

|      |               |  |       |        |       |
|------|---------------|--|-------|--------|-------|
|      |               |  |       |        |       |
|      |               |  |       |        |       |
|      |               |  |       |        |       |
| 00   | Febbraio 2024 | Elaborato per verifica di assoggettabilità alla V.I.A. | BD_FS | AV_SA  | AV_SA |
| Rev. | Data          | Descrizione  | Eseg. | Contr. | Appr. |



IMPIANTO AGRIVOLTAICO IN AREA AGRICOLA  
 COMUNI DI SANLURI E FURTEI  
 PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA

|         |   |
|---------|---|
| Oggetto | VERIFICA DI ASSOGGETTABILITÀ ALLA V.I.A. REGIONALE<br>ai sensi del D.Lgs. 152/06 e s.m.i., e Delib.G.R n.11/75 del 24.03.2021 |
|---------|---|

|   |  |
|---|--|
| Elaborato<br><b>RELAZIONE SCIENTIFICA<br/>           SULLA MODELLAZIONE FLUIDODINAMICA</b>  | Cod. elab.<br><br>AV.SA_VA_EL.11                                       |
| Proponente<br><br><b>AV SANLURI S.R.L.</b><br>Via E. Pais 12 - 09128 CAGLIARI<br>C.F./P.IVA 03976680920<br>Tel./Fax +39 0704521023<br>PEC: avsanluri@legalmail.it | Scala<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>Data<br><br>Febbraio 2024 |

|  |
|--|
| Il Tecnico<br><br><b>Dott. Ing. BRUNO DEMURU</b><br>Ordine Ingegneri Provincia di Cagliari n. 1923<br><br><b>Dott. Ing. FABRIZIO SERRENTI</b><br>Ordine Ingegneri Provincia di Oristano n. 464 |
|--|

|         |                |                |                |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| A4      | AV.SA_VA_EL.11 | AV.SA_VA_EL.11 | 2024/1003      |
| formato | file origine   | file stampa    | codice pratica |

|   |
|---|
| Tutte le informazioni contenute nel presente documento sono di proprietà della Teal Change Srl.<br>La stessa diffida chiunque entri in possesso della seguente documentazione di riprodurlo<br>in tutto o in parte e rivelarne il contenuto senza esplicita autorizzazzione |
|---|

Il proponente AV Sanluri ha incaricato l'Università degli studi di Cagliari per la stesura della Relazione scientifica sulla modellazione fluidodinamica relativamente all'area di impianto per parco agrivoltaico tra Sanluri e Furtei ("Impianto fotovoltaico a terra in area agricola - comuni di Sanluri e Furtei (Provincia del sud Sardegna).

Tale relazione è riportata a seguire.



**Convenzione DICAAR – TEAL Change s.r.l.**

**Studio di fattibilità dell'inserimento  
paesaggistico e micrometeorologico di un  
impianto agrivoltaico in area agricola nei  
comuni di Furtei-Sanluri**

# **Relazione intermedia**

Cagliari, 24 novembre '23

Responsabili tecnico-scientifici:

proff. Maria Grazia Badas, Adriano Dessì, Giorgio Querzoli

Gruppo di lavoro CFD:

prof. Giorgio Querzoli  
prof.ssa Maria Grazia Badas  
ing. Angius Federico

## Capitolo 1. Sommario

Nel presente progetto è stato esaminato l'inserimento di un impianto agrivoltaico nell'area agricola compresa tra i comuni di Furtei e Sanluri, nel Sud Sardegna. Le analisi svolte hanno riguardato l'impatto dell'impianto dal punto di vista micrometeorologico, al fine di fornire un'indicazione circa i potenziali effetti dello stesso sulle colture praticate nel sito in esame, elemento da preservare e fornire gli elementi per la scelta di una configurazione ottimale dell'impianto sia dal punto di vista della produzione agricola che da quello della produzione di energia rinnovabile.

La valutazione dei potenziali effetti sulle colture è stata svolta mediante l'impiego dell'analisi Fluidodinamica Computazionale (brevemente CFD): è stato sviluppato un modello numerico con il codice open-source OpenFOAM, attraverso il quale si sono svolte simulazioni in varie condizioni che hanno permesso di sviluppare un confronto tra la condizione di suolo libero e in presenza dell'impianto, esaminando in particolare i campi di velocità, temperatura e umidità dell'aria.

Il modello, sviluppato in forma bidimensionale, permette agevolmente di simulare diverse condizioni operative, variando la disposizione e il numero dei pannelli, nonché le condizioni climatiche di riferimento.

Verranno nel seguito mostrati i risultati ottenuti dalle analisi svolte e una valutazione dei potenziali effetti sulle condizioni micrometeorologiche. È bene precisare fin da ora che, in virtù delle assunzioni semplificative alla base dello sviluppo del modello, i confronti che verranno svolti dovranno essere interpretati in maniera qualitativa e non quantitativa, in quanto la valutazione dell'incidenza esatta dell'installazione dell'impianto necessiterebbe di modellistiche più complete ed onerose, in grado di rappresentare la configurazione nella sua tridimensionalità e di includere la complessa interazione tra l'impianto il bilancio idrologico e l'evapotraspirazione in modo accoppiato.

## Capitolo 2. Sviluppo del modello numerico CFD attraverso il codice OpenFOAM.

### 2.1 Panoramica

Il modello è stato sviluppato funzionalmente all'estrapolazione dei dati necessari per la valutazione di impatto sul microclima dell'area interessata dall'intervento. In particolare, gli elementi che maggiormente influenzano il microclima in esame sono:

- La radiazione solare, che rappresenta la principale fonte di calore
- Velocità e temperatura dell'aria
- La presenza della vegetazione

- L'umidità dell'aria

Essendo questi gli elementi influenti ed essendo determinante la temperatura nel sottosuolo e nei pannelli, si è deciso di sviluppare un modello che permettesse di calcolare lo scambio termico coniugato tra solidi e fluido, nonché il campo fluidodinamico nel dominio fluido.

## 2.2 Caratteristiche del modello numerico

Date le caratteristiche ritenute influenti nella determinazione del microclima al di sotto dell'impianto, si è deciso di sviluppare due diversi modelli CFD: il primo funzionale alla determinazione dei campi fluidodinamici di velocità dell'aria e di temperatura dell'aria, del sottosuolo e dei pannelli, il secondo funzionale alla simulazione del processo di evapotraspirazione dal suolo e la conseguente diffusione dell'umidità nell'aria circostante. Nel presente modello non è stato invece possibile considerare la mutua interazione tra evapotraspirazione e parametri fluidodinamici e termici che richiederebbe lo sviluppo di un modello più complesso e che va oltre gli obiettivi e le possibilità del presente studio. Lo sviluppo di tali modelli è stato preceduto dalla costruzione della griglia di calcolo.

### 2.2.1 Realizzazione della griglia di calcolo

Preliminarmente allo svolgimento delle simulazioni è stato necessario realizzare una mesh di calcolo con la quale discretizzare il dominio.

Il primo passo è stato quello della realizzazione del modello digitale dei pannelli. Tale modello è stato realizzato a partire dalle indicazioni fornite dal committente. In particolare, sulla base delle planimetrie fornite, si è scelto di realizzare un modello digitale composto da 20 filari di pannelli fotovoltaici, infinitamente estesi nella terza dimensione (corrispondente alla direzione Nord-Sud). I pannelli sono stati considerati nella loro configurazione "standard" proposta dal committente, nella quale sono caratterizzati da un'altezza da terra di circa 2.5 metri (dal suolo al mozzo per l'orientazione dei pannelli) e distanziati, nella direzione Est-Ovest di 12 metri. Il modello digitale di tali pannelli è stato realizzato in alcune versioni, ciascuna caratterizzata da un diverso angolo dei pannelli rispetto alla direzione orizzontale. I pannelli sono infatti ideati per seguire la posizione del sole durante la giornata, così da massimizzarne il rendimento. L'angolo di inclinazione è stato scelto a partire dalla direzione della radiazione solare nelle diverse fasi della giornata simulata. Non avendo a disposizione una precisa legge di rotazione dei pannelli in funzione dell'ora del giorno, si è assunto che la superficie dei pannelli fosse ortogonale alla direzione della radiazione solare, con la limitazione degli angoli massimi di inclinazione dei pannelli, corrispondente a  $55^\circ$  rispetto alla direzione orizzontale.

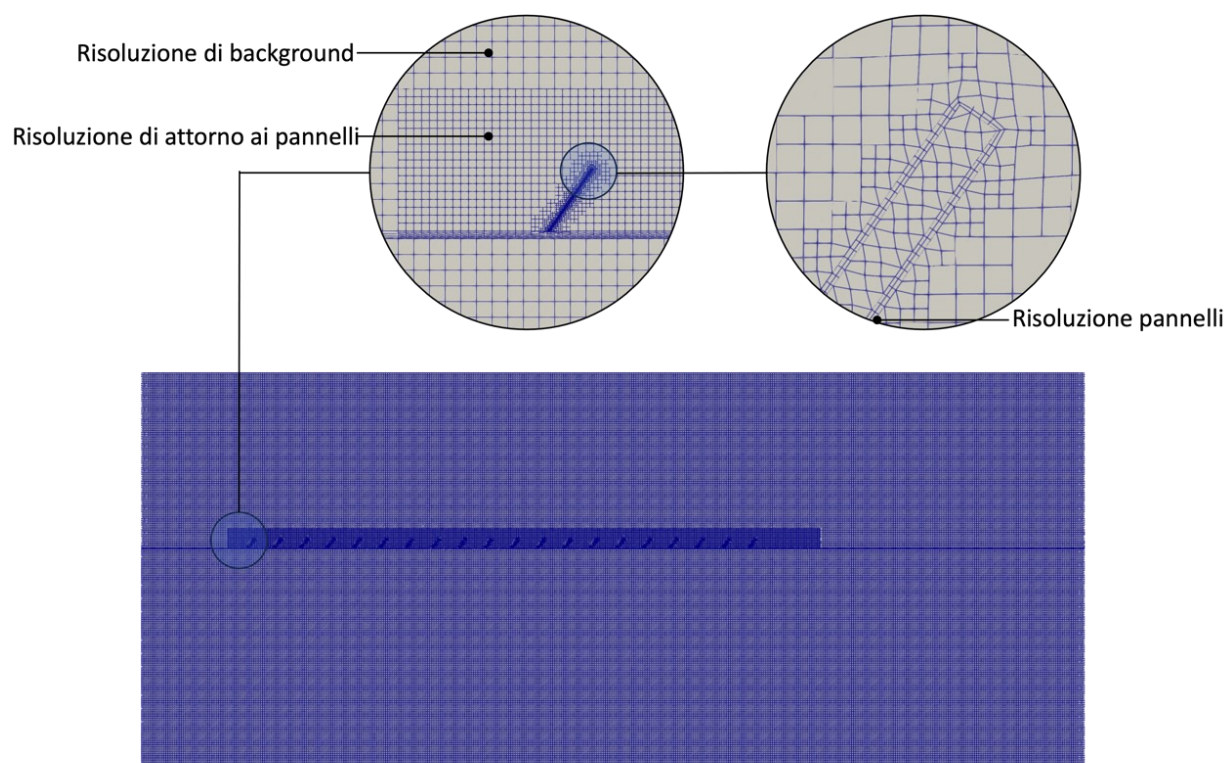
Il passo seguente è stato l'identificazione delle dimensioni del dominio necessarie per far sì che non venissero a instaurarsi fenomeni di confinamento. Per stabilire tali dimensioni si è fatto riferimento al lavoro di Blocken et al., nel quale vengono indicate le dimensioni necessarie nel caso di simulazioni di fluidodinamica urbana, caso concettualmente riconducibile a quello in esame.

La mesh è stata poi realizzata attraverso le utilities di OpenFOAM, blockMesh e snappyHexMesh. La prima delle due permette la realizzazione della mesh di background, caratterizzata da una forma parallelepipedica e da celle esaedriche ed isotrope.

La seconda delle utilities impiegate, snappyHexMesh, anche questa facente parte del pacchetto di OpenFOAM, è stata impiegata per inserire la geometria dei pannelli nel dominio di calcolo e rifinire laddove indicato. Il funzionamento permette di proiettare i vertici delle celle su una superficie in formato STL, per poi andare a rimuovere le celle in esubero e rifinire laddove indicato.

La mesh è stata impostata con una risoluzione di background uniforme di 1 metro, sia per il dominio fluido che per quello solido. Tale risoluzione è stata portata a 0.5 metri nel volume fluido attorno ai pannelli, così da cogliere con maggior accuratezza i gradienti che caratterizzano quest'area del dominio. La risoluzione sui pannelli è stata ulteriormente incrementata, fino a 0.03 metri, per via delle dimensioni che caratterizzano i pannelli (in particolare lo spessore).

Alcune celle esaedriche sono state poi estruse sulla superficie dei pannelli e al suolo, così da risolvere adeguatamente lo strato limite su queste superfici.



*Figura 1 Panoramica della mesh di calcolo.*

Terminata la fase di realizzazione della mesh si è passati alla formulazione del modello numerico CFD.

### 2.2.1 Il modello CFD

Il modello possiede una serie di caratteristiche derivanti dalle assunzioni fatte preliminarmente circa i casi di studio; le principali sono:

- **Fluido debolmente comprimibile:** secondo l'ipotesi di Boussinesq il fluido viene considerato con piccole variazioni di densità legate alla variazione della temperatura che hanno effetti solo nei termini gravitazionali ma il campo di velocità è considerato solenoidale.
- **Stazionario:** la variabilità temporale delle condizioni metereologiche non viene considerata dal modello sviluppato, il quale, sotto l'ipotesi che le condizioni della forzante varino gradualmente nel tempo, risolve le equazioni di Navier-Stokes per il moto medio in specifiche condizioni meteorologiche di interesse, senza considerare gli effetti della variabilità, ma cogliendone solo un andamento medio nel tempo. È questa una delle assunzioni di maggiore impatto, in quanto non permette la valutazione dell'evoluzione temporale delle temperature, ma la sola valutazione di una condizione di regime sotto le condizioni indicate.
- **Bidimensionale:** come anticipato, i pannelli sono stati considerati infinitamente estesi nella direzione Nord-Sud e la direzione del vento ortogonale all'asse dei filari.
- **RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations):** è l'approccio che si seguirà nella modellazione della turbolenza, elemento imprescindibile visti gli alti numeri di Reynolds che caratterizzano i casi in esame. Nello specifico verrà impiegato il modello k-omega SST, per la stima degli sforzi turbolenti.
- **Irraggiamento:** il modello è in grado di simulare l'irraggiamento solare, attraverso una libreria di OpenFOAM specificamente ideata per la simulazione di questo fenomeno (solarLoad). Tale funzione permette di specificare direzione e intensità della radiazione solare.
- **Scambio termico coniugato:** l'irraggiamento solare, principale fonte di calore nel fenomeno in esame, ha la caratteristica di scaldare in primo luogo i solidi che, aumentando di temperatura, contribuiranno a loro volta alla variazione della temperatura dell'aria. Per questo motivo la modellazione del solo dominio fluido non è sufficiente, ma si rende necessario simulare anche lo scambio termico tra fluido e solido, nonché la distribuzione di temperatura nel solido, elemento chiave nella valutazione rigorosa dei flussi di calore. A tal fine, sono stati impiegati i solutori della famiglia CHT (Conjugate Heat Transfer) di OpenFOAM. Nella valutazione dello scambio termico sono stati trascurati, per via della complessità di implementazione legata alla scala del modello, alcuni contributi potenzialmente significativi, ossia il calore latente di evaporazione e il calore assorbito dalla vegetazione nei processi di fotosintesi. Ancora una volta è bene ribadire che, per via di tali assunzioni, i confronti verranno svolti in maniera qualitativa.

### 2.2.2 Condizioni al contorno

La prima condizione di rilievo, che ha determinato in maniera significativa le caratteristiche del campo fluidodinamico nell'area, riguarda la sezione di ingresso del dominio, nella quale sono stati mappati i profili di velocità, energia cinetica turbolenta e di dissipazione della stessa



energia cinetica turbolenta. Le condizioni scelte sono quelle che riproducono lo strato limite atmosferico, generando un profilo di vento in ingresso di tipo logaritmico.

$$u = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{z-d+z_0}{z_0} \right) \quad \text{Profilo di velocità in ingresso}$$

$$\omega = \frac{u^*}{k\sqrt{C_\mu}} \frac{1}{z-d+z_0} \quad \text{Dissipazione energia cinetica turbolenta}$$

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left( \frac{z-d+z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad \text{Energia cinetica turbolenta}$$

I profili di vento impiegati sono stati mappati a partire da dati forniti dal committente, che fanno riferimento a condizioni medie durante l'anno nell'area in esame. Il profilo di vento identificato sarà caratterizzato dalla provenienza dai quadranti occidentali e da una velocità caratteristica di 5.9 m/s a 80 m s.l.t.

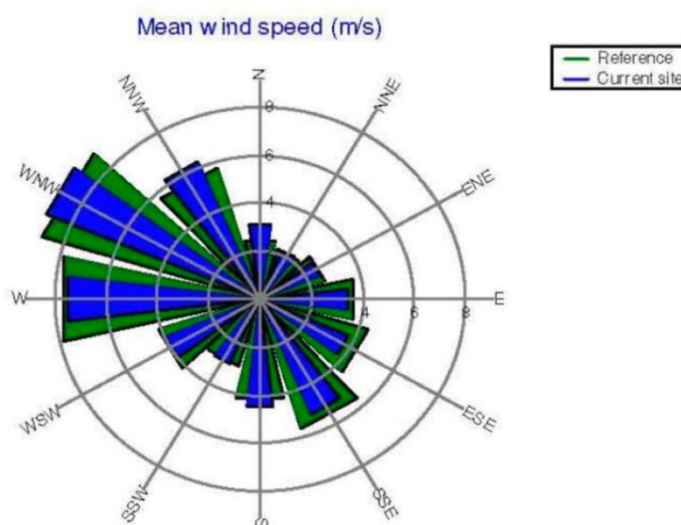


Figura 2 Intensità media dei venti nel sito in esame.

L'aria in ingresso nel dominio è stata quindi caratterizzata da una temperatura costante. Il valore di temperatura da impiegare è stato ricavato secondo la seguente procedura:

1. Si sono recuperati dal sito del NOAA (noaa.gov) i dati di temperatura massima e minima per i 15 giorni precedenti e i 15 giorni seguenti il giorno che si è scelto di esaminare
2. Si è estrapolato l'andamento giornaliero delle temperature per 3 giorni caratterizzata da orari di alba e tramonto simili a quelli del giorno in esame
3. Si è ricreata una legge di variazione della temperatura per il giorno in esame, sulla base dei dati estrapolati in 1. e 2.



In questo modo si è ricavato un andamento delle temperature per il giorno selezionato.

Altro aspetto di rilievo è stata la scelta delle condizioni al contorno nel volume solido del suolo. La valutazione precisa delle temperature del sottosuolo avrebbe richiesto l'implementazione di modellistiche complesse, che tenessero in considerazione lo scambio termico derivante dall'evaporazione dell'acqua nel sottosuolo e quello derivante dalla presenza della vegetazione. Per questa ragione si è seguito un approccio semplificato che parte dalle seguenti assunzioni:

1. La temperatura del sottosuolo è influenzata dagli agenti atmosferici, mediamente, nei primi 10/15 metri di profondità.
2. Già a circa 15 metri di profondità si può assumere un valore costante della temperatura, pari a quella media atmosferica (15°C nel caso in esame)

Per le ragioni di cui sopra, si è scelto di rappresentare in maniera esplicita i primi 10 metri di suolo e di imporre alla base una temperatura costante che si ha già ai 15 metri di profondità.

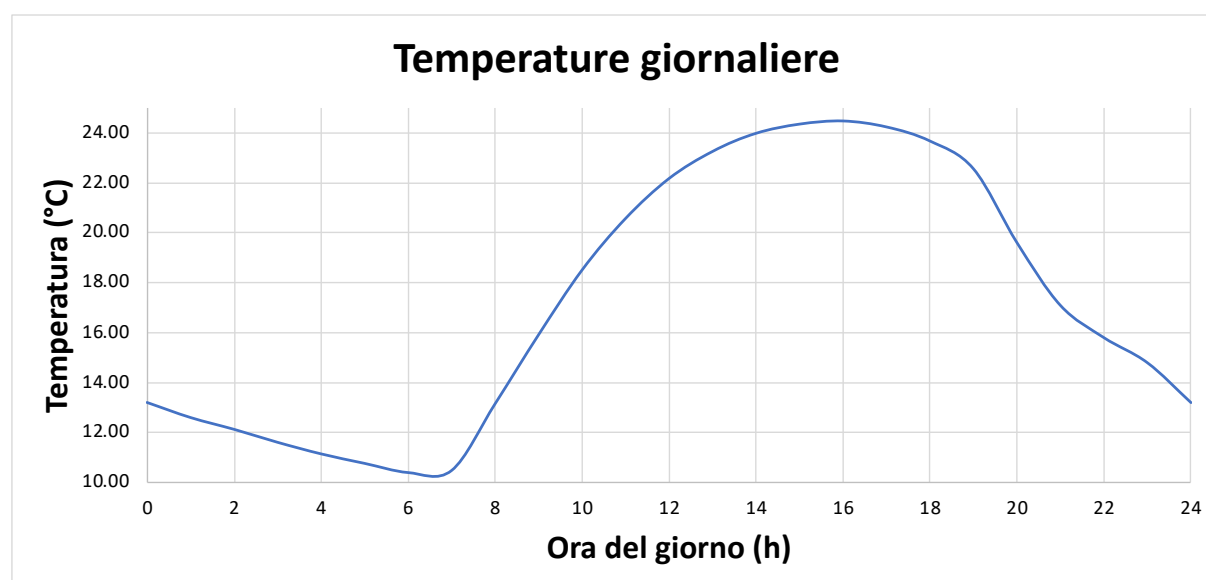


Figura 3 Andamento della temperatura dell'aria nel giorno di riferimento.

### 2.2.3 Modellazione delle colture e scelta del periodo dell'anno da simulare

Un elemento imprescindibile nella valutazione è la presenza delle colture, la cui preservazione ed efficientamento è obiettivo dell'analisi. Tali colture sono da considerarsi di erba medica, come da indicazioni del committente.

Le colture di erba medica vengono generalmente piantate all'inizio della primavera o nel tardo autunno, poiché l'intervallo ottimale per la germinazione dell'erba medica è compreso tra 18 e 22 gradi Celsius. Come linea guida generale, il momento migliore per massimizzare sia la resa che la qualità del foraggio può essere individuato prima della fioritura precoce, che avviene durante l'estate, mentre durante l'inverno la pianta non cresce. Ciò concorda con gli studi in Sardegna di Scarpa et al. (1995), che hanno eseguito il taglio delle piante nei mesi di

maggio e ottobre. Pertanto, durante i periodi indicati le colture raggiungono la loro massima altezza.

L'altezza caratteristica di queste colture può essere desunta anche dalla letteratura (Talk et al. 2006, Yuksel et al. 2016), che può essere quantificata in circa  $0,5 \text{ m} < H < 0,7 \text{ m}$ .

La rappresentazione di dettaglio non sarebbe stata possibile, viste le scale dimensionali in gioco. Si è pertanto optato per rappresentare tale elemento con un mezzo poroso equivalente, cioè un volume di celle avente come dimensione quella del volume che racchiude le colture. A tale volume di celle sono state quindi assegnate determinate proprietà di porosità, preliminarmente calibrate sulla base delle indicazioni trovate in letteratura, che determinano un effetto complessivo equivalente a quello delle colture presenti.

Per caratterizzare le proprietà aerodinamiche del mezzo poroso equivalente che mima la presenza di piante si parte dal classico modello di Darcy-Forchheimer per la resistenza su scala microscopica, il quale afferma che nel mezzo poroso il termine sorgente aggiuntivo all'interno delle equazioni di Navier-Stokes risulta:

$$S_{\phi} = - \left( \left( \frac{\mu}{K} \right) v + \left( C_F / K^{0.5} \right) v^2 \right)$$

dove  $\mu$  è la viscosità del fluido,  $v$  la velocità del flusso all'interno della coltura;  $K$  è la permeabilità di Darcy e  $C_F$  è il coefficiente di Forchheimer. Trascurando il termine lineare, che è importante solo per portate molto piccole attraverso la coltura, la stessa resistenza può anche essere riscritta come (Thom, 1971; Wilson, 1985):

$$S_{\phi} = - LAD C_D v^2$$

dove LAD è la cosiddetta Leaf Area Density [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ], ovvero la superficie delle foglie scalata con il volume della coltura.  $C_D$  è invece il coefficiente di resistenza aerodinamica che, per generiche coperture vegetali, può essere approssimato con  $C_D=0,2$  (Molina-Aiz et al. 2006). Pertanto, il problema si riduce nella stima del LAD per le colture di erba medica. Ciò può essere fatto sfruttando un'altra grandezza ampiamente misurata, ovvero l'Indice di Area Fogliare (LAI, [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]), che quantifica invece la superficie delle foglie ad una certa altezza rispetto alla superficie del suolo. Si noti che questa quantità può essere stimata indirettamente (Weiss et al. 2004). Una relazione formale tra LAI e LAD può essere scritta come:

$$LAI = \int_0^H LAD dz \quad (\text{Weiss et al. 2004})$$

Una stima è quindi fornita da  $LAI \approx LAD \cdot H$ . L'indice dell'area fogliare per le chiome di erba medica è stato stimato in diversi lavori (Walter-Shea et al. 1997; Tolk et al. 2006) in circa  $LAI \approx 3$  per altezze di ca.  $H=0,6 \text{ m}$  e per la distribuzione tipica di semi e piante, che implica  $LAD \approx 5$ .

Di conseguenza, il coefficiente di resistenza di Forchheimer è di circa unitario e la resistenza può essere approssimata come:

$$S_{\phi} \approx -1 \cdot v^2,$$

da impiegare in una regione porosa di altezza  $H \approx 0.6\text{m}$ . Questi valori sono in linea con precedenti studi CFD sulle chiome delle piante, (Boulard et al. 2010, 2016 e Fatnassi et al. 2023 e i riferimenti ivi contenuti).

Per quanto detto, si è stabilito di considerare come periodo dell'anno al quale riferire le simulazioni quello tra la fine di aprile e l'inizio di maggio, quando le colture hanno ormai un'altezza significativa e sono quasi pronte al taglio.

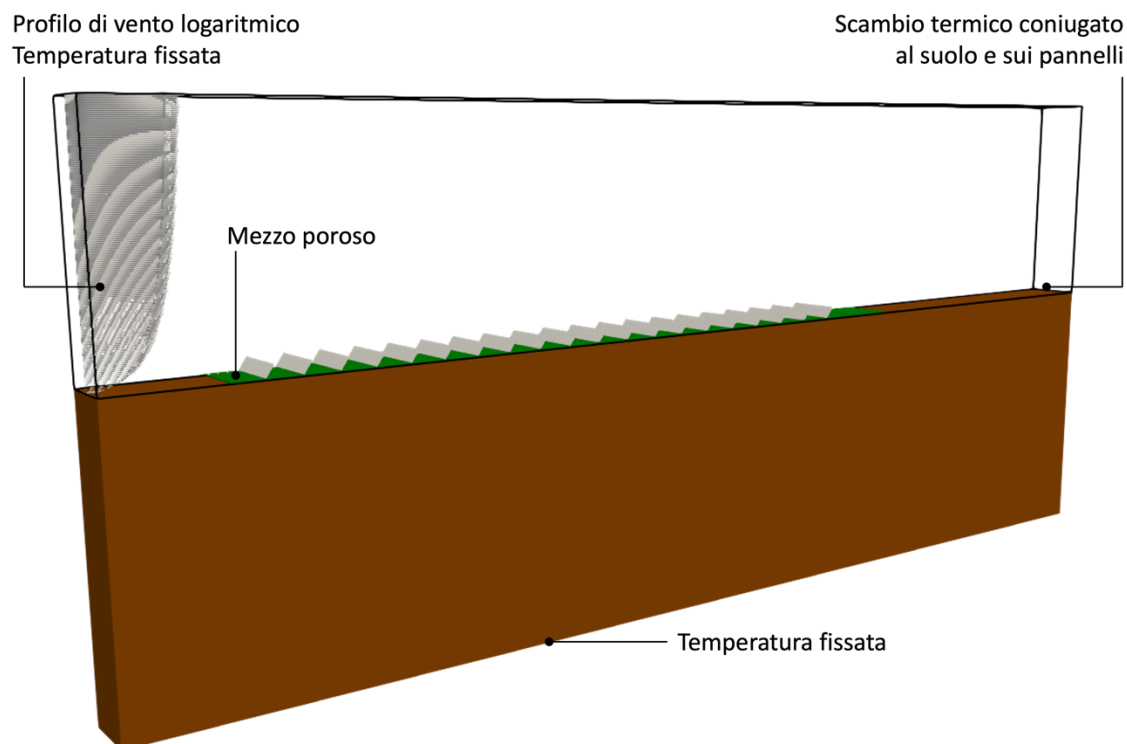


Figura 4 Rappresentazione schematica delle condizioni al contorno impiegate.

## 2.2.4 Modellazione dell'irraggiamento

Come anticipato, l'irraggiamento solare è la principale fonte di calore in gioco nel fenomeno preso in esame. Grazie all'effetto dell'irraggiamento il suolo e i pannelli si scaldano, determinando di conseguenza uno scambio termico, principalmente per conduzione e convezione, con l'aria circostante.

L'importanza nella modellazione dell'irraggiamento sta nella forte influenza che questo ha nella determinazione del microclima nell'area delle colture, incidendo sulla temperatura dell'aria, quella del suolo e dunque sull'evaporazione d'acqua da quest'ultimo.

In OpenFOAM sono presenti diverse librerie per la modellazione dell'irraggiamento e tra queste ne esiste una specificamente studiata per la modellazione dell'irraggiamento solare. Il modello in questione è il *solarLoad*. Con questo modello si è quindi scelto, in accordo alla stazionarietà del modello sviluppato, di impiegare direzione e intensità costanti per la radiazione solare, relativamente alla singola simulazione.

La determinazione di questi parametri è stata eseguita attraverso alcuni tools presenti online. In particolare si sono impiegati:

- [sunCalc.org](http://sunCalc.org) per la determinazione dell'altezza del sole in gradi, nella direzione Ovest-Est (la direzione Nord-Sud è stata trascurata per via della bidimensionalità del modello)
- [re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools) per la determinazione dell'intensità della radiazione solare

Attraverso questi strumenti è stato possibile determinare i parametri necessari per diversi orari della giornata e in riferimento al periodo che si è scelto di simulare.

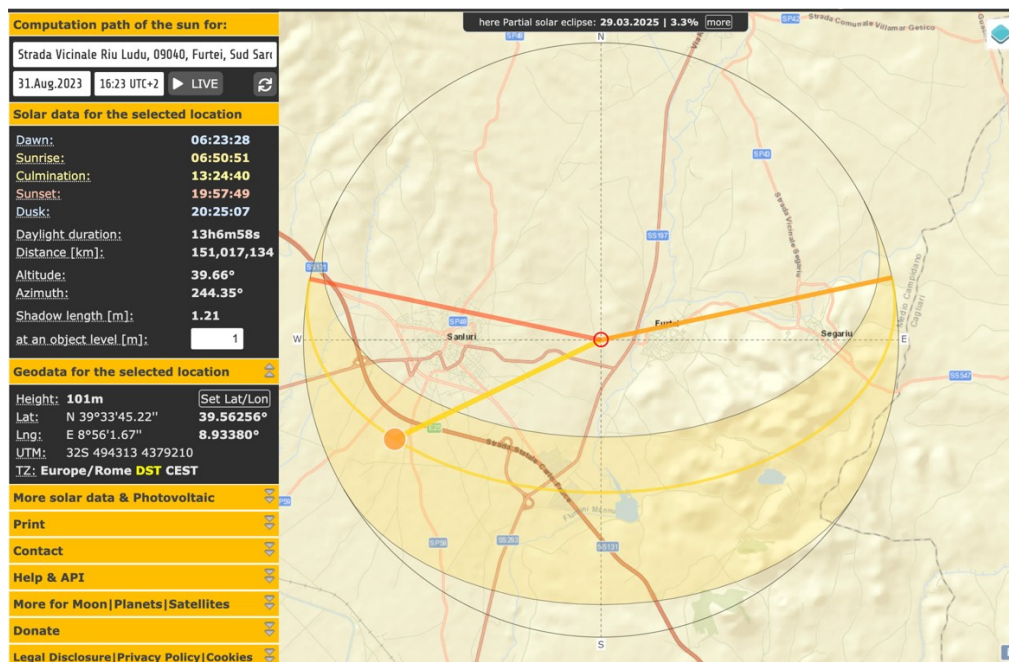


Figura 5 Panoramica sullo strumento impiegato per il calcolo dell'altezza solare.



Figura 6 Panoramica sullo strumento impiegato per il calcolo dell'intensità della radiazione solare.

## 2.2.5 Modellazione dell'evapotraspirazione

L'evapotraspirazione dell'acqua dal suolo è un fenomeno complesso, nel quale entrano in gioco molteplici fattori difficilmente rappresentabili in una simulazione CFD di grande scala come quella in esame. Si considerino ad esempio il cambiamento di fase, nonché il trasporto del vapore acqueo e gli scambi termici che prendono luogo in seguito alle trasformazioni in atto.

Per le ragioni di cui sopra, la valutazione dell'evapotraspirazione è stata svolta con un metodo semplificato, in cui il trasporto del vapore acqueo viene modellato impiegando uno scalare passivo.

Per il calcolo del flusso di vapore dal suolo si è seguita la formulazione riportata in Jacobs et al. 1997, secondo la quale:

$$E_{s,pot} = \frac{\rho Nu \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{\frac{1}{3}} D(x_2 - x_1)}{l}$$

Dove:

- $\rho$  è la densità dell'aria
- $Nu$  è il numero di Nusselt, calcolabile come  $Nu = 0.14 Ra^{\frac{1}{3}}$
- $Ra$  è il numero di Rayleigh, a sua volta calcolabile come  $Ra = \frac{l^3 g b \Delta T}{\nu^2}$
- $l$  può assumersi pari all'altezza dei pannelli
- $g$  è l'accelerazione di gravità
- $b$  è il coefficiente di espansione volumetrica dell'aria

- $\Delta T$  è la differenza di temperatura tra il suolo umido e l'aria in prossimità del suolo
- $\nu$  è la viscosità cinematica dell'aria
- $Sc$  è il numero di Schmidt, pari a 0.63 per l'aria
- $Pr$  è il numero di Prandtl, pari a 0.71 per l'aria
- $D$  è la diffusività molecolare del vapore acqueo in aria
- $x_2 - x_1$  è la differenza di concentrazione di umidità tra suolo e l'aria in prossimità del suolo

Da quanto detto l'espressione indicata per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale può risciversi come

$$E_{s,pot} = K(x_2 - x_1) \quad \text{dove} \quad K = \frac{\rho Nu \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{\frac{1}{3}} D}{l}$$

La formulazione è stata così posta per poterla ricondurre a una delle condizioni al contorno di OpenFOAM, impiegata anche nel caso della temperatura, in cui si assume che il flusso di calore (o dello scalare nel caso in esame) sia pari alla differenza di temperatura (di concentrazione nel caso in esame) moltiplicata per la resistenza alla conduzione nel mezzo (il coefficiente  $K$  nel caso in esame).

## Capitolo 3. Caratterizzazione del campo di moto.

### 3.1 Introduzione

La caratterizzazione del campo di moto, nonché la successiva valutazione dell'evapotraspirazione, sono state eseguite, come già detto, per una giornata ricadente tra fine aprile e inizio maggio.

Per la giornata in esame sono stati simulati diversi momenti della giornata, caratterizzati da diverse direzioni e intensità della radiazione solare, nonché da diverse temperature dell'aria in ingresso nel dominio fluido.

Nello specifico, si è stabilito di analizzare complessivamente 5 casi:

- Uno nel quale i pannelli si trovano in posizione perfettamente orizzontale, configurazione che si riscontra durante il mezzogiorno solare. In questa situazione la radiazione solare verrà considerata in direzione verticale.
- Due in cui i pannelli si trovano rispettivamente nelle due configurazioni estreme e opposte, in cui l'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale è di  $\pm 55^\circ$ . In Tali configurazioni il sole si troverà a est nella simulazione relativa alla mattina, in cui anche i pannelli guarderanno a est, mentre si troverà a ovest nella simulazione relativa al pomeriggio, in cui anche i pannelli guarderanno a ovest.

- Due in cui i pannelli si trovano in posizioni intermedie. Sono situazioni riconducibili a un momento di mezza mattina, in cui il sole si trova ancora a est e un momento del primo pomeriggio, in cui il sole è ancora alto ma si trova già a ovest

In tutte le simulazioni il vento sarà proveniente da ovest e sarà caratterizzato sempre dallo stesso profilo.

Ciascuna simulazione è stata quindi eseguita in assenza di pannelli e con i pannelli, disposti in 20 file equidistanti.

### 3.2 Convergenza della soluzione numerica

Preliminarmente all'analisi di ciascuna simulazione è stato necessario valutare la convergenza della soluzione numerica di ciascuna simulazione. Per farlo si sono presi in esame:

- L'andamento dei residui di calcolo: questi, al fine del raggiungimento della convergenza, devono essere caratterizzati da valori sufficientemente piccoli e costanti, per un numero elevato di iterazioni. Si riporta a titolo esemplificativo (Fig. 7) l'andamento dei residui di calcolo relativamente alla simulazione con i pannelli nella configurazione del tardo pomeriggio.

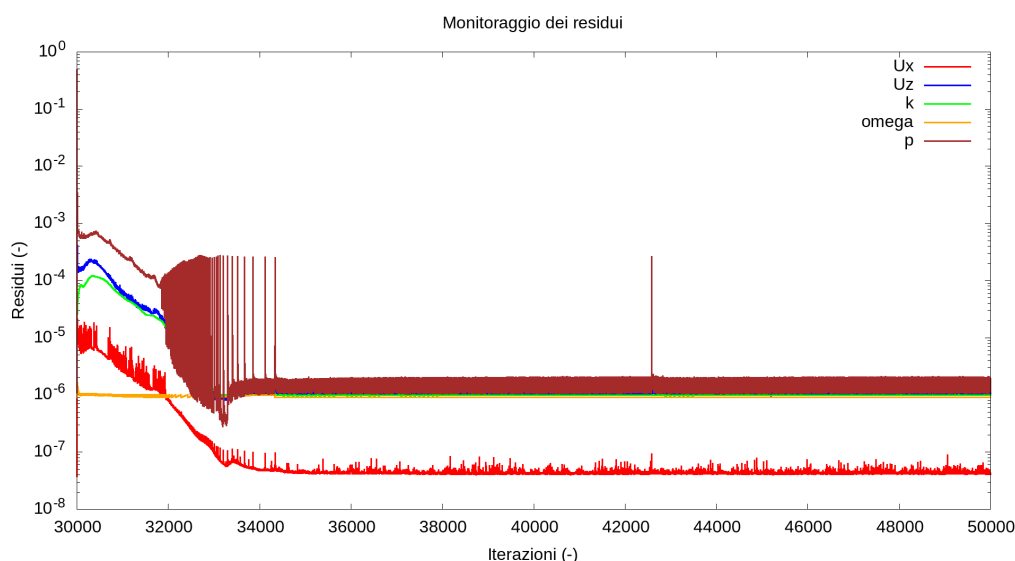


Figura 7 Andamento dei residui di calcolo.

- Monitor di grandezze indice: si sono considerati a tal proposito diverse grandezze, tra cui la temperatura media nel volume solido del suolo, i flussi termici verso i pannelli e temperatura e velocità dell'aria in alcuni punti del dominio. Di seguito si riporta ad esempio la convergenza della temperatura media nel sottosuolo e in un punto di campionamento posto immediatamente a valle dell'ultimo pannello (Fig. 8).



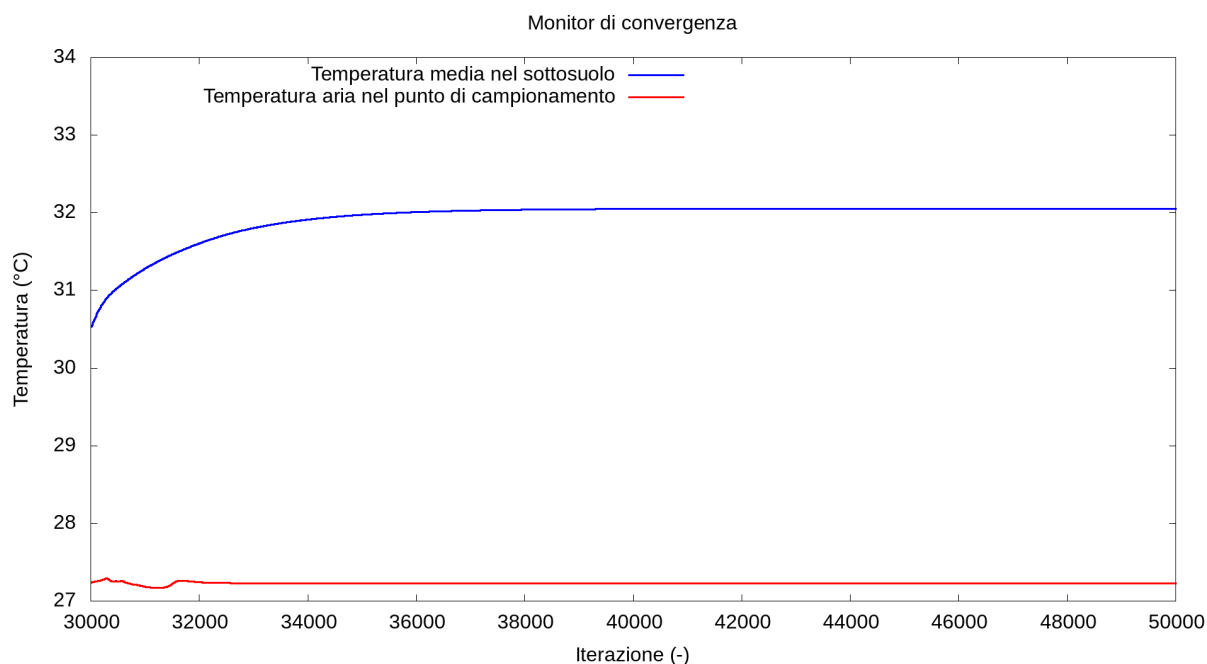


Figura 8 Monitor di convergenza: temperatura media.

Dopo aver appurato la convergenza della soluzione numerica si è passati all'analisi dei risultati delle simulazioni.

### 3.3 Analisi dei campi di velocità e temperatura nella configurazione standard

Dalle analisi svolte si è riscontrato che l'impianto ha un significativo impatto sulle caratteristiche dei campi fluidodinamici. Tale impatto si traduce principalmente in un rallentamento dell'aria che tende a stagnare nell'area a valle dei pannelli.

Dal punto di vista del campo di velocità si è riscontrato che l'incidenza sulle caratteristiche del campo è tanto maggiore quanto maggiore è l'angolo di inclinazione dei pannelli rispetto alla direzione orizzontale. Infatti, inclinando i pannelli l'effetto di ostruzione al passaggio del flusso viene accentuata per due motivi:

- Aumenta l'area della proiezione della superficie dei pannelli nella direzione del flusso indisturbato
- Si riduce la sezione di passaggio dell'aria alla base dei pannelli

Questo effetto è particolarmente visibile osservando i campi di velocità nelle simulazioni in cui i pannelli sono inclinati con un angolo diverso da 0°. In tutti i casi indicati, l'inclinazione dei pannelli è tale da minimizzare l'area per il passaggio libero dell'aria sotto i pannelli, parzialmente occupata dalle colture, anch'esse causa di un rallentamento del flusso d'aria. L'effetto è naturalmente meno evidente nel caso in cui i pannelli siano disposti orizzontalmente, situazione in cui l'interazione tra il flusso d'aria e i pannelli è minima.

Altro elemento caratteristico dei casi simulati con l'installazione dei pannelli è la periodicità della struttura del flusso a tra i pannelli. Si è infatti riscontrato che, dopo le prime file di

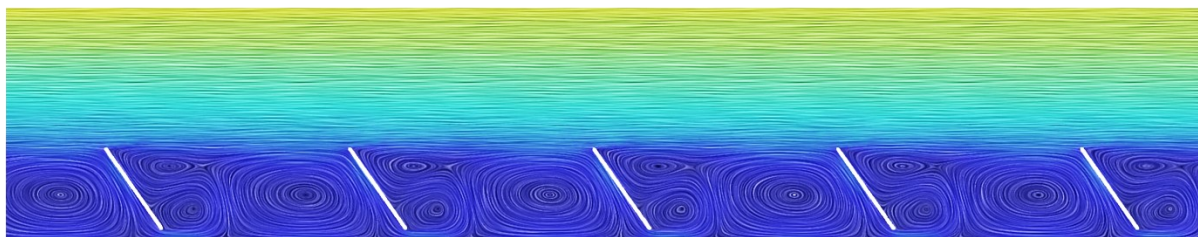
pannelli, il flusso assume una struttura caratteristica che si ripete periodicamente in ogni interfilare. Il campo di velocità rallentato, congiuntamente alle elevate temperature che caratterizzano il suolo e i pannelli (temperature maggiori di quelle dell'aria per effetto dell'irraggiamento solare) comporta quindi un incremento della temperatura nell'area sottostante i pannelli, per via del ridotto trasporto termico convettivo derivante dal rallentamento del flusso.

Anche la temperatura al suolo risente dell'effetto dei pannelli. Il primo effetto che si osserva è la disuniformità della radiazione solare incidente al suolo: questa sarà massima nelle aree esposte al sole, mentre sarà minima nelle aree in ombra.

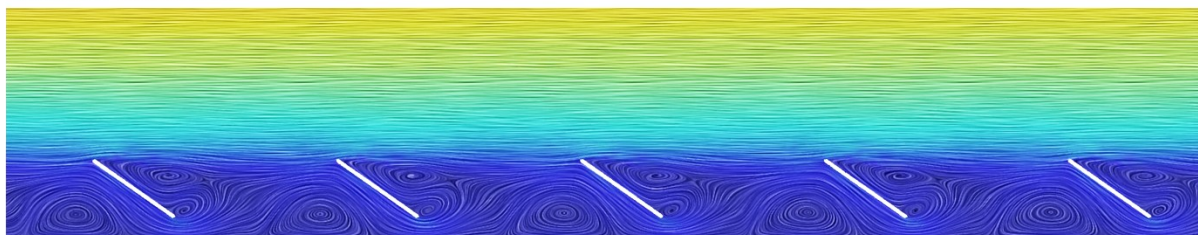
Inoltre, altro aspetto importante da osservare è l'andamento della temperatura media nel suolo coltivato durante la giornata. Si è calcolato un valore medio della temperatura al suolo per tutte le simulazioni svolte: ciò che si è riscontrato è tendenzialmente un andamento simile delle temperature nei due casi analizzati, ma con temperature maggiori nel caso di impianto installato (anche in questo caso è bene ribadire che il modello adottato non tiene conto dell'effetto del calore latente sottratto dall'evaporazione dell'umidità).

I pannelli, scaldandosi per via dell'elevato assorbimento della radiazione solare, diventano a loro volta una sorgente di calore, che andrà a scaldare il volume d'aria sottostante. Inoltre, il rallentamento del flusso d'aria sotto i pannelli, congiuntamente alle maggiori temperature dell'aria nello stesso volume, determina una riduzione dello scambio termico convettivo che dovrebbe raffreddare il suolo.

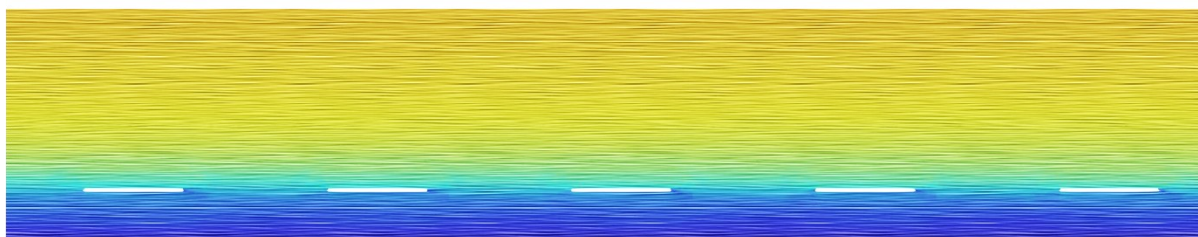
Prima mattina



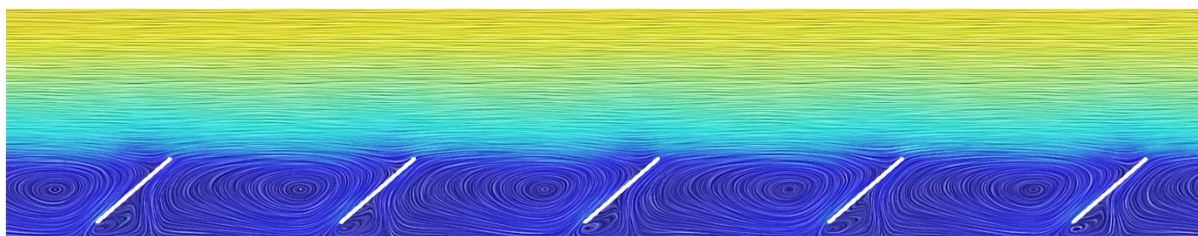
Mezza mattina



Mezzogiorno solare



Primo pomeriggio



Tardo pomeriggio

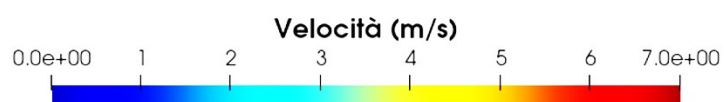
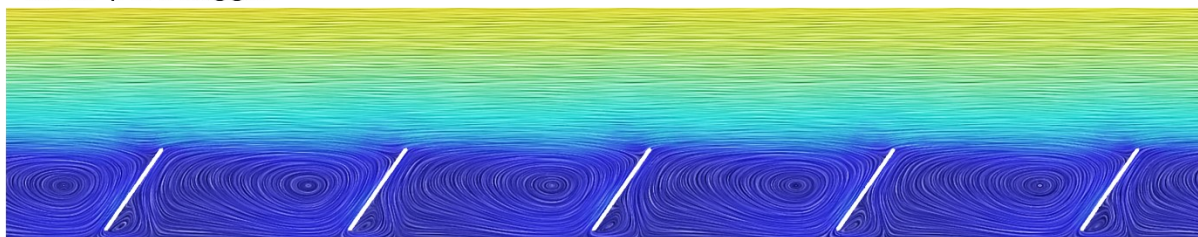


Figura 9 Andamento del campo di velocità in presenza dei pannelli.

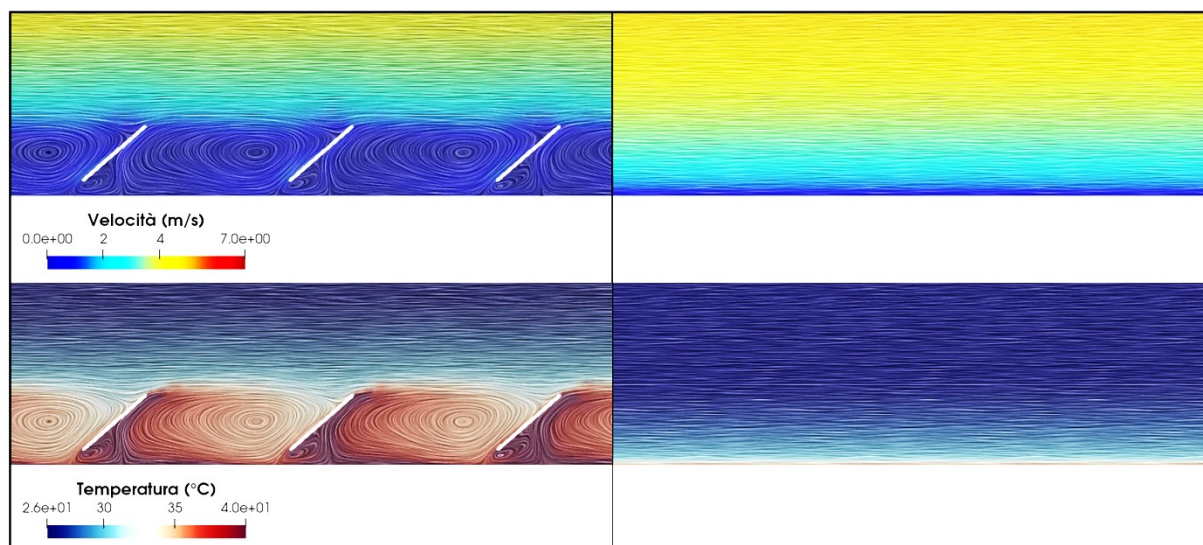


Figura 10 Confronto campi fluidodinamici con e senza pannelli, con riferimento alla configurazione del primo pomeriggio. La porzione di dominio rappresentata ricade nell'area nel mezzo dell'impianto.

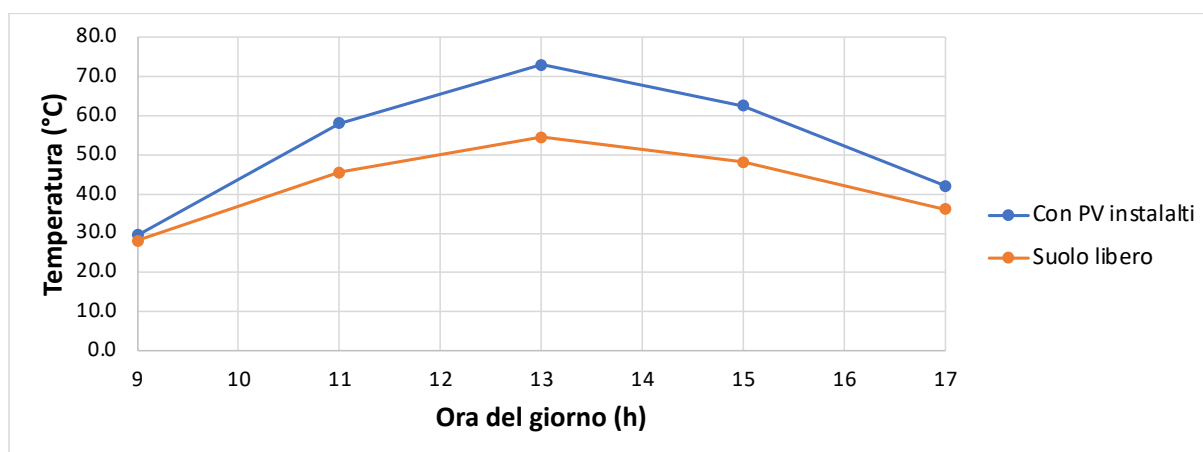


Figura 11 Andamento delle temperature medie al suolo nell'area dei pannelli durante la giornata.

In sintesi, per quanto visto finora, la presenza dei pannelli nella configurazione standard si traduce in:

- Una riduzione dell'intensità del vento nell'area delle colture
- Una riduzione del trasporto termico convettivo
- Un incremento della temperatura dell'aria sotto i pannelli
- Un incremento della temperatura del suolo



## Capitolo 4. Caratterizzazione dell'evapotraspirazione nelle configurazioni simulate.

Dopo aver determinato le caratteristiche del campo di moto e di temperatura si è valutata anche l'evapotraspirazione dal suolo nelle configurazioni identificate, nonché la dispersione del vapore acqueo nel dominio fluido.

Come anticipato, la tecnica impiegata parte dall'assunzione di considerare il vapore acqueo come uno scalare passivo e di trascurare l'esatta dinamica di evapotraspirazione, ma di valutarla attraverso delle correlazioni empiriche implementate nella simulazione CFD attraverso opportune condizioni al contorno.

In particolare, con riferimento a quanto esposto in 2.2.5, delle grandezze impiegate nel calcolo del coefficiente  $K$ , solo il numero di Rayleigh è calcolato sulla base dei risultati ottenuti nelle simulazioni relative al campo di moto fluidodinamico. L'effettivo tasso di evapotraspirazione dipenderà, oltre che da questo coefficiente, dall'umidità caratterizzante il volume fluido circostante.

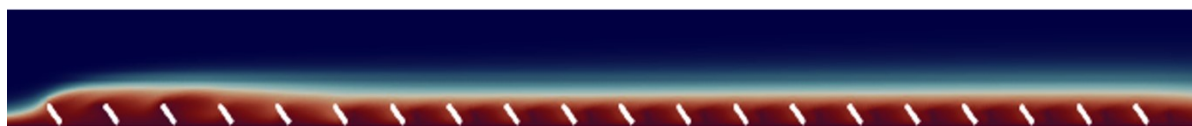
Partendo da queste considerazioni, si è ipotizzato di considerare il suolo saturo d'acqua e di caratterizzare il flusso in ingresso nel dominio con un'umidità costante del 40%.

Ciò che si evince dai risultati è un effetto fortemente influenzato dall'inclinazione dei pannelli. Impostando infatti i pannelli alla massima inclinazione raggiungibile, in condizioni di stazionarietà della soluzione ricavata, si ha la massimizzazione dell'umidità nel volume d'aria sottostante i pannelli.

Il ridotto ricambio d'aria in questa porzione di volume fa sì che l'acqua evaporata dal suolo vada a saturare l'aria, trattenendo l'umidità. Al contrario, nella configurazione del mezzogiorno solare, comparabile a quelle di suolo libero (delle quali se ne riporta una a titolo esemplificativo, in quanto analoga a quelle delle altre fasce orarie considerate) per via della limitata interazione tra i pannelli e il campo di moto, l'umidità si mantiene elevata solo nelle zone caratterizzate da modesti valori della velocità, in particolare nel volume occupato dalle colture. Al di fuori di questo volume il flusso d'aria generato dal vento fa sì che venga favorito un maggiore ricambio d'aria col flusso esterno, caratterizzato da un'umidità inferiore.

Le valutazioni fatte riguardano in ogni caso la soluzione di regime della simulazione: è trascurato il transitorio, in quanto non valutabile nell'ambito del presente studio.

Primo mattino – PV installati



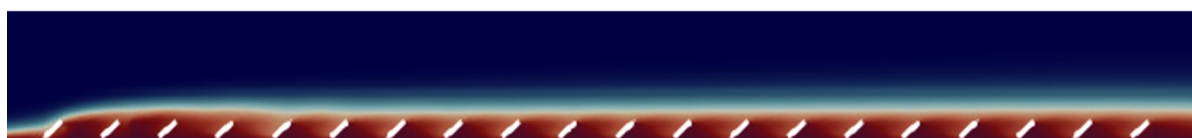
Metà mattina – PV installati



Mezzogiorno solare – PV installati



Primo pomeriggio – PV installati



Tardo pomeriggio – PV installati



Mezzogiorno solare – suolo libero



*Figura 12 Campi di umidità nelle configurazioni esaminate.*

## Capitolo 5. Analisi di alcune configurazioni alternative.

Al fine di valutare una potenziale configurazione di minor impatto si è valutata l'influenza di due parametri di progetto potenzialmente modificabili: l'altezza dei pannelli dal suolo e il distanziamento tra i filari.

In particolare, si sono considerate le seguenti varianti di progetto:

- A partire dall'altezza standard di 2.5 metri dal suolo, si sono considerate altre 2 altezze alternative di 3.0 m e 3.5 m rispettivamente
- A partire dall'interasse standard di 12 metri si sono considerati come alternativa i filari distanziati rispettivamente di 18 e 24 metri

Tali varianti sono state esaminate nella configurazione della mezza mattina, nella quale l'insolazione è elevata e si è riscontrato un importante effetto sulla temperatura al suolo e, al contempo, un'importante interazione dei pannelli con la struttura del campo di moto.

Partendo dall'esaminare l'effetto del distanziamento tra i filari, come anticipato, si è variato l'interasse tra i pannelli portandolo, da 12 metri, prima a 18 metri e poi a 24 metri.

Ciò che si è osservato è che l'incremento della distanza tra i pannelli permette di recuperare parzialmente una quota dello scambio termico convettivo che si ha in assenza degli stessi. Si osserva infatti dalle figure che la temperatura dell'aria a valle dei pannelli risulta mediamente più bassa, mentre la velocità risente ancora della schermatura reciproca tra i pannelli, e risulta essere molto modesta tra un pannello e l'altro.

Al recupero di scambio convettivo, è associata però una maggiore esposizione alla radiazione solare, per via dei maggiori spazi non ombreggiati dai pannelli. L'effetto complessivo è, al netto del calore latente associato all'evaporazione, una modesta variazione delle temperature al suolo.

Dal punto di vista della temperatura media dei pannelli, invece, si è riscontrata una diminuzione all'aumentare della distanza tra gli stessi.

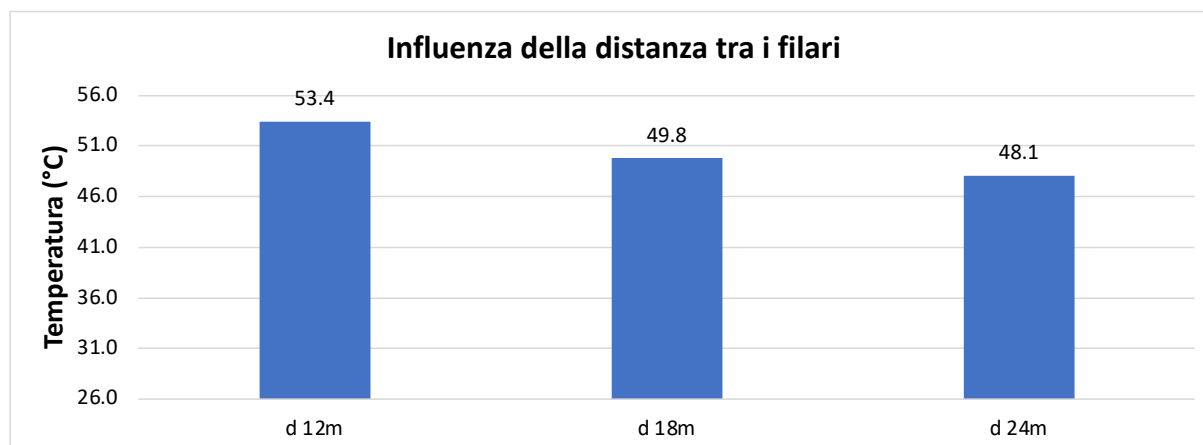


Figura 13 Temperatura media dei pannelli al variare dell'interasse tra i filari.



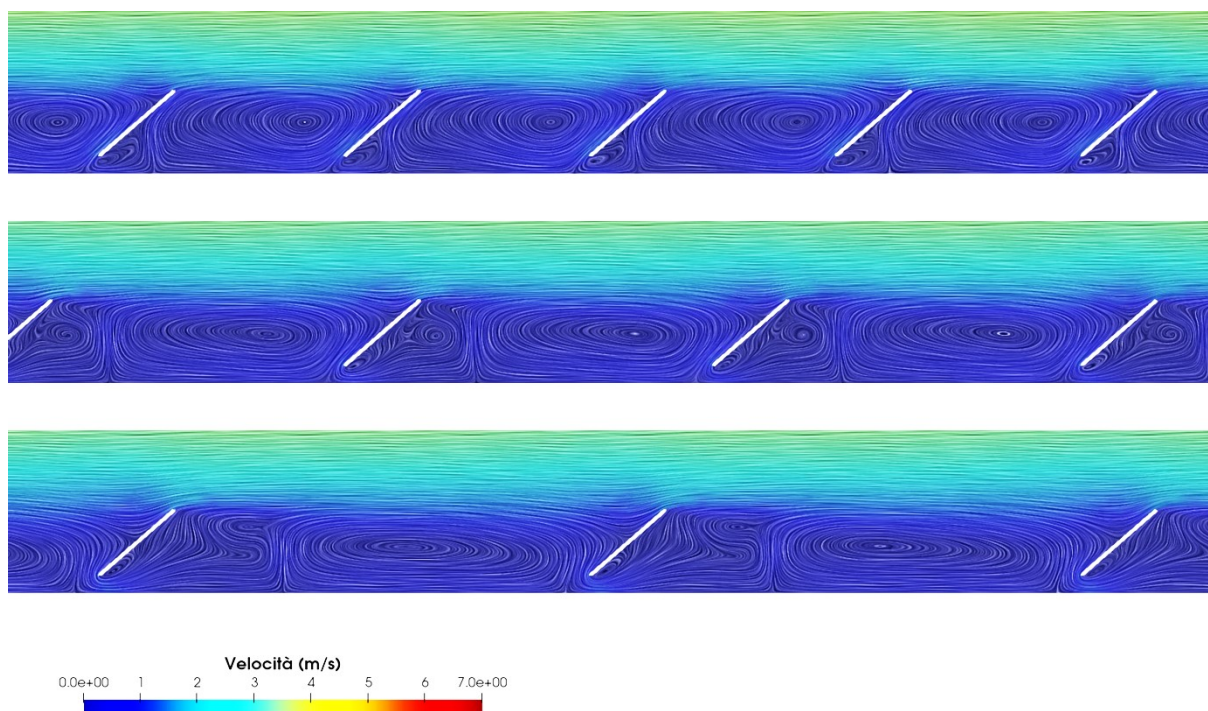


Figura 14 Campi di velocità tra i pannelli al variare dell'interasse tra i filari.

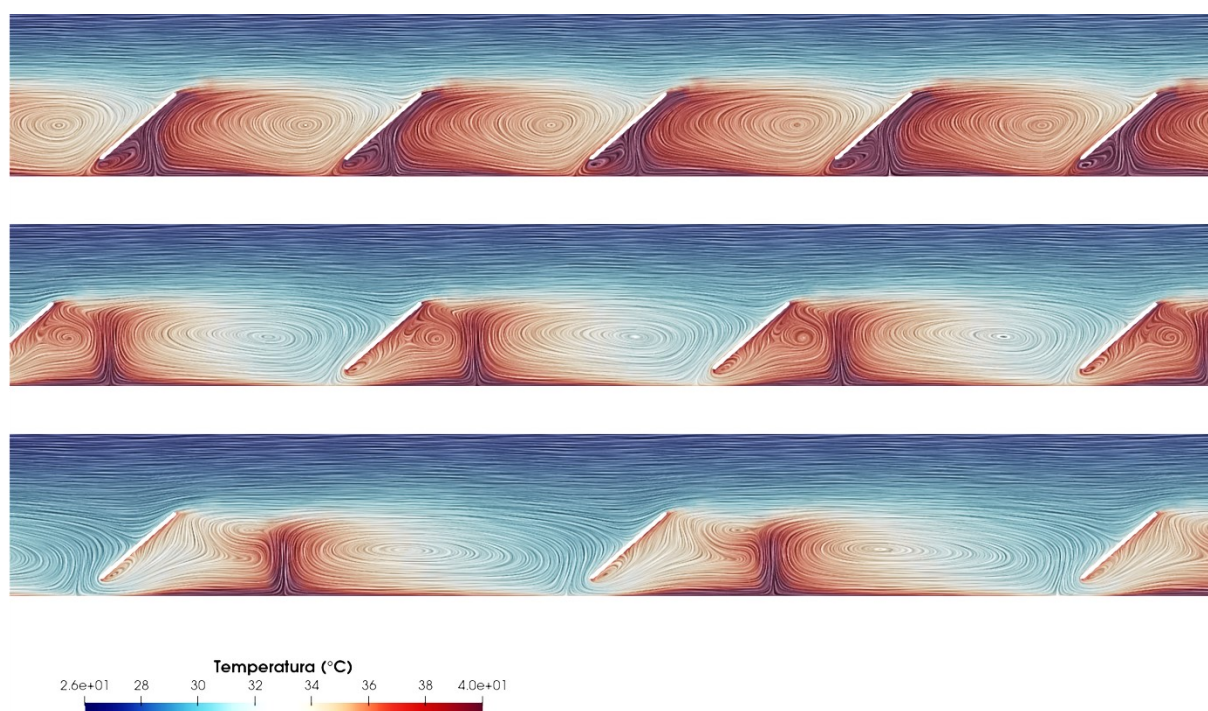


Figura 15 Campi di temperatura tra i pannelli al variare dell'interasse tra i filari.

Per quanto riguarda invece le configurazioni caratterizzate da una diversa altezza dei pannelli, si è osservato in primo luogo che, all'aumentare dell'altezza caratteristica, si raggiunge più difficilmente la stazionarietà delle caratteristiche del flusso lungo l'impianto, che non si presenta sempre uguale tra un pannello e quello successivo. Questo aspetto è legato alla maggiore dipendenza temporale delle strutture vorticosi che vengono a crearsi nell'aumentare l'altezza dei pannelli, più difficilmente valutabili nella loro forma media attraverso una simulazione stazionaria.

Complessivamente si riscontra una modesta riduzione nella temperatura dell'aria tra un pannello e l'altro, che non si riflette però in una riduzione della temperatura al suolo, la quale si mantiene pressoché invariata. Analizzando l'andamento lungo lo sviluppo dell'impianto si osserva che l'effetto di diminuzione della temperatura dell'aria è massimo in corrispondenza delle prime file, dove il flusso riesce ad insinuarsi sotto i pannelli con una maggiore intensità, per poi andare a smorzarsi come nel caso dei pannelli ad altezza standard dopo alcune file di pannelli.

Di contro, la temperatura media dei pannelli si giova della maggiore quota: interagendo con un flusso mediamente più intenso, la temperatura media dei pannelli nell'impianto si riduce sensibilmente, aumentandone potenzialmente il rendimento.

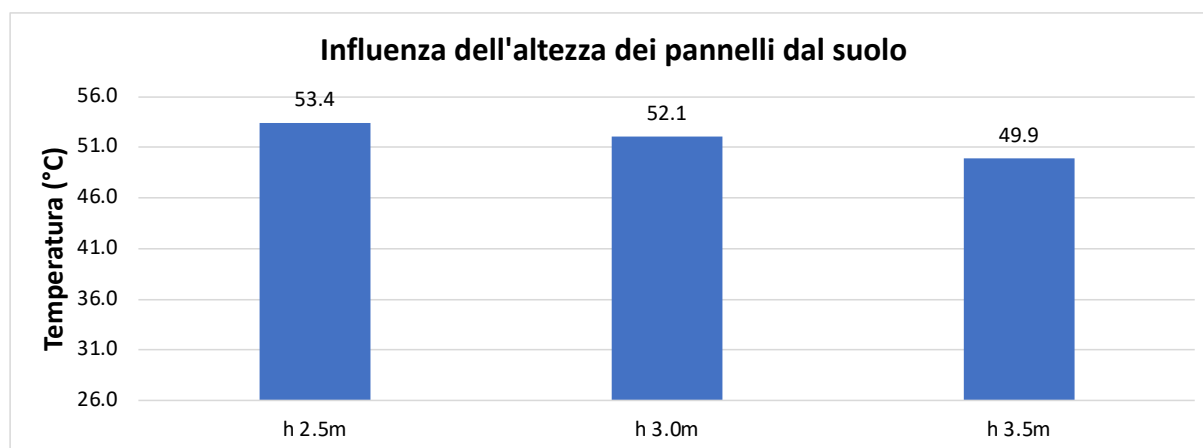


Figura 16 Temperatura media dei pannelli al variare della quota di installazione.



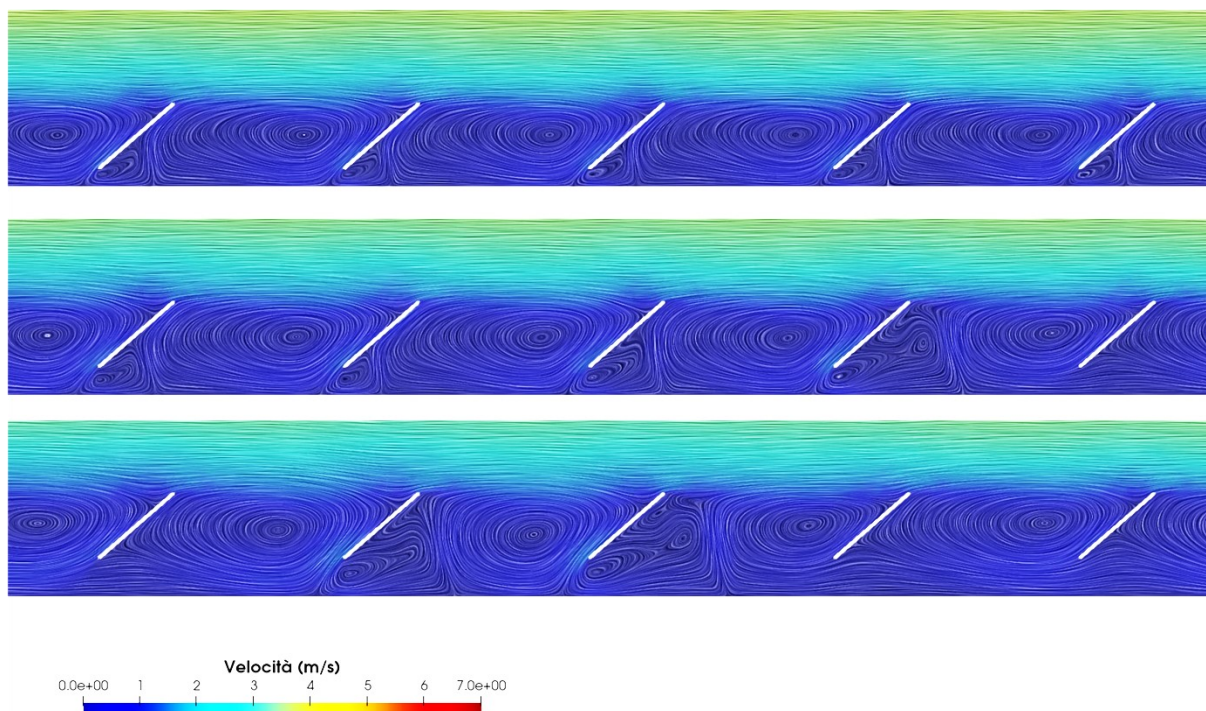


Figura 17 Campo di velocità tra i pannelli al variare della quota di installazione.

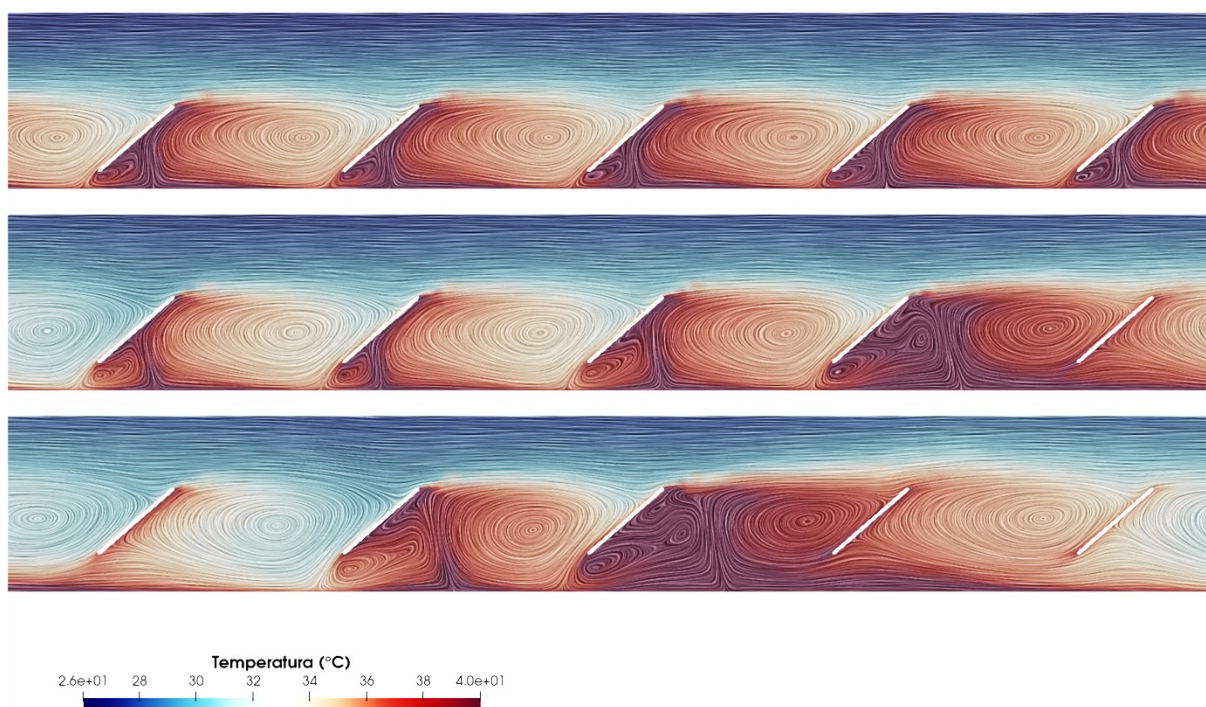


Figura 18 Campo di temperatura tra i pannelli al variare della quota di installazione.

## Conclusioni

Le analisi svolte hanno permesso una valutazione dell'incidenza dell'installazione dell'impianto sulle caratteristiche del microclima dell'area in esame.

Diverse varianti di progetto sono state prese in considerazione, valutando per ciascuna il potenziale effetto.

In sintesi, si può affermare che:

- In riferimento al periodo dell'anno considerato (tra fine aprile e inizio maggio) nell'area sottostante i pannelli si registra un incremento della temperatura dell'aria, dovuto alla presenza dei pannelli caldi e alla riduzione della ventilazione dovuta alla schermatura prodotta dagli stessi sul vento.
- In presenza dell'impianto, il suolo risente della riduzione della velocità dell'aria combinata all'irraggiamento dei pannelli mostrando una temperatura mediamente più alta nelle diverse fasi della giornata.
- Il campo di umidità sotto i pannelli risulta caratterizzato da valori medi maggiori, che fanno sì che si mantenga un ambiente più umido che, al contempo, dovrebbe ridurre l'evapotraspirazione dal suolo una volta raggiunta una condizione di regime.
- L'effetto della variazione dell'interasse tra i filari dei pannelli effetti rilevanti dal punto di vista delle temperature operative dei pannelli, che risultano mediamente più freddi all'aumentare dell'interasse. Le temperature vedono l'effetto opposto dell'aumento dell'insolazione e dell'aumento della ventilazione, che si compensano parzialmente tra loro.
- L'effetto della variazione dell'altezza dei pannelli dal suolo, analogamente al caso dell'interasse tra i filari, ha mostrato rilevanti effetti dal punto di vista delle temperature operative dei pannelli. Anche in questo caso i pannelli risultano mediamente più freddi all'aumentare dell'altezza dell'impianto dal suolo. Si osserva anche un aumento significativo della ventilazione al di sotto dell'impianto.
- Gli effetti della riduzione della ventilazione al suolo dipendono fortemente dallo sviluppo orizzontale dell'impianto. Si osserva infatti che la ventilazione si riduce progressivamente man mano che aumenta la distanza sottovento. Questa considerazione suggerisce che il microclima potrebbe beneficiare di uno sviluppo dell'impianto non troppo esteso nella direzione del vento e/o di saltuarie soluzioni di continuità che consentano al flusso di riprendere le caratteristiche iniziali all'inizio della successiva serie di pannelli.

## Limitazioni e possibili sviluppi

Il presente studio risente di alcune approssimazioni fatte in fase di sviluppo del modello, e non diversamente affrontabili in questa sede. Innanzitutto, non è stato possibile considerare l'effetto accoppiato del calore latente sottratto al suolo e allo strato vegetato dal fenomeno dell'evapotraspirazione. Inoltre, si è potuta considerare solo una configurazione bidimensionale, che non permette di tenere conto dello sviluppo spaziale dell'impianto in



direzione trasversale rispetto all'asse dei pannelli, né di considerare direzioni del vento diverse da quella ortogonale ai pannelli stessi. Infine, si è considerato il fenomeno in condizioni stazionarie.

Ulteriori studi, per il raggiungimento di un maggiore grado di dettaglio nella modellazione del fenomeno potrebbero essere:

- Analisi della soluzione transitoria: il fenomeno fisico presenta prevedibilmente una significativa variabilità temporale, ed uno scambio termico fortemente caratterizzato dal suo sviluppo nel tempo che può fornire ulteriori importanti informazioni sulle caratteristiche microclimatiche.
- Implementazione del modello accoppiato che include il calore latente di evaporazione, il quale rappresenta un importante contributo nel bilancio energetico al suolo e incide significativamente sulle temperature calcolate.
- Estensione del modello all'assorbimento energetico dovuto ai processi di fotosintesi che, anch'esso, contribuisce significativamente al bilancio complessivo di calore.
- Passaggio a un modello di tipo tridimensionale, che permetta di valutare l'effetto dell'effettivo sviluppo spaziale dell'impianto e di considerare direzioni del venti diverse da quella ortogonale ai filari di pannelli.

## Bibliografia

T. Boulard, J.C. Roy, H. Fatnassi, A. Kichah, I-B. Lee, Computer fluid dynamics prediction of climate and fungal spore transfer in a rose greenhouse, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 74, Issue 2, 2010, Pages 280-292, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.09.003>.

Thierry Boulard, Jean-Claude Roy, Jean-Baptiste Pouillard, Hicham Fatnassi, Ariane Grisey, Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics, *Biosystems Engineering*, Volume 158, 2017, Pages 110-133, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>.

Hicham Fatnassi, Pierre Emmanuel Bournet, Thierry Boulard, Jean Claude Roy, Francisco D. Molina-Aiz, Rashyd Zaaboul, Use of computational fluid dynamic tools to model the coupling of plant canopy activity and climate in greenhouses and closed plant growth systems: A review, *Biosystems Engineering*, Volume 230, 2023, Pages 388-408, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.016>.

Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Alvarez, A. J., & Madueño, A. (2006). A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient. *Biosystems engineering*, 93(4), 447-457.

Scarpa, Grazia Maria; Rosellini, Daniele; Veronesi, Fabio (1995) Esperienze di produzione di seme di erba medica (*Medicago sativa* L.) in coltura specializzata in Sardegna. *Rivista di agronomia*, Vol. 29 (2), p. 165-170.

Thom, A. S. (1971). Momentum absorption by vegetation. *Qrtly J. Royal Meteorol. Soc.*, 97(414), 414-428

Tolk, J. A., Evett, S. R., & Howell, T. A. (2006). Advection influences on evapotranspiration of alfalfa in a semiarid climate. *Agronomy journal*, 98(6), 1646-1654.

Wilson, J. D. (1985). Numerical studies of flow through a windbreak. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21, 119-154

Walter-Shea, E. A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M. A., & Hays, C. J. (1997). Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 61(1), 162-177.

M. Weiss, F. Baret, G.J. Smith, I. Jonckheere, P. Coppin,

Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 121, Issues 1–2, 2004, Pages 37-53,

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.001>.



YÜKSEL, O., ALBAYRAK, S., Mevlüt, T. Ü. R. K., & SEVİMAY, C. (2016). Dry matter yields and some quality features of alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars under two different locations of Turkey. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2).

NIKIFOROVA, Tetiana, et al. Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils. *Energy Procedia*, 2013, 42: 775-783.

BUSBY, Jon. Determination of thermal properties for horizontal ground collector loops. 2015.

JACOBS, Adrie FG; VERHOEF, Anne. Soil evaporation from sparse natural vegetation estimated from Sherwood numbers. *Journal of Hydrology*, 1997, 188: 443-452.