

**IMPIANTO AGRIVOLTAICO DENOMINATO "GR LUCERA"  
CON POTENZA FOTOVOLTAICA DI 51,22 MWp  
ACCUMULO ELETTROCHIMICO DI 14 MW**

**REGIONE PUGLIA**

PROVINCIA di FOGGIA

COMUNE di LUCERA

OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN NEI COMUNI DI LUCERA E TROIA

PROGETTO DEFINITIVO

Tav.:

Titolo:

R32i

**Studio di fattibilità ambientale  
Studio Modellistico Previsionale degli  
effetti sul microclima**

Scala:

Formato Stampa:

Codice Identificatore Elaborato

n.a.

A4

QAF1CF7\_StudioFattibilitàAmbientale\_32i

Progettazione:

Committente:



**Dott. Ing. Fabio CALCARELLA**

Via B. Ravenna, 14 - 73100 Lecce  
Mob. +39 340 9243575  
fabio.calcarella@gmail.com - fabio.calcarella@ingpec.eu

**Dott.ssa Elisa Gatto**

PhD in Biological and Environmental Sciences and  
Technologies  
Biologa ambientale  
Albo Nazionale dei Biologi (n. AA090001)



**GREENERGY RINNOVABILI 9 S.r.l.**

Gruppo GREENERGY RENOVBLES SA  
Via Borgonovo, 9 - 20121 - MILANO  
grr9srl@gmail.com - grr9srl@legalmail.it  
P. IVA 11892580967 - REA MI-22630177

Data	Motivo della revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
Settembre 2023	Prima emissione	EG	FC	GREENERGY s.r.l.



# ANALISI MODELLISTICA

Studio modellistico previsionale degli effetti  
sul microclima, comfort termico e qualità  
dell'aria dell'impianto agrivoltaico sito in  
Lucera (FG)

A cura di  
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD  
Biologa





## Sommario

Introduzione.....	3
1. ENVI-met: set up modellistico.....	4
1.1. Parametri modellistici investigati.....	6
<i>Calcolo del comfort termico: l'indice Temperatura fisiologica equivalente PET</i> .....	7
2. Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti .....	8
3. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica.....	9
<i>Temperatura dell'aria (Tair)</i> .....	9
<i>Umidità relativa atmosferica (RHair)</i> .....	10
<i>Temperatura delle superfici (Tsurf)</i> .....	11
<i>Umidità del suolo (RH suolo)</i> .....	12
<i>Temperatura Equivalente Potenziale (PET)</i> .....	13
4. Conclusioni .....	14



## Introduzione

In rispetto ai requisiti del processo di Valutazione di Impatto Ambientale, il presente documento riporta i risultati di uno studio volto a **valutare la conformità del progetto di agrivoltaico** nell'area di Lucera (FG) **in relazione ai rischi climatici identificati** nel documento "Analisi di rischio climatico".

A tal fine, sono stati analizzati **gli effetti microclimatici, il comfort termico e la qualità dell'aria** dell'area interessata dal progetto attraverso l'utilizzo dello strumento di simulazione modellistica fluidodinamica ENVI-met che ha permesso di ricostruire il layout progettuale ingegneristico e agronomico.

Tale approccio metodologico contribuisce a una **valutazione oggettiva dei potenziali impatti ambientali del progetto, fornendo una solida base scientifica per le decisioni e le misure di mitigazione necessarie** per mitigare i potenziali impatti negativi e massimizzare i benefici derivanti dall'agrivoltaico

L'agrivoltaico offre un potenziale significativo per la mitigazione delle emissioni di gas serra e per la sicurezza alimentare. Tuttavia, è essenziale comprendere appieno gli effetti microclimatici correlati, al fine di garantire un equilibrio ottimale tra le **esigenze agricole** e la **stabilità del clima locale**. Attraverso l'impiego di modelli di simulazione avanzati come ENVI-met, siamo in grado di valutare con precisione e dettaglio le variazioni microclimatiche che potrebbero emergere a seguito dell'integrazione di un sistema agrivoltaico nel paesaggio di Lucera.

🔍 Nello specifico sono investigati (i) **parametri microclimatici**: temperatura dell'aria ( $T_{air}$ ), umidità relativa atmosferica ( $RH_{air}$ ), temperatura delle superfici ( $T_{surf}$ ), umidità del suolo ( $RH_{soil}$ ); (ii) l'indice di **comfort termico** *Physiological Equivalent Temperature* (PET); (iii) **albedo** e (iii) la **qualità dell'aria** in termini di concentrazione (ppm) di CO<sub>2</sub> atmosferica.

Il presente approccio metodologico è stato validato in studi scientifici pubblicati in riviste internazionale sottoposte a *peer-reviewed*<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perroncel, L., Santiago, J.L., 2020. Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland). *Forests* 11, 228.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perroncel, L., Santiago, J.L. 2021. The Challenge in the Management of Historic Trees in Urban Environments during Climate Change: The Case of Corso Trieste (Rome, Italy). *Atmosphere*, 12, 500.

Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O.S., Santiago, J.L., Aarrevaara, E., Emmanuel, R., Buccolieri, R. 2021. Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy). *Climate*, 9, 116.



## 1. ENVI-met: set up modellistico

Attraverso un approccio olistico, ENVI-met (Bruse & Fler, 1998) considera l'ambiente come un unico organismo in cui tutti i diversi elementi dell'ambiente urbano o del paesaggio e la vegetazione interagiscono tra loro. ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di *urban-design* in quanto è in grado di simulare in modo preventivo gli effetti dovuti a determinate azioni fornendo previsioni utili e numeriche sull'impatto ambientale di nuove strutture o aree verdi ([www.envimet.com](http://www.envimet.com))

Il modello di calcolo implementato comprende:

- ✓ flussi di radiazioni su tutto lo spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione delle radiazioni dal sistema di edifici e vegetazione;
- ✓ traspirazione, evaporazione e flussi di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- ✓ simulazione completa dei fattori fisici delle piante, come ad esempio la reazione di fotosintesi ed i suoi effetti;
- ✓ temperatura delle superfici dell'area di simulazione (edifici e suolo);
- ✓ scambi di calore e di acqua all'interno del suolo;
- ✓ calcolo indici biometeorologici dei fruitori dell'area in analisi;
- ✓ dispersione di gas inerti e particolato e sedimentazione su superfici e foglie;
- ✓ flussi d'aria e turbolenze, dati relativi al vento.

Gli input della simulazione possono essere suddivisi in tre componenti: "Area", "File di configurazione" e "Database". Il file "Area" è stato creato attraverso l'interfaccia grafica del software. Esso contiene primariamente i dati geometrici del modello simulato:

- Dimensione dell'area;
- Spazi verdi (a terra ed in quota);
- Tipo di vegetazione;
- Strade;
- Tipologie di suolo;

Attraverso questa interfaccia è stata identificata la zona geografica in cui è posta l'area di modello e l'orientamento cardinale della stessa. La determinazione dell'area geografica è avvenuta mediante l'indicazione delle coordinate di latitudine e longitudine del sito.



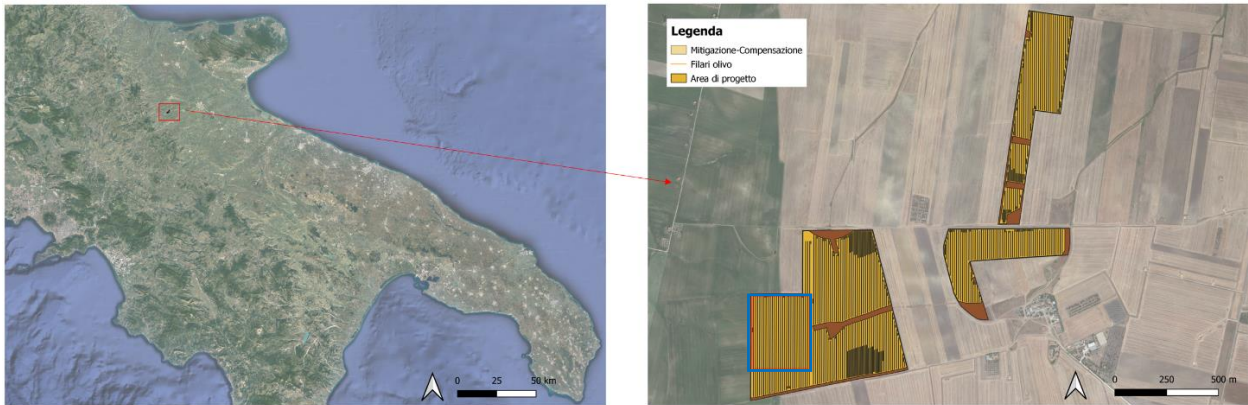
Per analizzare l'effetto del progetto agrivoltaico sono stati simulati due scenari e quindi generate due diverse "Aree": lo scenario allo stato di fatto (scenario attuale) e lo scenario di progetto in cui è stata ricostruita l'area con le scelte agronomiche riportate nella progettazione agricola.

Per modellare l'area di lavoro e svolgere i calcoli associati ad equazioni di bilancio, lo spazio del modello di simulazione viene discretizzato in volumi finiti. Il file "Area" è costituito da celle tridimensionali scelte ed impostate in fase iniziale. Nello specifico, **la dimensione di ogni singola cella nel dominio computazionale della presente elaborazione modellistica è di 2m (asse x) x 2m (asse y) x 2m (asse z)**. L'area simulata in 3D (dominio computazionale) **ha una dimensione di 400 m (orizzontale) x 300 m (verticale)** (Figura 1), con un'altezza verticale di 50 m.

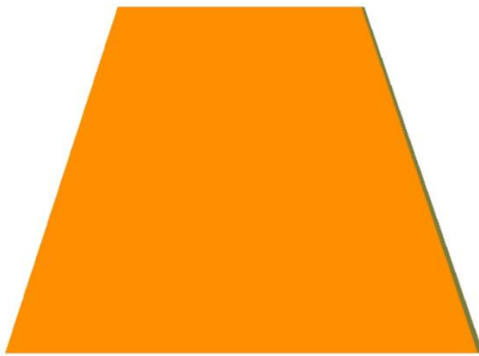
Per **aumentare l'accuratezza** delle simulazioni modellistiche e **ridurre il tempo computazionale** richiesto per il modello numerico, **l'area selezionata per l'analisi con ENVI-met rappresenta una porzione ridotta rispetto all'intera area del progetto di agrivoltaico**. Tuttavia, è importante sottolineare che i **risultati ottenuti** da questa area rappresentativa possono essere considerati **replicabili nello spazio**, data l'uniformità del progetto. Ciò significa che le informazioni ricavate dalla simulazione microclimatica possono essere generalizzate all'intero sito del progetto di agrivoltaico, consentendo di formulare conclusioni valide sull'impatto termico e sulla qualità dell'aria nell'intera area interessata.



### Inquadramento geografico



ENVI-met: scenario attuale



ENVI-met: «Progetto agrivoltaico»

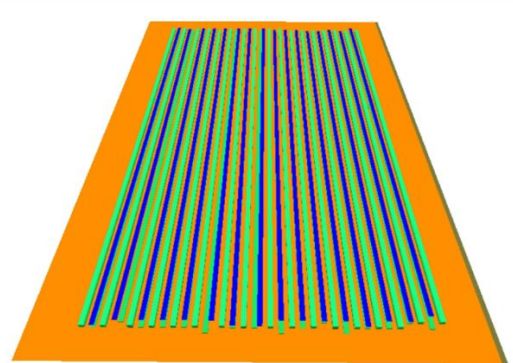


Figura 1. Area di progetto. In alto: inquadramento geografico (Base: Google satellite) con indicazione dell'area di progetto complessiva e dell'area di progetto considerata per le simulazioni modellistiche (riquadro blu); In basso: area ricostruita all'interno del modello ENVI-met.

Per determinare l'andamento giornaliero della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa è stata fissata come dato in ingresso la temperatura minima ( $T_{min}$ ), la temperatura massima ( $T_{max}$ ) e l'umidità relativa minima e massima ( $RH_{min}$ ,  $RH_{max}$ ) prendendo in considerazione un tipico giorno estivo. Il suolo è stato caratterizzato utilizzando il database di ENVI-met (*Default Soil*) e per la rappresentazione della vegetazione sono state impiegate i modelli 3D delle specie presenti disponibili nel database *Albero* di ENVI-met.

#### 1.1. Parametri modellistici investigati

L'impatto sul **microclima** del progetto di rigenerazione proposto è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari in termini di **temperatura dell'aria** ( $T_{air}$ ), **umidità relativa atmosferica** ( $RH_{air}$ ), **temperatura delle superfici** ( $T_{surf}$ ), **umidità relativa del suolo** ( $RH_{soil}$ ). Lo studio dell'indice di *temperatura fisiologica equivalente PET* ha permesso invece di valutare l'impatto delle scelte progettuali sul **comfort termico**.



### Calcolo del comfort termico: l'indice Temperatura fisiologica equivalente PET

Il PET è un indice di comfort termico basato su un modello prognostico del bilancio energetico umano che calcola la temperatura della pelle, la temperatura del nucleo corporeo, il tasso di sudorazione e, come variabile ausiliaria, la temperatura degli indumenti<sup>2</sup>.

Si basa sul *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI) che definisce l'equazione del corpo umano come:

$$M + W + R + C + ED + ERe + ESw + S = 0$$

dove M è l'attività metabolica, W è il lavoro fisico prodotto, R è la radiazione netta del corpo, C è il flusso di calore convettivo, ED è il flusso di calore latente che si diffonde attraverso la pelle sotto forma di vapore acqueo, ERe è la somma dei flussi di calore per il riscaldamento e l'umidificazione dell'aria inspirata, ESw è il flusso di calore dovuto all'evaporazione del sudore, S è il flusso di calore di accumulo per il riscaldamento o il raffreddamento della massa corporea. Tutti i valori sono espressi in *watt*. Il PET si presta bene alla valutazione della componente termica di diversi climi. È preferibile ad altri indici termici per la sua unità di misura (°C), che rende i risultati più comprensibili e in linea con la moderna terminologia biometeorologica umana.

L'indice PET è stato calcolato da ENVI-met che ha rielaborato i flussi di radiazione all'interno dell'area investigata, la temperatura dell'aria, la velocità del vento e la radiazione solare.

I valori di PET e le corrispondenti percezioni termiche sono indicati nella Tabella 1.

SCALA DI VALORI (PET °C)	PERCEZIONE TERMICA
<4	Molto freddo
4-8	Freddo
8-13	Fresco
13-18	Fresco moderato
18-23	Neutro
23-29	Caldo leggero
29-35	Caldo moderato
35-41	Molto caldo
>41	Caldo estremo

Tabella 1. Scala di percezione termica PET

<sup>2</sup> Höppe, P. 1999. *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.





## 2. Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti

L'utilizzo del modello ha fornito un quadro predittivo e quantitativo delle possibili variazioni nella concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica nell'area di progetto, consentendo una valutazione più accurata e dettagliata degli **effetti del progetto agrivoltaico sulla qualità dell'aria**. Nello specifico, il modello ha considerato il **processo di fotosintesi** delle piante incluse nel progetto agricolo e quindi ha permesso la **valutazione dell'assorbimento di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera** durante la fotosintesi e la conversione della stessa in biomassa.

La quantità di CO<sub>2</sub> atmosferica è stata calcolata in tutta l'area di progetto ed è stato effettuato un confronto dello scenario "Progetto Agrivoltaico" con uno scenario di riferimento senza il progetto "Scenario attuale".

Si è osservata una diminuzione di **CO<sub>2</sub> pari a 0.10 ppm nello scenario "Progetto Agrivoltaico"**.

Questo può essere dovuto a:

1. **Assorbimento di CO<sub>2</sub> dalle piante:** durante il processo di fotosintesi le piante assorbono CO<sub>2</sub> dall'atmosfera e la utilizzano per la produzione di energia. Di conseguenza, la presenza di colture nell'area di progetto può portare a un maggiore assorbimento di CO<sub>2</sub>, contribuendo a una diminuzione della sua concentrazione atmosferica.
2. **Effetto mitigante della vegetazione sulla temperatura:** la presenza di piante nell'area di progetto può influire anche sulla temperatura ambientale. Le piante, attraverso l'evapotraspirazione, rilasciano vapore acqueo nell'atmosfera. Questo processo può contribuire a ridurre la temperatura dell'aria circostante, creando un ambiente più fresco. Temperature più basse possono influenzare la capacità di assorbimento della CO<sub>2</sub> da parte delle piante stesse e favorire una maggiore efficienza del processo fotosintetico.

Inoltre, la concentrazione di CO<sub>2</sub> può essere ulteriormente abbattuta da pratiche di gestione del suolo che promuovono la fertilità e la conservazione del terreno. Queste pratiche possono contribuire a migliorare la struttura del suolo, aumentare la sua capacità di trattenere carbonio e ridurre la sua emissione di CO<sub>2</sub>. Di conseguenza, uno scenario agrivoltaico può contribuire a un **bilancio del carbonio più equilibrato nel suolo**, influenzando indirettamente anche la concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica.



### 3. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica

#### Temperatura dell'aria ( $T_{air}$ )

La Figura 2 mostra le differenze di  $T_{air}$  nei due scenari investigati. Si osserva una diminuzione media in tutta l'area nello scenario "Progetto Agrivoltaico" uguale a 2.04 °C.

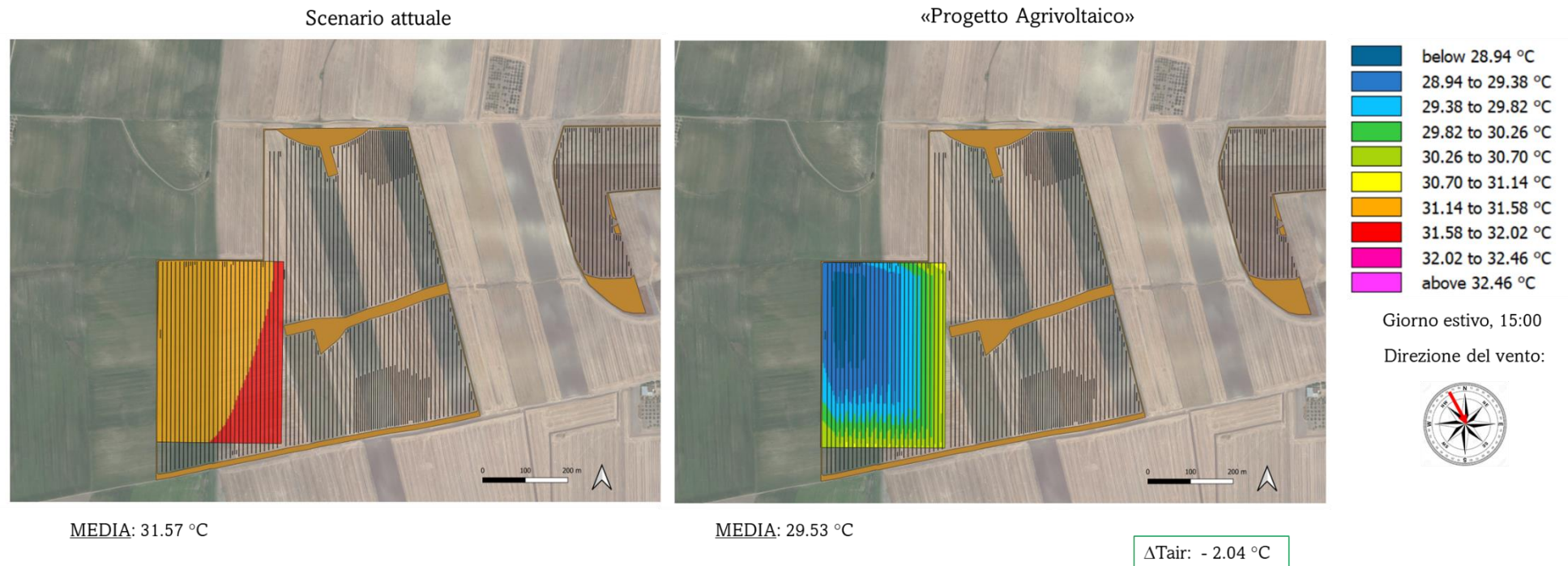


Figura 2. Mappe di distribuzione spaziale di  $T_{air}$  estratte alle 15:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



### Umidità relativa atmosferica (RHair)

La Figura 3 mostra le differenze di RH nei due scenari investigati. Si osserva che la presenza di vegetazione aumenta il tasso di umidità relativa con un aumento medio in tutta l'area nello scenario "Progetto Agrivoltaico" pari a 4.77%.

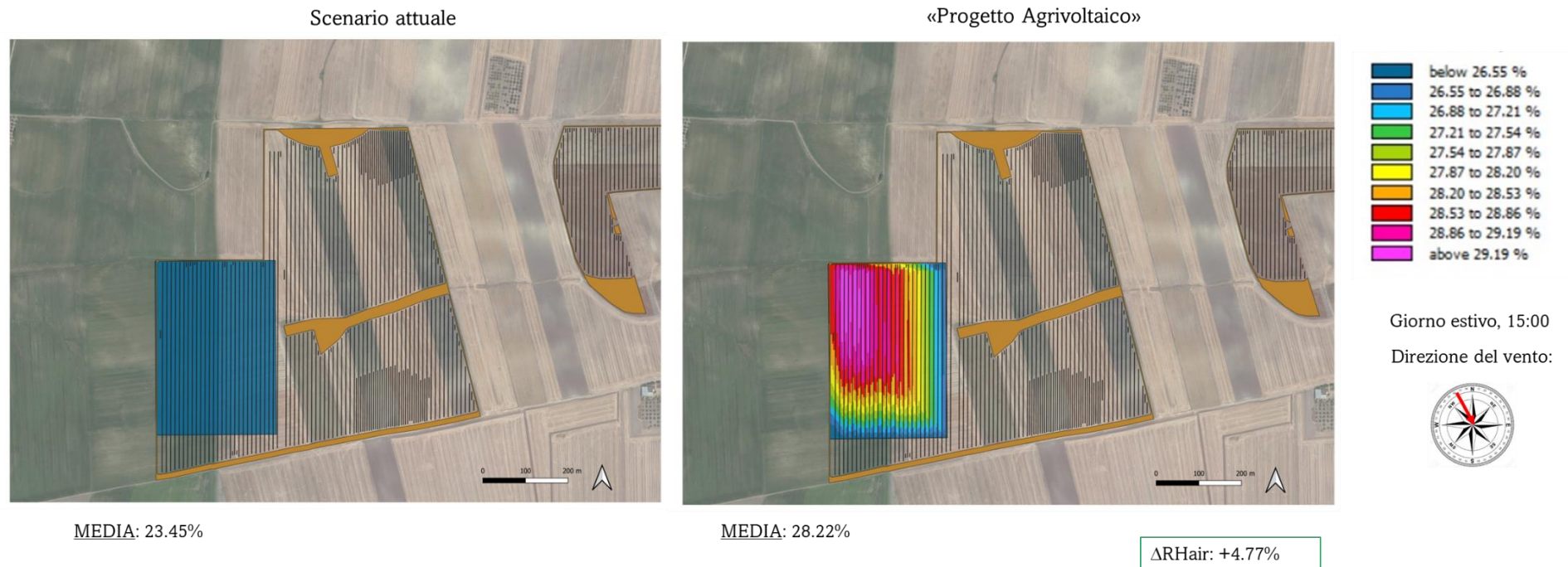


Figura 3. Mappe di distribuzione spaziale di RH estratte alle 15:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



### Temperatura delle superfici ( $T_{surf}$ )

La Figura 4 mostra le differenze di  $T_{surf}$  nei due scenari investigati. Si osserva che la presenza di vegetazione e dei pannelli genera un maggiore ombreggiamento del suolo e porta ad una diminuzione della temperatura superficiale. Nello scenario "Progetto Agrivoltaico" si osserva infatti una diminuzione media pari a 2.3 °C.

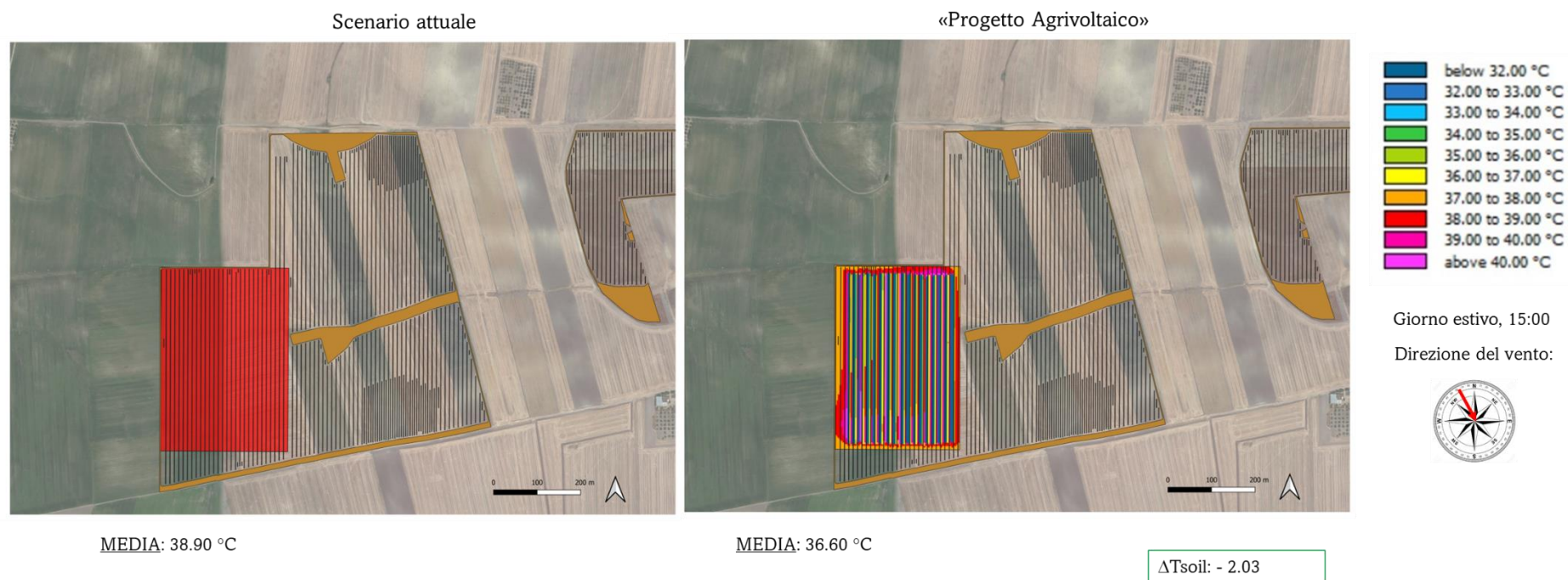


Figura 4. Mappe di distribuzione spaziale di  $T_{surf}$  estratte alle 15:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



### Umidità del suolo (RH suolo)

La Figura 5 mostra le differenze di RH suolo nei due scenari investigati. Si osserva che, nello scenario "Progetto Agrivoltaico", l'aggiunta della vegetazione e dei pannelli, generando un maggiore ombreggiamento, porta ad un aumento dell'umidità del suolo pari a 0.24%. Tale aumento di umidità si traduce in una maggiore disponibilità di risorsa idrica nel suolo.

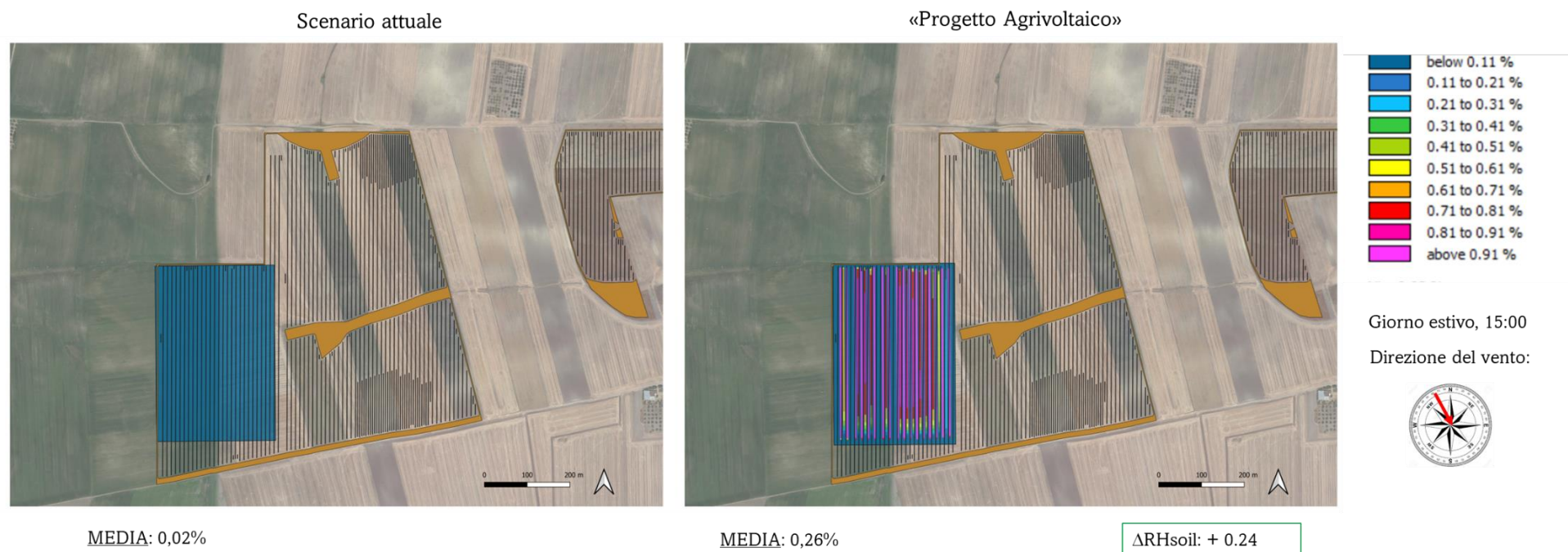


Figura 5. Mappe di distribuzione spaziale di RH soil estratte alle 15:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.





#### 4. Conclusioni

Il presente elaborato tecnico ha permesso di **valutare gli effetti sul microclima, sul comfort termico e sulla qualità dell'aria del progetto agrivoltaico che interessa un'area sita in Lucera (FG).**

Dallo studio è emerso che il progetto agrivoltaico porta ad un **miglioramento della qualità dell'aria** dovuto all'assorbimento e allo stoccaggio di inquinanti da parte delle specie vegetali adoperate e ad un **netto miglioramento delle condizioni microclimatiche con una diminuzione massima di 2 °C della temperatura dell'aria, una diminuzione della temperatura del suolo fino a 2.3 °C e un aumento del tasso di umidità relativa del suolo di 4.77%**. Tali cambiamenti microclimatici si traducono in un miglioramento del comfort termico con una diminuzione termica massima percepita pari a 3 °C.

Questo raffreddamento ha due ragioni principali negli scenari investigati: l'ombra e l'evapotraspirazione delle specie vegetali scelte e dei moduli fotovoltaici ed è in linea con quanto riscontrato in letteratura scientifica<sup>3</sup>.

Considerando le evidenze emerse nella relazione "Analisi di rischio climatico" è possibile concludere che:

1. L'impianto agrivoltaico può contribuire a **ridurre l'uso dell'acqua per l'irrigazione** mediante l'**ombreggiamento** dei moduli fotovoltaici. Ciò **ridurrà le esigenze idriche delle colture e aumenterà l'efficienza nell'uso dell'acqua**. Questo è particolarmente importante considerato il **pericolo moderato alla siccità** a cui è soggetta l'area e che un aumento della temperatura atmosferica causato dal riscaldamento globale e un aumento delle condizioni meteorologiche estreme causeranno ulteriore stress alle regioni soggette a siccità.
2. Il progetto agrivoltaico si dimostra efficace nel **migliorare la qualità dell'aria** nell'area interessata dal progetto grazie all'assorbimento e all'accumulo di inquinanti da parte delle specie vegetali selezionate. Questo effetto riveste **un'importanza significativa nel contesto dei rischi climatici**. Attraverso l'assorbimento di CO<sub>2</sub> e altri inquinanti atmosferici da parte delle specie vegetali impiegate nell'agrivoltaico, si può contribuire alla riduzione della

---

<sup>3</sup> Santiago, J.-L.; Rivas, E. *Advances on the Influence of Vegetation and Forest on Urban Air Quality and Thermal Comfort. Forests* 2021, 12, 1133.

Yang, X.; Zhao, L. *Diurnal Thermal Behavior of Pavements, Vegetation, and Water Pond in a Hot-Humid City. Buildings* 2016, 6, 2

Duarte, D.H., Shinzato, P., Santos Gusson C.D., Alves, C.A. *The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance-built density in a subtropical changing climate. Urban Climatology* 2015, 14, 224-239

FAO. 2016. *Guidelines on urban and peri-urban forestry*, by F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro and Y. Chen. *FAO Forestry Paper No. 178. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.*



concentrazione di gas serra nell'atmosfera, **essenziale per contrastare i cambiamenti climatici e i loro effetti negativi**, come l'aumento delle temperature, l'innalzamento del livello del mare, l'alterazione dei regimi delle precipitazioni e l'incremento degli eventi meteorologici estremi.

3. I cambiamenti microclimatici indotti dal progetto agrivoltaico hanno un impatto significativo sul **comfort termico**. Si registra una diminuzione massima di 3 °C nella temperatura percepita, risultante principalmente dall'ombreggiamento e dall'evapotraspirazione delle specie vegetali e dei moduli fotovoltaici. Questo contribuisce a creare un ambiente più confortevole per gli addetti alla manutenzione dell'impianto e per il personale addetto alla raccolta agricola e alle colture.

La Tabella che segue riassume i risultati emersi nello studio evidenziando la natura dell'effetto apportato sul microclima, sul comfort termico e sulla qualità dell'aria sulla base della Convenzione quadro delle Nazioni Unite e degli accordi a essa collegati, quali il Protocollo di Kyoto e gli Accordi di Parigi, per fronteggiare il rischio climatico. Tali impegni mondiali prevedono che i Paesi si attivino per contenere l'incremento della temperatura media globale tramite la riduzione delle emissioni e l'aumento degli assorbimenti (mitigazione – un esempio è l'attività di rimboschimento), e altresì a predisporre strategie di adattamento per difendersi dagli effetti avversi.





	Parametro	Scenario attuale	"Progetto Agrivoltaico"	Impatto
MICROCLIMA	Temperatura dell'aria (°C)	31.57	29.53	Positivo
	Umidità relativa (%)	28.22	23.45	Non rilevante considerate le specie vegetali da mettere a dimora.
	Temperatura superficiale (°C)	38.9	36.6	Positivo
	Umidità del suolo (%)	0.26	0.02	Positivo
	Velocità del vento (m/s)	2.46	1.62	Positivo
ALBEDO	Albedo	0.22	0.16	Positivo
COMFORT TERMICO	<i>Physiological Equivalent Temperature</i> (°C)	47.11	44.07	Positivo.
QUALITÀ DELL'ARIA	CO2 (ppm)	400	399	Positivo

Tabella 2. Sintesi dei risultati emersi dalla simulazione modellistica previsionale.

Il presente studio fornisce evidenze concrete sugli impatti positivi del progetto agrivoltaico a Lucera, includendo la riduzione dell'inquinamento atmosferico, il miglioramento delle condizioni microclimatiche e la promozione di pratiche agricole più sostenibili. Tali risultati confermano che il progetto agrivoltaico è in linea con gli obiettivi ambientali per lo Sviluppo Sostenibile mirati all'adozione di misure urgenti per combattere il cambiamento climatico.