

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO  
E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN  
LOCALITA' MASSERIA BARONI  
COMUNE DI PRESICCE ACQUARICA (LE)  
DENOMINAZIONE IMPIANTO - PVA003 ACQUARICA MASSERIA BARONI  
POTENZA NOMINALE 24.0 MW

## PROGETTO DEFINITIVO - SIA

### PROGETTAZIONE E SIA

#### HOPE engineering

ing. Fabio PACCAPELO  
ing. Andrea ANGELINI  
arch. Andrea GIUFFRIDA  
arch. Gaetano FORNARELLI  
dott.ssa Anastasia AGNOLI

#### Studio ALAMI

Arch. Fabiano SPANO  
Arch. Valentina RUBRICHI  
Arch. Susanna TUNDO

### PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI ELETTRICI

ing. Roberto DI MONTE

### AGRONOMIA E STUDI COLTURALI

dott. Donato RATANO

### STUDI SPECIALISTICI E AMBIENTALI

MICROCLIMATICA  
dott.ssa Elisa GATTO

ARCHEOLOGIA  
dott. Cristian NAPOLITANO

GEOLOGIA  
Apogeo Srl

ACUSTICA  
dott.ssa Sabrina SCARAMUZZI

### COLLABORAZIONE SCIENTIFICA

**UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE**  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI SOSTENIBILI  
prof. Stefano AMADUCCI

## R.2 RELAZIONI SPECIALISTICHE

### R.2.10 Analisi microclimatica del sito

REV.	DATA	DESCRIZIONE
	10-23	prima emissione





# ANALISI MICROCLIMATICA

Inquadramento **meteo-climatico**,  
valutazione dei **rischi climatici fisici** e  
**studio modellistico previsionale** degli effetti  
sul microclima, comfort termico e qualità  
dell'aria dell'impianto agrivoltaico sito nel  
comune di Presicce Acquarica (LE)

A cura di  
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD  
Biologa





## Sommario

Introduzione e nota metodologica .....	0
<b>1. Inquadramento meteo-climatico .....</b>	<b>2</b>
<b>3. Analisi dei rischi climatici fisici .....</b>	<b>9</b>
3.1. Proiezioni climatiche future: un'analisi a scala regionale .....	9
3.1.1. Proiezioni CMIP6 .....	9
<i>Scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5</i> .....	10
3.1.1.1 Variazione delle principali variabili climatiche .....	10
3.1.1.2. Impatto sui servizi ecosistemici .....	13
4. Stressor climatici nell'area di interesse: un'analisi a scala locale .....	16
4.1. Alte temperature .....	17
4.2. Precipitazioni intense .....	18
4.3. Siccità .....	20
4.4. Indice di sfruttamento della risorsa idrica .....	22
4.5. Incendi .....	24
4.6. Innalzamento del livello del mare .....	25
5. Resilienza dell'impianto agrivoltaico al rischio climatico: strategie di compatibilità e gestione .....	28
<b>6. Analisi modellistica previsionale .....</b>	<b>29</b>
7. ENVI-met: set up modellistico .....	29
<b>8. Analisi 1: Studio sull'effetto del layout di progetto sulle ore di sole .....</b>	<b>33</b>



8.1.	Materiali e Metodi .....	33
8.2.	Risultati .....	33
9.	<b>Analisi 2:</b> Effetti delle barriere vegetali sulla deriva dei prodotti fitosanitari, velocità del vento e implicazioni agricole in un contesto di cambiamenti climatici .....	36
9.1.	Obiettivi dello studio: .....	36
9.2.	Risultati .....	36
	Mappe di concentrazione e dispersione dei prodotti fitosanitari .....	36
	Ventilazione e velocità del vento .....	38
9.3.	Mitigazione della velocità del vento, cambiamenti climatici e rischi agricoli: .....	40
9.3.1.	La necessità di soluzioni di compromesso: .....	40
10.	<b>Analisi 3:</b> Impatto microclimatico dell'opera e delle fasce di mitigazione .....	41
	Parametri modellistici investigati .....	41
	<i>Calcolo del comfort termico: l'indice Temperatura fisiologica equivalente PET</i> .....	41
10.1.	Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti .....	42
10.2.	Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica .....	44
	<i>Temperatura dell'aria (Tair)</i> .....	44
	<i>Temperatura delle superfici (Tsoil)</i> .....	46
	<i>Capacità di ritenzione idrica (AWC)</i> .....	47
	<i>Temperatura Equivalente Potenziale (PET)</i> .....	49
11.	<b>Conclusioni</b> .....	50



## Introduzione e nota metodologica

Il presente elaborato tecnico ha come **obiettivo** lo **studio e caratterizzazione della condizione climatica e dei mutamenti prevedibili** della stessa in un'area sita nel comune di Presicce Acquarica (Lecce, Puglia, Italia) da destinare alla realizzazione di un impianto agrivoltaico. È altresì mirato alla definizione di un Indice di Rischio Climatico – *Climate Risk Index* che aumenti la resilienza dell'intervento e promuova il *climate proofing* degli investimenti auspicato dalla Commissione Europea nella Strategia Europea per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici<sup>1</sup>.

Nello specifico, tale studio tiene conto degli orientamenti tecnici sull'applicazione del principio “*non arrecare un danno significativo*”<sup>2</sup> a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e resilienza<sup>3</sup> ed è, quindi, altresì focalizzato a garantire che l'opera in esame non pregiudichi il conseguimento degli obiettivi climatici e ambientali ai sensi dell'articolo 17 del Regolamento (UE) 2020/852.

Il Regolamento UE 241/2021 stabilisce, inoltre, che **gli investimenti del Piano Nazionale per la ripresa e resilienza (PNRR) non siano esposti agli eventuali rischi indotti del cambiamento del clima, quali ad esempio innalzamento dei mari, siccità, alluvioni, esondazione dei fiumi, nevicate abnormi.**

Le infrastrutture energetiche sono particolarmente esposte ai cambiamenti a lungo termine. Si è perciò ritenuto necessario considerare i cambiamenti climatici a partire dalle fasi iniziali del progetto, attraverso l'utilizzo di opportuni criteri di progettazione, l'adozione di misure tecnologiche specifiche e l'analisi di proiezioni climatiche future su scala appropriata.

Inoltre, nel rispetto dei requisiti del processo di Valutazione di Impatto Ambientale, il presente documento riporta i risultati di uno **studio modellistico previsionale** volto a valutare la conformità del progetto di agrivoltaico in relazione ai rischi climatici identificati.

Nello specifico, 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.

---

<sup>1</sup> EC (Commissione Europea), 2009. Libro Bianco. *L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo.*

<sup>2</sup> Regolamento (UE) 2020/852, detto “regolamento Tassonomia”, relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili, tramite la definizione di un sistema di classificazione (“tassonomia”) delle attività ecosostenibili.

<sup>3</sup> Regolamento (UE) 2021/241 del Parlamento europeo e del Consiglio riguardo i piani di ripresa e resilienza che prevede che “Nessuna misura per l'attuazione delle riforme e dei progetti di investimento inclusi nel piano per la ripresa e la resilienza arreca un danno significativo agli obiettivi ambientali ai sensi dell'articolo 17 del regolamento (UE) 2020/852 (principio «non arrecare un danno significativo»)”



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 Presicce Acquarica.

Il presente approccio metodologico è stato validato in studi scientifici pubblicati in riviste internazionali sottoposte a peer-reviewed<sup>4</sup>.

Lo studio è strutturato nelle seguenti fasi di analisi:



<sup>4</sup> Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perronce, 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., Perronace, 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. Inquadramento meteo-climatico

Secondo la classificazione di Köppen - Geiger<sup>5</sup>, l'areale in oggetto, sito nel comune di Presicce Acquarica (Lecce, Puglia, Italia), è inquadrabile nella zona "Csa" (**clima caldo e temperato**), una zona climatica che interessa le aree più calde di ristrette fasce costiere dell'Italia meridionale e insulare con una media annua > 17 °C; media del mese più freddo > 10 °C; 5 mesi con media > 20 °C; escursione annua da 13 °C a 17 °C (Figura 1).

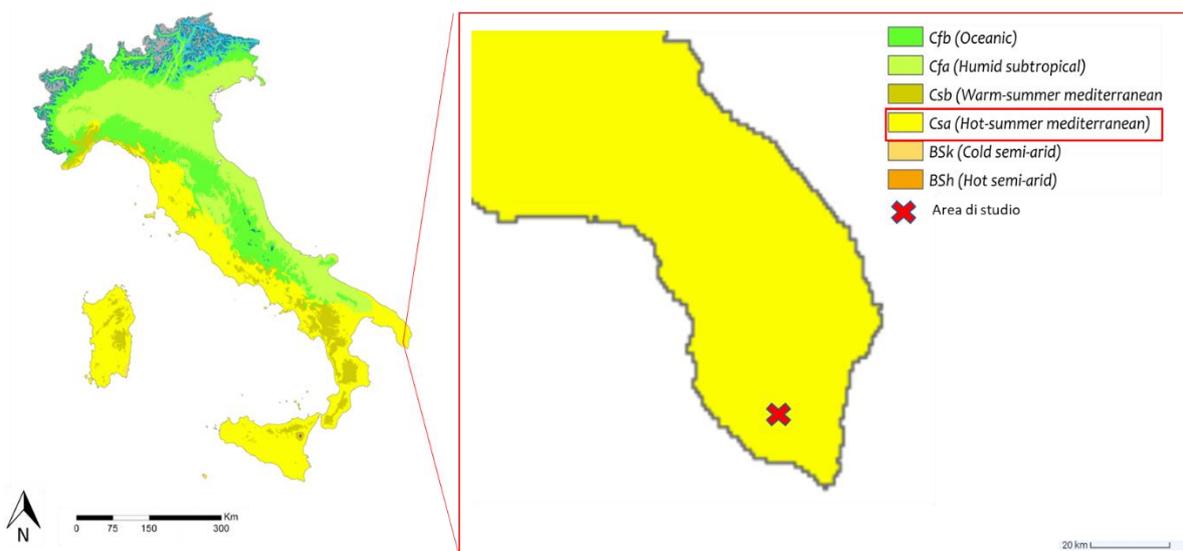


Figura 1. Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

Per la descrizione meteo-climatica dell'area è stato utilizzato il dataset di rianalisi di quinta generazione ERA5<sup>6</sup>, prodotto utilizzando il sistema di assimilazione dei dati a variazione quadrimensionale e le previsioni dei modelli in CY41R2 dell'ECMWF, IFS (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Integrated Forecast System*). ERA5 permette un'analisi del clima locale e globale ad alta risoluzione spaziale e temporale e consente studi di maggior dettaglio e affidabilità. Le rianalisi forniscono una descrizione numerica del clima recente integrando opportunamente dati da modello e osservazioni.

La caratterizzazione climatica riportata in Tabella 1 considera l'intervallo di tempo 1990-2021 e, in particolare, le variabili di temperatura (°C), precipitazioni (mm), umidità relativa (%) e giorni di pioggia (gg). I dati relativi alle ore di sole sono stati invece raccolti nel periodo 1999-2019.

Dall'analisi del dataset emerge che l'area è caratterizzata da una temperatura media annuale di 17.7 °C e da una piovosità annuale di 675 mm.

<sup>5</sup> Wladimir Köppen, 1936. *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger.

<sup>6</sup> <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>



	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	9,6	9,95	12,25	15,2	19,45	24,25	27	27,3	23	18,85	14,85	11,1
Temperatura minima (°C)	6,7	6,8	8,6	11,1	14,9	19,4	22	22,3	19,2	15,6	12	8,4
Temperatura massima (°C)	12,5	13,1	15,9	19,3	24	29,1	32	32,3	26,8	22,1	17,7	13,8
Precipitazioni (mm)	68	61	64	54	38	19	16	18	62	94	103	78
Umidità(%)	76%	73%	73%	70%	66%	58%	55%	58%	67%	76%	77%	77%
Giorni di pioggia (g.)	7	6	6	6	4	3	2	2	5	7	7	8
Ore di sole (ore)	6.4	7.3	8.6	10.1	11.8	12.9	12.9	12.0	10.0	7.9	6.8	6.3

Tabella 1. Medie mensili per i parametri meteorologici considerati. L'intensità del colore è direttamente proporzionale all'intensità del valore misurato. I dati sono stati estrapolati dal dataset ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) 1990-2021.

La temperatura media del mese di Agosto, il mese più caldo dell'anno, è di 27.3 °C. Durante l'anno, Gennaio ha una temperatura media di 9.6 °C, la temperatura media più bassa di tutto l'anno.

Il mese più secco è Luglio con una media di 16 mm di pioggia e un'umidità relativa del 55%, mentre i mesi con maggiori piogge sono Ottobre e Novembre con una media di 94 e 103 mm circa rispettivamente e un'umidità relativa del 76-77%. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 87 mm.

In Figura 2 il grafico di Walter Leith evidenzia il periodo con disponibilità idrica e il periodo arido. Questo grafico è utile per valutare la **variabilità stagionale delle precipitazioni** e le **variazioni di temperatura** che possono influenzare il regime idrico della regione.

Nello specifico il grafico rappresenta le precipitazioni mensili e le temperature medie mensili, utilizzando un doppio asse delle ordinate. L'asse y sinistro rappresenta la quantità di precipitazione, mentre l'asse y destro rappresenta la temperatura media. L'asse x rappresenta i mesi dell'anno.

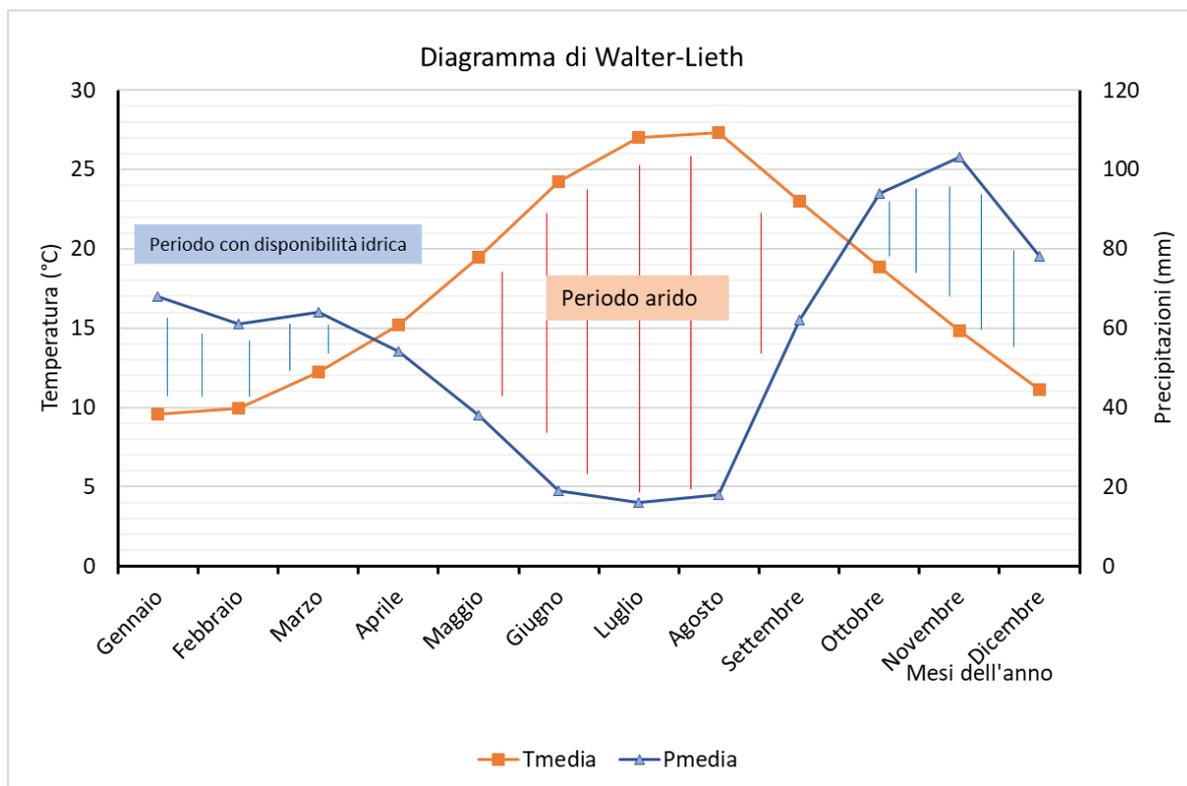


Figura 2. Grafico di Walter Lieth che evidenzia il periodo con disponibilità idrica, il periodo arido e i mesi con rischio gelate. Il dataset considerato è riportato in Tabella 1 (periodo 1990-2021). Tmedia: Temperatura media (°C), Pmedia: valore delle precipitazioni medie (mm).

Dal grafico si evince che il periodo con **disponibilità idrica va da metà Settembre a metà Marzo**. Questi mesi rappresentano la stagione piovosa nella regione. Il periodo **da Aprile a Settembre è invece prettamente arido**. Questi mesi rappresentano la stagione secca in cui la **disponibilità di precipitazioni è bassa**. Non ci sono invece mesi con **rischio gelate** caratterizzati da giorni in cui la temperatura scende al di sotto degli 0 °C.

Le ore di sole vanno da un minimo di 6.3 – 6.4, nei mesi invernali di Dicembre e Gennaio, a un massimo di 13 nei mesi di Giugno e Luglio. L'area di Presicce Acquarica gode di **un'abbondante quantità di luce solare** durante tutto l'anno, con una media di oltre 2.500 ore di sole annue. Ciò contribuisce alla **vitalità della vegetazione locale e alla produttività agricola** della regione circostante. In termini di irraggiamento, le aree designate per la realizzazione dell'opera godono di **un'ottima insolazione**, come, peraltro, gran parte della Regione (Figura 3), dove la maggior parte dei territori beneficiano di un irraggiamento solare annuo cumulato con valori superiori ai **2000 kWh/m<sup>2</sup>** (Joint Research Center, 2019<sup>7</sup>).

<sup>7</sup> Joint Research Centre (2019). [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index.html#!](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html#!).

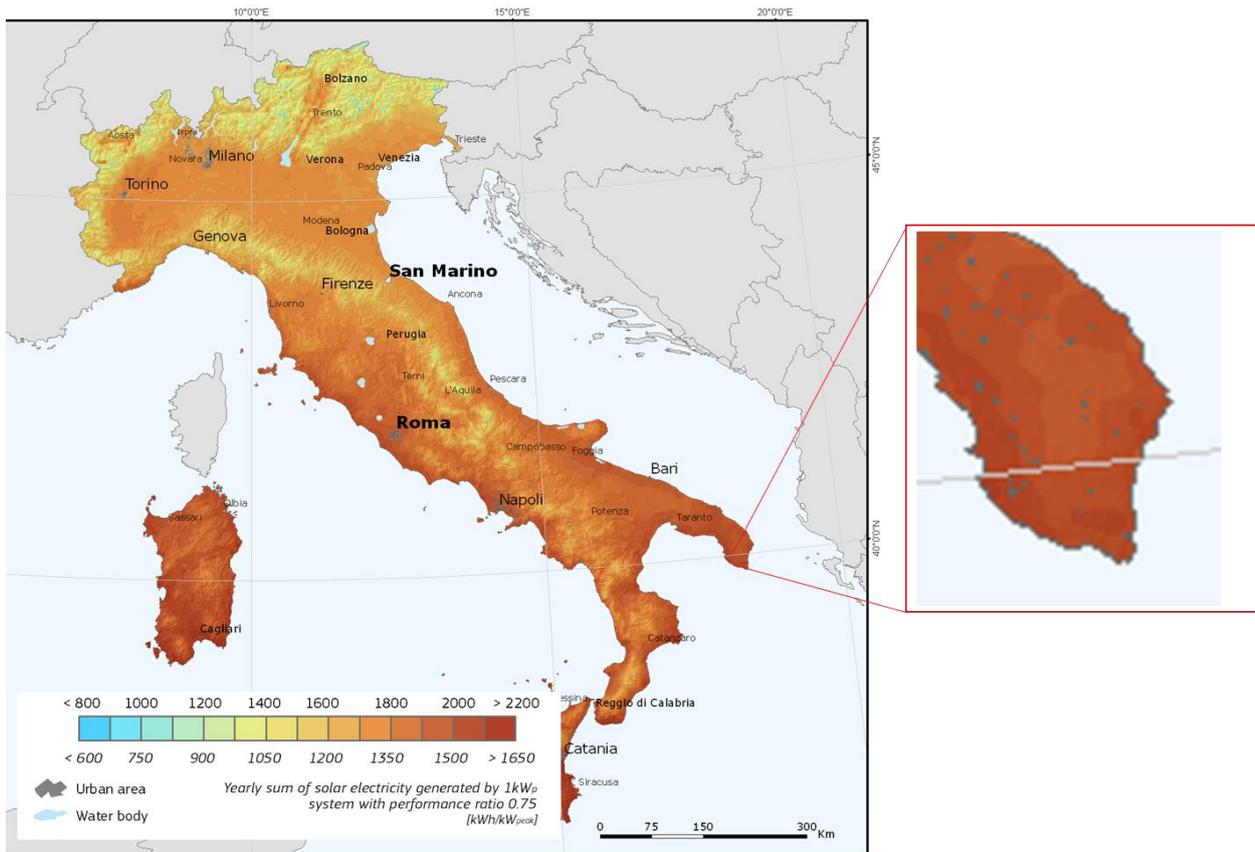


Figura 3. Somma della radiazione globale annua con inclinazione ottimale dei pannelli (European Commission, PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM).

Perciò, sotto quest'aspetto, l'area risulta potenzialmente adatta alla realizzazione di un impianto agrivoltaico.

Il riferimento principale per definire il regime anemologico dell'area in esame è rappresentato dalla rosa dei venti riprodotta in Figura 4, calcolata considerando il dataset degli ultimi 30 anni del modello meteorologico globale *Next-Generation Environmental Modeling System* (NEMS) con una risoluzione di circa 30 km i dati del vento estratti a 10m.

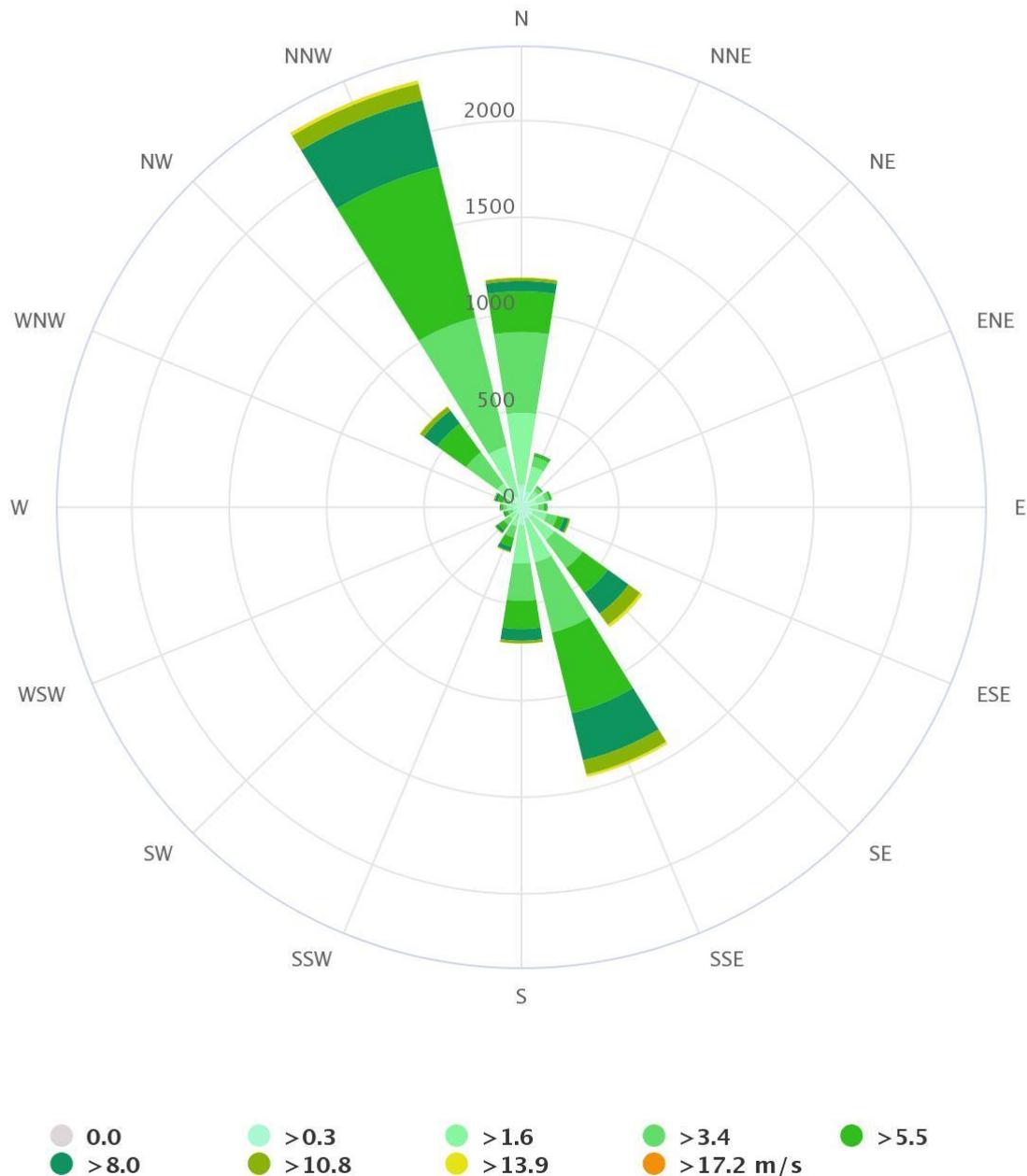


Figura 4. Rosa dei venti calcolata in base ai dati degli anni 2008-2021 (ERA5, ECMWF)

La forma della rosa dei venti evidenzia una prevalenza delle direzioni Nord Ovest. Come si può notare, le maggiori frequenze sono associate a venti di 3 - 5.5 m/s.

## 2. Analisi trend climatici

I diagrammi riportati nella presente sezione descrivono i trend climatici negli ultimi 40 anni e forniscono una prova analitica del cambiamento climatico già in atto nell'area di interesse. La fonte di dati



utilizzata è il dataset di rianalisi di quinta generazione ERA5<sup>8</sup>. L'intervallo di tempo analizzato va dal 1979 al 2021 con una risoluzione spaziale di 30 km.

I grafici riportati in Figura 5 e 6 mostrano una stima della temperatura media e delle precipitazioni totali medie annuali per Presicce Acquarica e dintorni. La linea blu tratteggiata mostra la tendenza lineare del cambiamento climatico. Nella parte inferiore del grafico sono riportate le cosiddette strisce di anomalia. Ogni striscia colorata rappresenta la temperatura media di un anno: blu per gli anni più freddi e rosso per quelli più caldi.

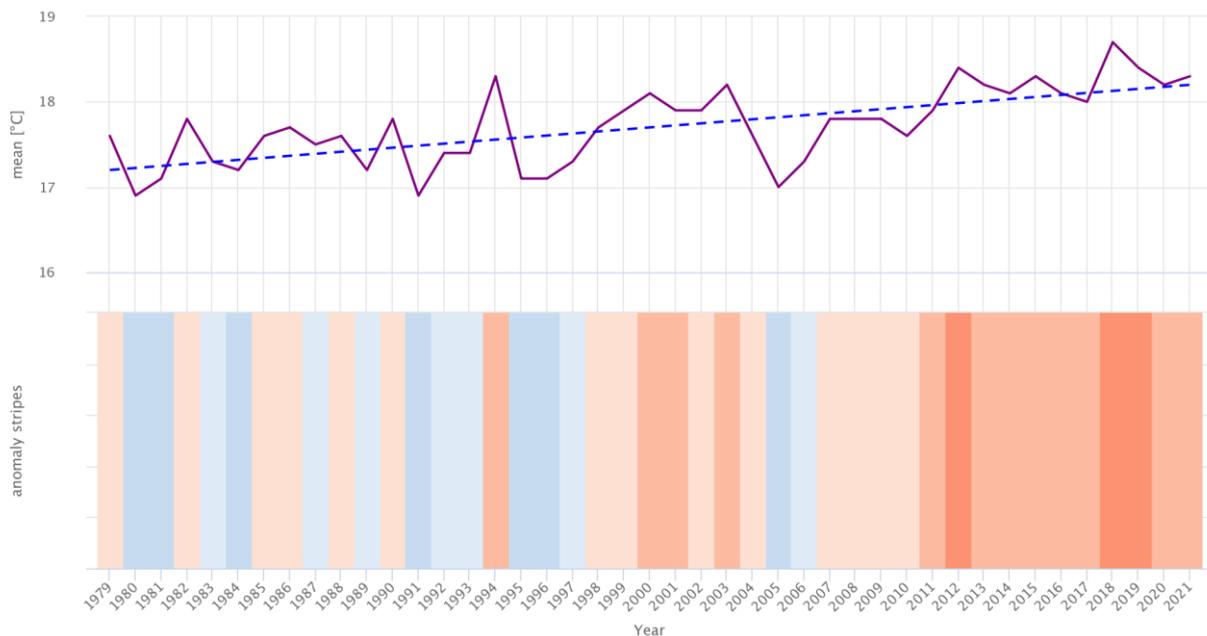


Figura 5. Stima della temperatura media annuale per Presicce Acquarica e dintorni dal 1979 al 2021 (ERA5, ECMWF). La linea blu tratteggiata mostra la tendenza lineare del cambiamento climatico. In basso le strisce anomalia che rappresentano la temperatura media di un anno: blu per gli anni più freddi e rosso per quelli più caldi.

**La linea di tendenza sale da sinistra a destra e ciò indica un cambiamento climatico in corso con una variazione della temperatura positiva ed indica, cioè, che l'area sta diventando più calda.**

In particolare, si osserva che dal 2007 ad oggi la tendenza di temperatura è sempre stata positiva con un'anomalia massima negli ultimi 40 anni di 1.1 °C nel 2018. Nell'ultimo anno riportato (2021) l'anomalia registrata è stata di 0.7 °C.

Il grafico in Figura 6 mostra che la linea di tendenza delle precipitazioni sale da sinistra a destra e ciò indica che **la variazione delle precipitazioni è positiva e che nell'area vi è un cambiamento climatico in corso che la rende maggiormente piovosa.**

<sup>8</sup> <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>

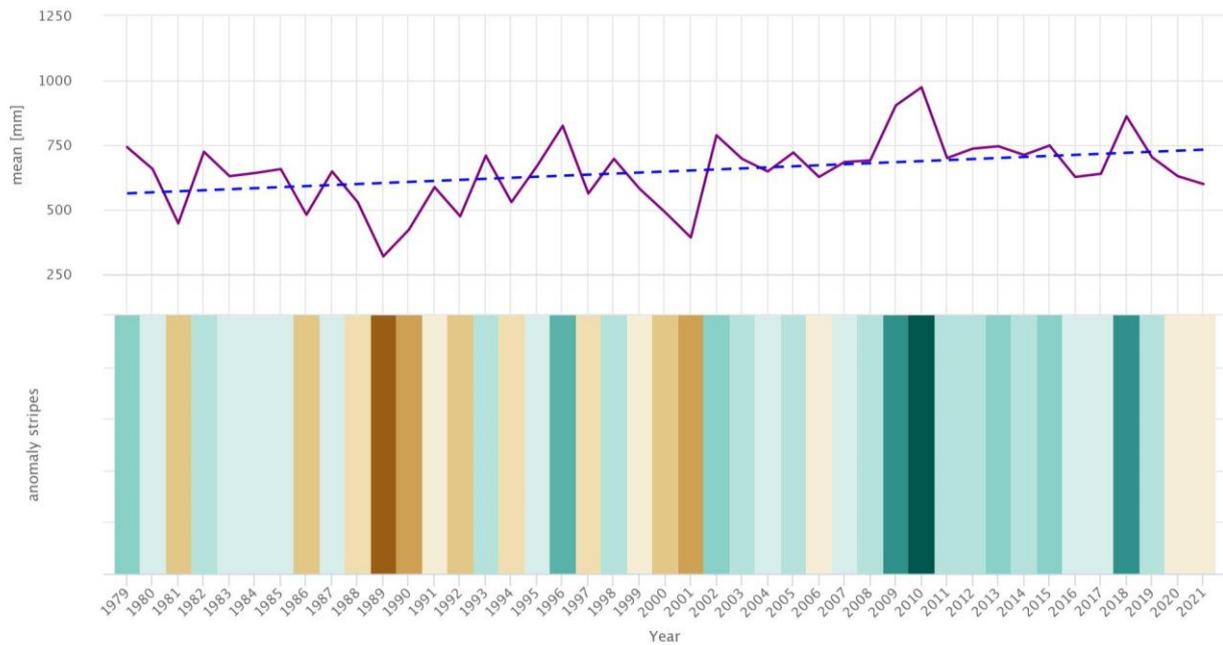


Figura 6. Stima delle precipitazioni totali medie annuali per Presicce Acquarica e dintorni dal 1979 al 2021 (ERA5, ECMWF). La linea blu tratteggiata mostra la tendenza lineare del cambiamento climatico. In basso le strisce anomalia che rappresentano la precipitazione totale di un anno: verde per gli anni più umidi e marrone per quelli più secchi.

Il grafico evidenzia una **storia climatica caratterizzata da anni particolarmente secchi e aridi**. L'ultima anomalia massima negativa è stata registrata nel **2001 ed è stata di -219 mm annui**. Successivamente la tendenza diventa positiva con **un'anomalia massima nel 2010 di 343 mm/anno**. Negli ultimi 2 anni (2020-2021) la **tendenza è tornata debolmente negativa con un'anomalia massima registrata di -18.3 mm nell'anno 2021**.

La linea di tendenza positiva non esclude il rischio siccità dell'area, che verrà analizzato in seguito, poiché la media dei mm di pioggia annuali potrebbero oscillare in base ad eventi di piovosità estremi.



### 3. Analisi dei rischi climatici fisici

Partendo dalle condizioni climatiche attuali dell'area, questa sezione riporta le **proiezioni climatiche valutate per identificare i rischi climatici fisici**; gli impatti sono stati valutati sulla base delle migliori pratiche e degli orientamenti disponibili e tenendo conto delle più attuali conoscenze scientifiche per l'analisi della vulnerabilità e del rischio e delle relative metodologie adottate dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico<sup>9</sup>.

Nel contesto del cambiamento climatico, **l'analisi del rischio climatico rappresenta uno strumento fondamentale per valutare e comprendere gli impatti futuri del clima su diverse attività umane**, tra cui l'agricoltura e l'installazione di nuovi impianti per la produzione di energia rinnovabile. Il cambiamento climatico è una delle sfide più pressanti del nostro tempo, con **il riscaldamento globale e i cambiamenti nei pattern meteorologici che influenzano direttamente i sistemi agricoli e le pratiche di coltivazione**.

L'analisi del rischio climatico permetterà di **identificare le potenziali vulnerabilità e gli impatti del cambiamento climatico sull'efficienza e la sostenibilità dell'impianto agrivoltaico, consentendo una migliore pianificazione e adattamento per affrontare le sfide future.**

#### 3.1. Proiezioni climatiche future: un'analisi a scala regionale

La valutazione dei rischi fisici dell'area è effettuata utilizzando **proiezioni climatiche avanzate** alla massima risoluzione disponibile nella serie esistente di scenari futuri coerenti con la durata prevista dell'attività.

Per comprendere meglio gli impatti futuri del cambiamento climatico e fornire basi solide per la pianificazione e l'adattamento, il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC) ha sviluppato il sesto progetto di intercomparazione dei modelli climatici accoppiati (CMIP6 *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). Nel presente capitolo, esamineremo le proiezioni climatiche future relative agli scenari SSP2-4.5 (*Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5*) e SSP5-8.5 (*Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5*) al fine di valutare le potenziali tendenze climatiche nell'area Mediterranea in cui rientra la nostra area di interesse.

##### 3.1.1. Proiezioni CMIP6

Il CMIP6 rappresenta un'importante iniziativa scientifica che coinvolge una vasta rete di modellisti climatici in tutto il mondo. L'obiettivo principale del progetto è migliorare la comprensione delle risposte

---

<sup>9</sup> *Relazioni di valutazione sui cambiamenti climatici relative a impatti, adattamento e vulnerabilità, pubblicati periodicamente dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC), l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione delle informazioni scientifiche prodotte relativamente al cambiamento climatico, <https://www.ipcc.ch/reports/>.*



climatiche ai cambiamenti nell'emissione di gas serra e **fornire proiezioni climatiche avanzate basate su scenari socio-economici** noti come *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP). Le proiezioni CMIP6 costituiscono un significativo progresso rispetto ai progetti precedenti, incorporando modelli climatici più sofisticati e raffinati per fornire una maggiore precisione nelle previsioni climatiche.

### *Scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5*

Gli scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5 rappresentano diverse traiettorie socio-economiche future definite nel contesto del CMIP6. Essi consentono di esplorare **le possibili evoluzioni globali basate su una combinazione di fattori socio-economici e tecnologici**.

SSP2-4.5 descrive un futuro in cui le politiche globali mirano a **una mitigazione significativa delle emissioni di gas serra**, risultando in una stabilizzazione delle concentrazioni atmosferiche e un moderato aumento delle temperature globali rispetto agli scenari più inquinanti.

SSP5-8.5, al contrario, rappresenta un futuro in cui le **politiche di mitigazione delle emissioni sono scarse o inefficaci, portando a una crescita continua delle concentrazioni di gas serra e ad un aumento più marcato e rapido delle temperature globali**.

#### 3.1.1.1 *Variazione delle principali variabili climatiche*

Nella nostra analisi, esamineremo una serie di variabili climatiche cruciali per comprenderne l'evoluzione futura nella nostra area di interesse. Queste variabili includono:

- **Mean temperature** (T) (temperatura media): La temperatura media annuale e in una specifica area geografica.
- **Minimum temperature** (TN) (temperatura minima): La temperatura minima giornaliera annuale e in una specifica area geografica.
- **Frost days** (FD) (giorni di gelo): Il numero di giorni in un anno in cui la temperatura scende al di sotto dello zero.
- **Maximum temperature** (TX) (temperatura massima): La temperatura massima giornaliera in un anno e in una specifica area geografica.
- **Days with TX above 35°C** (TX35) (giorni con temperatura massima sopra i 35°C): Il numero di giorni in cui la temperatura massima supera i 35°C.
- **Days with TX above 40°C** (TX40) (giorni con temperatura massima sopra i 40°C): Il numero di giorni in cui la temperatura massima supera i 40°C.
- **Total precipitation** (PR) (precipitazioni totali): La quantità totale di precipitazioni su un periodo di tempo e in una specifica area geografica.



- **Maximum 1-day precipitation (RX1day)** (massima quantità di precipitazioni in un giorno): La massima quantità di precipitazioni registrata in un singolo giorno.
- **Maximum 5-day precipitation (RX5day)** (massima quantità di precipitazioni in 5 giorni): La massima quantità di precipitazioni registrata in un periodo di 5 giorni.
- **Consecutive Dry Days (CDD)** (giorni consecutivi senza precipitazioni): Il numero di giorni consecutivi senza precipitazioni sopra una soglia specifica.
- **Standardized Precipitation Index (SPI-6)** (Indice Standardizzato di Precipitazione): Un indicatore di siccità basato sulla distribuzione delle precipitazioni su un periodo di tempo e luogo specifici. Valori negativi indicano condizioni di siccità, mentre valori positivi indicano condizioni di abbondanti precipitazioni.
- **Sea level rise (SLR)** (innalzamento del livello del mare): si riferisce al fenomeno di aumento del livello medio dei mari e degli oceani a livello globale.

In Tabella 2 si riporta la **variazione delle variabili climatiche** (rispetto all'arco di tempo recente 1990-2014) espressa in valori medi annuali per gli scenari **SSP2 4.5** (ottimistico - migliorativo) e **SSP5 8.5** (pessimistico – peggiorativo) calcolati per il **vicino (NT)** (2021-2040), **medio (MT)** (2041-2060) e **lungo periodo (LT)** (2081-2100).

Variabile	Periodo	SSP2 4.5	SSP5 8.5
<b>Mean temperature (T)</b> (°C)	NT	0.9	1.1
	MT	1.5	2.0
	LT	2.4	4.6
<b>Minimum temperature</b> (TN) (°C)	NT	0.9	1
	MT	1.4	2
	LT	2.3	4.5
<b>Frost days (FD)</b> (giorni)	NT	-3.1	-3.5
	MT	-4.6	-6.5
	LT	-7.2	-12.4
<b>Maximum temperature</b> (TX) (°C)	NT	1.0	1.1
	MT	1.6	2.2
	LT	2.5	4.8
<b>Days with TX above 35°C (TX35)</b> (giorni)	NT	11.9	12.8
	MT	16.3	20.5
	LT	23.0	43.1
<b>Days with TX above 40°C (TX40)</b>	NT	6.3	6.8
	MT	8.8	11.3



(giorni)	LT	13.1	26.8
<b>Total precipitation</b> (PR) (%)	NT	-5.7	-7
	MT	-8.7	-12
	LT	-11.3	-22.2
<b>Maximum 1-day precipitation</b> (RX1day) (%)	NT	1.8	1.7
	MT	2.2	3.1
	LT	3.9	5.4
<b>Maximum 5-day precipitation</b> (RX5day) (%)	NT	0.8	0.6
	MT	0.5	0.2
	LT	0.9	-1.4
<b>Consecutive Dry Days</b> (CDD) (giorni)	NT	3.2	4.3
	MT	6.5	9.4
	LT	10.1	20.4
<b>Standardized Precipitation Index</b> (%)	NT	-8.8	-12.3
	MT	-19.7	-30.9
	LT	-30.2	-68.4
<b>Sea level rise</b> (SLR) (m)	NT	0.1	0.1
	MT	0.2	0.3
	LT	0.5	0.7

Tabella 2. Variazione delle variabili climatiche per gli scenari SSP2 4.5 (ottimistico - migliorativo) e SSP5 8.5 (pessimistico - peggiorativo) calcolati per il vicino (NT) (2021-2040), medio (MT) (2041-2060) e lungo periodo (LT) (2081-2100).

Rielaborando i dati possiamo osservare:

- **Aumento della temperatura media (T):** In entrambi gli scenari, si nota un trend in aumento della temperatura media (T) nel corso dei periodi "NT", "MT" e "LT". Tuttavia, nel caso dello **scenario SSP2 4.5**, i valori sono più contenuti e controllati rispetto allo scenario SSP5 8.5, indicando un **impatto minore delle emissioni di gas serra sulla temperatura**.
- **Aumento dei giorni con temperature superiori a 35°C e 40°C (TX35 - TX40):** Entrambi gli scenari mostrano un aumento del numero di giorni con temperature massime sopra i 35°C e 40°C nei periodi "MT" e "LT". Tuttavia, anche in questo caso, lo scenario **SSP2 4.5** presenta valori più contenuti rispetto allo scenario "SSP5 8.5", suggerendo una **minore probabilità di ondate di calore estreme**.
- **Precipitazioni negative e condizioni siccitose:** Entrambi gli scenari mostrano valori negativi per le precipitazioni totali (PR) e per l'Indice di Precipitazione Standardizzato (SPI) nei periodi "MT" e "LT". Questo suggerisce un aumento delle **condizioni siccitose nel futuro**, con una



diminuzione delle precipitazioni. Anche in questo caso, lo scenario SSP2 4.5 presenta valori meno negativi rispetto allo scenario SSP5 8.5, indicando una maggiore probabilità di avere condizioni meno severe di siccità.

- **Aumento del livello del mare (SLR):** Entrambi gli scenari indicano un aumento proiettato del livello del mare (SLR) nei periodi "MT" e "LT", ma i valori nello scenario SSP2 4.5 sono più contenuti e controllati rispetto allo scenario SSP5 8.5. Questa tendenza è coerente con le proiezioni dell'innalzamento del livello del mare legato al cambiamento climatico.

In sintesi, i dati della tabella suggeriscono che entrambi gli scenari mostrano **una tendenza in aumento della temperatura, dei giorni con temperature elevate e dell'innalzamento del livello del mare**. Inoltre, entrambi gli scenari prospettano un **futuro caratterizzato da condizioni siccitose, con una diminuzione delle precipitazioni**. Tuttavia, **lo scenario SSP2 4.5 mostra valori più contenuti** e controllati per tutte le variabili climatiche considerate rispetto allo scenario SSP5 8.5 indicando che **politiche di mitigazione e riduzione delle emissioni di gas serra potrebbero avere un impatto positivo nel limitare gli effetti del cambiamento climatico.**

#### 3.1.1.2. Impatto sui servizi ecosistemici

Come osservato, la regione del Mediterraneo è interessata da un **cambiamento climatico che porterà a perdite nei rendimenti agricoli e nel potenziale di stoccaggio del carbonio, ad un aumento dei rischi legati agli incendi e cambiamenti nella tipologia del bioma**<sup>10</sup>. I servizi ecosistemici nel Mediterraneo risultano particolarmente sensibili ad eventi o stagioni estreme, come estati molto calde e secche<sup>11</sup> così come a inverni miti, tempeste di vento e forti piogge. Inoltre, tali servizi ecosistemici sono minacciati dai cambiamenti climatici a lungo termine, come l'aridificazione e la degradazione, i quali potrebbero portare a una desertificazione irreversibile<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> Navarra, A. and Tubiana, L. (eds), 2013. *Regional assessment of climate change in the Mediterranean. Volume 1: Air, Sea and precipitation and water, Advances in Global Change Research*, Springer Netherlands, Dordrecht.

Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S. and Valentini, R., 2010. *A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index*, *Applied Geography* 30(3), 394–415

<sup>11</sup> Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabre, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S. and Thornton, P., 2013. *Carbon and other biogeochemical cycles*. in: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., et al. (eds), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge; New York, pp. 465–570.

Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., Valentini, R., Running, S., Viovy, N., Cramer, W., Granier, A., Ogé, J., Allard, V., Aubinet, M., Bernhofer, C., Buchmann, N., Carrara, A., Grünwald, T., Heimann, M., Heinesch, B., Knohl, A., Kutsch, W. et al., 2007, 'Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: A joint flux tower, remote sensing and modelling analysis', *Global Change Biology* 13(3), 634–651.

<sup>12</sup> Rubio, J. L., Safriel, U., Daussa, R., Blum, W. and Pedrazzini, F. (eds), 2009. *Water scarcity, land degradation and desertification in the Mediterranean region*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer Netherlands, Dordrecht.



Il cambiamento climatico futuro **influenzerà anche colture tipiche del Mediterraneo, come la vite, il grano duro e l'olivo<sup>13</sup>**. In particolare, si prevede che l'area adatta agli alberi di olivo subirà uno **spostamento verso nord e verso est a causa del riscaldamento e dell'inaridimento**. L'agricoltura comprende anche l'allevamento di animali, i quali saranno esposti a un aumento dello stress termico durante l'estate.

La Tabella 3 fornisce un riassunto degli stress climatici, impatti e sensibilità per i diversi servizi ecosistemici e i settori che essi supportano.

---

<sup>13</sup> Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M. and Dell'Aquila, A., 2014, 'Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers', *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(15), 5 598–5 603.

Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C. and Lionello, P., 2014. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 144, 54–68

Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C. and Lionello, P., 2015, 'Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield', *Agricultural Water Management* 147, 103–115



<i>Settore</i>	<i>Servizi Ecosistemici</i>	<i>Stress (climatici, altri)</i>	<i>Impatti/Sensibilità</i>
<i>Agricoltura, pascolo, agroforestazione</i>	Produzione di cibo (colture e bestiame)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature più elevate</li> <li>- Modelli di precipitazioni variabili</li> <li>- Stress idrico</li> <li>- Malattie</li> <li>- Erosione</li> <li>- Espansione urbana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maggiore domanda di irrigazione</li> <li>- Ridotta produttività</li> <li>- Insuccesso delle colture</li> <li>- Mortalità del bestiame</li> </ul>
<i>Agricoltura</i>	Sequestro del carbonio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature più elevate</li> <li>- Modelli di precipitazioni variabili</li> <li>- Stress idrico</li> <li>- Malattie</li> <li>- Erosione</li> <li>- Espansione urbana</li> <li>- Maggiore domanda di irrigazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ridotta produttività</li> <li>- Decomposizione della materia organica del suolo</li> </ul>
<i>Agricoltura, foreste</i>	Biocarburanti, compensazione del carbonio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature più elevate</li> <li>- Modelli di precipitazioni variabili</li> <li>- Stress idrico</li> <li>- Malattie</li> <li>- Incendi</li> <li>- Erosione/sfruttamento eccessivo</li> <li>- Espansione urbana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ridotta produttività</li> <li>- Mortalità delle colture o degli alberi</li> </ul>
<i>Selvicoltura</i>	Produzione di legname	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature più elevate</li> <li>- Modelli di precipitazioni variabili</li> <li>- Stress idrico</li> <li>- Malattie</li> <li>- Incendi</li> <li>- Erosione/sfruttamento eccessivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ridotta produttività</li> <li>- Mortalità degli alberi</li> </ul>
<i>Selvicoltura, ecosistemi terrestri</i>	Sequestro del carbonio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature più elevate</li> <li>- Modelli di precipitazioni variabili</li> <li>- Stress idrico</li> <li>- Malattie</li> <li>- Incendi</li> <li>- Erosione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ridotta produttività</li> <li>- Mortalità degli alberi</li> <li>- Decomposizione della materia organica del suolo</li> </ul>
<i>Ecosistemi terrestri e acquatici</i>	Fornitura/regolazione idrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature più elevate</li> <li>- Modelli di precipitazioni variabili</li> <li>- Stress idrico</li> <li>- Cambiamenti nella copertura del suolo</li> <li>- Degradazione del paesaggio</li> <li>- Erosione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riduzione della disponibilità di acqua</li> <li>- Maggiore domanda di acqua</li> <li>- Degradazione della qualità dell'acqua</li> <li>- Produzione di sedimenti</li> </ul>

Tabella 3. Impatti di diversi stress climatici e antropici sui servizi ecosistemici e i settori che essi supportano.



#### 4. Stressor climatici nell'area di interesse: un'analisi a scala locale

Gli *stressor* climatici più rilevanti per l'area di interesse sono le **ondate di calore e l'intensificarsi degli eventi di precipitazione estremi**, che si accompagnano ad una generalizzata riduzione delle precipitazioni nel periodo estivo. Potenziali impatti climatici di particolare rilievo saranno quelli sulla **salute**, derivanti dalle patologie legate all'aumento delle temperature, incluse le ondate di calore. Inoltre, l'aumento della temperatura porterà ad un incremento dell'**aridificazione** (perdita umidità dei suoli) nelle **aree agricole, forestali e pastorali e ad un aumento del rischio di incendi** soprattutto in zone forestali non gestite e in aree abbandonate. L'aumento degli episodi di siccità porterà ad una **riduzione della disponibilità idrica**.

Per approfondire gli *stressor* climatici che porteranno ad un aumento del rischio nell'area indagata sono stati utilizzati i seguenti strumenti: *ThinkHazard!*<sup>14</sup>, un modello web-based sviluppato dal *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* e la piattaforma *Climate-ADAPT*<sup>15</sup> sviluppata dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Europea dell'Ambiente.

La Tabella 4 riporta una panoramica degli *stressor* climatici approfonditi, dei livelli di pericolo associati, delle minacce e del livello di rischio che ne consegue. Il livello di rischio è strettamente legato al pericolo e alle minacce.

STRESSOR CLIMATICI	LIVELLO DI PERICOLO	MINACCE	LIVELLO DI RISCHIO
ALTE TEMPERATURE	Basso	Ecosistemi Salute Umana Risorse idriche Foreste	Moderato
PRECIPITAZIONI INTENSE	Basso-Moderato	Inondazioni Erosione del suolo	Moderato
SICCITA'	Basso-Moderato	Riduzione delle risorse idriche Impatti sull'agricoltura	Moderato
STRESS IDRICO	Alto	Scarsità di acqua Riduzione delle risorse idriche	Alto

<sup>14</sup> GNU General Public Licence, Version 3, 29 June 2007

<sup>15</sup> <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>



INCENDI	Basso	Incendi boschivi Perdita di biodiversità	Moderato
INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE	Alto	Inondazioni costiere Intrusione di acqua salata nelle falde acquifere Perdita di terreni agricoli costieri	Alto

Tabella 4. Rischi climatici fisici e livelli di pericolo riferiti a proiezioni future nell'area di studio.

#### 4.1. Alte temperature

Le alte temperature sono probabilmente il pericolo climatico più urgente per le città in termini di rischi per la vita umana. Il calore influisce sul benessere e può essere letale per gli anziani e le persone in gravi condizioni di salute, in particolare quando si verificano lunghi periodi di giorni caldi e notti calde (ondate di calore)<sup>16</sup>. Secondo il sesto rapporto di valutazione del gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici<sup>17</sup> le continue emissioni di gas serra causeranno un ulteriore riscaldamento, ed è praticamente certo che nei prossimi cinquant'anni ci saranno più frequenti estremi di temperatura calda sulla maggior parte delle aree terrestri. Il riscaldamento non sarà uniforme a livello regionale.

**Nell'area interessata dal progetto, l'aumento della temperatura nei prossimi cinquant'anni sarà leggermente superiore alla media mondiale. Sarebbe perciò prudente dotare i progetti in quest'area di misure di mitigazione e adattamento al riscaldamento globale.**

**Il pericolo di calore estremo nell'area di studio è classificato come moderato in base alle informazioni sul calore attualmente disponibili nel modello *ThinkHazard!* e questo significa che c'è più del 25% di possibilità che almeno un periodo di esposizione prolungata al calore estremo, con conseguente stress da calore, si verifichi nei prossimi cinque anni.**

Il modello *ThinkHazard*, nella stima di tale rischio climatico, calcola l'indice *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT, in °C) e più precisamente il massimo giornaliero WBGT. Tale indice è una misura dello stress termico alla luce diretta del sole e tiene conto di: temperatura, umidità, velocità del vento, angolo del sole e copertura nuvolosa (radiazione solare). Ha un'ovvia rilevanza per la salute umana ed

<sup>16</sup> EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

<sup>17</sup> IPCC, 2021: *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press



è rilevante in tutti i tipi di progetti e settori, compresi quelli relativi alle infrastrutture. Gli studi sullo stress da calore nella letteratura scientifica che fanno uso del WBGT applicano soglie di 28°C e 32°C per classificare il rischio di stress da calore. Le soglie di intensità del danno sono applicate seguendo questa definizione: stress da calore lieve/basso (<28°C), moderato/alto (28-32°C) e grave/molto alto (>32°C).

In Figura 7 è riportata la proiezione su 20 anni della distribuzione dell'indice WBGT in una sezione della Puglia vicina all'area di interesse. Il **valore di WBGT** nella zona di interesse è di **27,2**: **stress da calore lieve/basso**.

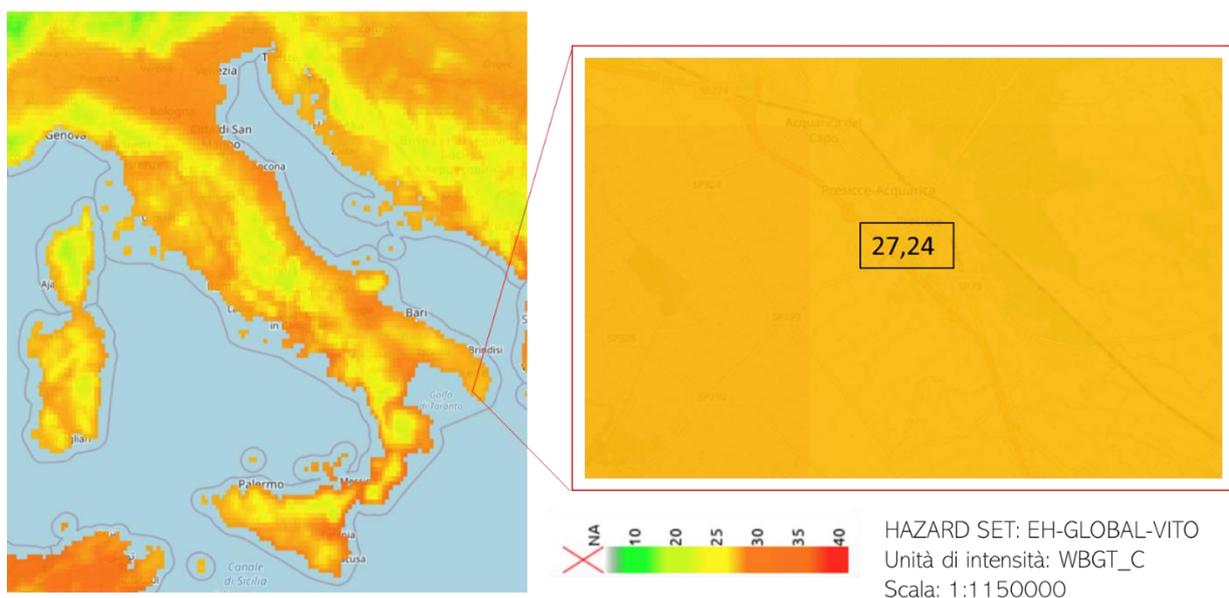


Figura 7. Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello ThinkHazard!.

#### 4.2. Precipitazioni intense

I cambiamenti previsti nelle precipitazioni intense (espressi in percentuale) in inverno (dicembre, gennaio, febbraio) sono stati calcolati a partire dai dati EURO-CORDEX: "Climate change projections for Europe based on an ensemble of regional climate model simulations provided by the EURO-CORDEX initiative" per lo scenario RCP8.5. Le simulazioni del modello climatico regionale CORDEX per il dominio europeo (EURO-CORDEX) sono condotte a due diverse risoluzioni spaziali, la risoluzione generale CORDEX di 0,4 gradi (EUR-44, ~50 km) e in aggiunta la risoluzione più fine di 0.11 gradi (EUR-11, ~12,5 km), quest'ultima utilizzata in questo set di dati<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>.



In Figura 8 è riportata la previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 basato sulla media dei risultati di diversi modelli climatici regionali annidati in diversi modelli di circolazione generale.

Per l'area di riferimento il **livello di pericolo** è **basso/moderato** con un **aumento previsto delle precipitazioni intense invernali dell'11%**.

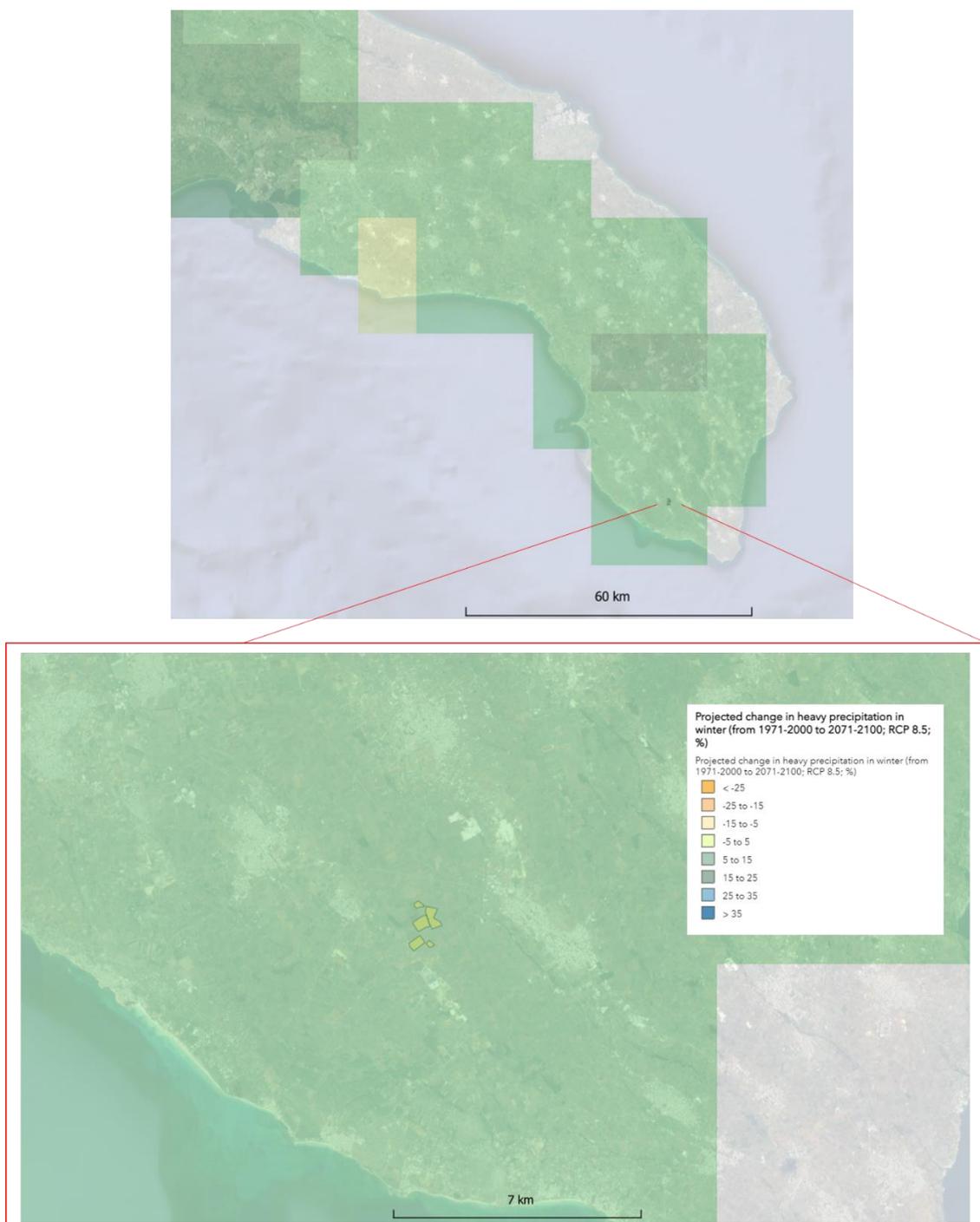


Figura 8. Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (EURO-CORDEX). L'area di studio è indicata in giallo.



### 4.3. Siccità

Nell'area d'interesse il **livello di pericolo di siccità** è classificato, secondo i modelli regionali europei, come **moderato**. Ciò significa che c'è fino al 20% di possibilità che si verifichino condizioni di siccità nei prossimi 10 anni.

La Figura 9 riporta la previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5, ottenuta con il set di dati delle simulazioni dei modelli climatici regionali fornite da EURO-CORDEX.

La siccità meteorologica si basa sull'indice di precipitazione standardizzato per tre mesi (SPI-3). Le tendenze passate si basano sui dati di precipitazione del dataset grigliato E-OBS<sup>19</sup> mentre le proiezioni si basano su un insieme di modelli del progetto EURO-CORDEX per due scenari di emissioni RCP.

Le tendenze della siccità idrologica sono calcolate in base al deflusso durante il mese più secco nel dataset E-RUN<sup>20</sup> che impiega un modello statistico per stimare il deflusso in tutta Europa, basato sul più grande database di osservazioni di flusso e sul dataset E-OBS. Le proiezioni sulla siccità idrologica si basano sul deficit idrico fluviale a 10 anni, calcolato dal modello idrologico LISFLOOD<sup>21</sup> forzato da un insieme di modelli del progetto EURO-CORDEX.

**Nell'area oggetto di studio la frequenza probabile di eventi siccitosi nei prossimi 30 anni è compresa tra 7 - 11 eventi.**

---

<sup>19</sup> <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download-charme.php>

<sup>20</sup> [https://store.pangaea.de/Publications/Gudmundsson-Seneviratne\\_2016/e-run\\_v1.1.nc](https://store.pangaea.de/Publications/Gudmundsson-Seneviratne_2016/e-run_v1.1.nc)

<sup>21</sup> *Natural Hazards Project of the Joint Research Centre of the European Commission*

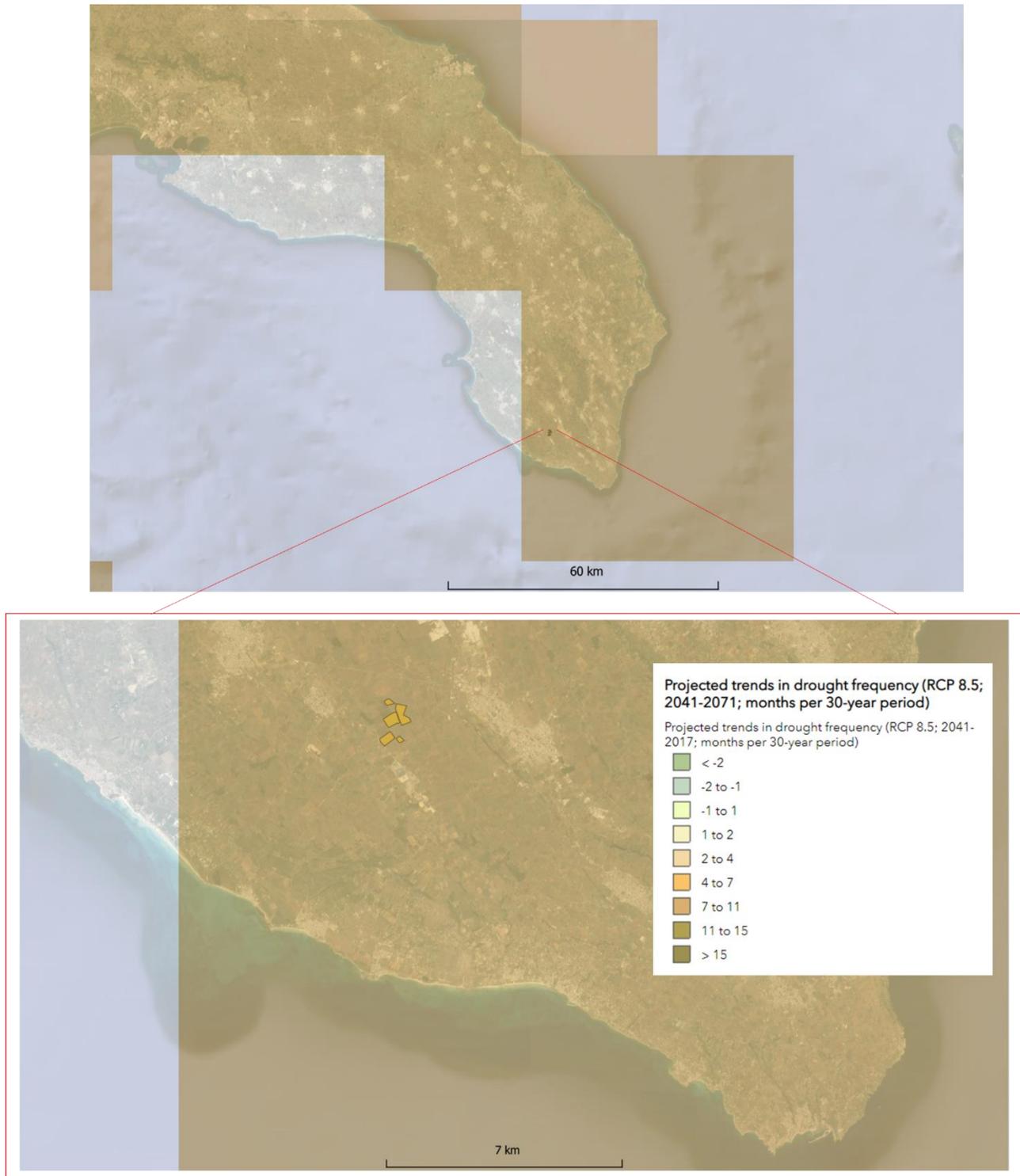


Figura 9. Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata in giallo.



#### 4.4. Indice di sfruttamento della risorsa idrica

Strettamente legato allo stress da siccità è l'indice di sfruttamento della risorsa idrica (*Water Exploitation Index plus, WEI+*) che ha lo scopo di illustrare la pressione sulle risorse idriche rinnovabili di un territorio definito in un determinato periodo (ad esempio, stagionale, annuale) come conseguenza dell'uso dell'acqua per le attività umane. I valori superiori al 20% indicano che le risorse idriche sono sotto stress, mentre quelli superiori al 40% indicano uno stress grave e un uso chiaramente insostenibile delle risorse di acqua dolce<sup>22</sup>. Il WEI+ è stato stimato come media trimestrale per distretto idrografico, per gli anni 1990-2015, come definito nell'*European catchments and rivers network system* (ECRINS).

L'indice di sfruttamento della risorsa idrica è pari al 81.3% per l'area di riferimento (Figura 10). Ciò indica un sovrasfruttamento della risorsa e che la popolazione è esposta a condizioni di stress idrico.

---

<sup>22</sup> Raskin, P., Gleick, P.H., Kirshen, P., Pontius, R. G. Jr and Strzepek, K. ,1997. Indicator codes: CSI 018, WAT 001 Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environmental Institute, Sweden. Document prepared for UN Commission for Sustainable Development 5th Session 1997 - Water stress categories are described on page 27-29.

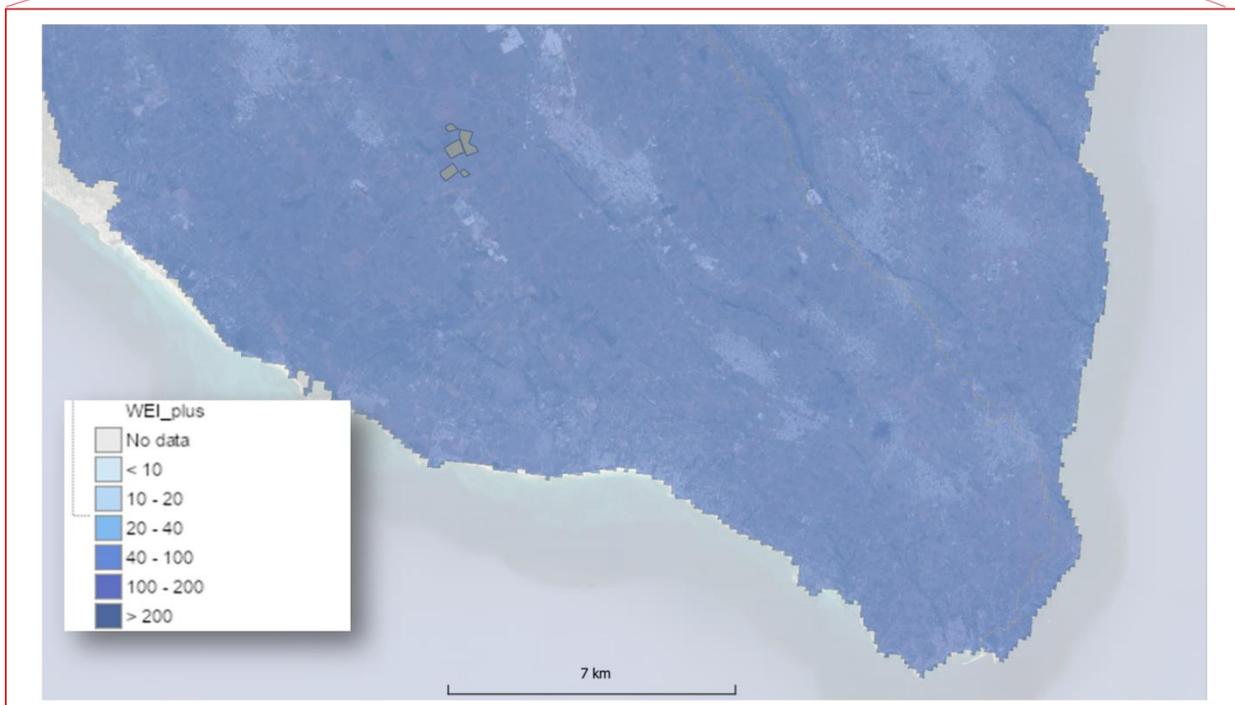
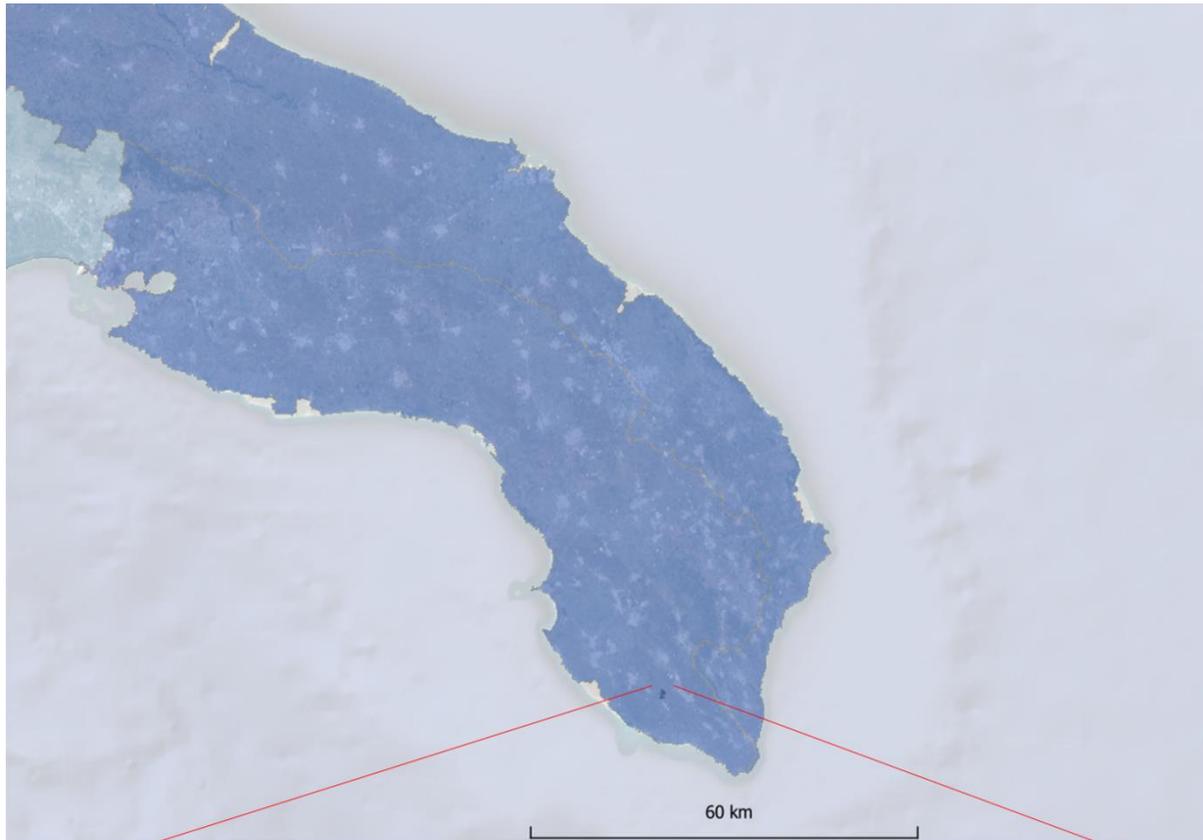


Figura 10. Indice di sfruttamento della risorsa idrica (WEI+). Fonte: *European Environment Agency (EEA)*<sup>23</sup>

<sup>23</sup> *European Environment Agency (EEA), Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), Eurostat, JRC.*



## 4.5. Incendi

Il rischio di incendi ai margini di molte città europee sta crescendo a causa del verificarsi più frequente di ondate di calore e siccità. Il più alto rischio di incendi si verifica nei paesi dell'Europa meridionale, in particolare in Portogallo, Spagna, Francia meridionale, Italia meridionale e Grecia, dove nel 2018 quasi 100 persone hanno perso la vita in incendi nella zona costiera dell'Attica<sup>24</sup>.

Il rischio incendi viene qui valutato attraverso l'indice *Forest fire danger* (pericolo di incendi forestali), una misura utilizzata per valutare il rischio di incendi in aree forestali basato su vari parametri climatici e ambientali. Nello specifico l'indice *Forest fire danger* è espresso attraverso l'indice *Seasonal Severity Rating* (SSR), che a sua volta è derivato dal *Canadian Fire Weather Index System*.

***Canadian Fire Weather Index System***: è un sistema consolidato e ampiamente utilizzato per valutare il rischio di incendi forestali in Canada, ma è stato adottato e adattato anche in molte altre regioni del mondo. Esso combina vari *fattori meteorologici*, come *temperatura, umidità, velocità del vento e precipitazioni*, per calcolare diversi indici che indicano l'essiccazione del combustibile e il potenziale di incendio.

***Seasonal Severity Rating*** (SSR): è uno degli indici derivati dal sistema sopra menzionato. Rappresenta una misura della severità stagionale degli incendi forestali. Mentre altri indici del sistema canadese potrebbero concentrarsi su condizioni giornaliere o su specifiche componenti del rischio d'incendio (come la disponibilità di combustibile o la probabilità di innesco), l'SSR fornisce una visione d'insieme della gravità prevista per una stagione di incendi, tenendo conto delle condizioni meteorologiche e della disponibilità di combustibili.

Qui, l'indice SSR è stato calcolato per le proiezioni future del clima in Europa, in base alle condizioni previste nello scenario RCP 4.5 per gli anni 2071-2100. Questo significa che sono stati utilizzati modelli climatici per prevedere come cambieranno le condizioni meteorologiche nel futuro, e che tali previsioni sono poi state applicate all'indice SSR per **stimare come il rischio di incendi forestali potrebbe evolversi in Europa nel corso della fine del 21° secolo**.

In sintesi, l'indice *Forest fire danger*, espresso attraverso l'SSR in questo contesto, fornisce una **stima della severità stagionale degli incendi forestali in Europa basata su previsioni climatiche future**.

---

<sup>24</sup> EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*



Nell'area di interesse il pericolo di incendi è classificato come **basso** secondo le informazioni attualmente disponibili, con un indice **FFD** di circa **3-4**.

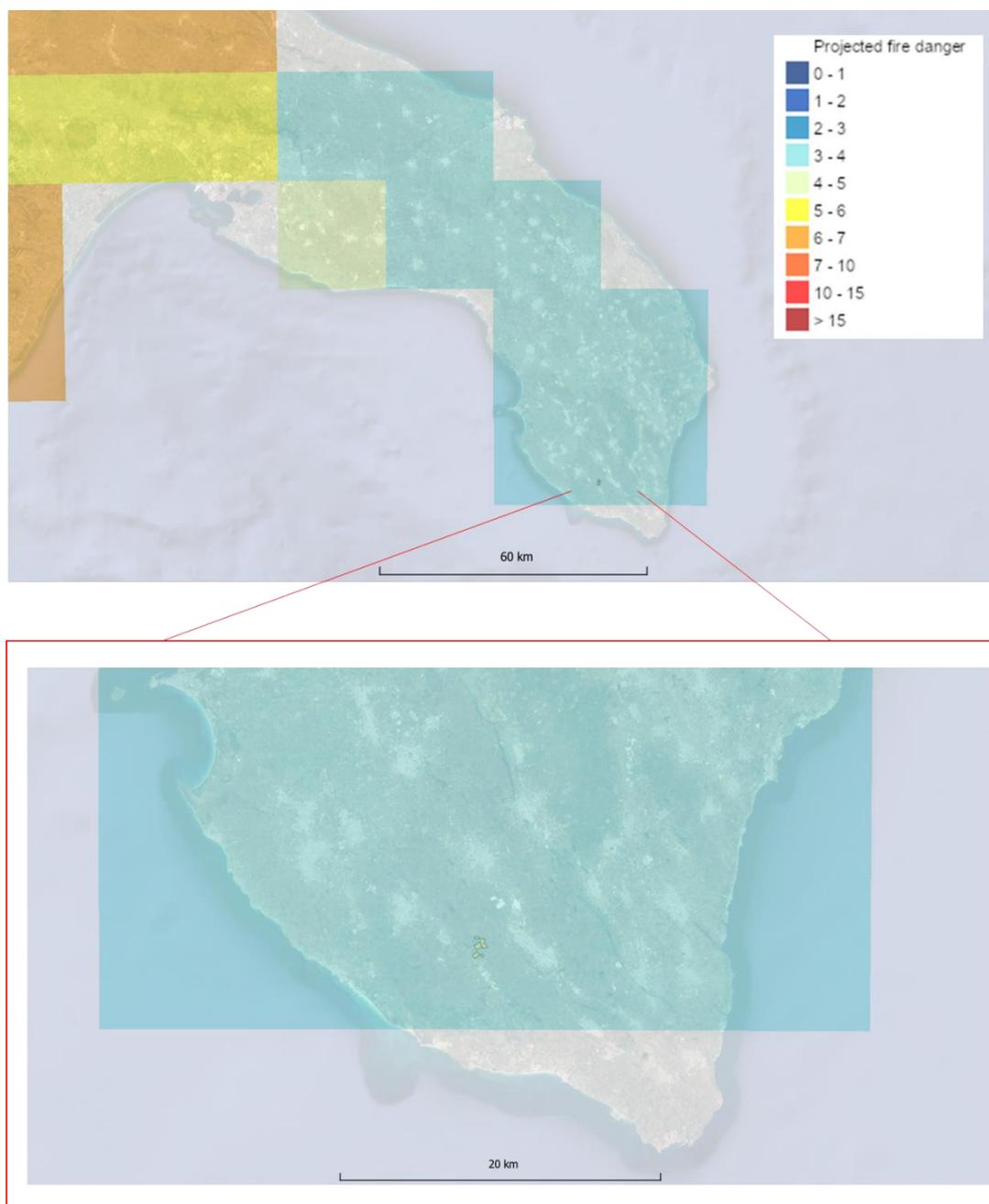


Figura 11. Previsione del rischio incendi classificato con l'indice *Forest fire danger*.

#### 4.6. Innalzamento del livello del mare

Il previsto innalzamento del livello del mare dovuto ai cambiamenti climatici avrà ripercussioni sugli insediamenti costieri, aumentando l'erosione e le inondazioni. Inoltre, l'innalzamento del livello del mare potrà compromettere la disponibilità di acqua dolce a causa dell'intrusione di acqua salata nelle falde



acquifere sotterranee. Questo fattore aumenta il livello di rischio nell'area di studio in considerazione del sovrasfruttamento delle risorse idriche analizzato nella sottosezione 4.4.

Nell'area d'interesse il livello di **rischio legato all'innalzamento del livello del mare è classificato alto, secondo i modelli regionali europei**. Ciò significa che si prevede la possibilità che onde potenzialmente dannose inondino la costa almeno una volta nei prossimi 10 anni.

La Figura 12 mostra la variazione prevista del livello relativo del mare (in metri) nel 2081-2100 rispetto al 1986-2005 per lo scenario di emissioni RCP4.5 basato su un insieme di modelli climatici innestati (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5*).

Nell'area di interesse si prevede **un innalzamento del livello del mare di 0.40 m nel periodo 2081-2100**.

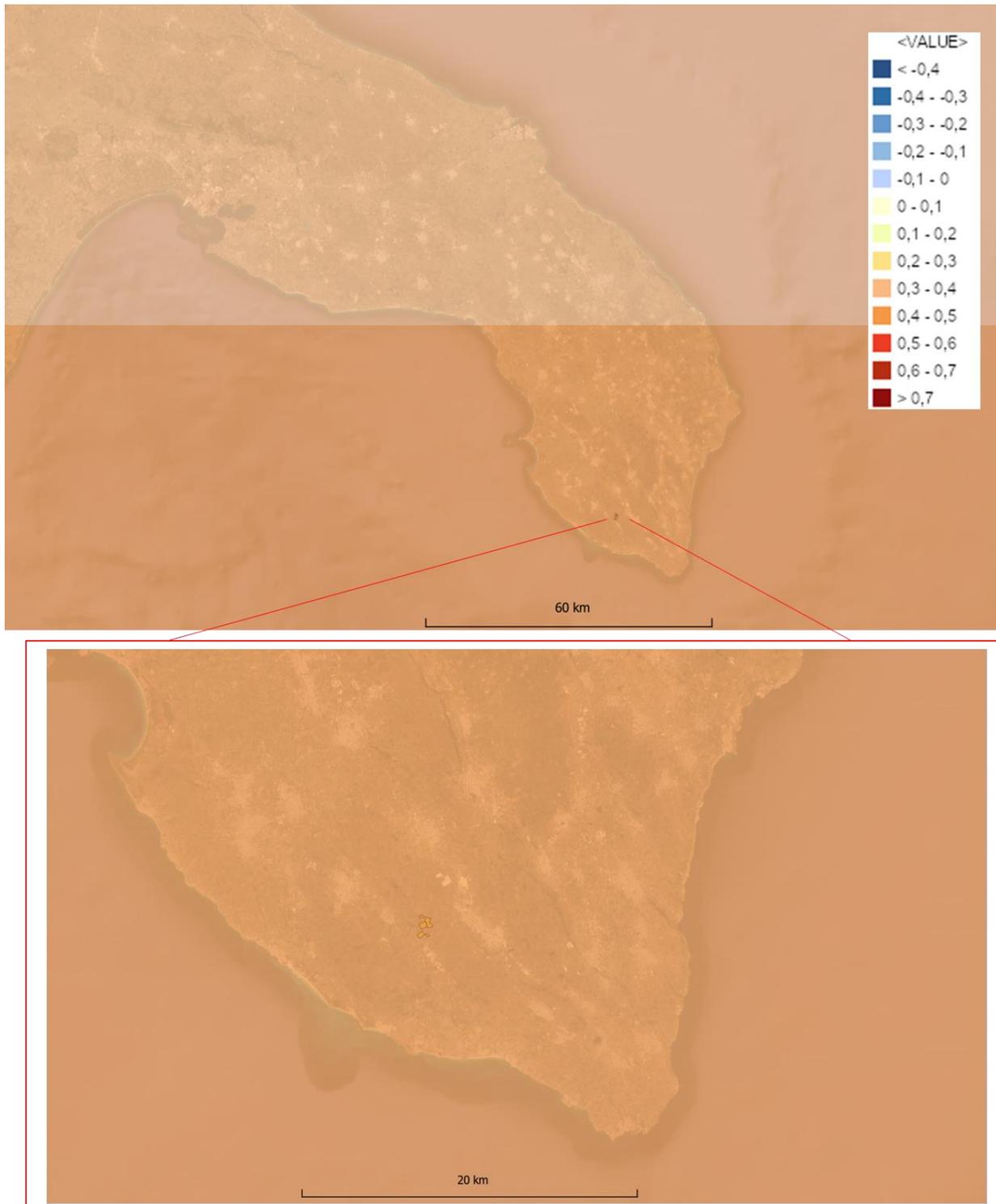


Figura 12. Previsione dell'innalzamento del livello del mare per lo scenario RCP 4.5 (Climate-ADAPT).



## 5. Resilienza dell'impianto agrivoltaico al rischio climatico: strategie di compatibilità e gestione

Per rendere il progetto agrivoltaico più compatibile con gli *stressor* climatici e **ridurre i livelli di pericolo e rischio** saranno adottate diverse strategie e misure di adattamento. Alcune delle azioni chiave considerate sono:

1. **Sistemi di irrigazione efficienti e sostenibili:** L'utilizzo di sistemi di irrigazione ad alta efficienza può contribuire a ridurre il rischio di stress idrico in caso di siccità o riduzione delle risorse idriche.
2. **Prevenzione e gestione degli incendi:** Un'adeguata prevenzione e gestione degli incendi boschivi è essenziale per ridurre il rischio di incendi. Ciò può includere la creazione di fasce di protezione, il controllo delle erbe infestanti, il monitoraggio costante e l'addestramento del personale per la gestione degli incendi.
3. **Scelta di colture adattate al clima locale:** Optare per colture adattate alle condizioni climatiche dell'area di interesse può aiutare a mitigare gli effetti negativi delle alte temperature e delle precipitazioni intense. Le colture resistenti alla siccità o alle temperature estreme possono essere preferite per garantire la stabilità del rendimento in caso di cambiamenti climatici.
4. **Conservazione del suolo:** Adottare misure per la conservazione del suolo, come la copertura vegetale e l'uso di pratiche di coltivazione sostenibili ed evitare l'erosione del suolo può aiutare a proteggere il terreno da danni e ridurre il rischio di perdita di fertilità del suolo.
5. **Pianificazione e progettazione attente all'ambiente:** Una pianificazione e progettazione che tiene conto delle condizioni microclimatiche e ambientali garantisce che il progetto agrivoltaico sia adeguatamente integrato nell'ecosistema circostante. La scelta della posizione, delle colture e delle tecnologie deve essere basata su una valutazione completa delle condizioni locali e dei possibili impatti del cambiamento climatico.

Inoltre, è importante tenere presente che il **monitoraggio continuo del clima e degli effetti del cambiamento climatico nell'area di interesse è fondamentale per adattare il progetto agrivoltaico in modo tempestivo ed efficace**. L'adozione di strategie di adattamento flessibili e la capacità di apportare modifiche in base alle nuove informazioni climatiche possono contribuire a garantire la sostenibilità e la resilienza del progetto agrivoltaico nel lungo termine.



## 6. Analisi modellistica previsionale

Per esaminare gli **impatti specifici e le interazioni dell'impianto agrivoltaico con la coltura olivicola e l'ecosistema circostante**, è stata condotta un'analisi dettagliata con il modello micrometeorologico CFD ENVI-met. Questo approccio è stato adottato in considerazione dei dati rivelati dall'analisi dei rischi climatici fisici pertinenti all'area di studio, riconoscendo la **necessità di una progettazione che sia sensibile alle variabili ecosistemiche e ambientali**. In questo contesto, una rigorosa indagine biologica e ambientale è stata integrata per analizzare:

- 1) **L'effetto del layout dell'impianto sulle colture:** una componente critica dell'interazione tra pannelli fotovoltaici e colture è rappresentata dall'ombreggiamento. Attraverso ENVI-met, sono state quantificate le ore di sole ricevute dal comparto olivicolo considerato che la fotosintesi clorofilliana, il bilancio idrico e i cicli fenologici dell'olivo possono essere sensibilmente influenzati da variazioni nell'irradiazione solare.
- 2) **L'effetto deriva dei prodotti fitosanitari:** l'uso di prodotti fitosanitari nell'oliveto richiede un'attenta considerazione delle dinamiche di dispersione atmosferica. Il modello ha permesso di analizzare le variazioni della ventilazione e l'effetto deriva su aree non target e di guidare la pianificazione delle barriere vegetazionali intorno all'impianto.
- 3) **L'impatto dell'opera sul microclima nonché gli effetti microclimatici e i servizi ecosistemici delle fasce di mitigazione:** la variazione del microclima (in termini di temperatura dell'aria, umidità relativa, temperatura del suolo, umidità del suolo ecc) è stata valutata in diversi scenari con differenti barriere vegetazionali col fine di valutarne l'efficacia e i servizi ecosistemici.

## 7. ENVI-met: set up modellistico

Attraverso un approccio olistico, ENVI-met (Bruse & Fleer, 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 l'analisi 1 e 2 sono stati simulati **quattro scenari** e quindi generate quattro diverse "Aree":

- scenario agrivoltaico senza barriera vegetazionale (**nessuna barriera**);
- scenario agrivoltaico con una barriera vegetazionale alta 2 m costituita da arbusti a siepe (**barriera siepe - h: 2m**);
- scenario agrivoltaico con una barriera vegetazionale alta 4 m costituita da arbusti a siepe (**barriera siepe - h: 4m**);
- scenario agrivoltaico con una barriera vegetazionale costituita da alberi e siepe alta 4 m (**barriera siepe - h: 4m + alberi**).

Per l'analisi 3 è stato simulato, in aggiunta ai suddetti, lo scenario attuale senza impianto agrivoltaico (**scenario attuale**).

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 1m (asse x) x 1m (asse y) x**



1m (asse z). L'area simulata in 3D (dominio computazionale) ha una dimensione di 71 m (orizzontale) x 75 m (verticale) (Figura 13), con un'altezza verticale di 25 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.

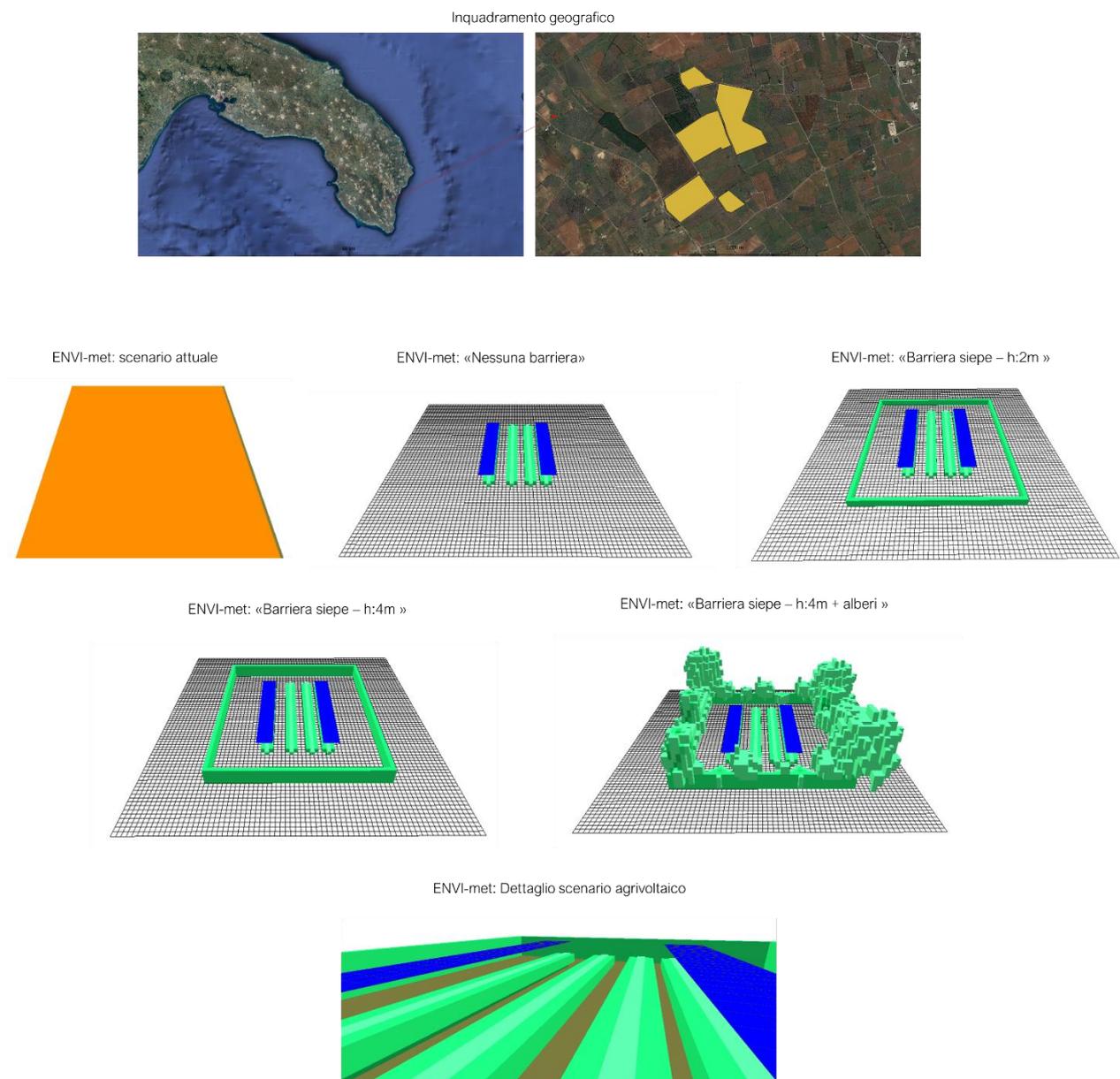


Figura 13. Area di progetto. In alto: inquadramento geografico (Base: Google satellite) con indicazione dell'area di progetto complessiva; Centro: scenari ricostruiti all'interno del modello ENVI-met; In basso: dettaglio del dominio computazionale.



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 impiegati i modelli 3D delle specie presenti disponibili nel database *Albero* di ENVI-met.



## 8. **Analisi 1:** Studio sull'effetto del layout di progetto sulle ore di sole

### 8.1. **Materiali e Metodi**

*Contesto e Obiettivo:* In un contesto di rischio climatico, la resilienza delle coltivazioni agricole, come l'olivo, è messa a dura prova, soprattutto in termini di stress termico. L'implementazione di impianti agrivoltaici emerge come un potenziale strumento per mitigare tali sfide, garantendo una produzione sostenibile e resiliente. Questo studio si propone di analizzare come il layout di un impianto agrivoltaico possa influenzare il microclima delle coltivazioni di olivo, con un particolare focus sulle ore di illuminazione solare, sia sotto il pannello che nella sezione interfilare.

ENVI-met è uno strumento avanzato di modellazione che simula in dettaglio le dinamiche microclimatiche con un sistema accurato di geolocalizzazione che assicura la specificità dell'azimut e dell'inclinazione del sole, offrendo una rappresentazione fedele delle ore di esposizione solare in una data area.

### 8.2. **Risultati**

Sono state analizzate le ore di sole per i mesi di Marzo, Giugno, Settembre e Dicembre, sia sotto i pannelli che interfilare (Figura 14).

#### **Marzo:**

- Sotto il pannello: 7.3 ore
- Interfilare: 9.5 ore
- Pieno campo: 12 ore

#### **Giugno:**

- Sotto il pannello: 9 ore
- Interfilare: 11.3 ore
- Pieno campo: 14.67 ore

#### **Settembre:**

- Sotto il pannello: 7.3 ore
- Interfilare: 9.2 ore
- Pieno campo: 11.8 ore

#### **Dicembre:**

- Sotto il pannello: 5.6 ore
- Interfilare: 7 ore



- Pieno campo: 9 ore

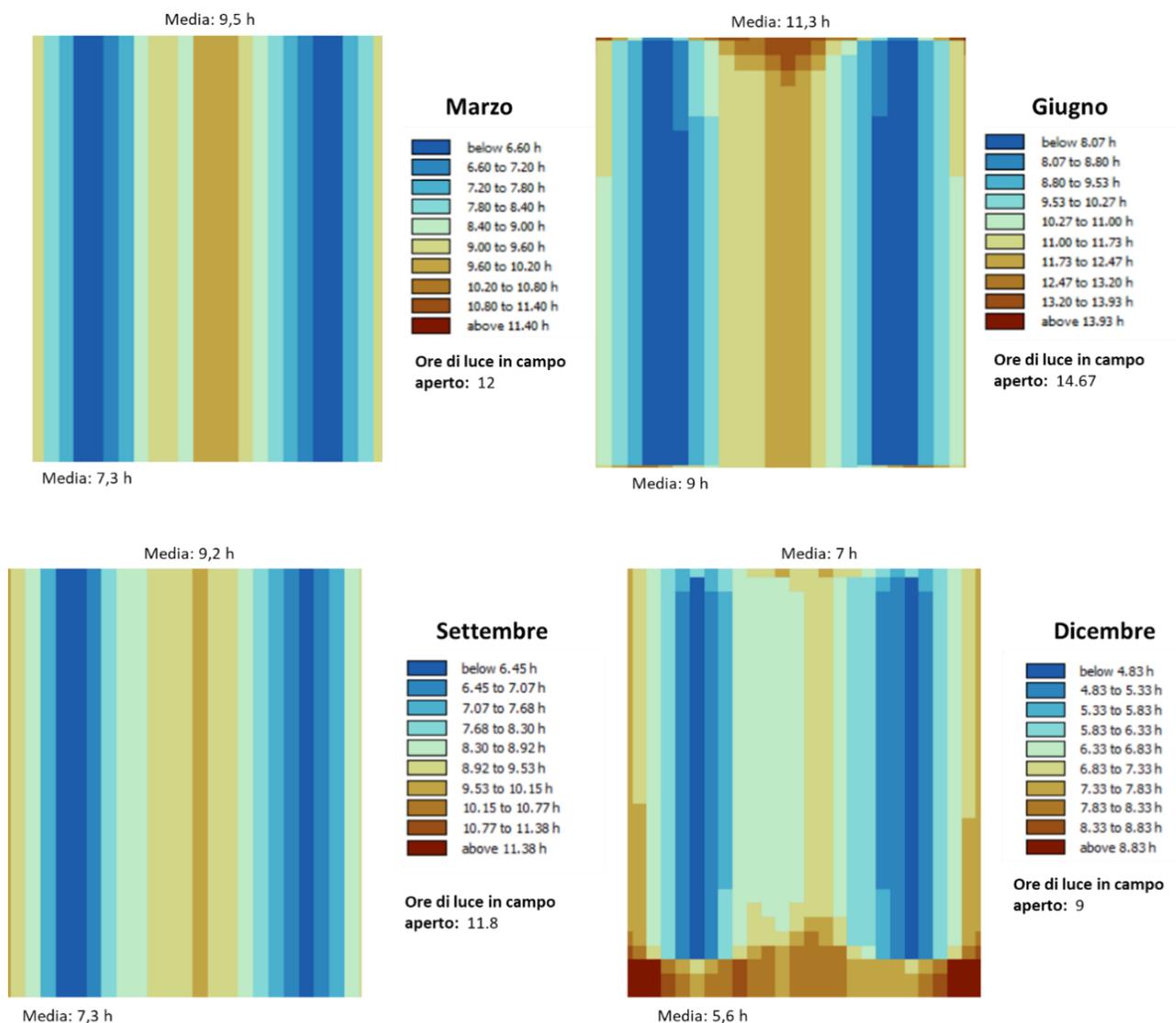


Figura 14. Media delle ore di sole in una giornata tipo del mese di Marzo, Giugno, Settembre e Dicembre nella porzione compresa tra due file di tracker.

Analizzando le ore di sole in campo agrivoltaico e confrontandole con uno scenario in pieno sole sono emerse le seguenti differenze:

**Marzo:**

- Sotto il pannello: -4.7 ore
- Interfilare: -2.5 ore

**Giugno:**

- Sotto il pannello: -5.67 ore
- Interfilare: -3.37 ore



### Settembre:

- Sotto il pannello: -4.5 ore
- Interfilare: -2.6 ore

### Dicembre:

- Sotto il pannello: -3.4 ore
- Interfilare: -2 ore

Considerate le seguenti evidenze, sebbene la letteratura scientifica sulle conseguenze dell'ombreggiamento sugli olivi sia limitata, è noto che un ombreggiamento eccessivo può influire negativamente sulla fotosintesi, la crescita e la produzione di frutti. Tuttavia, **in un contesto di cambiamenti climatici, la mitigazione dello stress termico, e quindi condizioni maggiori di ombreggiamento, potrebbe diventare cruciale per la sopravvivenza e la produttività delle colture.**

*Assenza di studi specifici:* L'interazione tra olivi e impianti agrivoltaici è un campo ancora non esplorato. L'uso della modellazione avanzata getta le basi per indagini future, fornendo dati preliminari su questa sinergia potenziale che è tuttavia necessario indagare con studi e monitoraggi specifici post operam.



## 9. **Analisi 2:** Effetti delle barriere vegetali sulla deriva dei prodotti fitosanitari, velocità del vento e implicazioni agricole in un contesto di cambiamenti climatici

L'interazione tra produzione energetica e pratica agricola comporta una serie di sfide, tra le quali l'uso e la gestione dei prodotti fitosanitari. Nel contesto dell'olivicoltura, l'uso di tali prodotti è spesso essenziale per garantire il benessere delle piante e la qualità del raccolto. In particolare, l'olivicoltura potrebbe richiedere l'uso di prodotti fitosanitari per combattere patogeni come la mosca dell'olivo o la rogna dell'ulivo. Data l'importanza di tali interventi, è fondamentale comprendere l'effetto deriva di questi prodotti per prevenire potenziali impatti sull'ambiente circostante e su colture limitrofe.

### 9.1. Obiettivi dello studio:

Attraverso la modellazione si è voluto determinare come le barriere vegetali possano influenzare la dispersione di tali prodotti e quale sia la composizione corretta delle stesse intorno all'impianto, tenendo in considerazione la dispersione dei prodotti fitosanitari e la variazione della ventilazione (in termini di velocità del vento), al fine di ridurre potenziali rischi per l'ambiente e per le coltivazioni vicine.

### 9.2. Risultati

#### Mappe di concentrazione e dispersione dei prodotti fitosanitari

Dalle mappe in Figura 15, estratte all'altezza di 1.5m alle ore 12:00, con un vento prevalente da NO, si osservano le seguenti tendenze:

- La concentrazione di inquinante a SE dell'area varia in funzione delle diverse barriere. La presenza di una barriera vegetale strutturata, composta da una siepe alta 4m intervallata da alberi, sembra ridurre la concentrazione inquinante a  $7.57 \text{ ug/m}^3$ , rispetto ai  $10.09 \text{ ug/m}^3$  con una barriera a siepe alta 2m. La concentrazione aumenta, raggiungendo i  $12.40 \text{ ug/m}^3$  con una barriera a siepe di 4m senza alberi e si attesta a  $9.76 \text{ ug/m}^3$  senza alcuna barriera.
- Nella zona centrale, dove è situata la sorgente emissiva, la concentrazione inquinante raggiunge i  $115.92 \text{ ug/m}^3$  senza barriera. L'introduzione di una barriera bassa di 2m ha il valore più basso di  $107.85 \text{ ug/m}^3$  mentre con una siepe la concentrazione è pari a  $112.72 \text{ ug/m}^3$ . Con una barriera più strutturata e fitta con presenza di alberi la concentrazione aumenta a  $123.51 \text{ ug/m}^3$ .

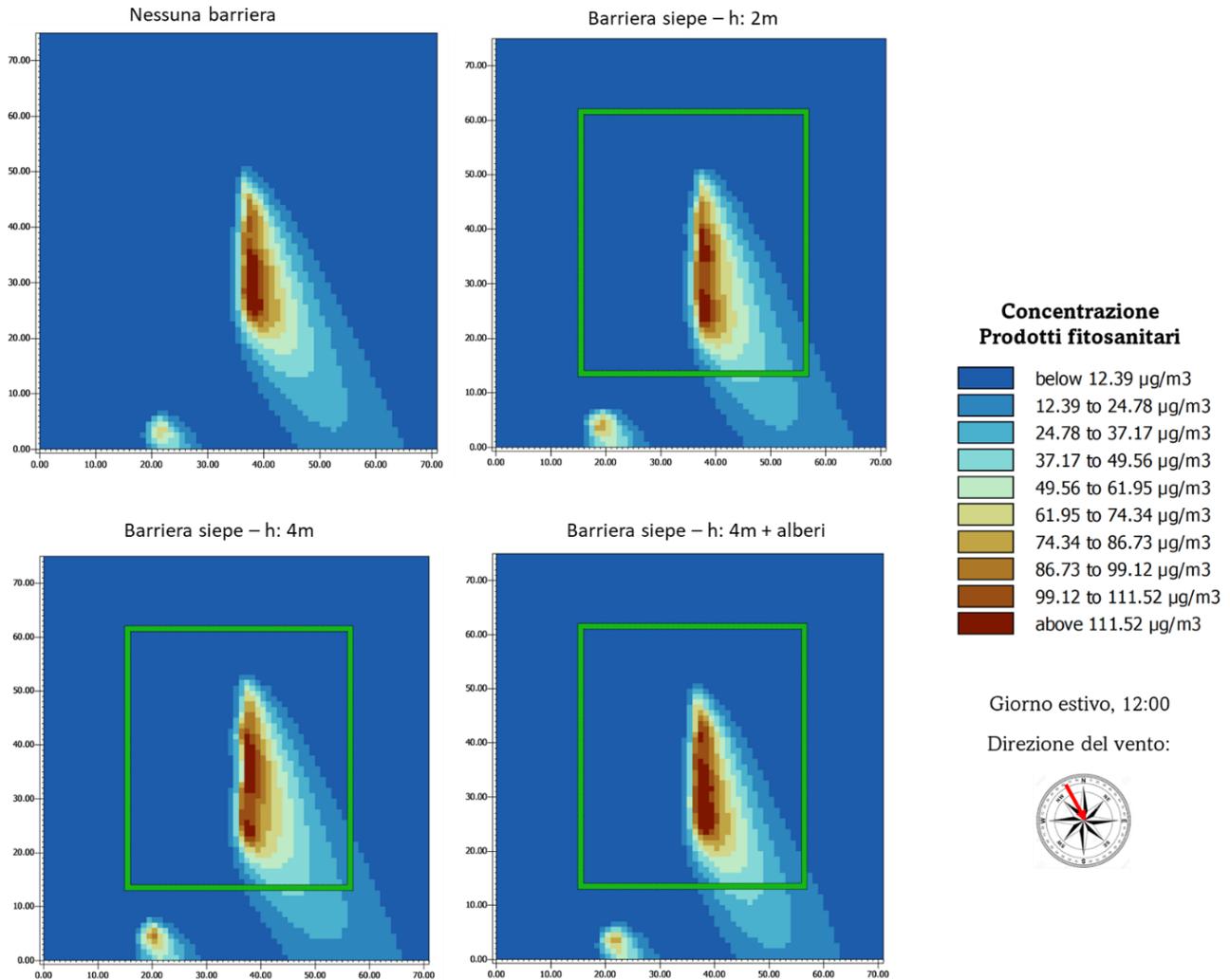


Figura 15. Mappe di concentrazione dei prodotti fitosanitari. In verde la barriera vegetale.

Da precedenti ricerche (Vos et al., 2013; Bowler et al., 2010<sup>25</sup>), sappiamo che **la vegetazione può svolgere un ruolo nella dispersione e nell'assorbimento degli inquinanti**. Le siepi e gli alberi possono agire come **barriere fisiche**, influenzando la velocità del vento e quindi la dispersione degli inquinanti (effetto aerodinamico). Allo stesso tempo, le superfici vegetative possono anche **assorbire** una certa quantità di particolato (effetto di deposizione).

Nel contesto dei nostri risultati, si osserva che una **barriera a siepe alta 2m favorisce una maggiore dispersione degli inquinanti nella zona centrale dove è collocata la sorgente**, mentre una **barriera più strutturata (siepe 4m e alberi) ha limitato la dispersione in uscita dall'area riducendo il pennacchio di**

<sup>25</sup> Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., & Pullin, A.S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.

Vos, P.E.J., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 183, 113-122.



**dispersione** e suggerendo che potrebbe efficacemente ridurre la deriva di prodotti fitosanitari verso aree non target.

La riduzione in uscita degli inquinanti sottolinea che **gli alberi** grazie alle loro dimensioni maggiori, alla complessità strutturale e alla superficie fogliare estesa, **tendono ad avere una maggiore capacità di cattura degli inquinanti atmosferici** rispetto alle siepi o ad altre vegetazioni di dimensioni minori (Tallis et al., 2011; Nowak et al., 2014; Janhäll, 2015<sup>26</sup>).

### Ventilazione e velocità del vento

I dati relativi alla velocità del vento, osservabili nelle mappe in Figura 16, nella zona centrale dell'area, dove è presente l'impianto agrivoltaico, indicano:

- Una velocità del vento di 1.69m/s in presenza di una barriera a siepe alta 2m.
- Una velocità leggermente superiore di 1.80m/s in assenza di barriere.
- Una diminuzione della velocità del vento a 1.60m/s con una barriera a siepe alta 4m e una simile velocità di 1.61m/s quando si aggiungono alberi alla barriera.

---

<sup>26</sup> Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., & Freer-Smith, P. (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 129-138.  
Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119-129.  
Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution–Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130-137.

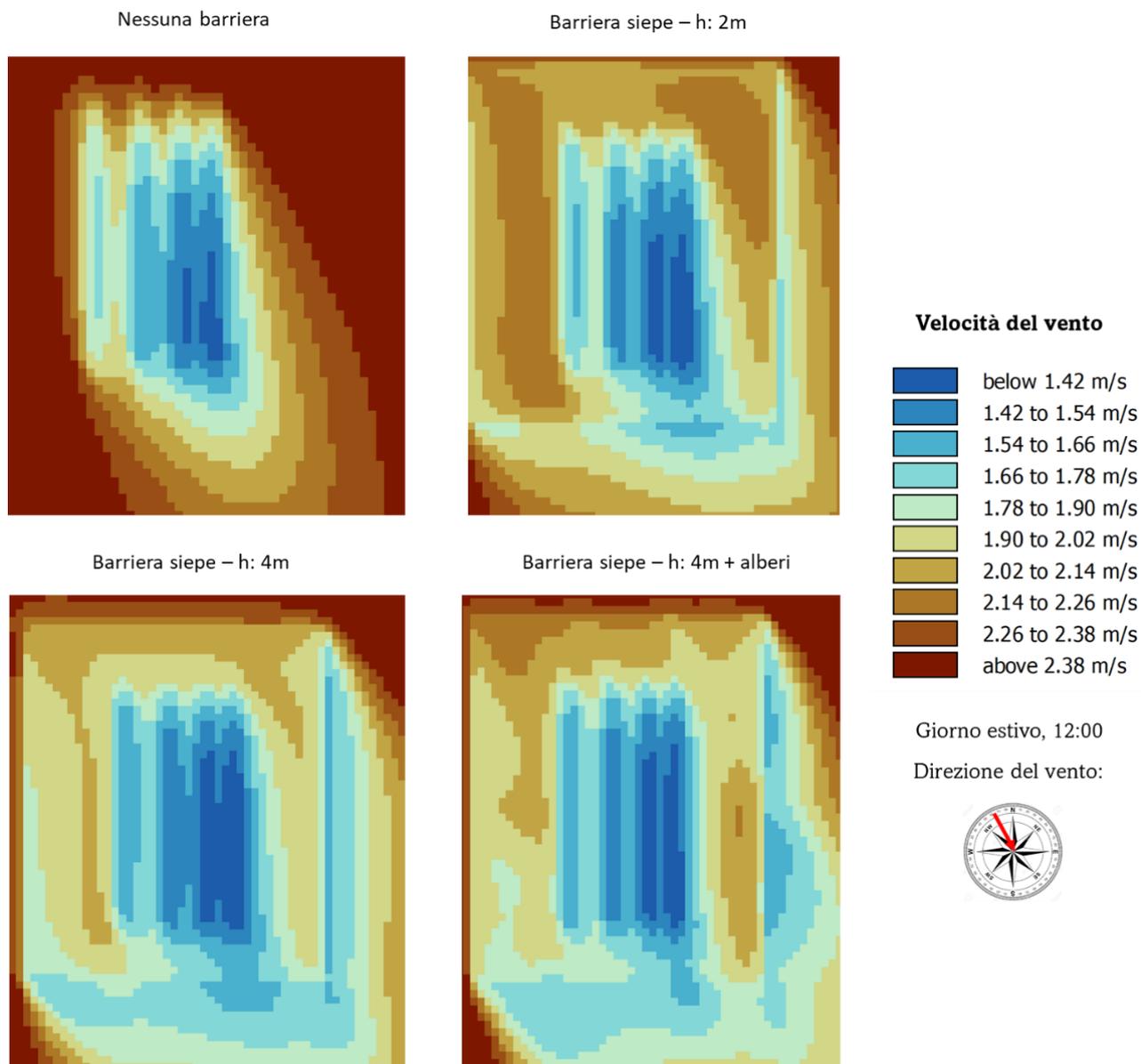


Figura 16. Mappe di distribuzione della velocità del vento.

La velocità del vento è un parametro essenziale nel determinare la dispersione degli inquinanti. La presenza di barriere vegetative, come siepi e alberi, può alterare la velocità e la direzione del vento a causa della resistenza offerta dalle piante (Gromke & Ruck, 2012<sup>27</sup>). Ciò può avere un effetto diretto sulla concentrazione di inquinanti, poiché una minore velocità del vento può limitare la dispersione degli inquinanti.

I dati mostrano che in assenza di barriere, la velocità del vento nell'area centrale interessata dall'impianto agrivoltaico è leggermente superiore (1.80m/s). Questa maggiore ventilazione porta ad una maggiore dispersione dei prodotti fitosanitari nel punto di emissione degli stessi. Una siepe di 2m

<sup>27</sup> Gromke, C., & Ruck, B. (2012). Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, 50, 130-143



di altezza sembra offrire una resistenza minima al vento, come indicato da una leggera diminuzione della velocità del vento a 1.69m/s. Barriere più alte e strutturate, come quelle di 4m con o senza alberi, riducono ulteriormente la velocità del vento a circa 1.60m/s. Questa riduzione potrebbe contribuire a una maggiore concentrazione di inquinanti vicino alla sorgente, dato che una minore velocità del vento potrebbe limitare la dispersione degli inquinanti.

### 9.3. Mitigazione della velocità del vento, cambiamenti climatici e rischi agricoli:

Con il progredire dei cambiamenti climatici, la **frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi, compresi i venti forti, sono in aumento** (Hansen et al., 2018<sup>28</sup>). Queste condizioni estreme possono avere impatti devastanti sulle coltivazioni agricole, provocando danni fisici alle piante, interrompendo la pollinazione ed esponendo le colture a ulteriori stress come la siccità e l'inondazione.

In particolare, i venti forti possono causare danni diretti alle piante, come la rottura dei fusti, la perdita di foglie e frutti, e l'erosione del suolo, che può ridurre la produttività agricola (St. Clair & Lynch, 2010<sup>29</sup>). Inoltre, l'erosione causata dai venti forti può rimuovere i nutrienti essenziali dalla superficie del suolo, diminuendo la fertilità e rendendo le terre meno produttive nel tempo (Fryrear, 1985<sup>30</sup>).

In questo contesto, **le barriere vegetali sono strumenti essenziali di adattamento ai cambiamenti climatici. Esse non solo giocano un ruolo cruciale nella mitigazione della dispersione degli inquinanti, ma servono anche come barriere fisiche contro i venti forti, riducendo la loro velocità e proteggendo le coltivazioni** (Brandle et al., 2004<sup>31</sup>). Le siepi e gli alberi possono agire come barriere frangivento, diminuendo l'intensità del vento e i suoi effetti erosivi e proteggendo le piante coltivate (Cleugh, 1998<sup>32</sup>).

#### 9.3.1. La necessità di soluzioni di compromesso:

In un contesto climatico così vario e in continua evoluzione, è essenziale trovare soluzioni di compromesso. **Le barriere vegetali offrono benefici multipli**: proteggono dall'erosione eolica, riducono l'effetto dei venti forti sulle coltivazioni e contribuiscono a limitare la dispersione degli inquinanti. Tuttavia, **è fondamentale selezionare e posizionare correttamente queste barriere**, considerando

---

<sup>28</sup> Hansen, G., Stone, D., Auffhammer, M., Huggel, C., & Cramer, W. (2018). Linking local impacts to changes in climate: a guide to attribution. *Regional Environmental Change*, 18(2), 527-540.

<sup>29</sup> St. Clair, S. B., & Lynch, J. P. (2010). The opening of Pandora's Box: climate change impacts on soil fertility and crop nutrition in developing countries. *Plant and Soil*, 335(1-2), 101-115.

<sup>30</sup> Fryrear, D.W. (1985). Soil cover and wind erosion. *Transactions of the ASAE*, 28(3), 781-784.

<sup>31</sup> Brandle, J.R., Hodges, L., & Zhou, X.H. (2004). Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry systems*, 61(1), 65-78.

<sup>32</sup> Cleugh, H.A. (1998). Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, 41(1), 55-84.



l'orientamento, la densità e la specie vegetale per massimizzare i loro benefici e minimizzare gli impatti negativi sul microclima locale (Jose, 2009<sup>33</sup>).

## 10. Analisi 3: Impatto microclimatico dell'opera e delle fasce di mitigazione

### Parametri modellistici investigati

L'impatto sul **microclima** dell'opera e del progetto di mitigazione proposto è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari in termini di **temperatura dell'aria (Tair)**, **umidità relativa atmosferica (RHair)**, **temperatura delle superfici (Tsoil)**, **capacità di ritenzione idrica (AWC)**. 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>34</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 5.

---

<sup>33</sup> Jose, S. (2009). *Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview*. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1-10.

<sup>34</sup> Höpfe, P. 1999. *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.



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 5. Scala di percezione termica PET

### 10.1. 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 negli scenari rappresentativi del progetto agrivoltaico con uno scenario di riferimento senza il progetto "Scenario attuale".

Si è osservata una diminuzione di **CO<sub>2</sub> pari a 0.12 ppm nello scenario di progetto con barriere vegetali a siepe e di 0.19 nello scenario di progetto con siepe e alberi**.

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.



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

### Temperatura dell'aria (Tair)

La Figura 17 mostra le differenze di Tair negli scenari investigati. Si osserva una diminuzione media in tutta l'area negli scenari agrivoltaici. Nello specifico, nello scenario senza barriera vegetale si ha una diminuzione di 0.5 °C mentre, con la barriera vegetale si ha un effetto di mitigazione più accentuato con una diminuzione massima della Tair con una barriera mista costituita da alberi e arbusti pari a 2.2 °C.

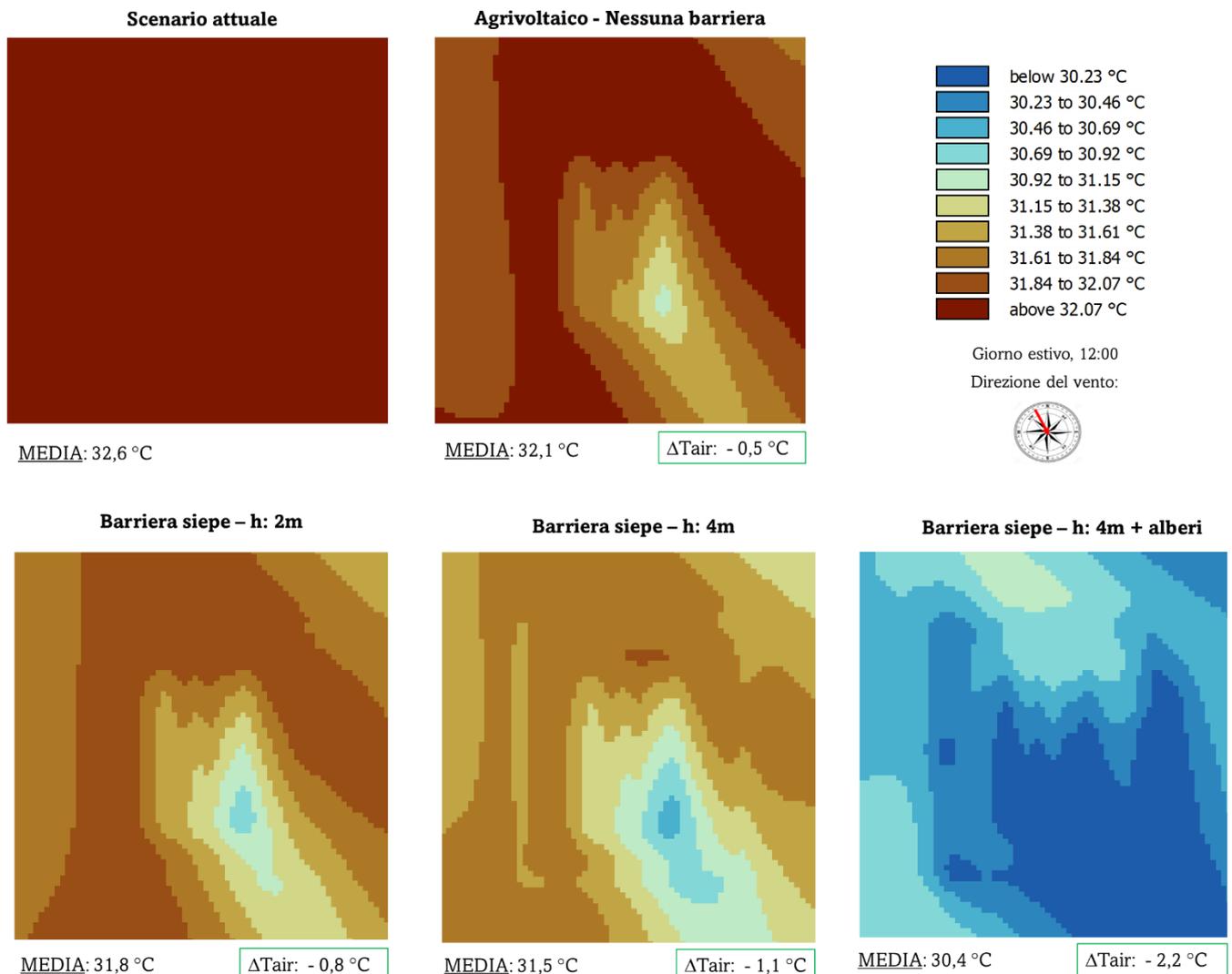


Figura 17. Mappe di distribuzione spaziale di Tair estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



### Umidità relativa atmosferica (RHair)

La Figura 18 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 negli scenari agrivoltaici. L'aumento massimo si attesta a 7,7% nello scenario con barriera vegetale composta da arbusti e alberi. E' pari al 2,5% circa, invece, negli scenari con barriera a siepe.

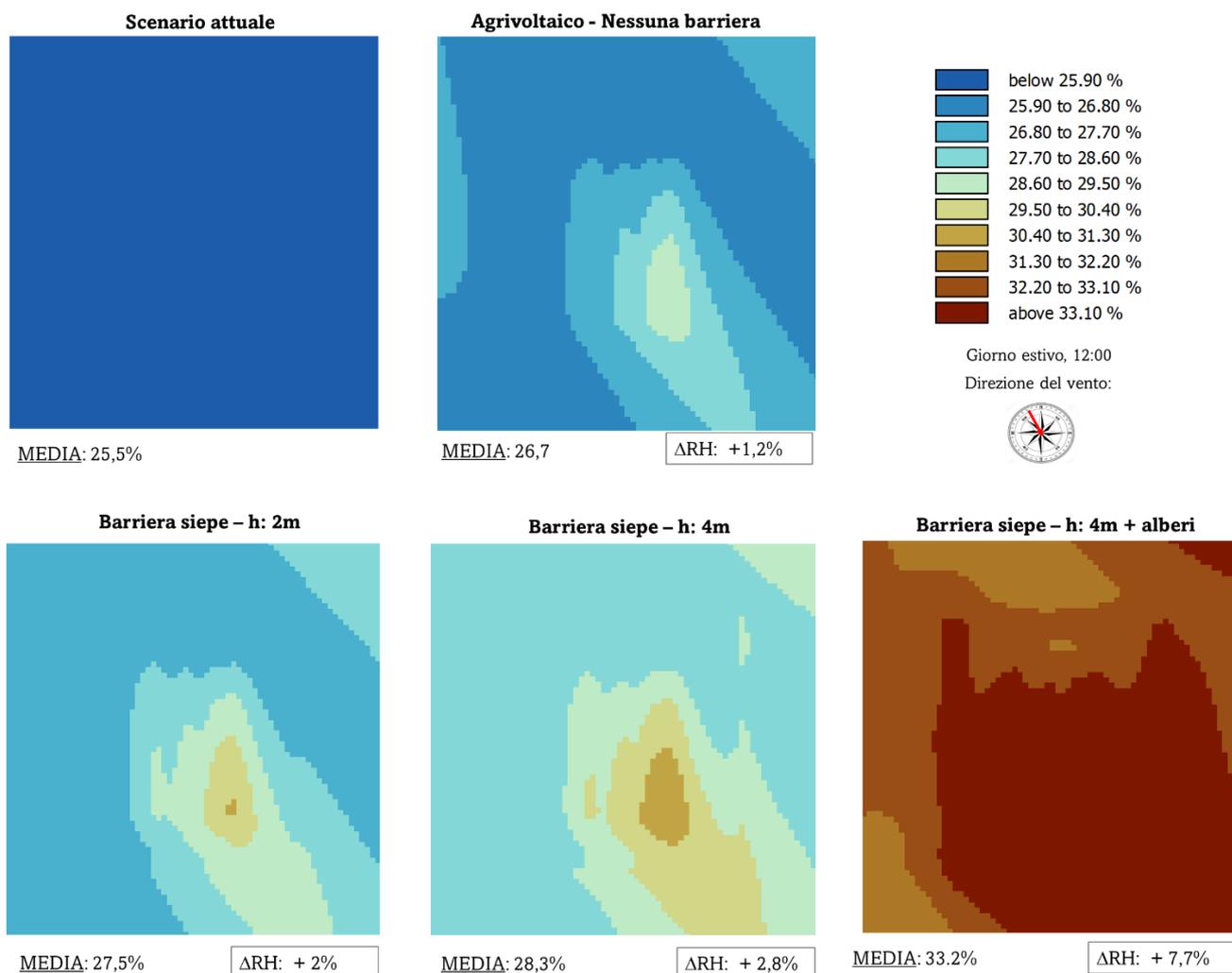


Figura 18. Mappe di distribuzione spaziale di RH estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



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

La Figura 19 mostra le differenze di  $T_{soil}$  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 di progetto senza barriera si osserva una diminuzione di 1 °C, prettamente imputabile all'ombreggiamento dei pannelli e alla coltura di olivo interfilare. Tale diminuzione si accentua con le barriere vegetazionali raggiungendo un massimo di 5,8 °C con la barriera con arbusti e alberi.

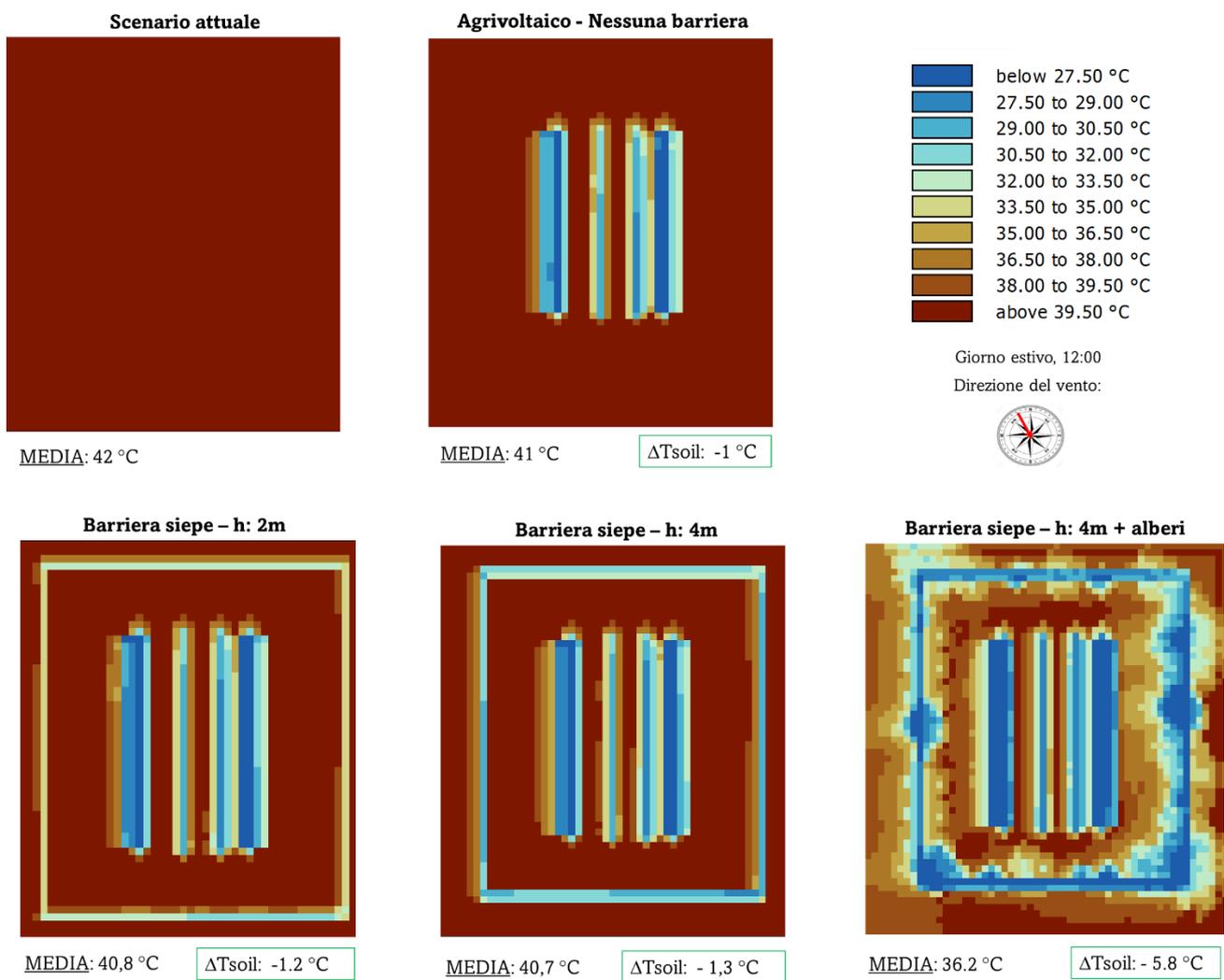


Figura 19. Mappe di distribuzione spaziale di  $T_{soil}$  estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



### Capacità di ritenzione idrica (AWC)

La AWC si riferisce alla capacità di un suolo di immagazzinare acqua disponibile per le piante. Più specificamente, rappresenta la differenza tra il contenuto d'acqua del suolo al punto di capacità di campo (dopo che l'eccesso di acqua è drenato via) e il punto di appassimento permanente (il contenuto d'acqua del suolo al quale le piante non possono più estrarre acqua sufficiente per le loro esigenze). È una misura chiave delle proprietà fisiche del suolo e può influenzare la capacità delle piante di sopravvivere e prosperare in determinate condizioni microclimatiche. Un AWC elevato indica che il suolo ha una buona capacità di fornire acqua alle piante, mentre un valore basso potrebbe indicare un rischio maggiore di stress idrico per la vegetazione.

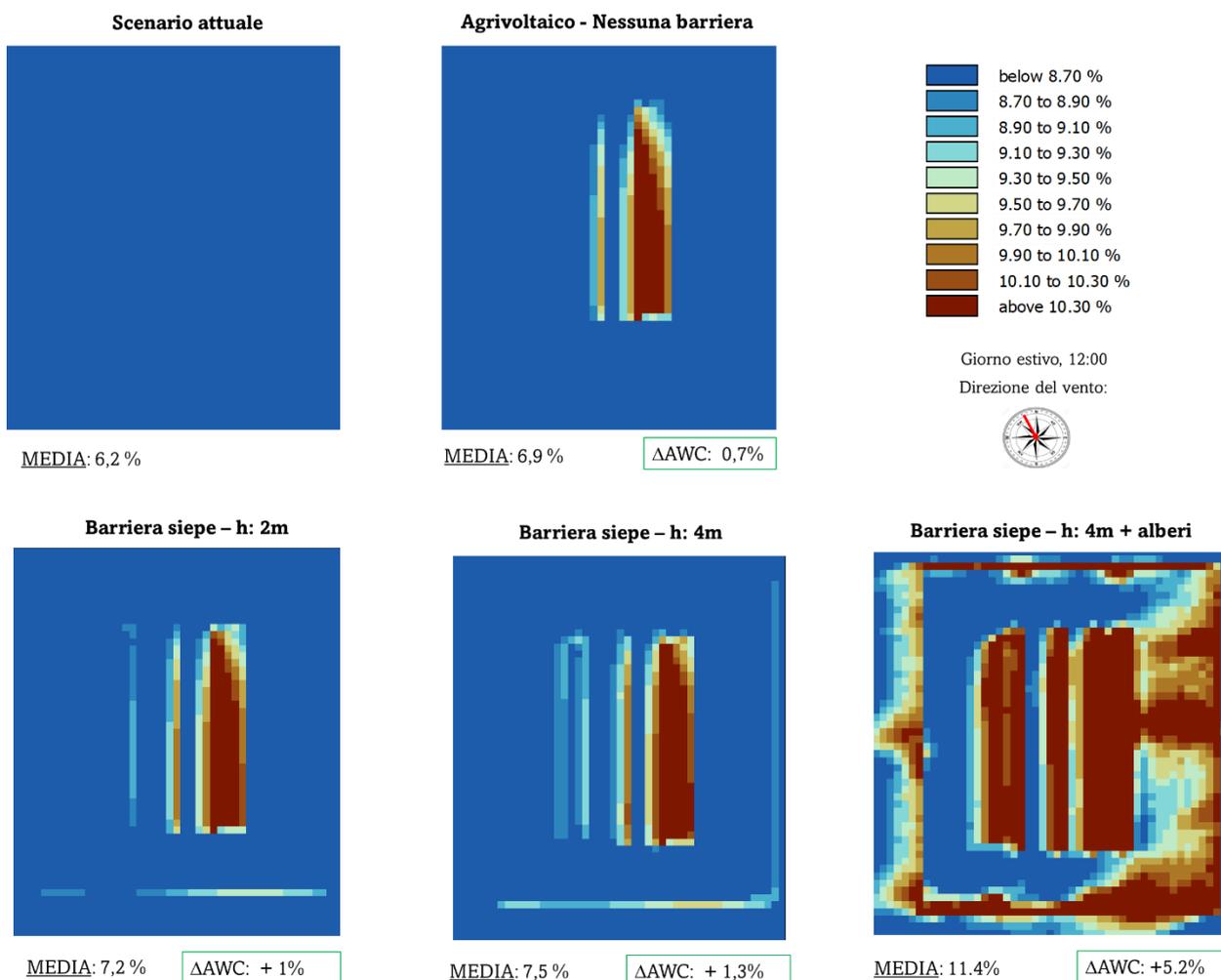


Figura 20. Mappe di distribuzione spaziale di AWC estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



Dalle mappe in Figura 20 emerge che i sistemi agrivoltaici portano ad un aumento della AWC. In particolare, si osserva:

- **Aumento della AWC senza barriera (+0.7%):** Questo lieve aumento può essere attribuito all'ombreggiamento fornito dai pannelli solari. I pannelli possono ridurre l'evaporazione diretta dal suolo, mantenendo un maggiore contenuto di umidità nel terreno sottostante.
- **Aumento con barriera vegetale a siepe (+1% e +1,3%) e Aumento massimo con barriera vegetale composta da arbusti e alberi (+5.2%):** Questo significativo aumento dell'AWC può dipendere da vari fattori:
  - **Maggiore ombreggiamento:** Gli arbusti e gli alberi, essendo di dimensioni maggiori rispetto alle siepi, possono fornire un ombreggiamento più consistente.
  - **Profondità delle radici:** Gli alberi e gli arbusti hanno radici più profonde rispetto alle siepi, che possono migliorare la struttura del suolo e aumentare la sua capacità di trattenere l'acqua.
  - **Effetto microclimatico:** la maggiore quantità di vegetazione, come visto nelle mappe precedenti, modifica il microclima locale in termini di umidità, temperatura e velocità del vento, offrendo condizioni più favorevoli per la conservazione dell'acqua nel suolo.



### Temperatura Equivalente Potenziale (PET)

La Figura 21 mostra le differenze di PET nei due scenari investigati. Si osserva che, negli scenari di progetto il comfort termico migliora di 1,5 °C (Scenario senza barriera) e 1,7 e 2,2 °C (Scenari con barriera a siepe) in media in tutta l'area e 4 °C Scenario con barriera con arbusti e alberi.

Le alte temperature sono dovute alla scelta di un caldo giorno estivo e in linea con gli studi già presenti nella letteratura scientifica.

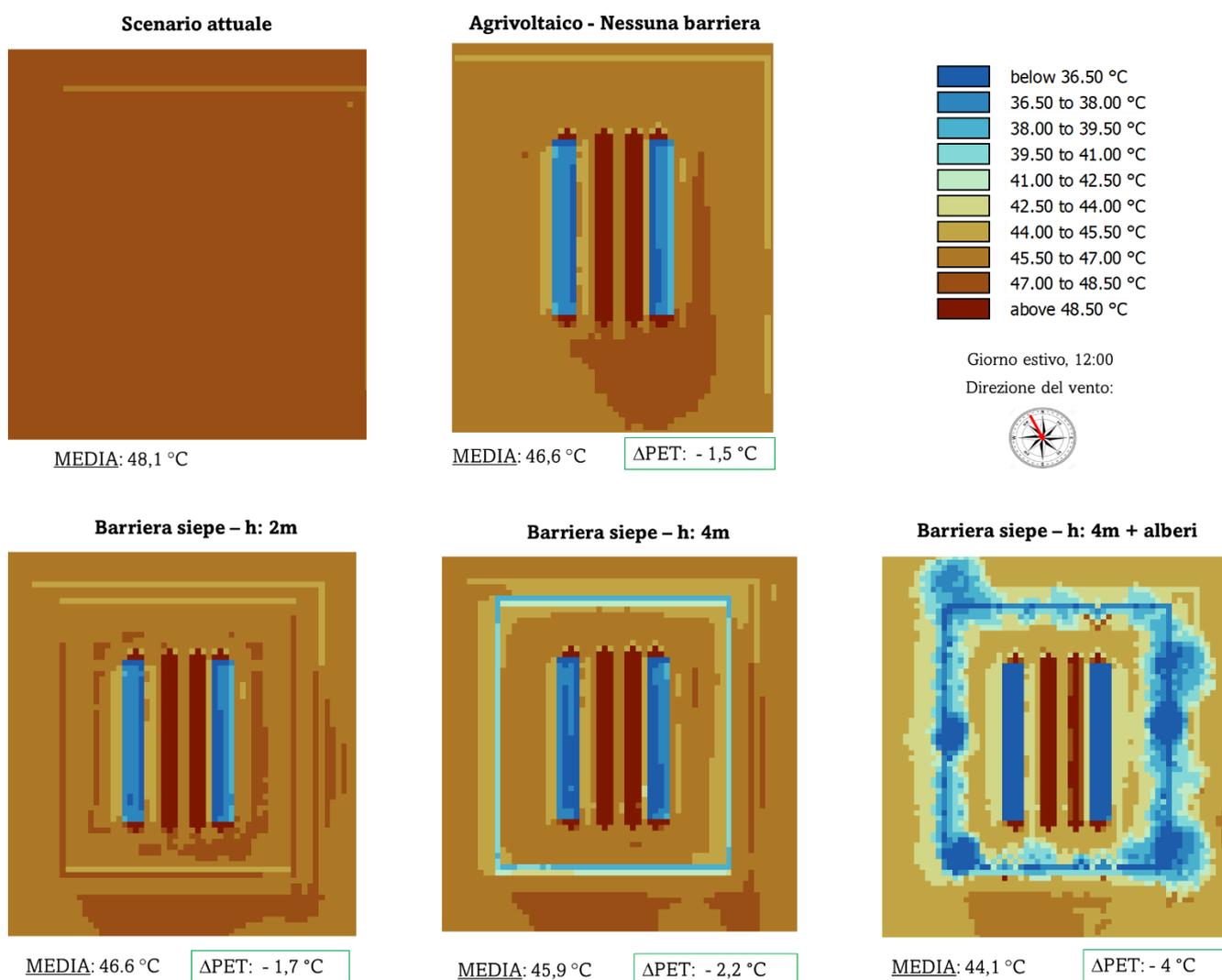


Figura 21. Mappe di distribuzione spaziale di PET estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



## 11. 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 nel comune di Presicce Acquarica.**

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 2.2 °C della temperatura dell'aria, una diminuzione della temperatura del suolo fino a 6 °C e un aumento della capacità di ritenzione idrica fino al 5%.** Tali cambiamenti microclimatici si traducono in un **miglioramento del comfort termico con una diminuzione termica massima percepita pari a 4 °C.**

Questo raffreddamento ha due ragioni principali negli scenari investigati: l'ombra dei moduli fotovoltaici e delle specie vegetali scelte nonché l'effetto evapotraspirazione delle stesse, ed è in linea con quanto riscontrato in letteratura scientifica<sup>35</sup>.

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.

---

<sup>35</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.*



	Parametro	Scenario attuale	Agrivoltaico – nessuna barriera	Barriera a siepe – H: 2m	Barriera a siepe – H: 4m	Barriera a siepe – H: 4m + alberi	Impatto
MICROCLIMA	Temperatura dell'aria (°C)	32.6	32	31.8	31.5	30.4	Positivo
	Umidità relativa (%)	25.5	26.7	27.5	28.3	33.2	Non rilevante considerare le specie vegetali da mettere a dimora.
	Temperatura superficiale (°C)	42	41	40.8	40.7	36.2	Positivo
	Capacità di ritenzione idrica (%)	6.2	6.9	7.2	7.5	11.4	Positivo
COMFORT TERMICO	<i>Physiological Equivalent Temperature</i> (°C)	48.1	46.6	46.4	45.9	44.1	Positivo.
QUALITA' DELL' ARIA	CO2 (ppm)	400	399	399	399	399	Positivo

Tabella 6. Sintesi dei risultati emersi dalla simulazione modellistica previsionale.



Alla luce dei risultati ottenuti e considerando le evidenze emerse nella relazione “*Analisi di rischio climatico*”, è possibile trarre alcune osservazioni approfondite riguardo all'implementazione dell'agrivoltaico di progetto:

### 1. Benefici climatici e ambientali:

Il sistema agrivoltaico analizzato fornisce una soluzione efficace per **contrastare le crescenti sfide climatiche**. La significativa riduzione della temperatura dell'aria e del suolo, soprattutto in presenza di una barriera vegetale, potrebbe avere un ruolo cruciale in situazioni di forte stress termico e di ondate di calore.

Il progetto agrivoltaico, inoltre, 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 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**.

### 2. Sostenibilità e gestione delle risorse idriche:

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.

### 3. Integrazione ecologica:

La presenza della **barriera vegetale di mitigazione** all'interno del sistema agrivoltaico promuove un'interazione sinergica tra la tecnologia e la natura. Ciò potrebbe favorire la **biodiversità**, offrendo habitat per una varietà di specie e potenziando gli ecosistemi locali. Inoltre, come osservato, **potenzia tutti i servizi ecosistemici microclimatici**.



#### 4. Benefici energetici e agricoli:

La riduzione della temperatura del suolo potrebbe influenzare positivamente la **produttività delle colture**, dato che temperature troppo elevate possono danneggiare la crescita delle piante.

#### 5. Comfort termico e benessere umano

I cambiamenti microclimatici indotti dal progetto agrivoltaico hanno un impatto significativo sul **comfort termico**. Si registra una diminuzione massima di 4 °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**.

Il presente studio ha esplorato **l'effetto delle barriere vegetali sulla dispersione dei prodotti fitosanitari** in olivicoltura, considerando variabili come la composizione, l'altezza e la densità della vegetazione. Da tale studio è emerso che:

- La presenza di barriere vegetali, in particolare **siepi alte 4m intervallate da alberi**, ha mostrato **una notevole capacità di riduzione della concentrazione inquinante**. Tali barriere sembrano limitare efficacemente la dispersione dei prodotti fitosanitari nelle aree circostanti.
- La **dimensione e la complessità strutturale degli alberi** amplificano la **capacità di cattura degli inquinanti atmosferici**, suggerendo **l'importanza di una combinazione di siepi e alberi per massimizzare l'assorbimento degli inquinanti**.

I risultati ottenuti offrono **preziose indicazioni sulla scelta e la disposizione ottimale della vegetazione per le strategie di mitigazione**. In particolare, suggeriscono le seguenti linee guida:

- ✓ È preferibile posizionare siepi di altezza ridotta a nord-ovest (NO) per garantire una ventilazione ottimale all'entrata del campo agrivoltaico;
- ✓ A sud-est (SE), è consigliabile utilizzare una combinazione di siepi e alberi, allo scopo di massimizzare l'assorbimento degli inquinanti e ridurre al minimo l'effetto deriva dei prodotti fitosanitari.

Il presente studio fornisce evidenze concrete sugli impatti positivi del progetto agrivoltaico a Presicce Acquarica, 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.**