

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL NUOVO PARCO AGRI-NATURALISTICO-VOLTAICO
DELL'ALTA MURGIA E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN
LOCALITA' MASSERIA CAPUTI
COMUNE DI MINERVINO MURGE (BAT)
DENOMINAZIONE IMPIANTO - PVA005 MINERVINO - MASSERIA CAPUTI
POTENZA NOMINALE 55 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

PROGETTAZIONE E SIA

HOPE engineering

ing. Fabio PACCAPELO

ing. Andrea ANGELINI

arch. Gaetano FORNARELLI

dott.ssa Anastasia AGNOLI

AGRONOMIA E STUDI COLTURALI

dott.ssa Lucia PESOLA

STUDI SPECIALISTICI E AMBIENTALI

MICROCLIMATICA
dott.ssa Elisa GATTO

ARCHEOLOGIA
dott.ssa Domenica CARRASSO

GEOLOGIA
Apogeo Srl

ACUSTICA
dott.ssa Sabrina SCARAMUZZI

FAUNISTICA
dott. Fabio Mastropasqua

INSERIMENTO PAESAGGISTICO

Studio ALAMI

Arch.Fabiano SPANO

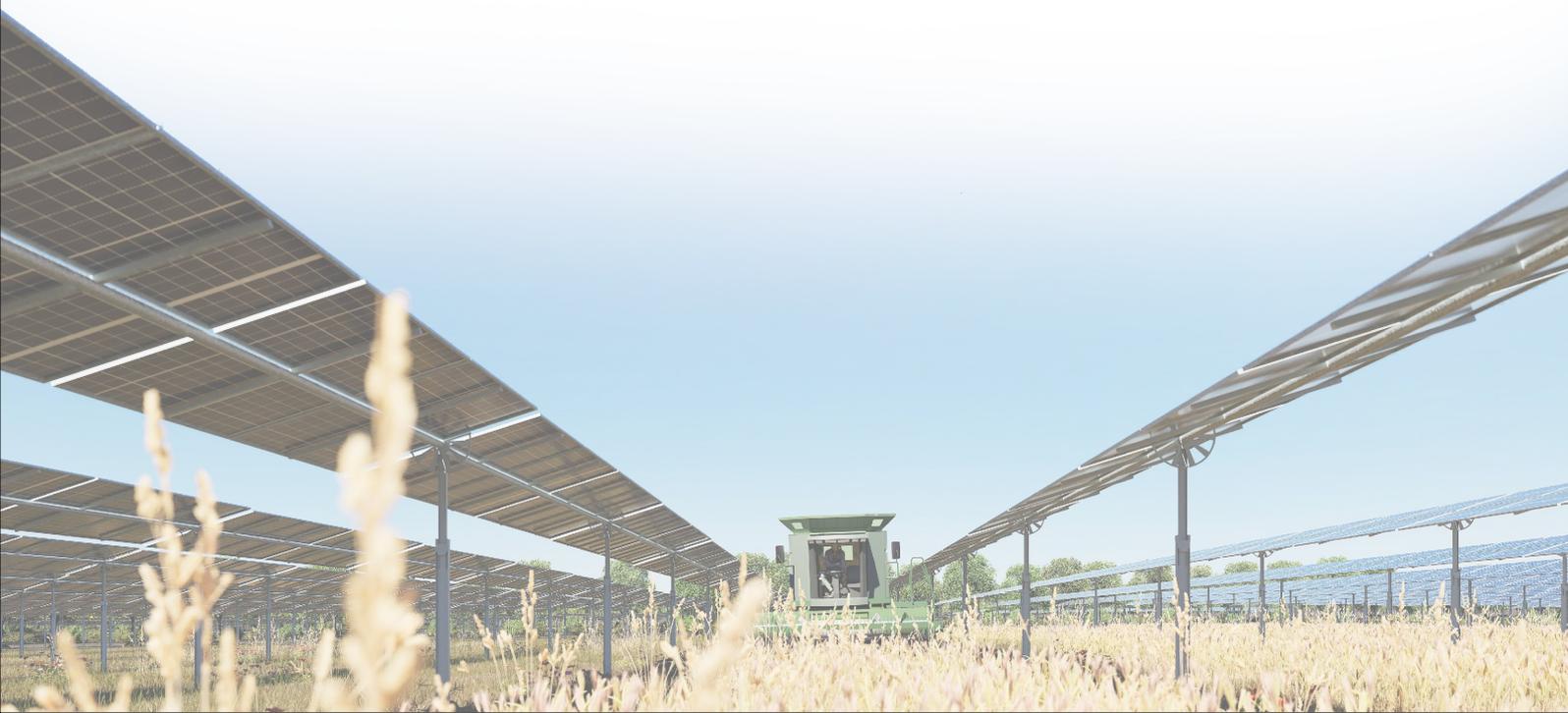
Arch. Valentina Marta RUBRICHI

Arch. Susanna TUNDO

R.2 RELAZIONI SPECIALISTICHE

R.2.9 Analisi microclimatica del sito

REV.	DATA	DESCRIZIONE
	02-24	prima emissione



Sommario

Introduzione e nota metodologica	4
1. Inquadramento meteo-climatico	5
1.1. Caratterizzazione climatica: gli indicatori climatici	8
1.1.1. Continentalità / oceanicità	9
1.1.2. Aridità / Umidità	11
1.1.2.1. Pluviofattore di Lang	11
1.1.2.2. Indice di De Martonne	11
1.1.2.3. Indice di Crowther	12
1.1.2.4. Indice bioclimatico di J. L. Vernet	13
1.1.2.5. Indice FAO	13
1.1.2.6. Quoziente pluviometrico di Emberger	14
1.2. Caratterizzazione climatica: i risultati per l'area di interesse	14
1.3. Climogrammi	15
1.3.1. Diagramma ombrotermico	16
1.3.2. Diagramma Walter & Lieth	16
1.3.3. Climogramma di Peguy	18
2. Analisi dei rischi climatici fisici	18
2.1. Proiezioni climatiche future: un'analisi a scala regionale	19
2.1.1. Proiezioni CMIP6	19

Scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5	20
3.1.1.1..... Variazione delle principali variabili climatiche	20
3.1.1.2. Impatto sui servizi ecosistemici	23
4. Stressor climatici nell'area di interesse: un'analisi a scala locale	26
4.1. Alte temperature.....	27
4.2. Precipitazioni intense	28
4.3. Siccità.....	30
4.4. Indice di sfruttamento della risorsa idrica	31
4.5. Incendi.....	33
4.6. Innalzamento del livello del mare	34
5. Resilienza del parco agri-naturalistico-voltaico al rischio climatico	36
5.1. Strategie di progettazione e gestione.....	36
5.2. Analisi dei servizi ecosistemici degli interventi di potenziamento ecologico.....	37
5.3. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica.....	45
5.3.1. Analisi modellistica previsionale.....	45
ENVI-met: set up modellistico	45
Parametri modellistici investigati	47
Calcolo del comfort termico: l'indice Temperatura fisiologica equivalente PET	47
5.3.2. Risultati.....	49
5.3.2.1. Le mappe tematiche.....	50
Temperatura dell'aria (Tair)	50
Umidità relativa atmosferica (RHair)	52

<i>Temperatura superficiale (T_{surf})</i>	53
<i>Temperatura fisiologica equivalente PET</i>	54
6. Conclusioni	57

Introduzione e nota metodologica

Il presente elaborato tecnico è finalizzato allo **studio e la caratterizzazione della condizione climatica e dei mutamenti prevedibili** della stessa in un'area sita nel territorio comunale di **Minervino Murge (BAT, Italia)** da destinare alla realizzazione del progetto **denominato “Parco Agri Naturalistico Voltaico dell'Alta Murgia”**.

Nello specifico, nell'analisi si perseguirà un **obiettivo bilaterale**: da una parte, si tratterà un **profilo preciso del clima presente e futuro dell'area** di interesse mediante lo studio di proiezioni climatiche; dall'altra, si **quantificheranno e valuteranno i servizi ecosistemici generati dalle azioni di potenziamento ecologico** implementate nel progetto, al fine di valutare il contributo delle stesse nel **raggiungimento degli obiettivi climatici e nella mitigazione dei rischi individuati**.

In questo contesto, il lavoro 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 Climatici¹.

Nello specifico, tale studio tiene conto degli **Orientamenti tecnici sull'applicazione del principio “non arrecare un danno significativo”²** a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e resilienza³ 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. L'analisi condotta è inoltre conforme agli **Orientamenti tecnici per infrastrutture a prova di clima nel periodo 2021-2027 (2021/C 373/01)** e si configura come una documentazione consolidata di **screening climatico/resa a prova di clima**.

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.

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

² 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.

³ 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»)”

1. Inquadramento meteo-climatico

Secondo la classificazione di Köppen - Geiger⁴, l'areale in oggetto, sito nel comune di Minervino Murge (BAT), è inquadrabile nella zona "Cfa" (clima subtropicale umido o clima temperato caldo), una zona climatica caratterizzata da estati calde e umide e inverni da freschi (Figura 1).

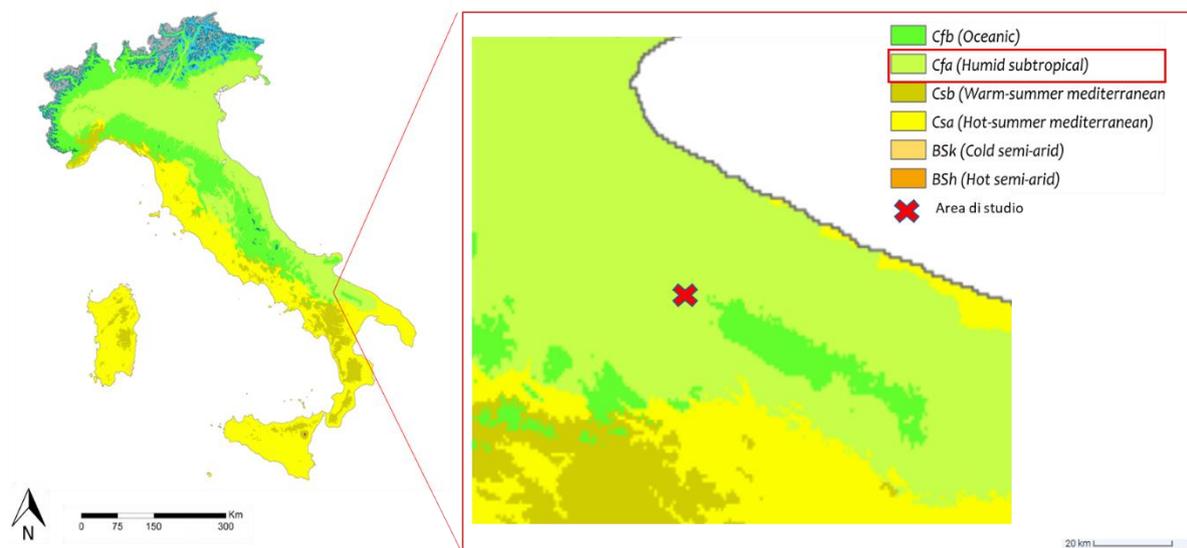


Figura 1: Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

Per la descrizione meteo-climatica dell'area è stato utilizzato il dataset di rianalisi di quinta generazione ERA5⁵, 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 1990-2022 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 14.9 °C e da una piovosità annuale di 609 mm.

⁴ Wladimir Köppen, 1936. *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger.

⁵ <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>

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) 1990-2022.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	5,9	6,3	9,4	12,9	17,5	22,4	25,1	25	20	15,8	11,4	7,1
Temperatura minima (°C)	2,3°C	2,3°C	4,9°C	7,8°C	11,9°C	16,4°C	19°C	19,2°C	15,3°C	11,6°C	7,7°C	3,7°C
Temperatura massima (°C)	10,2°C	10,9°C	14,5°C	18,2°C	22,9°C	28°C	30,9°C	31°C	25,1°C	20,9°C	15,8°C	11,2°C
Precipitazioni (mm)	59	56	65	65	47	37	27	23	48	56	61	65
Umidità(%)	77%	74%	70%	66%	60%	52%	46%	49%	62%	72%	75%	78%
Giorni di pioggia (g.)	7	7	7	8	6	5	3	3	6	6	6	7
Ore di sole (ore)	5,8	6,4	8	9,6	11,4	12,5	12,7	11,8	9,6	7,6	6,5	5,8

La temperatura media di Luglio, il mese più caldo dell'anno, è di 25,1 °C. Durante l'anno, Gennaio ha una temperatura media di 5,9 °C, la temperatura media più bassa.

Il mese più secco è Agosto con una media di 23 mm di pioggia e un'umidità relativa del 49%, mentre i mesi con maggiori piogge sono Marzo, Aprile e Dicembre con una media di 65 mm circa e un'umidità relativa del 70, 66 e 78% rispettivamente. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 42 mm.

Le ore di sole vanno da un minimo di 5,8 nei mesi invernali di Dicembre e Gennaio, a un massimo di 12,7 nel mese di Luglio. L'area di interesse 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 2), dove la maggior parte dei territori beneficiano di un irraggiamento solare annuo cumulato con valori superiori ai **2000 kWh/m²** (Joint Research Center, 2019⁶).

⁶ Joint Research Centre (2019). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html#!.

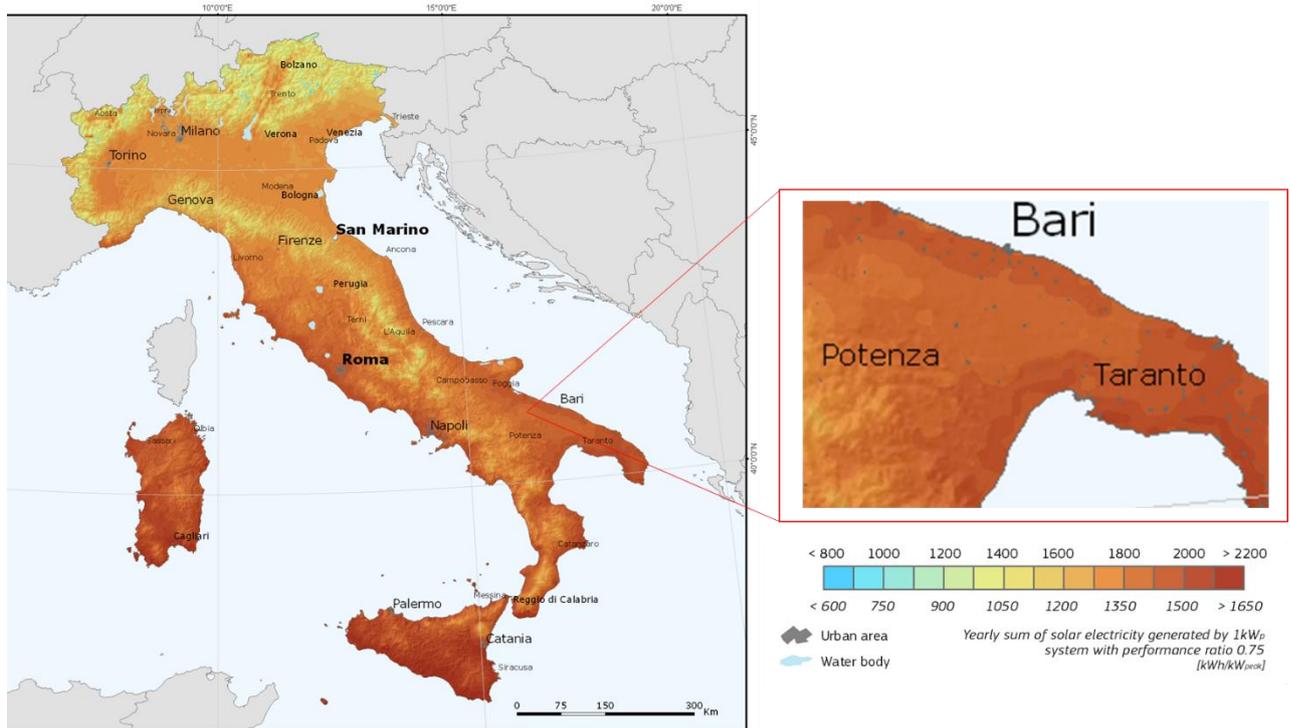


Figura 2: Somma della radiazione globale annua con inclinazione ottimale dei pannelli (European Commission, PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM).

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 3, calcolata considerando il dataset di dati dal 2008 al 2021 e i dati del vento estratti a 10m.

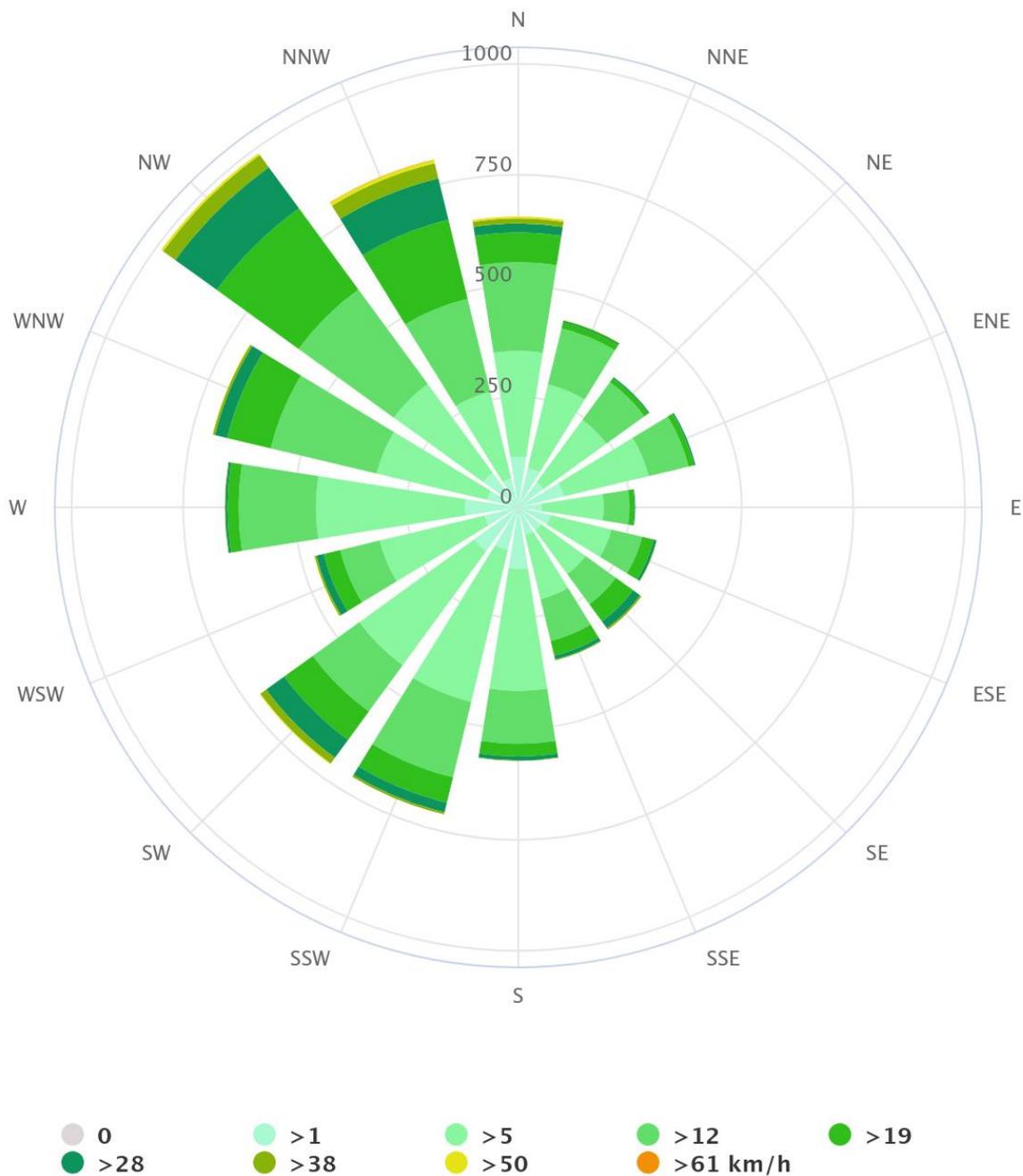


Figura 3: Rosa dei venti calcolata in base ai dati degli anni 2008-2021 (ERA5, ECMWF)

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.

1.1. Caratterizzazione climatica: gli indicatori climatici

Questa sezione si propone di offrire una visione dettagliata delle caratteristiche climatiche dell'area di studio attraverso l'analisi approfondita di indicatori climatici specifici che,

rappresentati da parametri chiave come temperatura, umidità, precipitazioni ecc., sono strumenti fondamentali per valutare le dinamiche atmosferiche e le variazioni climatiche.

La lettura accurata e l'interpretazione degli indicatori climatici è fondamentale perché permette di:

- **Comprendere le dinamiche climatiche locali:** gli indicatori climatici offrono un'analisi dettagliata delle caratteristiche termiche, pluviometriche e altre dinamiche climatiche specifiche dell'area in esame.
- **Valutare impatti ambientali:** l'analisi degli indicatori climatici supporta la valutazione degli impatti ambientali, consentendo di anticipare e comprendere le variazioni climatiche che possono influenzare ecosistemi, risorse idriche, e agricoltura.
- **Ottimizzare la progettazione di sistemi:** la conoscenza dettagliata degli indicatori climatici è cruciale per ottimizzare la progettazione del sistema, considerando fattori come l'ombreggiamento, la temperatura, e le esigenze idriche delle colture.
- **Supportare decisioni di gestione:** la gestione efficiente delle risorse agricole e ambientali richiede una comprensione approfondita delle condizioni climatiche locali, resa possibile dalla corretta interpretazione degli indicatori climatici.

1.1.1. Continentalità / oceanicità

La continentalità climatica emerge quando una regione si trova a una notevole distanza dalle masse marine o oceaniche, in contrasto con l'oceanicità che denota la prossimità a tali masse d'acqua. Tale condizione solitamente comporta un'accentuata escursione termica annuale, ossia una significativa differenza tra le temperature del mese più caldo e quello più freddo. Questa caratteristica esercita un'influenza significativa sul regime pluviometrico, spesso risultando in una diminuzione delle precipitazioni allontanandosi dalla costa.

Gli indici di continentalità sono spesso calcolati sull'escursione termica annuale. Dal semplice indice I_c di Rivas - Martinez proposto nell'ambito del *Worldwide Bioclimatic Classification System* (1996 – 2009), che consiste nella semplice differenza di temperatura tra il mese più caldo e quello più freddo, si passa ai classici indici di Gorczynski (1920) e della rivisitazione di Conrad (1946), che compensano la naturale diminuzione dell'escursione termica verso l'equatore, includendo la latitudine come variabile nella formula.

La valutazione della continentalità e degli indici ad essa associati risulta fondamentale per una completa comprensione del clima in una specifica area. Le tre equazioni impiegate per la

definizione del grado di continentalità sono le seguenti, dove T_m è la temperatura media dei singoli 12 mesi, Lat la latitudine (gradi):

$$\text{Gorczyński (1920)}^7: K_G = 1.7 \frac{\max(T_m) - \min(T_m)}{\sin(\text{Lat} - 20.4)}$$

$$\text{Conrad (1946)}^8: K_C = 1.7 \frac{\max(T_m) - \min(T_m)}{\sin(\text{Lat} - 14)}$$

$$\text{Rivas-Martínez (1996-2009)}^9: I_c = \max(T_m) - \min(T_m)$$

Le scala di classificazione degli indici è solitamente interpretata in termini di grado di continentalità, che varia da bassa a elevata a seconda dei valori degli indici specifici. Nello specifico, per K_G e K_C valori <33 indicano un Clima marittimo di transizione (verso la continentalità), valori compresi o uguali a 34 – 66 un Clima continentale e valori >77 un Clima estremamente continentale. Per I_c valori <10 indicano una Bassa continentalità, valori compresi tra 10 – 20 una Moderata continentalità e valori >20 un'Alta continentalità.

Tabella 2: Valori degli indici di continentalità

INDICE DI CONTINENTALITÀ	VALORE	CLIMA
K_G	29,27	Clima marittimo di transizione (verso la continentalità)
K_C	35,67	Clima continentale
I_c	19,20	Moderata continentalità

La presenza di un clima marittimo di transizione, inclinato verso la continentalità, l'indice di Conrad indica, infatti, un clima continentale, ha implicazioni significative per la pianificazione e l'esecuzione del progetto. Ecco alcuni punti chiave da considerare:

1. Variabilità termica stagionale: la moderata continentalità e il clima marittimo di transizione suggeriscono una variabilità termica stagionale moderata. La transizione alla continentalità, tuttavia, visibile soprattutto con l'indice K_C , indica un'escursione termica

⁷ Gorczyński, L. (1920) : Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. Geografiska Annaler 2, 324-331

⁸ Conrad, V. 1946: Usual formulas of continentality and their limits of validity. Transactions, American Geophysical Union, Volume 27, Issue 5, p. 663-664.

⁹ Rivas – Martínez: http://www.iao.florence.it/training/geomatics/BenSlimane/Marocco21_3_1_2.htm

annuale maggiore ed è soprattutto causata dalle elevate temperature estive delle quali bisogna dunque tener conto per le colture.

2. Gestione Idrica: la continentalità potrebbe influire sui *pattern* di precipitazioni. Una gestione dell'acqua efficace è essenziale per garantire che la coltura riceva l'irrigazione necessaria durante periodi più secchi o con potenziali variazioni nella distribuzione delle precipitazioni.
3. Ombreggiamento e impatto dell'Agrivoltaico: la presenza di una moderata continentalità potrebbe suggerire la necessità di un adeguato ombreggiamento per proteggere le colture dagli stress termici. L'ombreggiamento dei pannelli dell'impianto agrivoltaico può contribuire a mitigare le temperature più elevate durante l'estate.

La natura di un clima marittimo di transizione con moderata continentalità indica una situazione favorevole per tale progetto agrivoltaico. Tuttavia, è fondamentale un'attenta attività di monitoraggio che garantisca una risposta flessibile alle variazioni stagionali ottimizzando l'efficienza complessiva del progetto.

1.1.2. Aridità / Umidità

Il concetto di clima arido o umido (con tutti i gradi in cui questa schematizzazione si manifesta) è insito in ogni classificazione climatica di per sé, prima fra tutte proprio quella di Köppen, qui impiegata. Tuttavia, l'uso di indici specifici chiarisce con maggior dettaglio il grado di aridità o di umidità del clima di una regione. In generale, gli indici di aridità hanno lo scopo di stimare in modo molto approssimativo la possibilità del verificarsi o meno di condizioni di deficit idrico durante l'anno; per fare ciò, risulta necessario stimare le perdite evapotraspirative annuali (o in qualche caso con dettaglio superiore, mensile).

1.1.2.1. Pluviofattore di Lang

Lang ha messo in relazione la piovosità media annua P (in mm) con la temperatura media annua T (in °C), e ha definito questo rapporto pluviofattore $P_f = P/T$. L'indice ha un significato ecologico in quanto esprime l'umidità di un determinato areale entro determinati limiti di temperatura. L'indice classifica il clima secondo la seguente scala di valori: >160 il clima è Umido, 160-100 Temperato Umido, 100-60 Temperato Caldo, 60-40 Semiarido, <40 Steppico.

1.1.2.2. Indice di De Martonne

L'indice di De Martonne rappresenta un perfezionamento del pluviofattore di Lang. L'indice è rappresentato mediante la formula: $IA = P / (T+10)$ dove IA è l'indice di aridità, P le precipitazioni

medie annue in mm e T le temperature medie annue in °C. In base all'indice di De Martonne, i vari gradi di aridità vengono indicati come:

Tabella 3. Classificazione climatica secondo l'indice di De Martonne

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
0 - 5	arido estremo (deserto)	20 - 30	Subumido <u>irrigazione opportuna</u>
5 - 15	arido (steppe circumdesertiche) <u>irrigazione continua</u>	30 - 60	Umido <u>irrigazione occasionale</u>
15 - 20	semiarido (di tipo mediterraneo) <u>irrigazione necessaria</u>	> 60	Perumido <u>autosufficienza idrica</u>

Secondo l'analisi di De Martonne, valori dell'Indice superiori a 20 indicano la prevalenza di vegetazione forestale. Questo indice assume un ruolo cruciale nella caratterizzazione climatica e vegetazionale, permettendo di definire con precisione i gradi di umidità nell'ambiente e quantificando numericamente le condizioni ambientali.

L'utilità dell'Indice di De Martonne va oltre il solo aspetto climatologico, estendendosi alla valutazione delle condizioni ideali per la crescita di specifici tipi di piante o colture. La sua capacità di quantificare le esigenze vegetative attraverso valori numerici consente una pianificazione agricola più mirata.

Particolarmente rilevante è il ruolo dell'indice nella determinazione della necessità di irrigazione. La conoscenza dei gradi di umidità fornita dall'Indice di De Martonne è essenziale per valutare la disponibilità d'acqua nell'area, diventando cruciale per la gestione dell'acqua in progetti agrivoltaici.

1.1.2.3. Indice di Crowther

L'indice di aridità di Crowther tiene conto del bilancio tra precipitazioni e evaporazione ed è calcolato attraverso la seguente espressione: $I_a = P - 3.3 * T$ dove:

P = precipitazione totale annua espressa in cm; T = temperatura media annua in °C; 3,3 = costante numerica. Si possono presentare i seguenti casi:

Tabella 4: Classificazione climatica secondo l'indice di Crowther

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
< -30	Zone desertiche o limitrofe	$0 < I_c < 15$	Modeste condizioni di umidità

			<u>irrigazione opportuna</u>
-30 < Ic < -15	Semiaridità (<u>irrigazione costante e continua</u>)	15 < Ic < 40	Apprezzabile acqua di scorrimento <u>irrigazione stagionale</u>
-15 < Ic < 0	Formazioni erbacee ed alberi <u>irrigazione necessaria</u>	> 40	Molta acqua

1.1.2.4. Indice bioclimatico di J. L. Vernet

L'indice è rappresentato mediante la formula:

$$IB = 100 \times \frac{H - h}{P} \times \frac{Me}{Pe}$$

dove IB è l'indice di aridità, H indica le precipitazioni medie della stagione più piovosa (in mm), h le precipitazioni medie della stagione meno piovosa (in mm), P le precipitazioni medie annuali (in mm), Pe le precipitazioni medie estive e Me la temperatura media massima estiva (in °C). L'indice dà valori proporzionali all'umidità.

La classificazione climatica secondo tale indice è:

Tabella 5: Classificazione climatica secondo l'indice bioclimatico di J.L. Vernet

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
> +2	Clima continentale	-3 < I < -2	Clima mediterraneo di transizione oceanico
0 < I < + 2	Clima oceanico continentale	-4 < I < -3	Clima Mediterraneo
-2 < I < 0	Clima pseudo-oceanico		

1.1.2.5. Indice FAO

L'indice bioclimatico di aridità e desertificazione FAO-UNEP, introdotto in base alle convenzioni delle Nazioni Unite, è calcolato dalla seguente espressione: Ia = P/ETP dove: P = precipitazioni medie annue; ETP = evapotraspirazione media annua; si possono presentare i seguenti casi:

Tabella 6: Classificazione climatica secondo l'indice FAO

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
< 0,05	Clima iperarido	< 0,65	Clima subumido secco
< 0,2	Clima arido	> 0,65	Clima umido
< 0,5	Clima semiarido		

1.1.2.6. Quoziente pluviometrico di Emberger

La classificazione bioclimatica di Emberger ha trovato larga applicazione nella caratterizzazione dei climi del Bacino mediterraneo per la relativa semplicità di calcolo e per la buona corrispondenza che, in genere, si riscontra con i caratteri vegetazionali delle diverse regioni geografiche di quest'area.

L'elemento fondamentale della classificazione bioclimatica di Emberger è il quoziente pluviometrico (Q), che esprime la siccità generale in clima mediterraneo. Il clima è tanto più secco quanto più basso è il valore di questo quoziente. Il quoziente di Emberger, proposto inizialmente nel 1923, corrisponde alla formulazione seguente: $Q = (2000 \times P) / (T_{max}^2 - T_{min}^2)$.

Tabella 7: Classificazione climatica secondo l'indice Emberger

Valori dell'indice	Tipo
> 90	Umido
90 - 50	Subumido
50 - 30	Semiarido
30 - 0	Arido

Nello specifico, nell'area Mediterraneo questo indice comprende valori che vanno da 50 – 250.

L'area Mediterranea è così caratterizzata:

- una estate calda con scarse precipitazioni (periodo arido);
- temperature invernali non tanto basse;
- precipitazioni concentrate principalmente in autunno-inverno (periodo umido).

1.2. Caratterizzazione climatica: i risultati per l'area di interesse

L'area interessata dal progetto agrivoltaico in esame è descritta dagli indici riportati in Tabella 8.

Tabella 8: Classificazione climatica dell'area di studio

INDICE	VALORE	CLIMA
Pluviofattore di Lang	40,74	Semiarido
Mesi Aridi:	Secondo Koppen: lug ago	-
	Secondo Gaussen: giu lug ago	
Indice di De Martonne	24,41	Subumido (<u>irrigazione opportuna</u>)

Indice di aridità di Crowther	11,56	Modeste condizioni di umidità <u>irrigazione opportuna</u>
Indice bioclimatico di J.L. Vernet	1,99	Continentale (variabilità stagionale moderata per le precipitazioni)
Indice FAO	1,19	Umido
Evaporazione media mensile [mm]	130,06	-
Quoziente pluviometrico di Emberger	73,49	Subumido

L'indice di De Martonne è stato calcolato per ogni mese:

Tabella 9: Indice di De Martonne mensile; il giallo indica un clima arido, il grigio un clima semiarido, il celeste chiaro un clima subumido, il celeste scuro un clima umido.

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Indice di De Martonne	44,53	41,23	40,21	34,06	20,51	13,70	9,23	7,89	19,20	26,05	34,21	45,61

L'analisi complessiva suggerisce una disponibilità moderata d'acqua con fluttuazioni stagionali e con periodi estivi aridi. La gestione oculata dell'irrigazione, particolarmente durante la stagione secca, diventa essenziale per massimizzare la produzione agricola e l'efficienza del sistema agrivoltaico.

Il progetto agrivoltaico è compatibile con gli indici e la classificazione climatica presa in considerazione. La moderata disponibilità d'acqua, le variazioni stagionali e le esigenze di irrigazione suggerite dagli indici climatici sono aspetti che possono essere adeguatamente gestiti attraverso una pianificazione accurata del progetto. **La compatibilità con l'ambiente climatico delineato conferma la fattibilità e la sostenibilità del progetto agrivoltaico nell'area di studio.**

1.3. Climogrammi

I climogrammi rappresentano un potente strumento visuale che combina dati mensili di temperatura e precipitazioni, offrendo una panoramica completa delle caratteristiche climatiche nel corso dell'anno. In questa sezione, esamineremo attentamente i climogrammi dell'area di studio. Queste rappresentazioni grafiche non solo ci consentiranno di identificare i modelli climatici stagionali, ma ci aiuteranno anche a valutare l'idoneità del sito per il progetto in questione.

1.3.1. Diagramma ombrotermico

Il climogramma ombrotermico è un grafico che rappresenta graficamente la distribuzione mensile delle temperature medie e delle precipitazioni. Per l'area in esame si nota ciò che è già stato evidenziato per l'area in esame e cioè la variabilità stagionale con una stagione più secca estiva con temperature più alte e una più umida.

Dal climogramma riportato in Figura 4 emerge visivamente la variabilità stagionale che caratterizza l'area di interesse con un periodo caratterizzato da temperature più alte e basse precipitazioni (giugno-agosto) e un periodo con abbondanti precipitazioni (settembre-maggio).

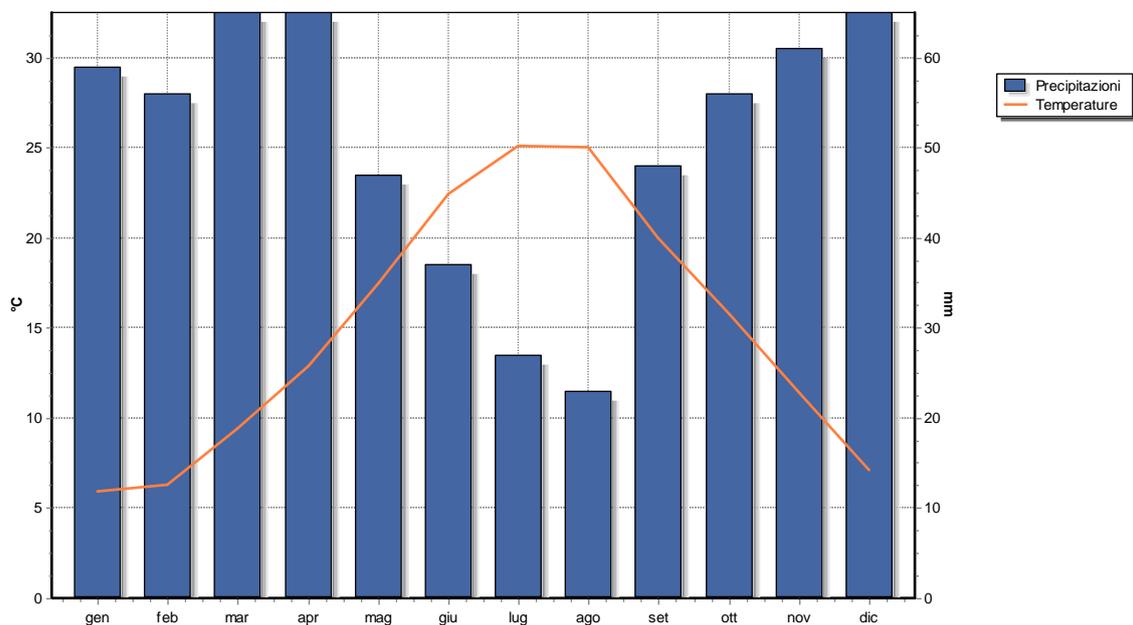


Figura 4: Diagramma ombrotermico

1.3.2. Diagramma Walter & Lieth

Questo diagramma¹⁰ è particolarmente utile per valutare la disponibilità di acqua in relazione alle temperature. Nello specifico, analizzando la posizione relativa delle curve delle temperature e delle precipitazioni, è possibile identificare visivamente i periodi in cui potrebbero verificarsi condizioni di aridità o eccesso idrico. Quando la curva delle precipitazioni scende sotto quella delle temperature medie il mese/periodo interessato viene considerato “arido”, altrimenti con “disponibilità idrica”. Inoltre, sono indicati anche i mesi/periodi con rischio gelate ($T < 0$ °C).

¹⁰ Lieth, H., Berlekamp, J., Fuest, S., and Riediger, S., 1957: Walter-Lieth: Climate Diagram World Atlas, CD-Series I of Climate and Biosphere, 1st edit.

Dal climogramma rappresentato dalla Figura 5 si evince che il periodo con disponibilità idrica va da Settembre fino a Maggio. Questi mesi rappresentano la stagione piovosa nella regione. Il periodo da Giugno a metà Settembre è invece prettamente arido. Questi mesi rappresentano la stagione secca in cui la disponibilità di precipitazioni è bassa. Quanto descritto è anche visibile dal climogramma in Figura 6.

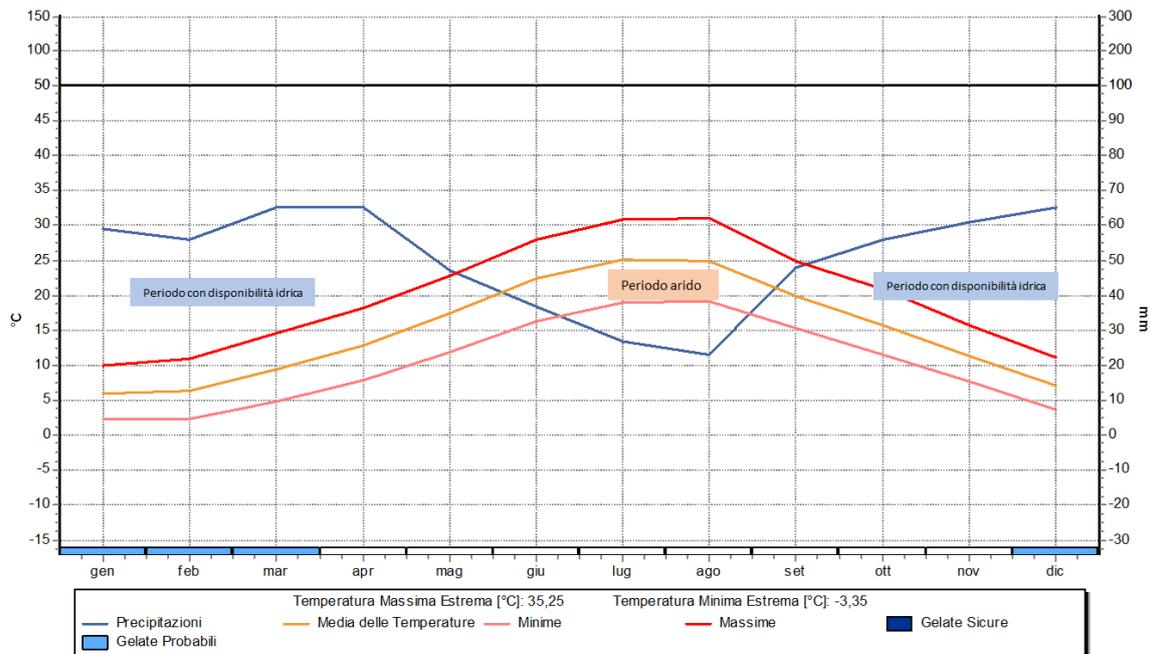


Figura 5: Climogramma di Walter & Lieth

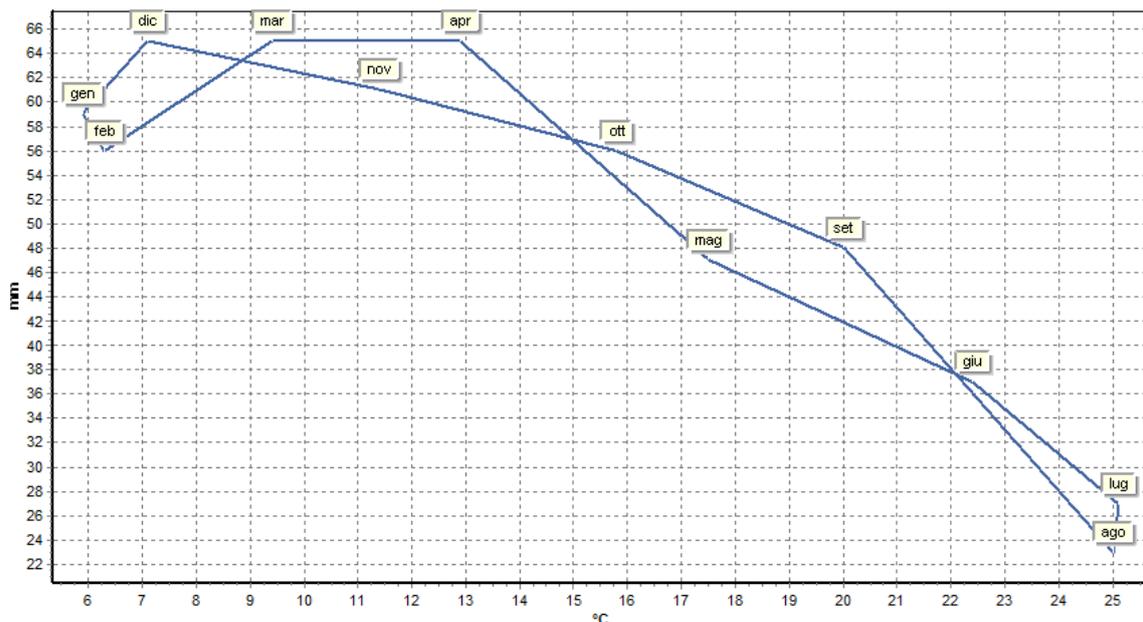


Figura 6: Climogramma Precipitazioni e Temperature

1.3.3. Climogramma di Peguy

I climogrammi di Péguy¹¹ rappresentano la climatologia mensile di una stazione nei confronti di una schematica classificazione climatica che viene rappresentata nel grafico in base a temperatura e precipitazione (Figura 7). I diversi mesi si collocano così dentro il grafico in diverse aree, ognuna identificata con un termine. **Il mese più arido è Agosto mentre Giugno e Luglio sono debolmente aridi. I restanti mesi dell'anno sono Temperati.**

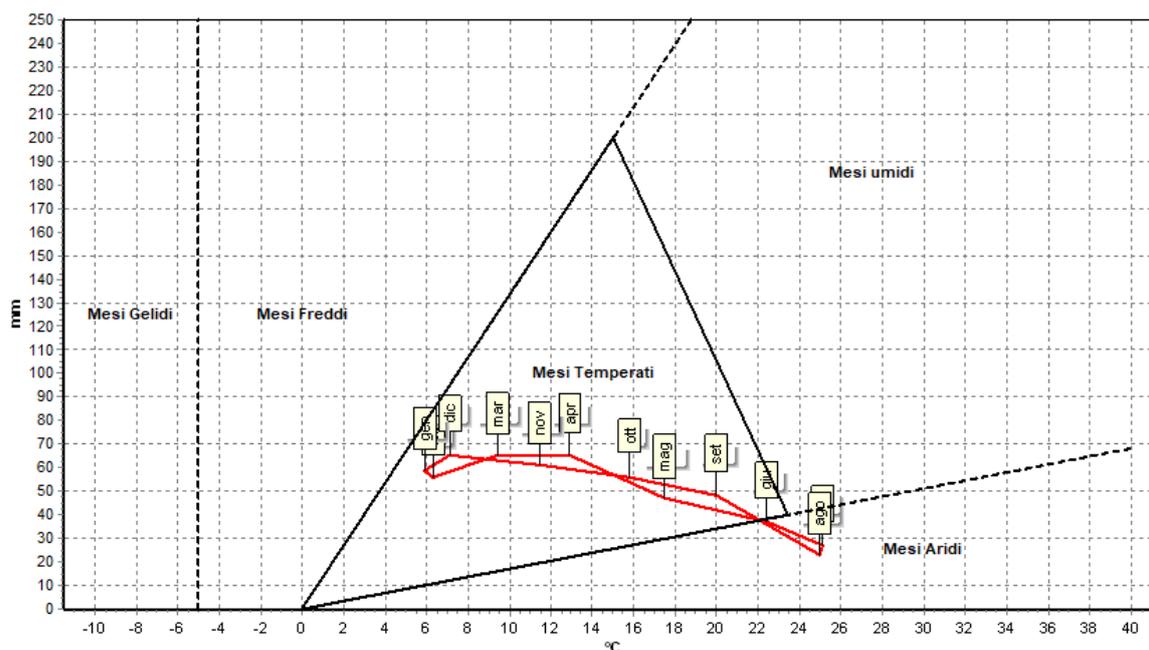


Figura 7: Climogramma di Peguy

2. 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 climatico¹².

¹¹ Péguy, C.P. , 1970 : Precis de climatologie, ed. Masson, Paris

¹² 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/>.

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.

2.1. 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.

2.1.1. 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 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 10 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).

Tabella 10: *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).*

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

40°C (TX40) (giorni)	MT	8.8	11.3
	LT	13.1	26.8
Total precipitation (PR) (%)	NT	-5.7	-7
	MT	-8.7	-12
	LT	-11.3	-22.2
Maximum 1-day precipitation (RX1day) (%)	NT	1.8	1.7
	MT	2.2	3.1
	LT	3.9	5.4
Maximum 5-day precipitation (RX5day) (%)	NT	0.8	0.6
	MT	0.5	0.2
	LT	0.9	-1.4
Consecutive Dry Days (CDD) (giorni)	NT	3.2	4.3
	MT	6.5	9.4
	LT	10.1	20.4
Standardized Precipitation Index (%)	NT	-8.8	-12.3
	MT	-19.7	-30.9
	LT	-30.2	-68.4
Sea level rise (SLR) (m)	NT	0.1	0.1
	MT	0.2	0.3
	LT	0.5	0.7

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 Puglia sarà 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**¹³. I servizi ecosistemici nell'area di interesse risultano particolarmente sensibili ad eventi o stagioni estreme, come estati molto calde e secche¹⁴ così come a inverni miti, tempeste di vento e forti piogge. Inoltre, tali servizi

¹³ 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

¹⁴ 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.

ecosistemici sono minacciati dai cambiamenti climatici a lungo termine, come l'aridificazione e la degradazione, i quali potrebbero portare a una desertificazione irreversibile¹⁵.

La Tabella 11 fornisce un riassunto degli stress climatici, impatti e sensibilità per i diversi servizi ecosistemici e i settori che essi supportano.

¹⁵ Rubio, J. L., Safriel, U., Dausa, 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.

Tabella 11: Impatti di diversi stress climatici e antropici sui servizi ecosistemici e i settori che essi supportano.

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

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!*¹⁶, un modello web-based sviluppato dal *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* e la piattaforma *Climate-ADAPT*¹⁷ sviluppata dalla Commissione Europea e dall'Agencia Europea dell'Ambiente.

La Tabella 12 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.

Tabella 12: Rischi climatici fisici e livelli di pericolo riferiti a proiezioni future nell'area di studio.

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	Alto

¹⁶ GNU General Public Licence, Version 3, 29 June 2007

¹⁷ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

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

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)¹⁸. Secondo il sesto rapporto di valutazione del gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici¹⁹ 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

¹⁸ EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

¹⁹ 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

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 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 8 è riportata la proiezione su 20 anni della distribuzione dell'indice WBGT in una sezione della Puglia che comprende l'area di interesse. Il **valore di WBGT nella zona di interesse è di 27,4: stress da calore lieve/basso.**

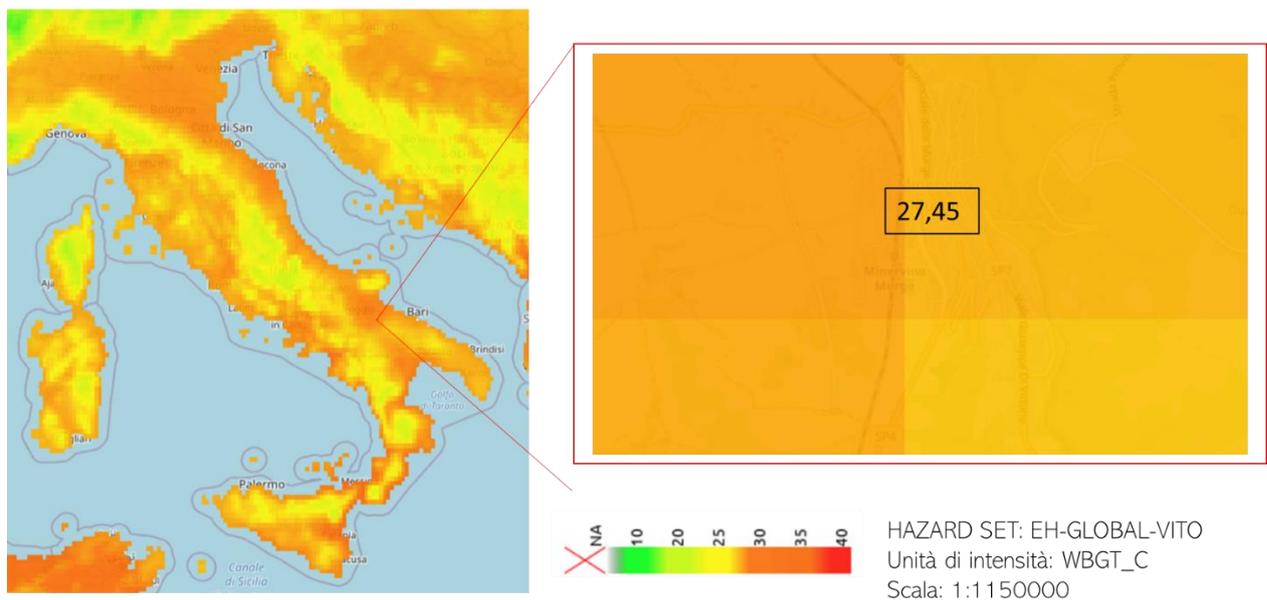


Figura 8: Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello ThinkHazard!.

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 dati²⁰.

Considerando 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 moderato con un aumento previsto delle precipitazioni intense invernali dell'17%.

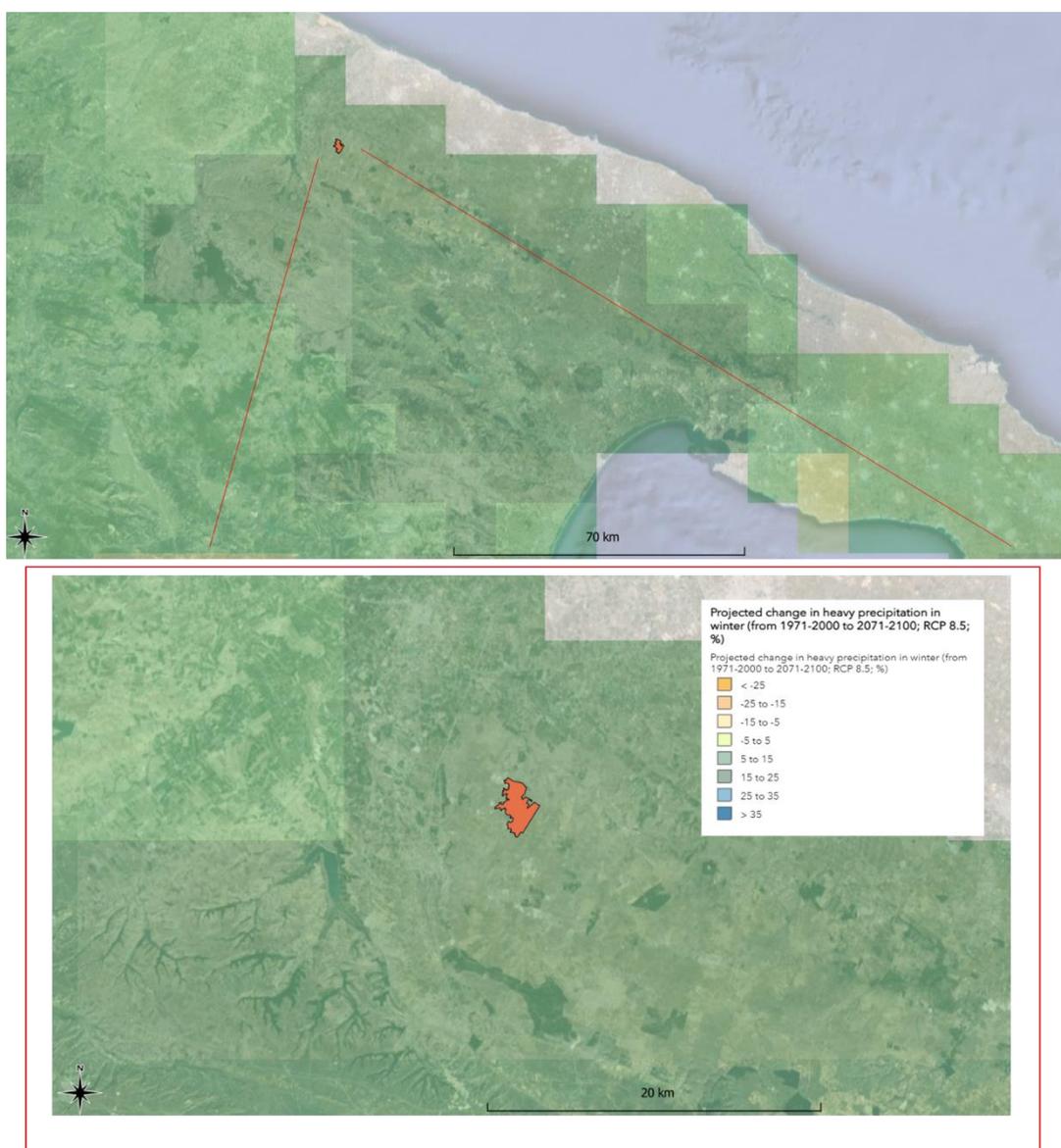


Figura 9: Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (EURO-CORDEX). L'area di studio è indicata in rosso.

²⁰ <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>.

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 10 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-OBS²¹ 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-RUN²² 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 LISFLOOD²³ 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 4 - 7 eventi.

²¹ <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download-charme.php>

²² https://store.pangaea.de/Publications/Gudmundsson-Seneviratne_2016/e-run_v1.1.nc

²³ *Natural Hazards Project of the Joint Research Centre of the European Commission*

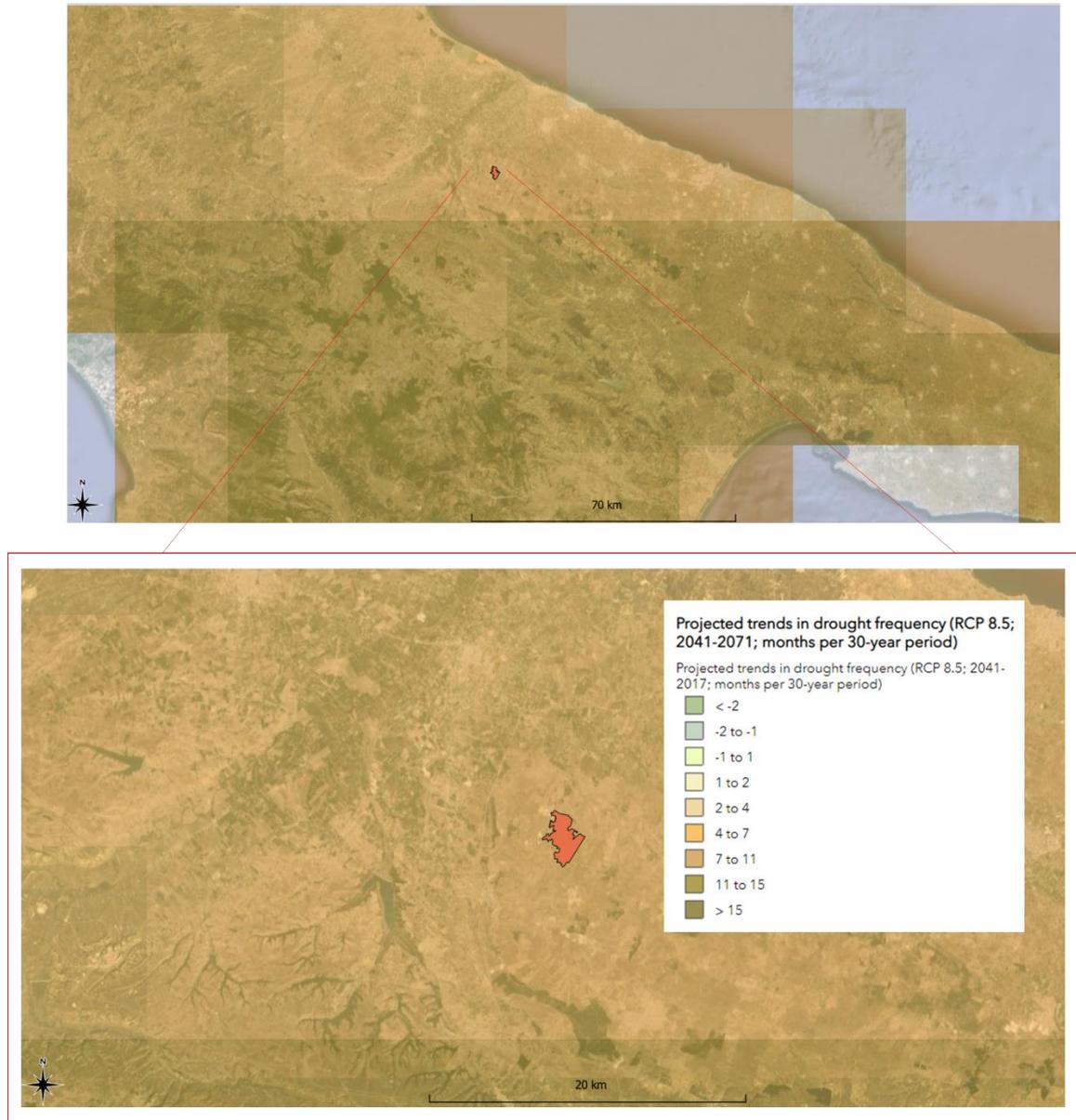


Figura 10: Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (Climate-ADAPT). L'area di studio è indicata in giallo.

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 dolce²⁴. 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 42% per l'area di riferimento (Figura 11). Ciò indica un sovrasfruttamento grave della risorsa e che la popolazione è esposta a condizioni di stress idrico.

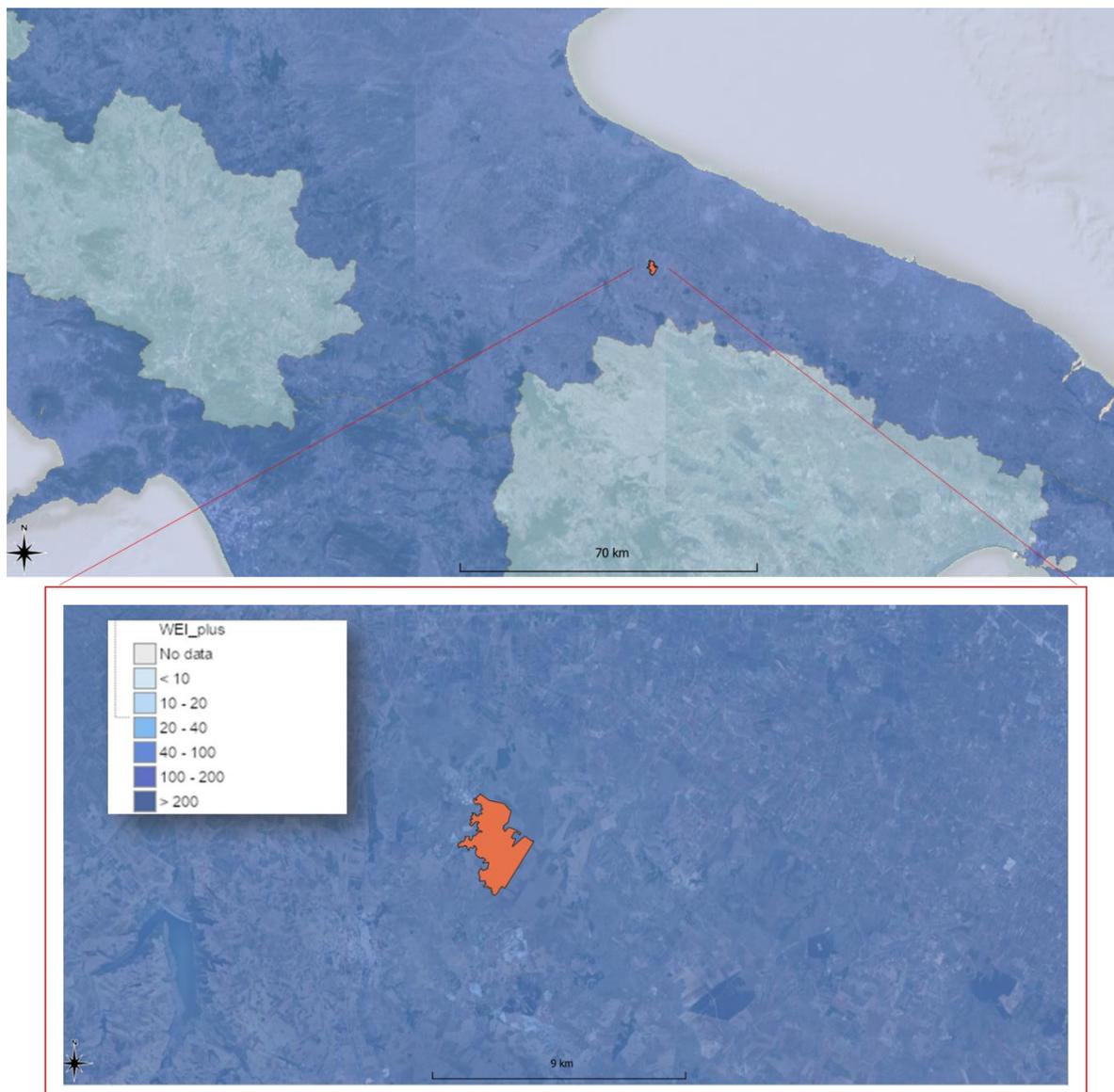


Figura 11: Indice di sfruttamento della risorsa idrica (WEI+). Fonte: European Environment Agency (EEA)

²⁴ 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.

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'Attica²⁵.

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.**

²⁵ EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

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.

Nell'area di interesse il pericolo di incendi è classificato come **alto** secondo le informazioni attualmente disponibili, con un indice FFD di circa 6.

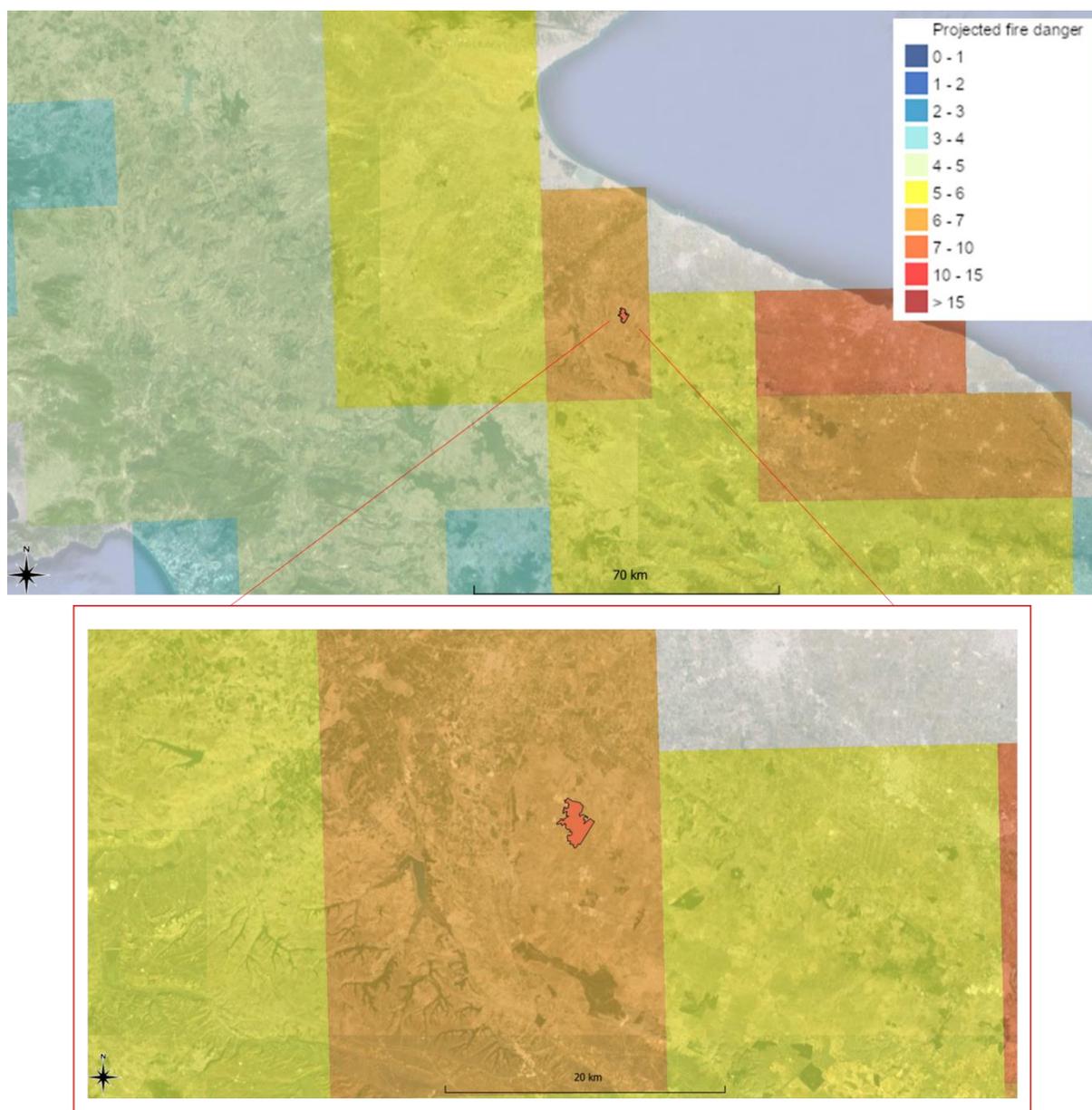


Figura 12: Previsione del rischio incendi classificato con l'indice *Forest fire danger*.

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**.

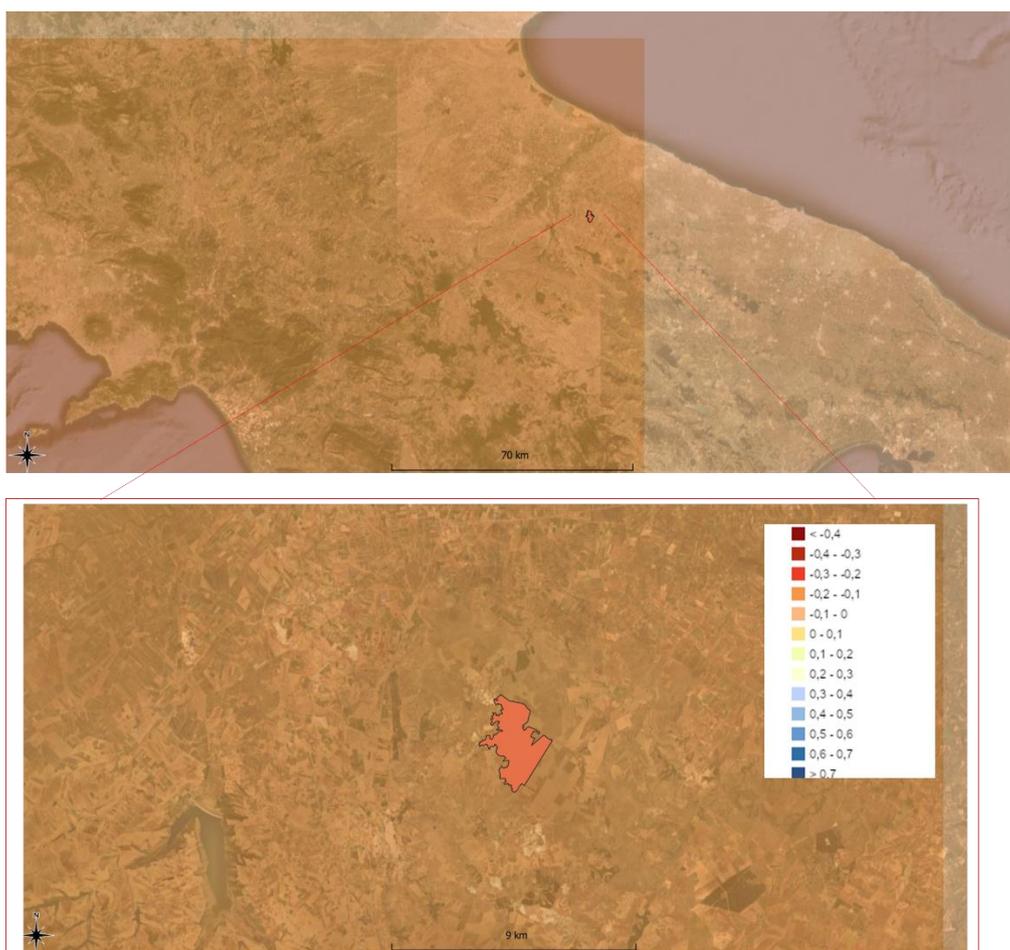


Figura 13: Previsione dell'innalzamento del livello del mare per lo scenario RCP 4.5 (Climate-ADAPT).

5. Resilienza del parco agri-naturalistico-voltaico al rischio climatico

5.1. Strategie di progettazione e gestione

Per rendere il parco agri-naturalistico-voltaico più compatibile con gli *stressor* climatici e **ridurre i livelli di pericolo e rischio** sono previste 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 parco 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**. L'adozione di strategie di adattamento flessibili e la capacità di apportare modifiche in base alle nuove informazioni climatiche contribuiranno a garantire la sostenibilità e la resilienza del progetto agrivoltaico nel lungo termine.

5.2. Analisi dei servizi ecosistemici degli interventi di potenziamento ecologico

La scelta delle specie vegetali nelle strategie di potenziamento ecologico incorporate nel progetto del Parco Agri-Naturalistico-Voltaico è stata guidata da un approccio olistico che mira a ottimizzare la resilienza ecologica e la funzionalità ecosistemica del parco, contribuendo significativamente alla mitigazione degli impatti ambientali negativi e alla promozione della biodiversità.

Questa sezione si dedica all'analisi quantitativa e qualitativa dei servizi ecosistemici offerti dalle specie vegetali scelte in termini di assorbimento degli inquinanti atmosferici, creazione di habitat e rifugi per la fauna selvatica, prevenzione dell'erosione del suolo, produzione di risorse alimentari per la fauna. Tale analisi è supportata da dati di letteratura tabulati nelle schede tecniche Qualiviva²⁶.

²⁶ <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/9785>

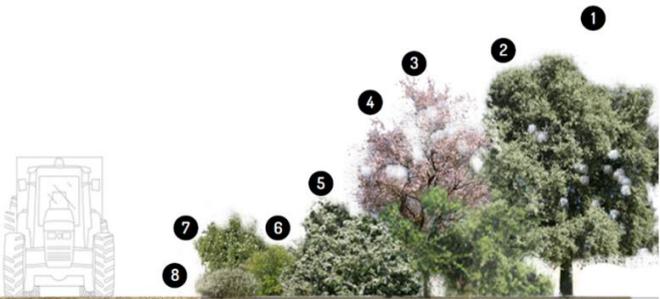


AZIONE A.1

Mitigazione con filari di vegetazione arborea e arbustiva

➔ **10 ha**





	Specie	CO2 assimilata (kg/anno)	Abbattimento inquinanti				Altri servizi ecosistemici
			O3	NO2	SO2	PM10	
	1 Leccio <i>Quercus ilex</i>	226	0.6	0.3	0.1	0.4	Mitigazione microclimatica
	2 Perastro <i>Pyrus communis subsp. pyraeaster</i>	84	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Appariscente fioritura primaverile con fiori bianchi e piccoli frutti rosso bruni appetitosi per gli uccelli.
	3 Olivastro <i>Olea europaea sylvestris</i>	76	0.2	<0.05	<0.05	0.1	Controllo erosione del suolo

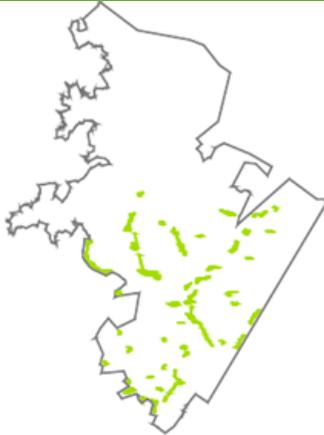
	4	Mandorlo <i>Prunus amygdalus</i>	77	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Appariscente fioritura che attrae insetti impollinatori, mitigazione microclimatica
	5	Biancospino <i>Crataegus monogyna</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Pianta mellifera
	6	Ramno <i>Rhamnus cathartica</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Frutti appetitosi per gli uccelli. Le bacche sono inoltre benefiche per l'uomo in quanto fonte concentrata di vitamine e minerali essenziali
	7	Rosa canina <i>Rosa canina</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Frutti appetitosi per gli uccelli.
	8	Prugnolo <i>Prunus spinosa</i>	77	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Offre riparo a uccelli e altri piccoli animali, specie mellifera

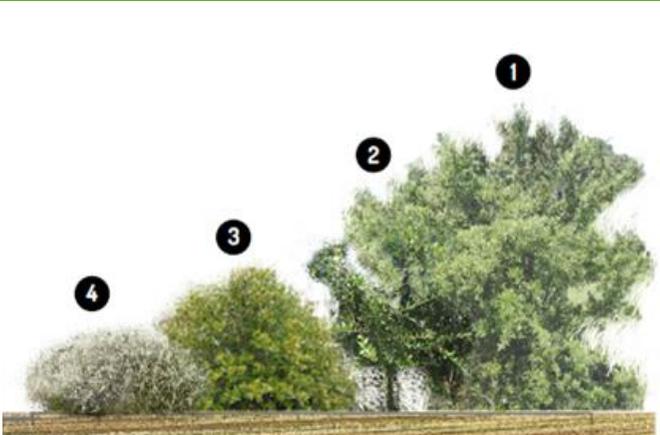


AZIONE A.2

Rinaturalizzazione con vegetazione
dei pascoli arborati

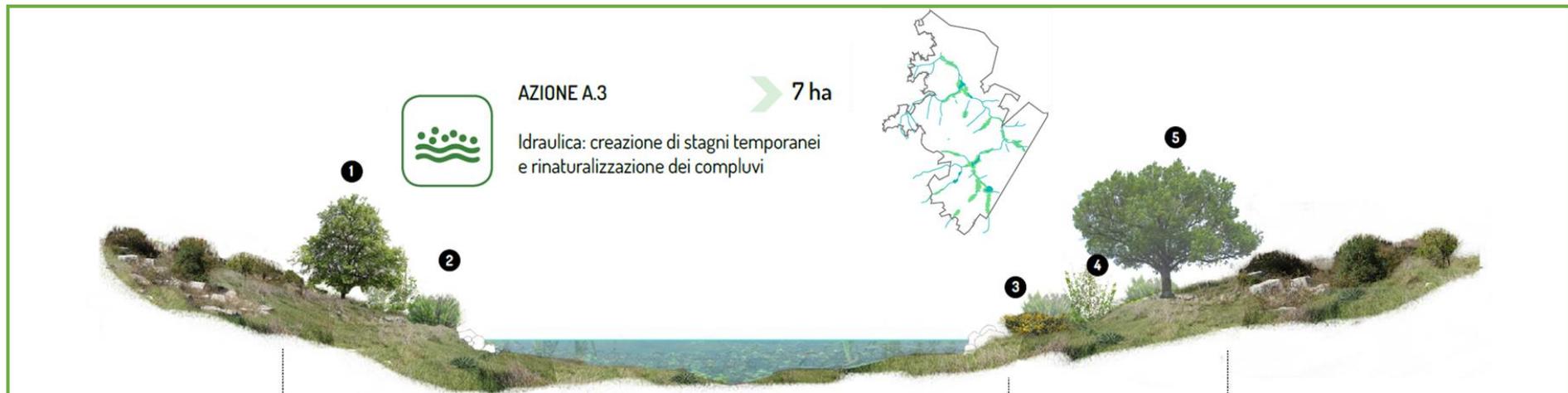
➤ **6 ha**





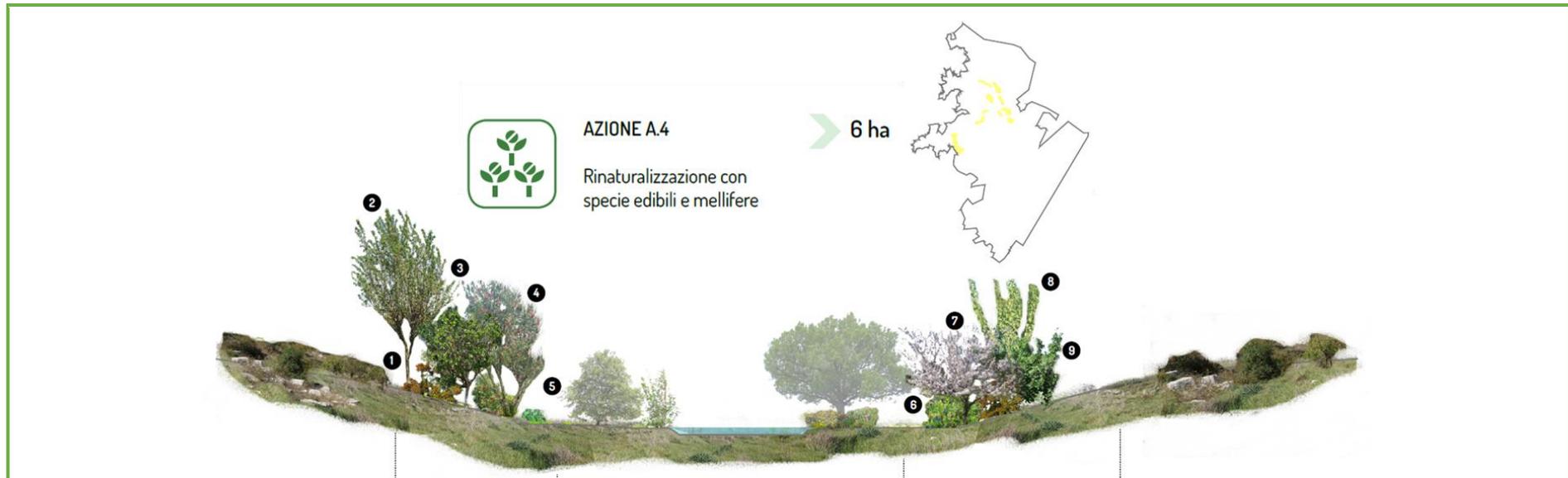
		Specie	CO2 assimilata (kg/anno)	Abbattimento inquinanti				Altri servizi ecosistemici
				O3	NO2	SO2	PM10	
	1	Perastro <i>Pyrus communis subsp. pyraeaster</i>	84	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Appariscente fioritura primaverile con fiori bianchi e piccoli frutti rosso bruni appetitosi per gli uccelli.
	2	Olivastro <i>Olea europaea sylvestris</i>	76	0.2	<0.05	<0.05	0.1	Controllo erosione del suolo
	3	Ramno <i>Rhamnus cathartica</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Frutti appetitosi per gli uccelli. Le bacche sono inoltre benefiche per l'uomo in quanto fonte concentrata di vitamine e minerali essenziali

	4	Prugnolo <i>Prunus spinosa</i>	77	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Offre riparo a uccelli e altri piccoli animali, specie mellifera
---	---	-----------------------------------	----	-------	-------	-----	-------	--



	Specie	CO2 assimilata (kg/anno)	Abbattimento inquinanti				Altri servizi ecosistemici
			O3	NO2	SO2	PM10	
	1 Olmo <i>Ulmus minor</i>	259	0.3	1.5	0.2	0.1	Mitigazione microclimatica; controllo erosione del suolo; habitat e rifugio
	2 Rosmarino <i>Salvia rosmarinus</i>	nd	nd	nd	nd	nd	I fiori sono particolarmente melliferi. Da foglie e fiori si ottengono un olio essenziale ed estratti utilizzati in

								profumeria
	3	Sparzio <i>Calicotome spinosa</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Pianta mellifera
	4	Fillirea <i>Phillyrea angustifolia</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Pianta mellifera
	5	Roverella <i>Quercus pubescens</i>	436	0.2	0.3	0.4	0.2	Mitigazione microclimatica; controllo erosione del suolo; habitat e rifugio



	Specie	CO2 assimilata (kg/anno)	Abbattimento inquinanti				Altri servizi ecosistemici
			O3	NO2	SO2	PM10	
	1 Azzeruolo <i>Crataegus azarolus</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Fiori e frutti sono una preziosa risorsa per molti insetti utili ed animali selvatici.
	2 Susino <i>Prunus domestica</i>	77	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	I fiori sono particolarmente melliferi. Da foglie e fiori si ottengono un olio essenziale ed estratti utilizzati in profumeria; controllo erosione del suolo

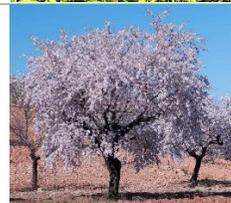
	3	Corbezzolo <i>Arbutus unedo</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Piccoli fiori a campanella, rosa o bianchi, sono raccolti in grappoli e molto apprezzati dagli insetti impollinatori.
	4	Melograno <i>Punica granatum</i>	nd	nd	nd	nd	nd	I frutti edibili hanno importanti proprietà nutrizionali
	5	Fragola di bosco <i>Fragaria vesca</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Frutti appetitosi per gli uccelli.
	6	Mirtillo <i>Myrtillus spp.</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Frutti appetitosi per gli uccelli
	7	Mandorlo <i>Prunus amygdalus</i>	77	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Appariscente fioritura che attrae insetti impollinatori; mitigazione del microclima; controllo erosione del suolo
	8	Albicocco <i>Prunus armeniaca</i>	77	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	Appariscente fioritura che attrae insetti impollinatori; mitigazione del microclima; controllo erosione del suolo
	8	Nespolo <i>Crataegus germanica</i>	nd	nd	nd	nd	nd	Habitat e rifugio; mitigazione del microclima; controllo erosione del suolo

Tabella 13. Servizi ecosistemici delle azioni di potenziamento ecologico del parco agri-naturalistico-voltaico. Nd: nessun dato.

5.3. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica

Per esaminare gli **impatti specifici e le interazioni del progetto con 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 **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 per ogni azione di potenziamento ecologico.

5.3.1. Analisi modellistica previsionale

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)

Il modello di calcolo implementato comprende:

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

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

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

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

Per analizzare l’effetto di ogni azione di potenziamento ecologico è stata costruito un dominio computazionale di 70m x 70m e sono stati inseriti gli elementi caratterizzanti ciascuna azione (Figura 14).

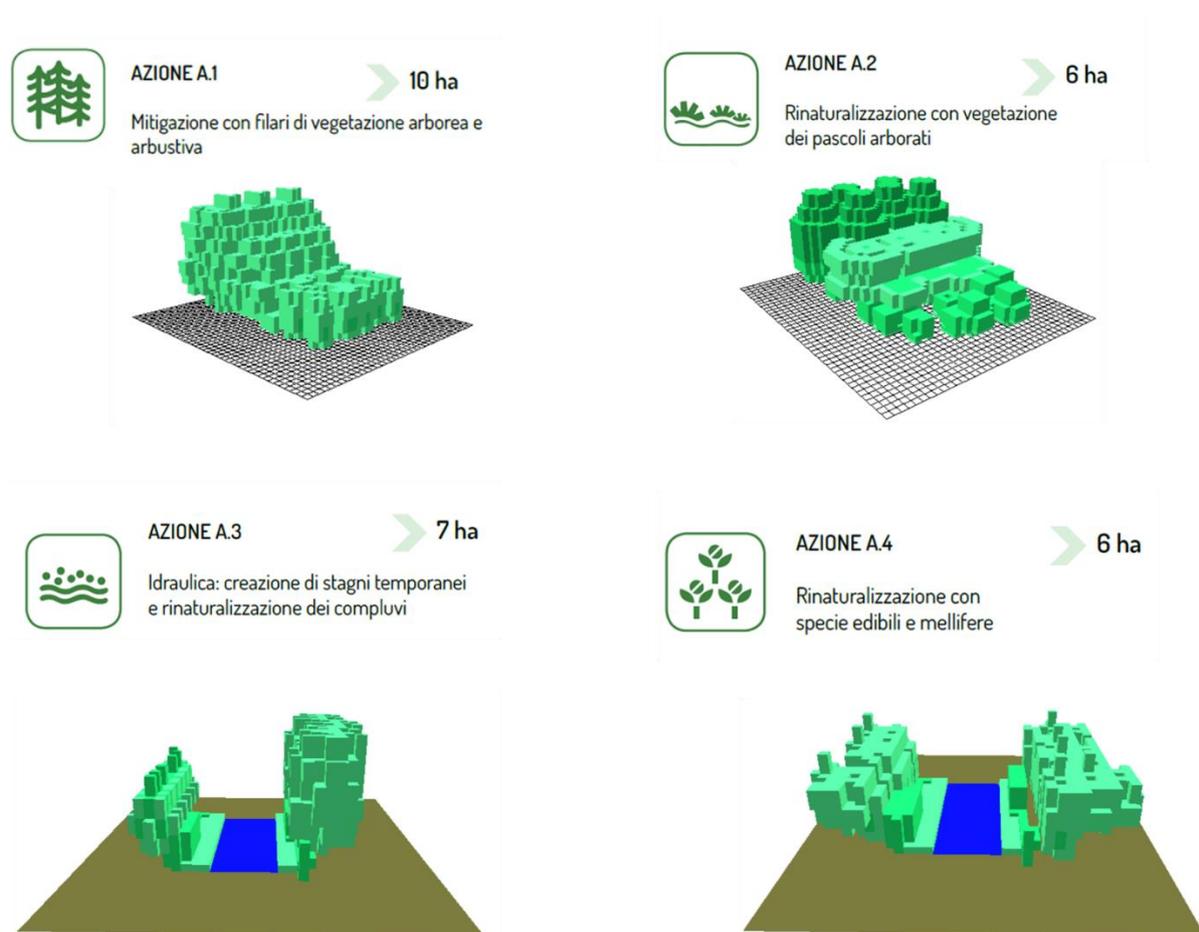


Figura 14: Scenari simulati in ENVI-met

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).**

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

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.

Parametri modellistici investigati

L'impatto sul **microclima** del progetto di rigenerazione proposto è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari in termini di **temperatura dell'aria (T_{air})**, **umidità relativa atmosferica (RH_{air})**, **velocità del vento (WS)**, **temperatura delle superfici (T_{soil})**, **umidità relativa del suolo (RH_{soil})**, **turbolent kinetic energy (TKE)**. 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 indumenti²⁷.

²⁷ Höppe, P. 1999. *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment.* *Int J Biometeorol* 43, 71–75.

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 14.

Tabella 14: Scala di percezione termica PET

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

5.3.2. Risultati

La Tabella 15 presenta i risultati dettagliati delle simulazioni ENVI-met, con dati specifici estratti alle ore 12:00. Questi risultati includono misurazioni a 1.4 metri di altezza, che forniscono *insight* approfonditi sui parametri microclimatici atmosferici. Tali dati sono fondamentali per **analizzare l'impatto delle azioni di progetto, considerato il contesto climatico e ambientale e gli obiettivi prefissati di rigenerazione e potenziamento ecologico.**

Per quanto riguarda i dati rilevati a livello del suolo (0 metri), questi si concentrano sui parametri relativi alla salute del terreno e sono cruciali per valutare gli impatti dell'agricoltura combinata con l'energia fotovoltaica sulla vitalità del suolo e sulla crescita delle colture.

Infine, si presenteranno delle mappe di distribuzione spaziale per alcuni di questi parametri, che saranno utili per visualizzare l'interazione dinamica tra gli impianti fotovoltaici e il contesto agricolo circostante, permettendo così una valutazione più completa e integrata degli effetti dell'agrivoltaico sull'ambiente.

Tabella 15: Sintesi dei risultati emersi dalla simulazione modellistica previsionale.

	Parametro	Scenario					Impatto
		Attuale	Azione A1	Azione A2	Azione A3	Azione A4	
MICROCLIMA	Temperatura dell'aria (°C)	28.8	27.5	26.5	28.5	28.6	Positivo
	Umidità relativa (%)	77.4	81	84.5	83.8	83.7	Non rilevante.
	Velocità del vento (m/s)	2.6	2.4	1.9	2.5	2.6	Non rilevante.
	Temperatura superficiale (°C)	30.4	28	26.4	29.5	29.6	Positivo
	Umidità del suolo (%)	20.5	24.5	26	23.4 (solo nell'area vegetata)	23.1	Positivo
	Turbolent kinetic energy (m ² /m ³)	4	3.8	3.9	2.7	3.2	Positivo
COMFORT TERMICO	Physiological Equivalent Temperature (°C)	43	40	37	41.1	42	Positivo.

La presenza di valori elevati nella tabella è attribuibile alla simulazione effettuata per il giorno con il più alto stress termico estivo, tipico dell'area di riferimento. Questa scelta metodologica è stata adottata per fornire una **stima realistica e precisa** degli **impatti climatici più severi che possono verificarsi in condizioni di picco di calore**. Tale approccio è cruciale per comprendere in modo approfondito gli effetti che temperature estreme possono avere sull'interazione tra le pratiche agrivoltaiche e l'ambiente.

Analizzare il sistema sotto condizioni di massimo stress termico permette di valutare la resilienza dell'ecosistema e dell'infrastruttura agrivoltaica progettata, nonché di prevedere possibili impatti sul microclima, sulla salute del suolo, e sulla crescita delle colture. Questo tipo di analisi è particolarmente rilevante in contesti afflitti da cambiamenti climatici, dove gli eventi di calore estremo sono sempre più frequenti e intensi. La comprensione di questi scenari aiuta a formulare strategie di mitigazione e adattamento più efficaci, assicurando la sostenibilità a lungo termine del progetto agrivoltaico.

5.3.2.1. Le mappe tematiche

Temperatura dell'aria (T_{air})

La Figura 15 mostra le differenze di T_{air} nelle azioni di potenziamento ecologico di progetto che costituiranno i bordi di mitigazioni del parco agri-naturalistico-voltaico (vedi Figura 14). Rispetto allo scenario attuale, come già osservato in tabella 15, si **osserva una diminuzione media negli scenari maggiore per l'area con bordo A2.**

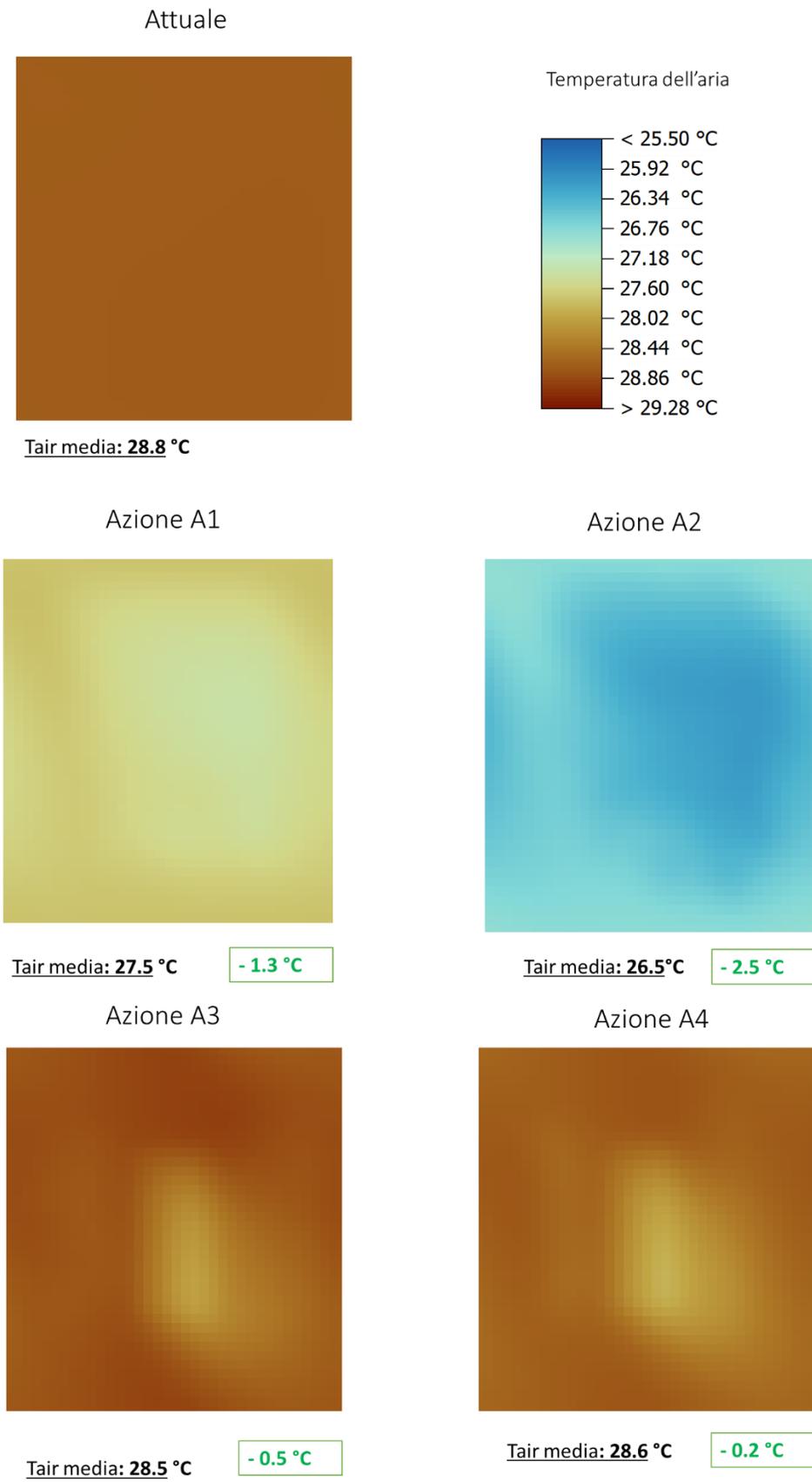


Figura 15: Mappe di distribuzione spaziale di Tair estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.

Umidità relativa atmosferica (RHair)

La Figura 16 mostra le differenze di RH. È evidente che la presenza di vegetazione e l'introduzione di stagni temporanei incide positivamente sull'umidità relativa.

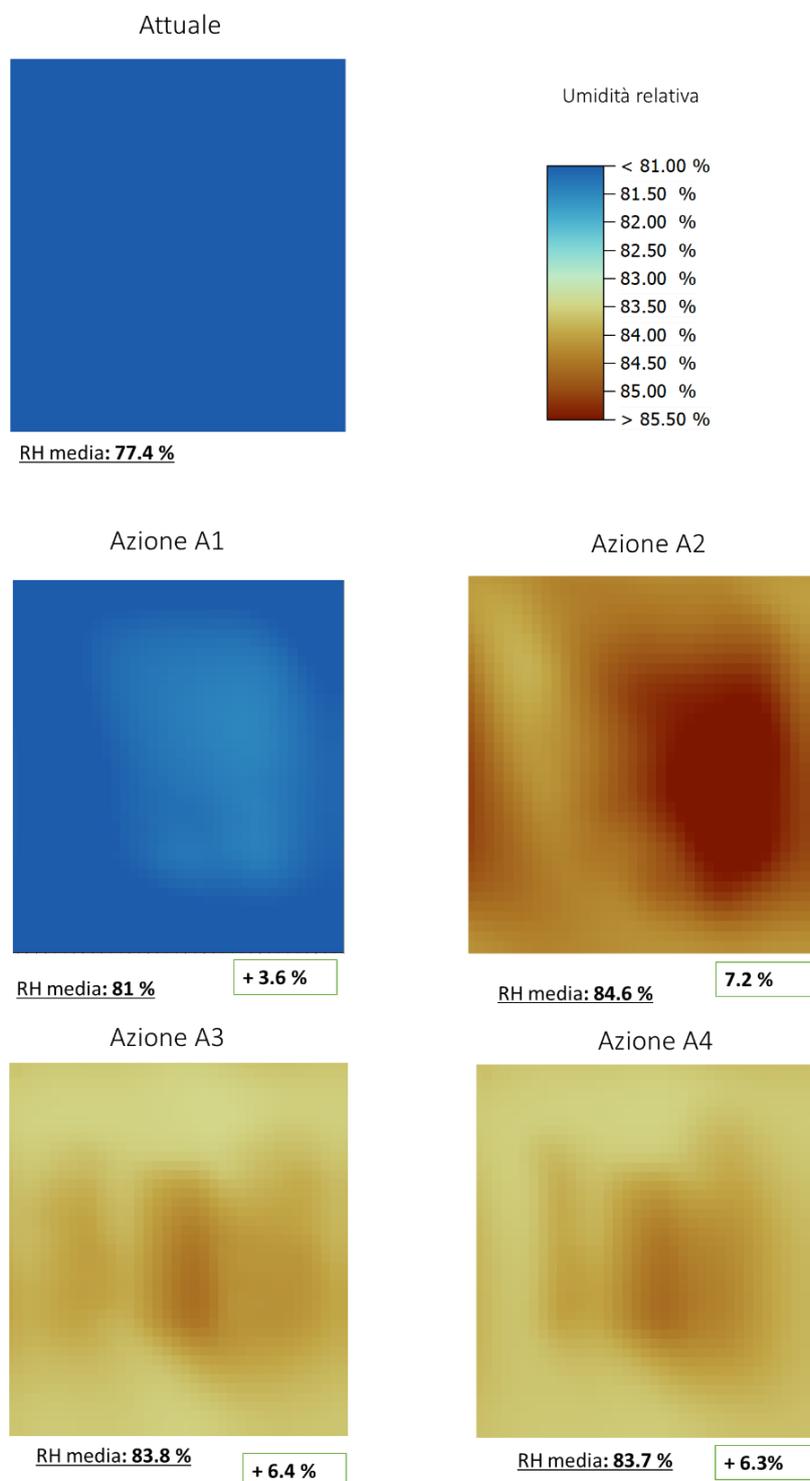


Figura 16: Mappe di distribuzione spaziale di RH estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.

Temperatura superficiale (Tsurf)

La Figura 17 mostra le differenze di Tsurf mettendo in evidenza che la presenza di vegetazione genera un maggiore ombreggiamento del suolo e porta ad una diminuzione della temperatura superficiale.

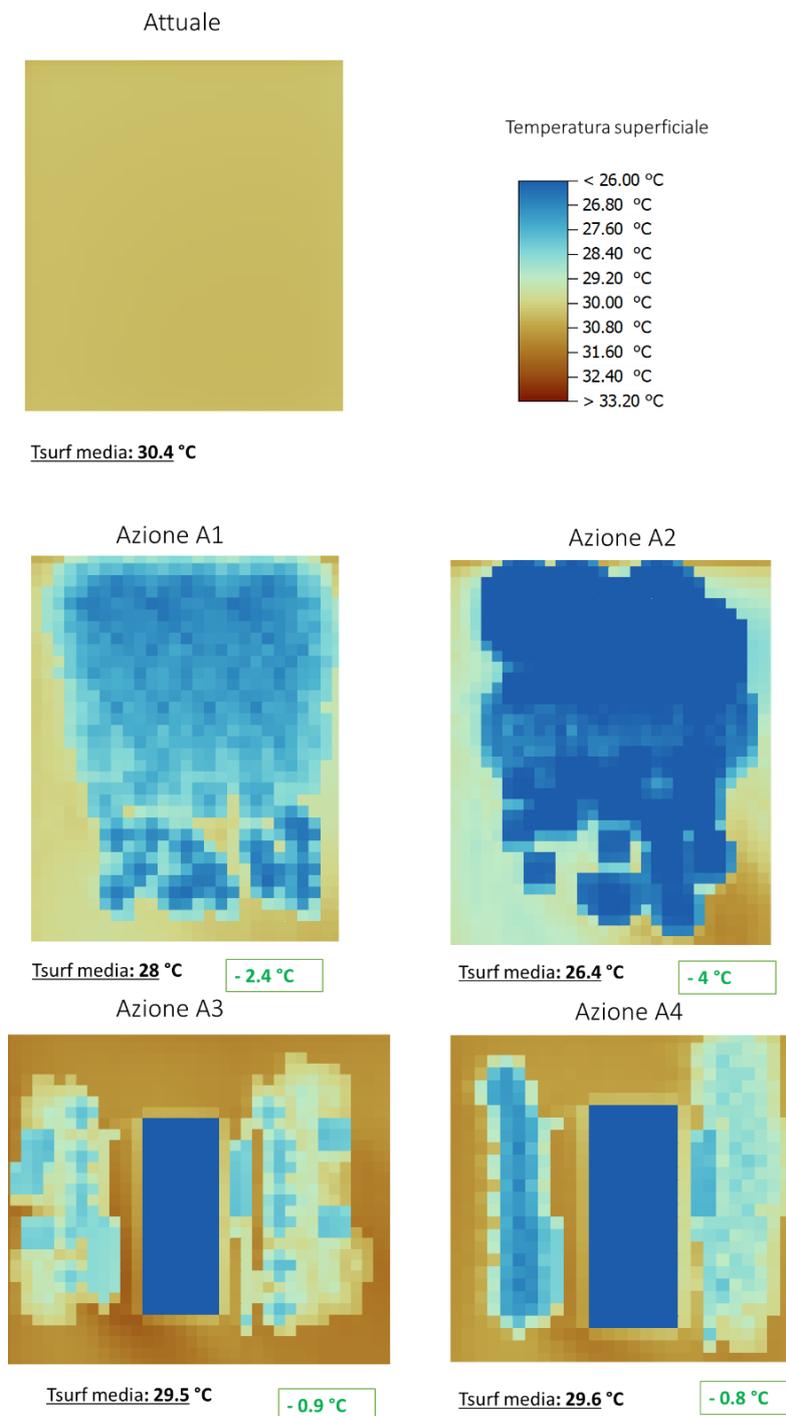


Figura 17: Mappe di distribuzione spaziale di Tsurf estratte alle 12:00.

Temperatura fisiologica equivalente PET

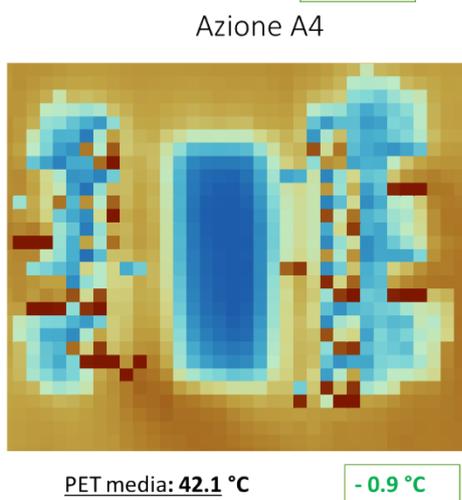
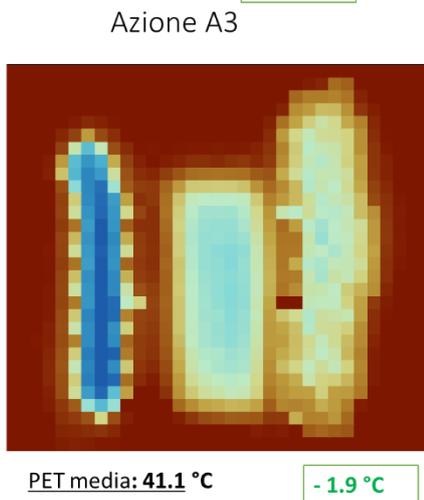
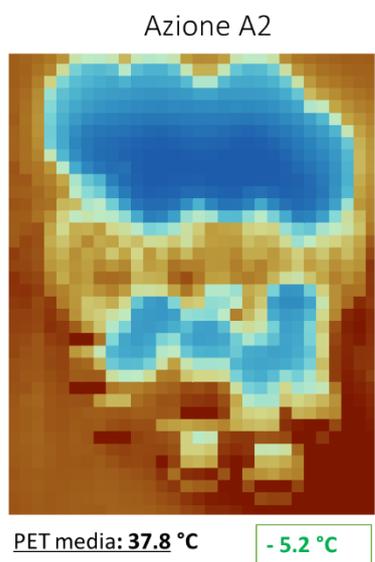
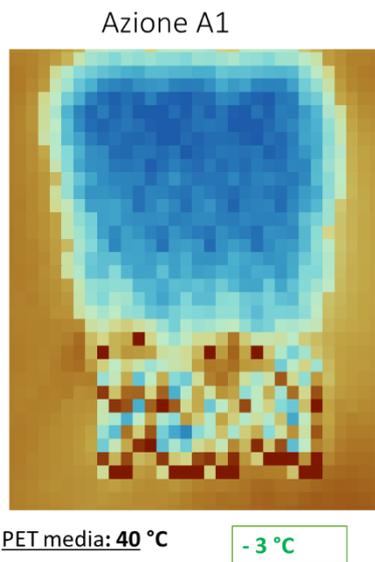
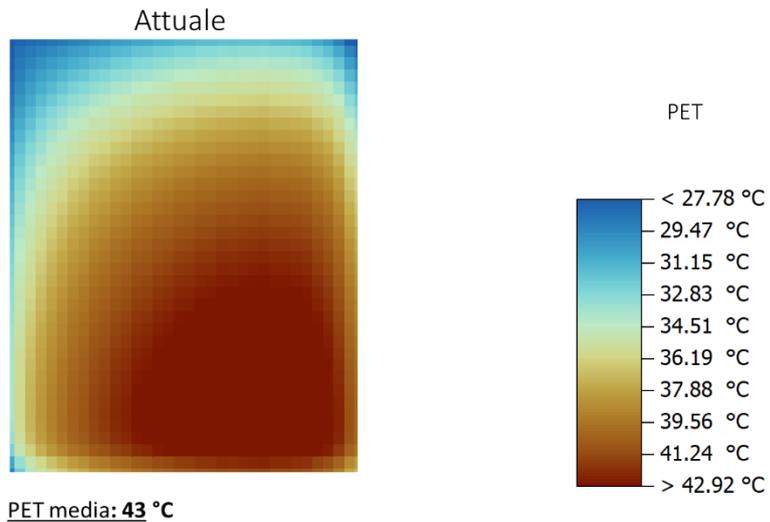


Figura 18: Mappe di distribuzione spaziale di RHsoil estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.

La Figura 18 mostra le differenze di PET negli scenari. Si osserva che la diminuzione massima si raggiunge con l'azione A2, conformemente a quanto osservato per gli altri parametri microclimatici.

Nel contesto di un progetto agrivoltaico, dove le azioni intraprese per la mitigazione prevedono l'introduzione di vegetazione ai suoi bordi, i risultati indicati nella Tabella 15 e visibili nelle mappe tematiche assumono un'importanza strategica. Questa **strategia si focalizza non solo sul miglioramento del comfort termico e sulla riduzione dell'impatto ambientale ma anche sul sostegno alla biodiversità e sulla promozione di un ambiente più equilibrato e sostenibile.**

I risultati possono essere riassunti come segue:

- **Temperatura dell'aria e superficiale:** la significativa riduzione delle temperature, sia dell'aria che superficiale, osservata in particolare con l'azione A2, che è caratterizzata da specie con potenzialità maggiori nella mitigazione microclimatica, è fondamentale per creare un ambiente favorevole alla crescita delle piante. Temperature più basse possono **ridurre lo stress termico** sulle specie vegetali, migliorando la loro crescita e sviluppo. Inoltre, temperature superficiali inferiori possono contribuire a un minore riscaldamento del suolo, favorendo un **miglior apporto idrico e riducendo l'evaporazione dell'acqua**. La diminuzione della temperatura dell'aria massima è di 2.2 °C nell'azione A2 seguita da 1.3 °C nell'azione A1 e 0.3 e 0.2 nell'azione A3 e A4. La temperatura superficiale massima osservata è di 4 °C nell'azione A2 e di 2.37 °C nell'azione A1.
- **Umidità relativa e del suolo:** l'incremento dell'umidità relativa e l'effetto positivo sull'umidità del suolo sono particolarmente vantaggiosi per le piante. Un ambiente più umido riduce il bisogno di irrigazione e sostiene la vita del suolo, essenziale per la salute e la nutrizione delle piante. Questo ambiente umido può anche favorire la biodiversità microbica nel suolo, che a sua volta supporta la crescita delle piante. L'aumento massimo dell'umidità relativa si osserva nell'azione A2 con il 7% in più rispetto allo scenario attuale. Seguono le azioni A3 e A4 che comportano la creazione di stagni temporanei (+6%). L'umidità del suolo aumenta fino al 6% nello scenario A2.
- **Velocità del vento:** la riduzione della velocità del vento, risultato di tutte le azioni ma in particolare dell'Azione A2 (-0.7 m/s), è un altro fattore cruciale per la protezione delle specie vegetali da potenziali danni fisici e dalla disidratazione rapida.
- **Turbulent kinetic energy (TKE):** la diminuzione della TKE suggerisce una riduzione della turbolenza atmosferica nei pressi del terreno, che può essere vantaggiosa per le piante **riducendo l'erosione del suolo e il rischio di danneggiamento delle piante giovani**. Un ambiente meno turbolento è anche più favorevole alla dispersione di semi e al polline, sostenendo la

biodiversità vegetale. Inoltre, anche la presenza dell'impianto agrivoltaico contribuirà a ridurre ulteriormente la TKE. Infatti, gli impianti agrivoltaici, con i loro pannelli e strutture di supporto, alterano la rugosità superficiale e perturbano il flusso d'aria. Questo può risultare in un abbassamento della TKE nelle vicinanze delle strutture, a seconda dell'orientamento e dell'altezza dei pannelli rispetto al terreno.

- ***Physiological Equivalent Temperature*** (PET): la riduzione della PET attraverso le varie azioni evidenzia un miglioramento del comfort termico non solo per gli esseri umani ma anche per le piante. Un ambiente con meno stress termici favorisce la crescita e lo sviluppo delle piante, riducendo il rischio di malattie legate al calore e migliorando la produttività agricola. La riduzione massima osservata, pari a 5 °C si osserva nell'azione A2. In generale, tutte le azioni portano ad un miglioramento del comfort termico con un passaggio dalla condizione di "Caldo estremo" a "Molto caldo" nella scala della percezione termica.

6. Conclusioni

Il presente elaborato tecnico offre un'analisi dettagliata delle **caratteristiche climatiche** dell'area del comune di Minervino Murge (BAT) interessata dal progetto denominato “**Parco Agri Naturalistico Voltaico dell'Alta Murgia**” e degli effetti dello stesso **sul microclima, sul comfort termico e sulla qualità dell'aria**.

Il **raffreddamento** osservato negli scenari di progetto ha due ragioni principali: **l'ombra e l'evapotraspirazione delle specie vegetali** scelte ed è in linea con quanto riscontrato in letteratura scientifica²⁸.

Considerando le evidenze emerse nel seguente studio e sintetizzate nella Tabella 15 è possibile concludere che:

1. Le azioni di potenziamento ecologico del progetto contribuiranno a **ridurre l'uso dell'acqua per l'irrigazione** mediante l'**ombreggiamento** delle specie vegetali e ciò **ridurrà le esigenze idriche delle colture e aumenterà l'efficienza nell'uso dell'acqua nel sistema agrivoltaico**. Inoltre, lo stesso effetto dell'ombreggiamento dei pannelli porterà ad un ulteriore risparmio idrico al di sotto dei pannelli. Questo è particolarmente importante considerato il **pericolo moderato alla siccità** a cui è soggetta l'area e che un aumento della temperatura atmosferica causato dal riscaldamento globale e un aumento delle condizioni meteorologiche estreme causeranno ulteriore stress alle regioni soggette a siccità.
2. **L'accumulo di inquinanti** da parte delle specie vegetali selezionate (vedi Tabella 13) riveste **un'importanza significativa nel contesto dei rischi climatici**. Attraverso l'assorbimento di CO₂ e altri inquinanti atmosferici da parte delle specie vegetali impiegate nel progetto, infatti, 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**.
3. I cambiamenti microclimatici indotti dal progetto hanno un impatto significativo sul **comfort termico**. 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.

²⁸ 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.

4. La mitigazione microclimatica, attraverso l'implementazione di strategie di rafforzamento ecologico come l'introduzione di vegetazione o la creazione di barriere naturali, ha un **impatto significativo sull'efficienza operativa dei moduli fotovoltaici**. Poiché l'efficienza dei pannelli fotovoltaici tende a diminuire con l'aumento della temperatura, la loro capacità di generare energia può essere notevolmente migliorata in ambienti più freschi. Inoltre, la vegetazione può agire come barriera contro il vento e proteggere i pannelli da depositi di polvere e detriti, che possono ridurre l'efficienza. Inoltre, un ambiente stabilizzato riduce il rischio di danni ai moduli fotovoltaici causati da condizioni meteorologiche estreme. Questo evidenzia **l'importanza di considerare l'integrazione ecologica nei progetti di energia rinnovabile**.

Considerati questi presupposti e l'adozione delle azioni chiave sopra elencate, in linea con gli **Orientamenti tecnici per infrastrutture a prova di clima nel periodo 2021-2027 (2021/C 373/01)**, il progetto si configura a prova di clima ed è in linea con la **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.