



REGIONE PUGLIA



PROVINCIA di FOGGIA



COMUNE di APRICENA



COMUNE di SAN SEVERO



Società Proponente	 <b>AM ENERGY 2 S.R.L. *</b> Sede: via Tiberio Solis, n. 128 - 71016 San Severo (FG) Pec: amenergy2@pec.it P.iva: 04351510716 <small>*Società con socio unico, soggetta a direzione e coordinamento di PLAN A HOLDING S.R.L. p.iva 03930741206</small>	Sviluppo e Coordinamento	 <b>PLAN A ENERGY S.R.L.</b> Sede: Via Cavour n.104 40026 Imola BO Pec: planaenergy@pec.it C.F e P.IVA : 03930841204
Progettazione generale e progettazione elettrica	 <b>STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA</b> MEZZINA dott. ing. Antonio Via T. Solis 128   71016 San Severo (FG) Tel. 0882.228072   Fax 0882.243651 e-mail: info@studiomezzina.net Ordine degli ingegneri della Provincia di Foggia matr. n 1604  	Supervisione scientifica piani culturali e montaggio	 <b>Università di Foggia</b> Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria (DAFNE) Sede: via Antonio Gramsci,89/91 Foggia 71122 P.iva: 03016180717
Studio e progetto ecologico vegetazionale	 <b>Dott. Biol. Leonardo Beccarisi</b> Via D'Enghien, 43 - 73013 Galatina (LE) cell. 3209709895 E-Mail: beccarisi@gmail.com Ordine nazionale dei Biologi Albo-Sezione matr. n. AA_067313	Studio di impatto ambientale	 <b>Dott.ssa Anastasia Agnoli</b> Via Armando Diaz, 37   73100 Lecce (LE) cell. 3515100328 E-Mail: anastasia.agnoli989@gmail.com
Studio meteorologico	 <b>Dott. Biol. Elisa Gatto</b> Via S. Santo, 22   73044 Galatone (LE) cell. 3283433525 E-Mail: dottelisagatto@gmail.com Ordine nazionale dei Biologi matr.n. AA_090001	Studio paesaggistico e di inserimento urbanistico	 <b>Dott. Agr. Barnaba Marinosci</b> via Pilella 19, 73040 Alliste (LE) Cell. 329 3620201 E-Mail: barnabamarinosci@gmail.com Ordine dei Dottori Agronomi e Forestali provincia di Lecce matr. n 674
Studio faunistico	 <b>Dott. Antonio Feola</b> Via Civitella n°25   84060 Moio della Civitella (SA) cell. 338 2593262 E-Mail: feolantx@gmail.com Ordine Nazionale dei Biologi matr. n . AA_047004	Rappresentazioni fotorealistiche	 <b>Arch. Gaetano Fornarelli</b> Via Fulcignano Casale 17   73100 Lecce (LE) cell. 3358758545 E-Mail: forgaet@gmail.com Ordine degli Architetti della provincia di Lecce matr. n 1739
Studio archeologico	 <b>NOSTOI s.r.l.</b> <b>Dott.ssa Maria Grazia Liseno</b> Tel. 0972.081259   Fax 0972.83694 E-Mail: mgliseno@nostoisrl.it Elenco Nazionale Archeologo Fascia I matr n. 1646	Consulenza strutturale	 <b>Ing. Tommaso Monaco</b> Tel. 0885.429850   Fax 0885.090485 E-Mail: ing.tommaso@studiotecnicomonaco.it Ordine degli Ingegneri della provincia di Foggia matr. n. 2906
Studio acustico	 <b>Ing. Antonio Falcone</b> Tel. 0884.534378   Fax. 0884.534378 E-Mail: antonio.falcone@studiofalcone.eu Ordine degli Ingegneri di Foggia matr. n.2100	Consulenza topografica	 <b>Geom. Matteo Occhiochiuso</b> Tel. 328 5615292 E-Mail: matteo.occhiochiuso@gmail.com Collegio dei Circondariale Geometri e Geometri Laureati di Lucera matr. n. 1101
Studio idraulico geologico e geotecnico	 <b>Dott. Nazario Di Lella</b> Tel./Fax 0882.991704   cell. 328 3250902 E-Mail: geol.dilella@gmail.com Ordine regionale dei Geologi della Puglia matr. n. 345		
Opera	<b>Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto Agri-Fotovoltaico denominato "Apricena Agricolo" da realizzarsi su aree agricole ricadenti nella "Solar Belt" delle aree a destinazione industriale, artigianale e commerciale e cave nelle località "Podere Camilli - San Giovanni - Corrado", nel territorio comunale di Apricena (FG) per una potenza complessiva di 88,529 MWp ed immissione di 70,4 MW, nonché delle opere connesse ed infrastrutture indispensabili alla costruzione ed all'esercizio dell'impianto nei comuni di Apricena (FG) e San Severo (FG).</b>		
AUTORITA' PROCEDENTE V.I.A. :	 MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA	AUTORITA' PROCEDENTE A.U. :	 REGIONE PUGLIA
Oggetto	Nome Elaborato: 8526816_DocumentazioneSpecialistica_01.2.pdf Descrizione Elaborato: Studio meteo-climatico		
00	Gennaio 2023	Progetto definitivo	Ing. A. Mezzina AM ENERGY 2 S.R.L.
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione Verifica Approvazione
Scala:			
Formato:	Codice Pratica	<b>8526816</b>	



# STUDIO METEO – CLIMATICO COMUNE DI APRICENA

*Progetto di realizzazione di un impianto  
Agri-Fotovoltaico denominato "Apricena  
Agricolo"*

A cura di  
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD  
Biologa



## Sommario

Introduzione.....	2
1. Inquadramento meteo-climatico .....	2
1.1 Qualità climatica dell'area di studio .....	5
1.1.1. Benessere animale.....	5
1.1.2. Benessere umano.....	6
2. Analisi dei rischi climatici fisici.....	7
2.1 Alte temperature .....	8
2.2. Precipitazioni intense.....	10
2.3. Siccità.....	11
2.4. Incendi.....	12
3. Soluzioni di adattamento .....	12
3.1. Studio modellistico: ENVI-met .....	13
4. Metodologia e set-up modellistico.....	14
4.1. Parametri investigati .....	16
4.2. Deriva dei prodotti fitosanitari e dispersione delle polveri da cava.....	16
4.3. Microclima .....	17
4.3.1. Albedo e inquinamento termico .....	17
4.3.2. Indici di comfort termico.....	17
4.3.2.1. Temperatura media radiante MRT.....	17
4.3.2.2. Temperatura fisiologica equivalente PET .....	18
5. Risultati.....	19
5.1. Deriva dei prodotti fitosanitari e Dispersione delle polveri da cava .....	19
5.2. Micrometeorologia e Comfort termico .....	19
6. Conclusioni.....	22

## Introduzione

Il presente elaborato tecnico è strutturato nelle seguenti fasi di analisi:



La scelta di tale metodologia operativa è stata guidata dagli orientamenti tecnici sull'applicazione del principio "non arrecare un danno significativo"<sup>1</sup> a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e resilienza<sup>2</sup> ed è, quindi, altresì focalizzata 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.

### 1. Inquadramento meteo-climatico

Per la descrizione meteo-climatica dell'area di studio sono state analizzate le medie mensili e annue di temperatura (°C), precipitazione (mm) e umidità relativa (%) registrate nel periodo di riferimento considerato 2009-2020 dalla stazione meteorologica della Protezione Civile Puglia sita in Apricena.

Secondo la classificazione di Köppen - Geiger<sup>3</sup>, l'areale in oggetto 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 a miti (Figura 1).

---

<sup>1</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>2</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»)"

<sup>3</sup> Wladimir Köppen, 1936. *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger.

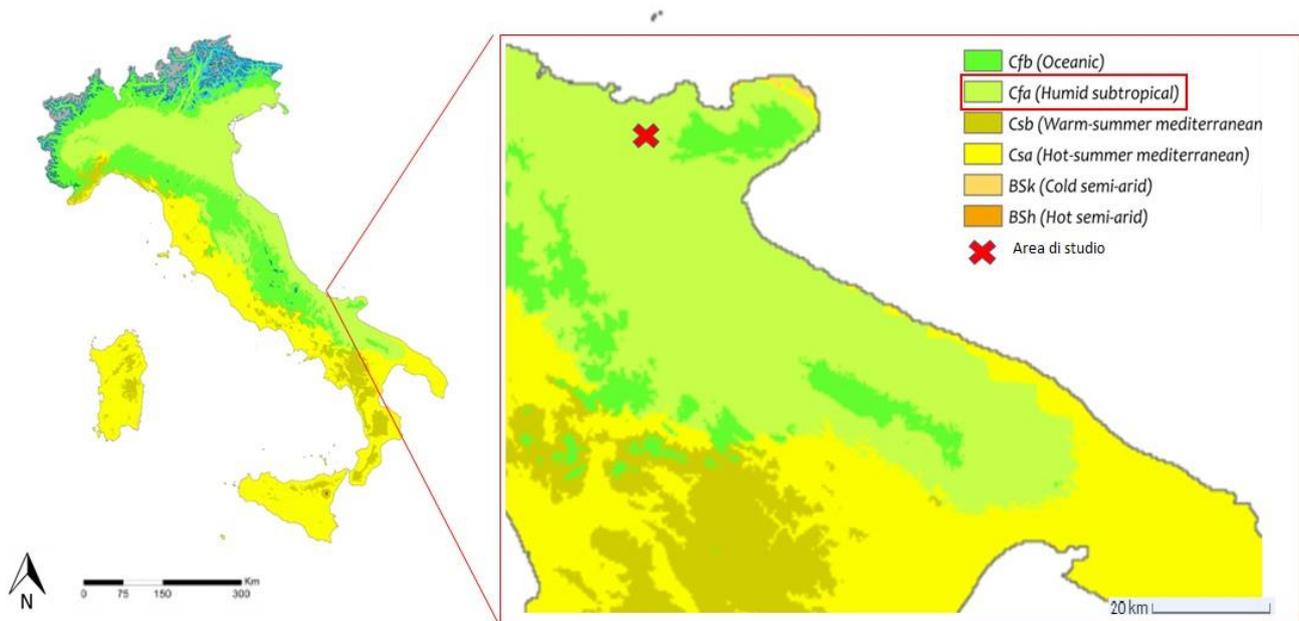


Figura 1. Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

Nello specifico, la Tabella 1 riporta i valori medi dei parametri meteorologici che influenzano il clima dell'area di studio, misurati dalla stazione di riferimento nel dataset temporale 2009-2020. Dall'analisi del dataset, emerge che l'area è caratterizzata da una temperatura media annuale di 15.6 °C e da una piovosità annuale di 632 mm.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
<b>Medie temperatura (°C)</b>	6,8	7,9	10,3	13,7	17,5	21,7	25,3	25,6	21,4	16,4	12,3	8,0
<b>Temperatura minima (°C)</b>	2,0	2,8	4,2	7,1	10,8	15,6	18,1	18,8	15,3	10,9	7,5	3,1
<b>Temperatura massima (°C)</b>	11,6	13,0	16,3	20,4	24,2	29,8	32,4	32,4	27,5	21,9	17,1	12,9
<b>Precipitazioni (mm)</b>	62	54	59	63	47	34	29	32	57	58	69	68
<b>Umidità (%)</b>	76	73	71	68	63	56	52	56	65	73	75	77
<b>Giorni di pioggia (g.)</b>	7	8	7	7	6	4	3	4	6	6	7	8
<b>Ore di sole (ore)</b>	5,7	6,4	8,1	9,9	11,6	12,7	12,7	11,7	9,4	7,5	6,4	5,6

Tabella 1. Medie mensili per i parametri meteorologici considerati. L'intensità del colore è direttamente proporzionale all'intensità del valore misurato. I dati sono estrapolati dal dataset della stazione meteorologica di Apricena della Protezione Civile Puglia<sup>4</sup> e si riferiscono al range temporale 2009-2020.

I mesi più caldi dell'anno sono Luglio e Agosto con una temperatura media di 25 °C circa e valori massimi che raggiungono 32 °C, mentre il mese più freddo è Gennaio con una media di 6.8 °C. Il mese più secco è Luglio, con una media di 29 mm di pioggia e un'umidità relativa del 52 %, mentre i mesi con maggiori piogge sono Novembre con una media di 69 mm e un'umidità relativa del 75 % e Dicembre con una media di 68 mm e un'umidità relativa del 77%. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 40 mm.

Dicembre ha in media i giorni più piovosi al mese (giorni: 8). Il minor numero di giorni di pioggia si registra nei tre mesi estivi Giugno, Luglio e Agosto (giorni: 4-3-4 rispettivamente).

<sup>4</sup> <https://protezionecivile.puglia.it/>

Il riferimento principale per definire il **regime anemologico** dell'area in esame è rappresentato dalla "rosa dei venti" riprodotta in Figura 2, calcolata considerando il dataset di dati dal 2019 al 2021 della stazione meteorologica di Arpa Puglia sita a San Severo (FG), a 13 km di distanza dall'area investigata. Tale stazione meteo risulta essere la più vicina all'area di studio con dati completi e validati di direzione e velocità del vento. In questa figura sono indicate graficamente le frequenze percentuali (sul totale dei dati esaminati) della direzione del vento a loro volta suddivise anche sulla base della velocità del vento associata a tali direzioni.

La forma della rosa dei venti evidenzia una prevalenza delle direzioni nord - ovest, comportamento caratteristico e tipico dell'hotspot climatico mediterraneo. Come si può notare, le maggiori frequenze sono associate a venti moderati (bave di vento) con velocità compresa tra 0,5 m/s e 2,1 m/s che costituiscono circa il 60% del totale dei casi analizzati.

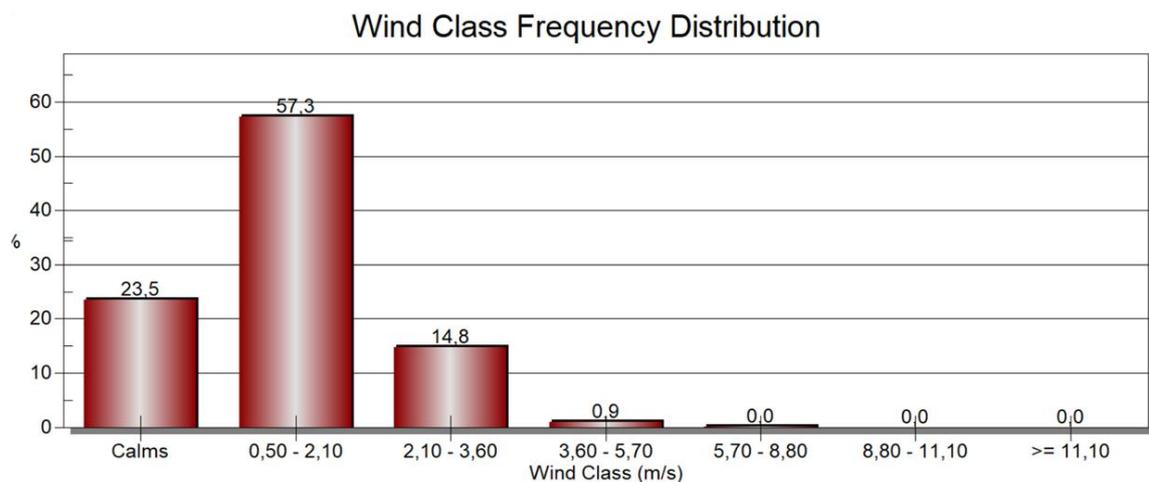
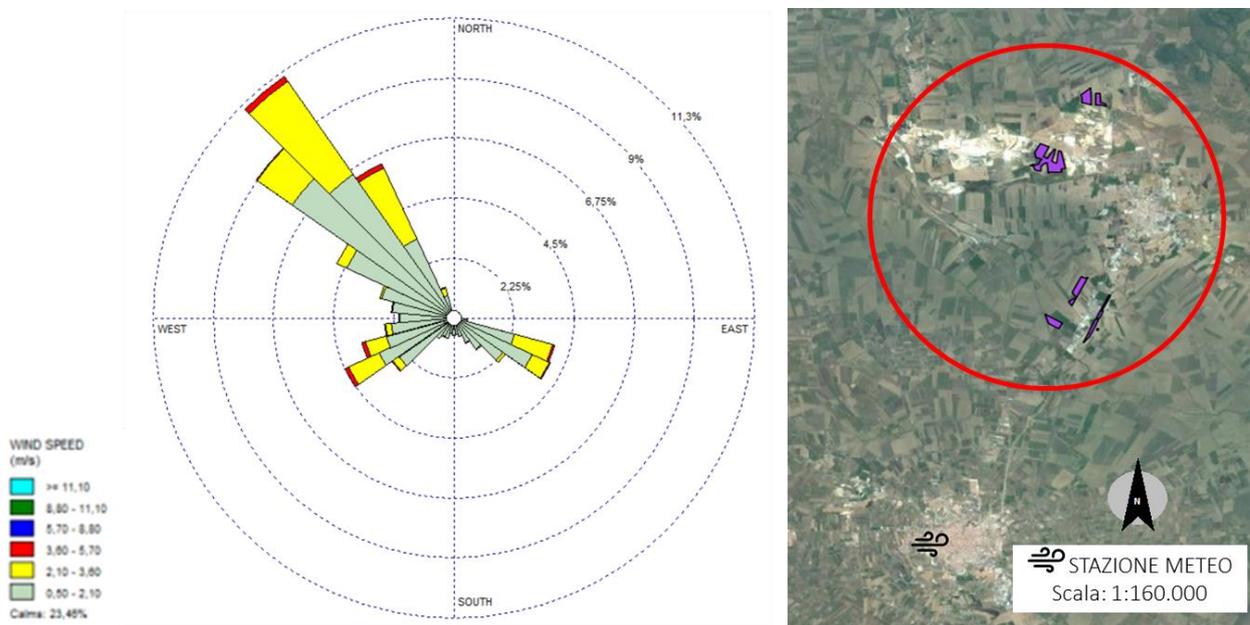


Figura 2. Rosa dei venti calcolata in base ai dati degli anni 2019-2021 della stazione di monitoraggio meteorologica di Arpa Puglia sita a San Severo (FG). L'istogramma in basso riporta la frequenza delle classi di vento (m/s).

## 1.1 Qualità climatica dell'area di studio

La qualità o la criticità di un'area dal punto di vista climatico è tipicamente data dal rapporto tra temperatura e umidità. La figura 3 mostra graficamente il rapporto tra le due variabili meteorologiche. In particolare, riporta i valori massimi, minimi e medi della temperatura (Ta) e i valori medi dell'umidità relativa (RH).

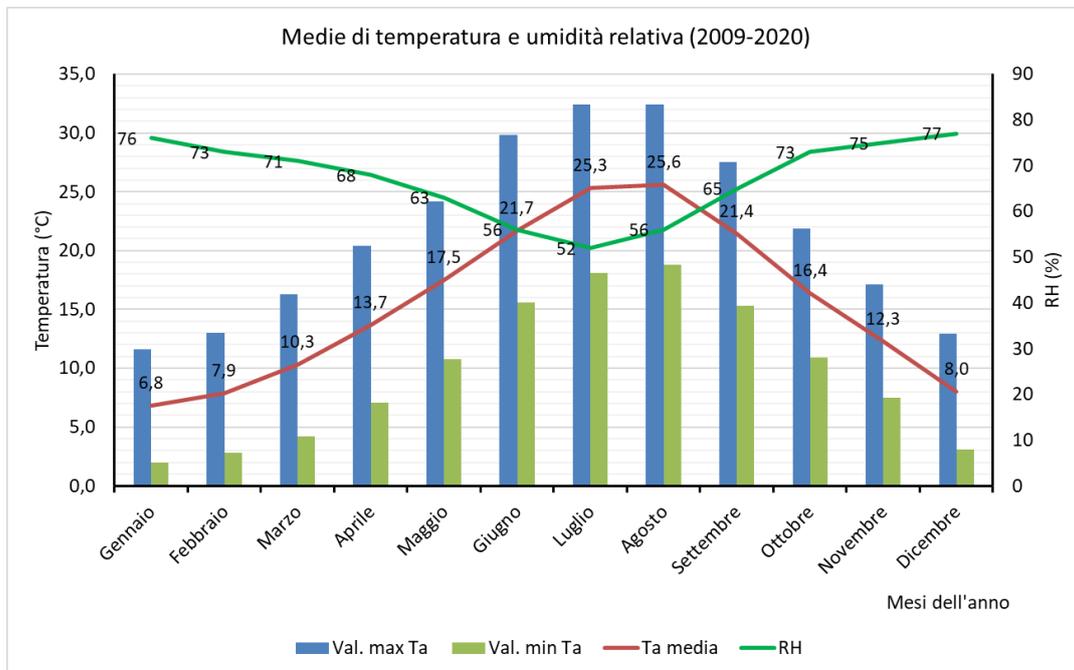


Figura 3. Valori massimi (Val. max Ta), minimi (Val. min Ta) e medi (Ta media) della temperatura (°C) e i valori medi dell'umidità relativa (RH, %).

Per analizzare gli effetti combinati della temperatura ambientale e dell'umidità relativa e valutare il rischio di stress da calore sia sulla componente animale che umana, sono stati calcolati due indici di qualità climatica: *Temperature Humidity Index* (THI) e il *Discomfort Index* (DI)<sup>5</sup>.

### 1.1.1. Benessere animale

L'indice THI massimo giornaliero permette di valutare la temperatura ambientale percepita dagli animali in relazione ai valori dell'umidità relativa dell'aria (ottenuto applicando il modello NOAA, 1976<sup>6</sup>) è stato proposto dal CRA-CMA<sup>7</sup> come miglior indicatore bioclimatico per la pianificazione delle strategie di mitigazione degli effetti del caldo sulla salute e sulle performance produttive degli animali allevati in settori altamente specializzati.

L'indice THI<sup>8</sup> è stato calcolato come:  $THI = 0,8 \cdot Ta + RH \cdot (Ta - 14,4) + 46,4$ ; con Ta = temperatura dell'aria (°C) e RH = umidità relativa espressa come proporzione.

<sup>5</sup> Thom E. C. 1959. *The discomfort index*. *Weatherwise*, 12, 57-60

<sup>6</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration National Aeronautics and Space Administration United States Air Force, Washington, D.C, October 1976

<sup>7</sup> Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria - Unità di ricerca per la Climatologia e la Meteorologia Applicate all'Agricoltura

<sup>8</sup> Steadman RG. 1979. *The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science*. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 18: 861-873.

I livelli di stress sono stati suddivisi in: Lieve (da 72 a 79 THI); Moderato (da 80 a 89 THI); Grave (90 THI o superiore).

La soglia limite dell'indice di benessere animale è differente per le specie animali. Studi recenti mostrano che oggi i bovini sono molto più sensibili allo stress da calore a causa dell'aumento della produzione di latte e dell'assunzione di cibo. Le vacche da latte moderne cominciano a patire il caldo a partire da un THI medio di 68 (Vitali, 2009<sup>9</sup>). Quando il THI supera 72, è probabile che le mucche inizino a subire uno stress da calore e la loro fertilità venga influenzata. Quando il THI supera 78, la produzione di latte vaccino è seriamente compromessa. Quando il THI sale sopra l'82, sono probabili perdite significative nella produzione di latte, le mucche mostrano segni di grave stress e alla fine possono morire. La scrofa lo stress da caldo inizia con valori del THI maggiori di 74 e per i polli da carne lo stress da caldo inizia con valori del THI maggiori di 78.

La Tabella 2 riporta i valori di THI calcolati sulle medie mensili (2009-2020). In generale, si osserva che non si hanno condizioni importanti di stress termico. Dicembre, Gennaio e Febbraio hanno i valori più bassi di THI mentre Luglio e Agosto rientrano nella categoria di stress lieve.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
THI (°C)	46	48	52	57	62	68	73	74	68	61	55	48

Tabella 2. Risultati di *Temperature Humidity Index* calcolati sulle medie mensili di Ta e RH riportate in Tabella 1.

### 1.1.2. Benessere umano

L'indice DI per il disagio climatico stima la "temperatura effettiva", definita come la combinazione, in un unico valore espresso in gradi Celsius, dell'effetto di temperatura, umidità e movimento dell'aria sulla sensazione di caldo o freddo percepita dal corpo umano. Questo indice è adatto per descrivere le condizioni di disagio fisiologico dovute al caldo-umido ed è sensibile in un intervallo termico compreso tra 21°C e 47°C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce sempre la condizione fisiologica alle classi estreme, cioè "benessere" per temperature inferiori a 21°C e "stato di emergenza sanitaria" per temperature superiori a 47°C.

È stato calcolato come:  $DI = 0.4 (Ta + Tw) + 4.8$ ; dove Ta = temperatura di bulbo asciutto (°C) e Tw = temperatura di bulbo umido (°C). I livelli di stress termico sono indicati in Tabella 4.

▶ ≤ 21	Stato di benessere generalizzato, nessun disagio.
▶ 21 ÷ 24	Meno di metà della popolazione prova disagio.
▶ 25 ÷ 27	Più di metà della popolazione prova disagio.
▶ 28 ÷ 29	La maggioranza della popolazione prova disagio e un deterioramento dello stato psico-fisico.
▶ 30 ÷ 32	Tutta la popolazione prova un forte disagio.
▶ ≥ 32	Stato di emergenza sanitaria per il disagio molto forte con elevato rischio di colpi di calore.

Tabella 3. Scala di valori di *Discomfort Index* cui corrisponde una categoria di stress termico.

<sup>9</sup> A. Vitali, A. Felici, S. Esposito, U. Bernabucci, L. Bertocchi, C. Maresca, A. Nardone, N. Lacetera, 2015. The effect of heat waves on dairy cow mortality. *Journal of Dairy Science*, Volume 98, Issue 7, Pages 4572-4579

Dai risultati illustrati nella Tabella 4 è possibile osservare che solo per i mesi estivi Luglio e Agosto, in linea con quanto già osservato nei profili delle variabili meteorologiche in Figura 3, si osserva che meno di metà della popolazione prova disagio mentre per i restanti mesi dell'anno non si registra nessun disagio e vi è una condizione di benessere generalizzato.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
DI (°C)	<21	<21	<21	<21	<21	<21	22	23	<21	<21	<21	<21

Tabella 4. Risultati di *Discomfort Index* calcolati sulle medie mensili di Ta e RH riportate in Tabella 1.

Dai risultati emersi è possibile concludere che nell'area di studio non sussistono criticità climatiche e che la stessa non è soggetta a condizioni di stress termico estreme e che, dunque, ha una qualità climatica tale da non richiedere, allo stato di fatto, urgenti opere di mitigazione.

## 2. Analisi dei rischi climatici fisici

Questa sezione riporta le proiezioni climatiche valutate per identificare i rischi climatici fisici dell'area; 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>10</sup>.

Nello specifico, la valutazione è effettuata utilizzando proiezioni climatiche avanzate alla massima risoluzione disponibile nella serie esistente di scenari futuri<sup>11</sup> coerenti con la durata prevista dell'attività e quindi da 10 a 30 anni.

Gli strumenti utilizzati sono: *ThinkHazard!*<sup>12</sup>, un modello web-based sviluppato dal *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* e la piattaforma *Climate-ADAPT*<sup>13</sup> sviluppata dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Europea dell'Ambiente.

Considerata la natura del progetto, la posizione dell'area di studio e le caratteristiche ambientali e microclimatiche attuali, sono stati considerati i rischi riportati in Tabella 5. La stessa riporta una panoramica dei livelli di pericolo che saranno poi approfonditi nelle sottosezioni che seguono.

RISCHIO	LIVELLO DI PERICOLO
ALTE TEMPERATURE	Moderato
PRECIPITAZIONI INTENSE	Moderato
SICCITA'	Moderato
INCENDI	Alto

Tabella 5. Rischi climatici fisici e livelli di pericolo riferiti a proiezioni future nell'area di studio.

<sup>10</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/>.

<sup>11</sup> Gli scenari futuri comprendono i percorsi di concentrazione rappresentativi (RCP, Representative Concentration Pathways) del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5.

<sup>12</sup> GNU General Public Licence, Version 3, 29 June 2007

<sup>13</sup> <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

## 2.1 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>14</sup>. Secondo il sesto rapporto di valutazione del gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici<sup>15</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 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 5 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 **28.11 stress da calore moderato**.

---

<sup>14</sup> EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

<sup>15</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

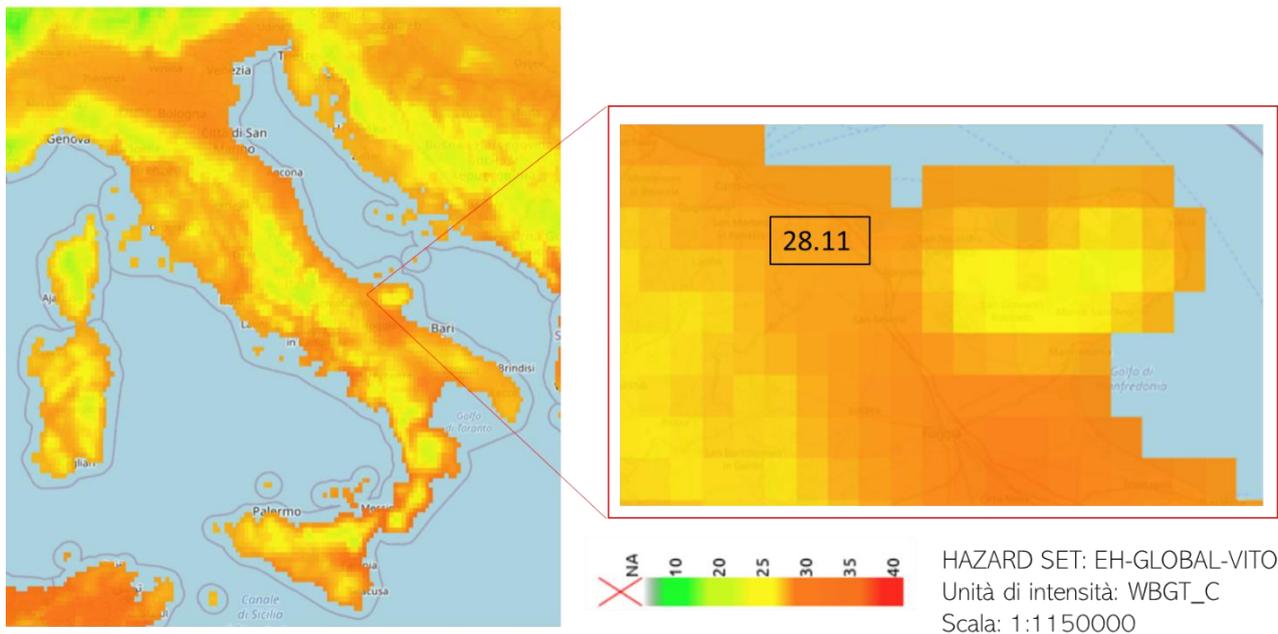


Figura 4. Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello *ThinkHazard!*.

La piattaforma *Climate-ADAPT* per calcolare il possibile sviluppo del clima utilizza gli scenari di emissione dei gas a effetto serra e degli aerosol detti Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (*Representative Concentration Pathways, RCP*) che indicano un andamento rappresentativo delle concentrazioni dei gas a effetto serra e degli aerosol per un determinato obiettivo climatico.

Nella Figura 5 è riportato il numero di ondate di calore estreme previste dal modello *Climate-ADAPT* nei 33 anni compresi tra il 2020 e il 2052 nell'area di riferimento. Il modello considera lo scenario RCP 8.5 che suppone che non vi sia alcun provvedimento in favore della protezione del clima e che quindi le emissioni di gas a effetto serra aumentino in modo continuo fino ad un forzante radiativo di 8.5 W/m<sup>2</sup> nel 2100.

La previsione per l'area di riferimento è di **9 ondate di calore estremo** (pericolo moderato/alto) negli anni tra il 2020-2052.

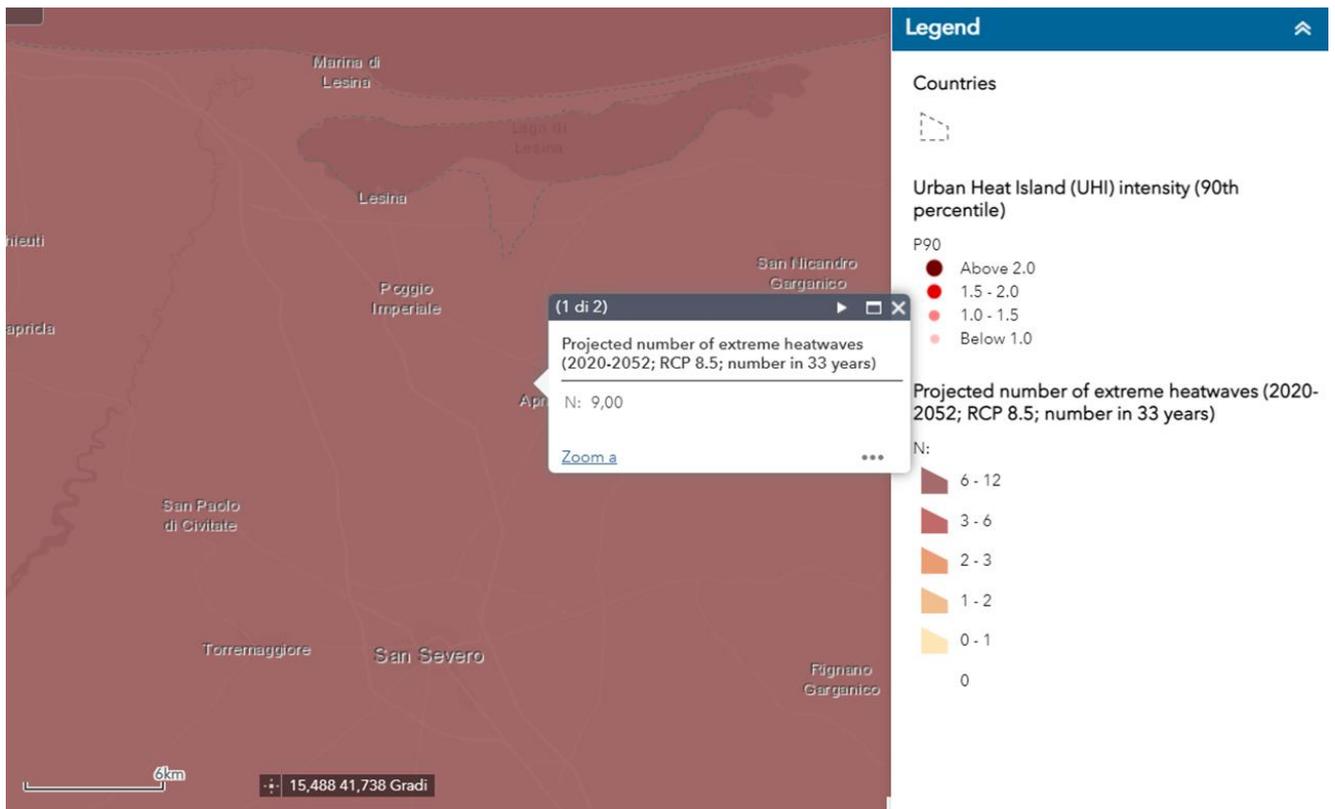


Figura 5. Ondate di calore estreme previste dal modello *Climate-ADAPT* nei 33 anni compresi tra il 2020 e il 2052 nell'area di riferimento

## 2.2. Precipitazioni intense

Le precipitazioni intense (troppa pioggia che cade troppo velocemente) possono provocare inondazioni e frane. Un decimo della popolazione urbana europea vive attualmente in zone a rischio inondazioni<sup>16</sup>. Tra il 1980 e il 2017, le inondazioni hanno tolto la vita a circa 4.300 persone e sono costate all'economia europea più di 170 miliardi di euro, rappresentando quasi un terzo dei danni totali dovuti ai pericoli naturali<sup>17</sup>. Si prevede che il riscaldamento globale porti a una maggiore intensità delle precipitazioni e a periodi di siccità più lunghi in Europa<sup>18</sup>. Le proiezioni mostrano un aumento delle precipitazioni pesanti giornaliere nella maggior parte dell'Europa in inverno, fino al 35% durante il XXI secolo.

In Figura 6 è riportata la previsione, ottenuta con il modello *Climate-ADAPT*, 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 rischio è moderato con un aumento previsto delle precipitazioni intense compreso tra il 5 e 15%.

<sup>16</sup> AEA, 2020: *Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe*

<sup>17</sup> AEA, 2020: *Economic losses from climate-related extremes in Europe*

<sup>18</sup> IPCC, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012), <http://ipcc-wg2.gov/SREX/report/>; Hov et al., *Extreme Weather Events in Europe: Preparing for Climate Change Adaptation*.

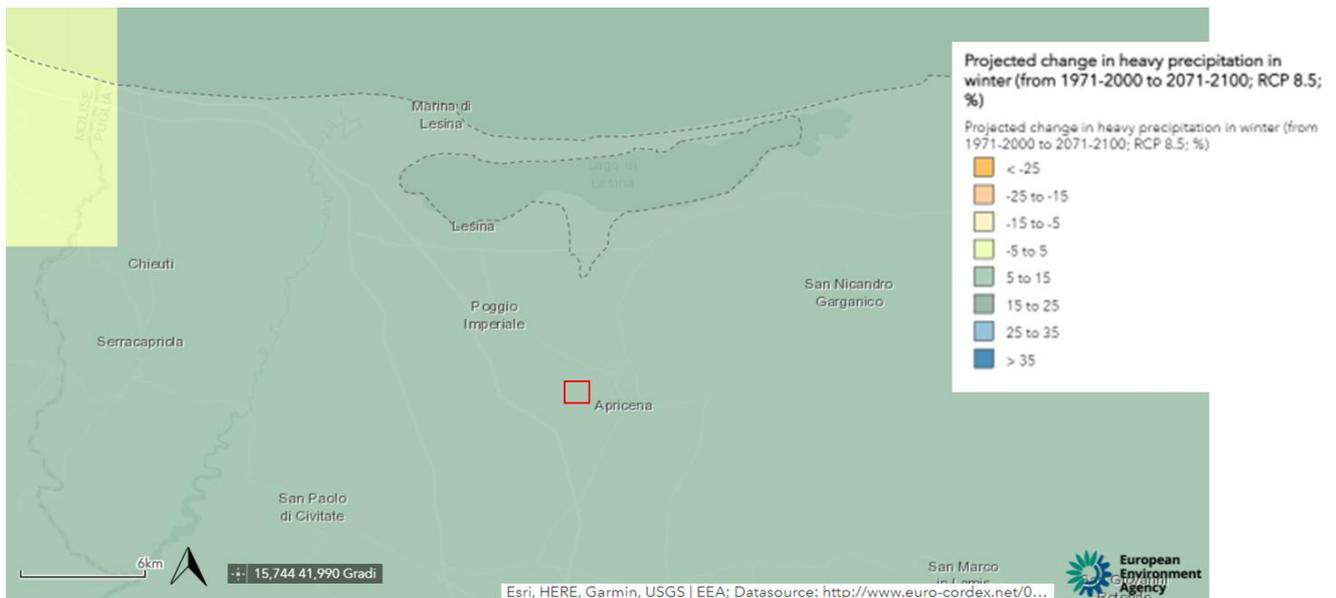


Figura 6. Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

### 2.3. Siccità

Nell'area d'interesse il **rischio** di siccità è classificato, secondo i modelli *Climate-ADAPT* e *ThinkHazard* come **moderato** secondo le informazioni attualmente disponibili. Ciò significa che c'è fino al 20% di possibilità che si verifichino condizioni di siccità nei prossimi 10 anni.

La Figura 7 riporta la previsione, ottenuta con il modello *Climate-ADAPT*, della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5. La frequenza è compresa tra **2 e 4 eventi siccitosi**.

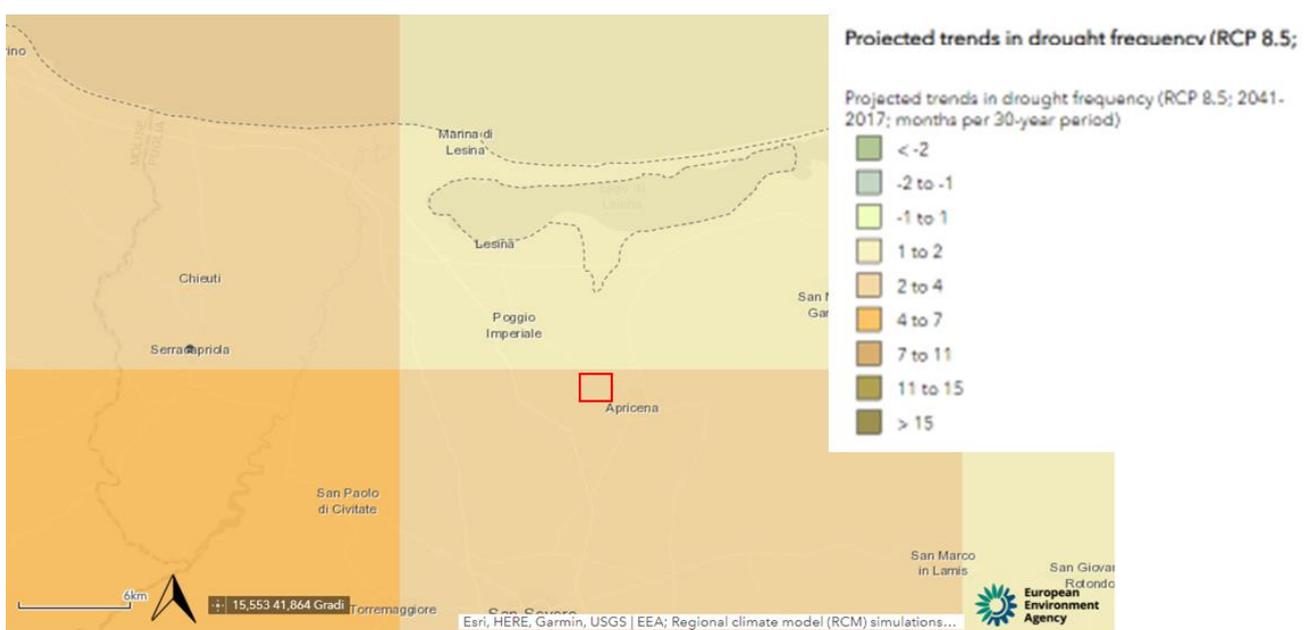


Figura 7. Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

## 2.4. 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>19</sup>.

Il rischio incendi viene calcolato nel modello *ThinkHazard!* attraverso l'indice *Canadian Fire Weather Index* (FWI) che è il sistema di classificazione del pericolo di incendio più usato a livello mondiale. Il FWI integra diversi fattori meteorologici che influenzano la probabilità che un incendio di una copertura vegetativa si accenda e si diffonda. L'indice si basa su misurazioni istantanee (o previsioni) di temperatura, umidità relativa e velocità del vento. Inoltre, lo storico delle precipitazioni a lungo termine viene usato per valutare la secchezza del materiale combustibile disponibile e dunque per valutare il livello di diffusione del fuoco.

In *ThinkHazard!* le soglie di intensità dannose sono: alta: FWI >30; media: 30 <FWI< 20; bassa: FWI< 20.

Nell'area di interesse il pericolo di incendi è classificato come **alto** secondo le informazioni attualmente disponibili e valutando i prossimi 10 anni, con un indice **FWI** di circa **132**. Questo significa che c'è più del 50% di possibilità che si sviluppi un incendio significativo.

## 3. Soluzioni di adattamento

Nell'ambito del *Recovery and Resilience Facility* RRP (Regolamento (UE) 2021/241), la produzione di elettricità da pannelli solari è considerata un'attività che contribuisce in modo sostanziale all'obiettivo della mitigazione dei cambiamenti climatici. La diffusione di dette tecnologie è infatti ritenuta necessaria per un'economia climaticamente neutra e per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per il 2030 e 2050. Tuttavia, per garantire il rispetto del contributo sostanziale alla mitigazione dei cambiamenti climatici e la significativa riduzione di emissioni di gas a effetto serra, le linee guida della Commissione Europea previste dal RRP dispongono l'adozione di tutte le **strategie** disponibili perché la **produzione di elettricità da pannelli solari sia efficiente**.

La produzione di energia rinnovabile attraverso moduli fotovoltaici è strettamente dipendente dalle variabili meteorologiche in termini di efficienza energetica dell'impianto. L'efficienza riportata dai produttori di pannelli solari si riferisce alle prestazioni in condizioni di test standard (STC) solitamente con un irraggiamento di 1000 W/m<sup>2</sup> e una temperatura delle celle di 25 °C (IEC, 2016). Tuttavia, in condizioni operative reali, la temperatura del modulo è spesso superiore a 25 °C, causando un'efficienza energetica inferiore. Secondo Bücher (1997) per le celle in silicio cristallino, la caduta dell'efficienza, che è descritta dal coefficiente di temperatura ( $\beta_{ref}$ ), è circa 0,4 % per ogni °C di aumento della temperatura della cella al di sopra della temperatura di riferimento STC. A seconda del periodo dell'anno, questo può portare a diminuzioni nella produzione di energia fino al 30% in meno di quanto ci si aspetta dalle condizioni STC.

I rischi fisici legati al clima che potrebbero pesare sulla misura sono stati valutati in un'analisi dell'esposizione, riguardante sia il clima attuale che quello futuro (vedi sez. 1 e 2), dalla quale è emerso che nell'area di studio non sussistono attualmente criticità climatiche e che la stessa non è soggetta a

---

<sup>19</sup> EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

condizioni di stress termico estreme ma, analizzando le proiezioni future, essa si troverà esposta a ondate di calore e sarà soggetta a eventi siccitosi.

Considerati dunque gli scenari climatici futuri, gli obiettivi principali del seguente studio sono: (i) calcolare la variazione dei parametri microclimatici in diversi scenari di progetto valutando l'impatto ambientale dell'opera e di ciascuna misura adottata nel progetto rispetto ad una situazione senza alcun impatto ambientale<sup>20</sup>, (ii) elaborare le più efficaci soluzioni di adattamento.

La Tabella 6 descrive sinteticamente il processo analitico seguito, riportando gli assunti scientifici da cui si è partiti in merito all'inquinamento da gas serra e termico generato da un impianto fotovoltaico e Agri-Fotovoltaico. Gli stessi hanno permesso di identificare obiettivi e strumenti dell'indagine che ha poi condotto alla scelta delle **soluzioni progettuali ottimali**.

	Qualità dell'aria	Microclima
Impianto fotovoltaico	Nessuna emissione gas serra	Probabile inquinamento termico
<b>PREVISIONE</b>	-	Diminuzione albedo <sup>21</sup>
Impianto Agri-Fotovoltaico	Nessuna emissione gas serra	Assenza di inquinamento termico
<b>PREVISIONE</b>	Abbattimento degli inquinanti di origine agricola dovuto all'azione della vegetazione <sup>22</sup>	- L'aggiunta di vegetazione mitiga il microclima, migliora il comfort termico e compensa l'effetto dovuto alla diminuzione dell'albedo. - Aumento ombreggiamento con conseguente risparmio idrico
<b>OBIETTIVI</b>	Quantificare la rimozione di inquinanti di origine agricola	- Quantificare il cambiamento di albedo - Analisi parametri microclimatici - Analisi del comfort termico
<b>STRUMENTI</b>	ENVI-met	ENVI-met

Tabella 6. Processo e metodologia analitica.

### 3.1. Studio modellistico: ENVI-met

ENVI-met è un modello microclimatico prognostico tridimensionale ad alta risoluzione<sup>23</sup> basato sulle leggi fondamentali della fluidodinamica e della termodinamica, che risolve nell'elaborazione dei dati le equazioni di Navier-Stokes ([www.envimet.com](http://www.envimet.com)). Il modello è progettato per indagare sui processi che avvengono alla microscaletta con una risoluzione orizzontale che va da 0.5 a 10 m e un intervallo di tempo che varia dalle 24 h alle 48 h, con un intervallo temporale compreso tra 1 s e 5 s. Questa risoluzione consente di analizzare le interazioni su piccola scala tra singoli edifici, superfici e vegetazione.

Nello specifico il modello considera:

<sup>20</sup> L'approccio è in linea con la logica del regolamento Tassonomia (Regolamento (UE) 2020/852) ed è ulteriormente corroborato dal principio di precauzione e scaturisce dalla necessità di considerare un danno all'ambiente da una prospettiva assoluta e non relativa.

<sup>21</sup> Nemet Gregory F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

<sup>22</sup> Barwise, Y., Kumar, P. 2020. Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection. *npj Clim Atmos Sci* 3, 12

<sup>23</sup> Bruse M., Fleer H., 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environment Modelling & Software* 13, 373-384.

- flussi di radiazione su uno spettro che va dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione dagli edifici e dalla vegetazione;
- traspirazione, evaporazione e flusso di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- tutti i parametri fisici della pianta;
- la temperatura superficiale e la temperatura delle superfici;
- gli scambi di acqua e di calore all'interno del sistema suolo, compreso l'assorbimento di acqua delle piante;
- rappresentazione 3D della vegetazione inclusa la modellizzazione dinamica del bilancio idrico delle singole specie;
- dispersione di gas e particelle. Il modello supporta particelle (inclusi sedimentazione e deposizione su foglie e superfici), gas inerti e gas reattivi del ciclo di reazione NO-NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>;
- indici biometeorologici come la temperatura media radiante (MRT, *Temperatura media radiante*), e il PET (*temperatura fisiologica equivalente*).

Attraverso un approccio olistico, il modello considera l'ambiente come un unico organismo in cui tutti i diversi elementi di un ambiente urbano o il paesaggio e la vegetazione interagiscono tra loro. ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di *urban-design* e *land planning* 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.

#### 4. Metodologia e set-up modellistico

Sono stati analizzati **5 scenari** (Tabella 8) attraverso il modello di fluidodinamica computazionale (CFD) ENVI-met: **scenario 1 attuale** (ambiente allo stato di fatto), **scenario 2 fotovoltaico** (moduli fotovoltaici e nessuna opera di mitigazione), **scenario 3 agri-fotovoltaico** (moduli fotovoltaici + colture) **scenario 4 agri-fotovoltaico + barriera veg. 10m** (moduli fotovoltaici + fascia perimetrale a vegetazione arbustiva e arborea (ampia 10m) + colture cerealicole), **scenario 5 agri-fotovoltaico + barriera veg. 20m** (moduli fotovoltaici + fascia perimetrale a vegetazione arbustiva e arborea (ampia 20m) + colture cerealicole).

Le fasce perimetrali a vegetazione arbustiva e arborea intorno agli impianti agri-fotovoltaici sono state previste per garantire l'efficienza della produzione di energia elettrica da pannelli solari, specialmente nei periodi più caldi estivi in cui il rischio delle alte temperature si intensifica e, considerato che alcune aree saranno destinate al pascolo, per migliorare il comfort termico e garantire il benessere animale. Inoltre, considerata la presenza di attività agricole confinanti all'area di interesse, la vegetazione funge da barriera fisica e porosa alla dispersione dei prodotti fitosanitari.

**La metodologia e il processo investigativo del seguente studio sono stati validati scientificamente in pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali con *peer-review*<sup>24</sup>.**

---

<sup>24</sup> Gatto, E., Buccolieri, R., Aarveaara, 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.

Il set-up del modello ENVI-met è riportato in Tabella 8. Le simulazioni svolte hanno avuto una durata di 16 h in totale. Per migliorare l'efficienza computazionale è stata simulata solo una piccola porzione di area poiché la stessa può essere replicata nello spazio. L'area simulata in 3D (dominio computazionale) ha una dimensione di 500 m (orizzontale) x 500 m (verticale), con un'altezza verticale di 40 m. Il dominio computazionale, che include edifici e vegetazione descritti nella Sezione 2, è stato suddiviso con una griglia di risoluzione 2 m x 2 m x 2 m con eccezione delle prime 5 celle (vicine al suolo) aventi una risoluzione verticale di 0.4 m. Per migliorare l'accuratezza e stabilità del modello sono state aggiunte 10 *nesting grids* al contorno. La temperatura oraria e l'umidità relativa sono state "forzate" in ingresso per guidare la simulazione. Nello specifico, l'input meteorologico orario è stato ottenuto dai dati meteorologici della stazione di monitoraggio meteorologica di Arpa Puglia sita a Foggia. È stato scelto il giorno più caldo estivo (giugno-luglio-agosto) dell'anno 2021, la media della velocità del vento e la mediana della direzione del vento.

		METEOROLOGIA settata nel modello	MISURE DI COMPENSAZIONE E MITIGAZIONE
ATTUALE	<p>SCENARIO 1</p> 	<p>Giorno simulato: 13 Luglio 2021</p> <p>Media Temperatura dell'aria: 28 °C</p>	Nessuna.
OPERA	<p>SCENARIO 2</p> 	<p>Valore massimo Temperatura dell'aria: 34 °C</p> <p>Media Umidità relativa: 65 %</p> <p>Valore massimo Umidità relativa: 81 %</p>	Nessuna.
AGRI-FOTOVOLTAICO	<p>SCENARIO 3</p> 	<p>Velocità del vento: 1.50 m/s</p> <p>Direzione del vento: 315°</p>	Nessuna.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perronace, L., Santiago, J., 2021a. *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., 2021b. *Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy)*. *Climate*, 9, 116.

Semeraro, T., Aretano, R., Barca, A., Pomes, A., Del Giudice, C., Gatto, E., Lenucci, M., Buccolieri, R., Emmanuel, R., Gao, Z., Scognamiglio, A., 2020. *A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems*. *Land*, 9, 238.

	<p style="text-align: center;"><b>SCENARIO 4</b></p> 		<p>Fascia di mitigazione che delimita dell'area ampia 20m (arbusti e alberi da fusto).</p> <p>Colture cerealicole.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>SCENARIO 5</b></p> 		<p>Fascia di mitigazione che delimita dell'area ampia 20m (arbusti e alberi da fusto).</p> <p>Colture cerealicole.</p>

Tabella 8. Scenari investigati con set-up delle condizioni meteorologiche al contorno e le misure di mitigazione e compensazione considerate per ciascuno.

#### 4.1. Parametri investigati

#### 4.2. Deriva dei prodotti fitosanitari e dispersione delle polveri da cava

Considerata la vocazione agricola dei terreni che delimitano l'area di interesse, per lo più seminativi, vigneti, orticole e uliveti, e la presenza di cave, con il modello ENVI-met è stato valutato l'impatto delle misure di compensazione e mitigazione sulla **qualità dell'aria** in termini di concentrazione di prodotti fitosanitari assimilati ed è stata valutata la dispersione delle polveri da cava. Le evidenze tecnico scientifiche di tale indagine hanno guidato la scelta del sistema di **conduzione agricola** e hanno permesso di identificare le soluzioni di mitigazione più adatte.

Inoltre, considerata la presenza di una cava dismessa in prossimità dell'area di interesse (Figura 8) e che le polveri della stessa potrebbero compromettere l'efficienza dei moduli solari, con ENVI-met è stata valutata la dispersione delle polveri inserendo nel dominio computazionale una sorgente diffusa areale a 100 m dall'area con fotovoltaico.



Figura 8. Cava dismessa.

### 4.3. Microclima

L'impatto sul **microclima** è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari strategici e di progetto in termini di **albedo**, **temperatura dell'aria T<sub>air</sub> (°C)**, **RH (%)**, **temperatura media radiante MRT (°C)** e **percentuale di umidità al suolo (%)**. Lo studio di specifici indici (temperatura media radiante, *temperatura fisiologica equivalente PET*) ha permesso invece di valutare l'impatto delle scelte progettuali sul comfort termico.

#### 4.3.1. Albedo e inquinamento termico

Con il termine **albedo** si indica il rapporto tra la quantità di radiazione solare riflessa e quella incidente ed è solitamente espresso come una percentuale o un valore decimale, con 1 che indica un riflettore perfetto e 0 che indica un materiale che assorbe tutta la luce in ingresso.

I pannelli fotovoltaici (PV) utilizzano rivestimenti antiriflesso e superfici strutturate per massimizzare la radiazione solare in entrata assorbita dalla cella e minimizzare la quantità di radiazione riflessa e presentano valori di albedo piuttosto bassi: in laboratorio si può scendere fino allo 0.01, ma valori più realistici ricavabili da installazioni reali si aggirano attorno allo 0.10<sup>25</sup>. Di contro, secondo i valori di albedo riportati dalla norma UNI 8477, l'albedo di un terreno incolto si aggira intorno allo 0.30.

Quindi, la copertura di terreno con pannelli fotovoltaici riduce l'albedo della superficie terrestre, aumentando così la forzante radiativa e, in ultima analisi, aumentando la temperatura.



Per tale ragione si è ritenuto necessario quantificare la variazione di albedo tra gli scenari col fine di quantificare l'impatto termico delle soluzioni adottate. L'albedo assegnato ai pannelli fotovoltaici all'interno del dominio computazionale è di 0.10 mentre l'albedo del terreno è di 0.30.

#### 4.3.2. Indici di comfort termico

##### 4.3.2.1. Temperatura media radiante MRT

La MRT è definita come "la temperatura di un involucro nero uniforme che scambia la stessa quantità di calore per irraggiamento con l'occupante dell'ambiente reale" (ASHRAE 55-92<sup>26</sup>). Essa è espressa dalla formula<sup>27</sup>:

$$MRT = [(T_g + 273.15)^4 + \frac{1335 \times 10^8 v^{0.71}}{\epsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_{air})]^{\frac{1}{4}} - 273.15$$

dove T<sub>g</sub> = temperatura di bulbo umido (°C); v = velocità del vento (ms<sup>-1</sup>); T<sub>air</sub> = temperatura dell'aria (°C); D = diametro del globo (m) = 44 mm e ε = emissività del globo. Il modello ENVI-met simula

<sup>25</sup> Nemet G. F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

<sup>26</sup> American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) 1992. Standard 55-92: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Georgia

<sup>27</sup> Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, 983-1993

accuratamente i valori di picco della MRT diurna<sup>28</sup>, una caratteristica di grande importanza quando si tratta dell'indagine sull'analisi del **comfort termico**; essa considera tutti i flussi di radiazione a onde corte e lunghe, sia quelli emessi dalla radiazione solare, che quelli provenienti da ambienti con temperature superficiali differenti e la sua distribuzione spaziale risulta influenzata dalla posizione e dal modello spaziale della vegetazione.

#### 4.3.2.2. 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>29</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 9.

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 9. Scala di percezione termica PET

<sup>28</sup> Gatto, E., Buccolieri, R., Aarveaara, 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.

<sup>29</sup> Höppe, P. 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.

## 5. Risultati

### 5.1. Deriva dei prodotti fitosanitari e Dispersione delle polveri da cava

Dalle mappe in Figura 9 è possibile osservare una diminuzione della concentrazione media nelle soluzioni con barriera vegetazionale. Nello specifico, con **barriera vegetazionale ampia 10 m si osserva una diminuzione media in tutta l'area di 0.22 ug/s**. Tale differenza aumenta con lo **spessore della barriera vegetazione (20m)** dove si osserva una diminuzione in tutta l'area di **1.01 ug/s**.

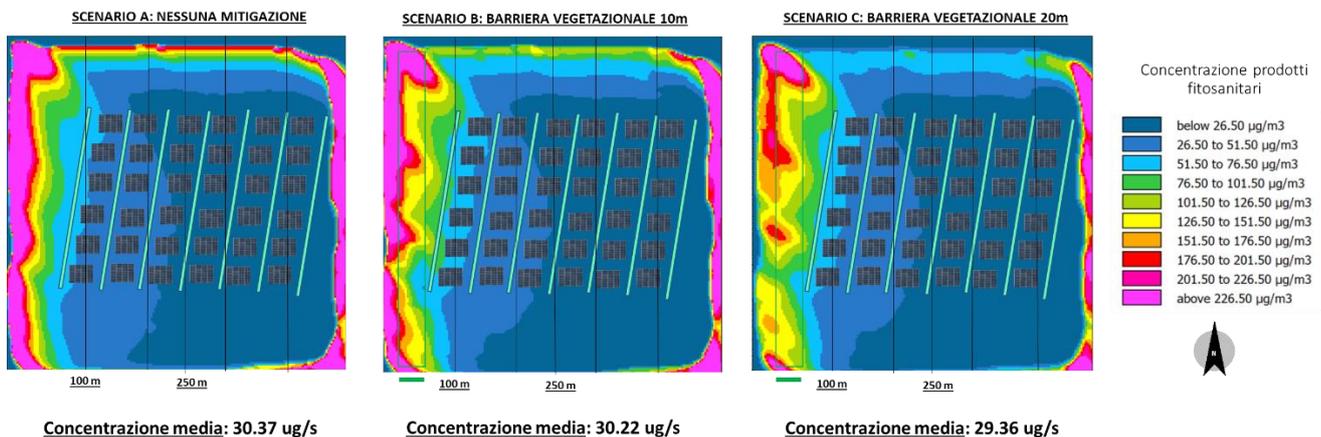


Figura 9. Mappe spaziali di dispersione di polveri da cava e prodotti fitosanitari

### 5.2. Micrometeorologia e Comfort termico

La Tabella 10 riporta le medie spaziali di *Albedo*, *Tair*, *RH* ed *MRT* alle 15:00, orario in cui si registra il valore massimo di temperatura e in cui è possibile stimare il miglior contributo delle soluzioni di adattamento previste. I dati di *albedo* sono stati estratti ad altezza 0 mentre i dati di *Tair*, *RH* e *MRT* ad altezza pedestre pari a 1.5m.

Come si può osservare, le medie spaziali mostrano una variazione poco importante dell'albedo: passando dallo scenario 1 (scenario attuale) allo scenario 2 (fotovoltaico) si ha una diminuzione media pari a 0.01. La stessa variazione si osserva confrontando lo scenario 1 con gli scenari 3 e 4 (agri-fotovoltaico). Mentre una diminuzione media pari a 0.03 si registra nello scenario 5, a causa probabilmente dall'aumento della superficie vegetata che, in linea con i valori di albedo della norma UNI 8477, ha un'albedo uguale a 0.25 circa.

Per verificare l'impatto dell'effetto albedo sull'inquinamento termico l'indagine è stata approfondita con l'analisi dei valori spaziali di **Tair** e **RH**.

Osservando i **valori della temperatura**, si osserva una **diminuzione** importante in tutti gli scenari di progetto confrontandoli con lo scenario attuale. Nel fotovoltaico (scenario 2) si registra una diminuzione media spaziale di **1.31 °C**. Tale diminuzione aumenta nello scenario di agri-fotovoltaico (scenario 3) raggiungendo **1.45 °C** di differenza. Le misure di mitigazione, rappresentate dalla barriera vegetazionale, hanno un effetto positivo sulla temperatura portando ad un'ulteriore e notevole diminuzione pari rispettivamente a **1.89** e **2.5 °C**.

I **valori di umidità relativa aumentano** in tutti gli scenari di progetto. Tale dato è strettamente correlato all'aumento della percentuale di umidità al suolo. Il maggior ombreggiamento, dovuto principalmente alla presenza di pannelli solari, trattiene maggiori concentrazioni di acqua e porta ad un aumento dell'umidità relativa dell'aria nelle zone sottostanti i moduli. Tale aumento della RH in atmosfera è pari a 4.57% nello scenario fotovoltaico e pari a 5.03, 6.09 e 9.01 % rispettivamente negli scenari di agri-fotovoltaico 3-4-5. La concentrazione di umidità nel suolo, invece, aumenta di 2.17% nel fotovoltaico, del 32.41% nell'agri-fotovoltaico senza vegetazione e di 31.01% e 21.03% nell'agri-fotovoltaico 4-5. È possibile dunque osservare che, in presenza di vegetazione, la presenza media di acqua al suolo diminuisce mentre aumenta quella atmosferica per effetto della traspirazione.

L'effetto positivo dell'ombreggiamento è maggiormente confermato dal calcolo dell'indice MRT la cui misura dipende strettamente dallo stesso. In generale si osserva un miglioramento della MRT **negli scenari di progetto con una diminuzione massima di 12.56 °C nello scenario 5. Si ha conferma del miglioramento del comfort termico dall'analisi dell'andamento del PET.** Si passa, infatti, dalla percezione termica di **"caldo estremo"** dello scenario attuale alla percezione di **"caldo moderato"** nello scenario di agri-fotovoltaico con barriera vegetazionale di 20m con una diminuzione massima registrata è di 9.72 °C. La differenza tra lo scenario attuale (1) e lo scenario fotovoltaico (2) è pari a 4.68 °C.

	Albedo	Tair (°C)	RH (%)	RH del suolo (%)	MRT (°C)	PET (°C)
SCENARIO 1	0.31	29.49	43.43	0.43	63.5	44.68 (caldo estremo)
SCENARIO 2	0.30	28.18	48.00	2.60	58.92	40.00 (caldo)
SCENARIO 3	0.30	28.04	48.46	31.98	59.05	39.69 (caldo)
SCENARIO 4	0.30	27.60	50.33	31.44	55.41	37.32 (caldo)
SCENARIO 5	0.28	26.99	53.04	21.62	50.94	34.96 (caldo moderato)

Tabella 10. Media spaziale dei parametri investigati nei diversi scenari alle 15:00.

Quanto emerso dai risultati rivela che **l'effetto dell'albedo** sul comfort termico è mitigato dall'effetto della copertura arborea<sup>30</sup> e dalla stessa presenza dell'impianto fotovoltaico e gri-fotovoltaico che, per effetto dell'ombreggiamento, riduce la temperatura e aumenta la concentrazione di acqua nel suolo. Perciò, per i valori di albedo considerati e per gli scenari investigati, la diminuzione dell'albedo **non comporta un rischio di inquinamento termico.**

In Figura 10 e 11 sono riportate le mappe spaziali di Tair (°C) e PET (°C) alle 15:00 estratte dal modello ad altezza pedestre di 1.5 m per gli scenari esaminati. Le mappe spaziali consentono di osservare le differenze di temperatura e comfort termico all'interno del dominio computazionale e di discriminare l'effetto locale delle misure di mitigazione e dei moduli fotovoltaici.

<sup>30</sup>Mohammad, P. Aghlmand, S., Fadaei, A., Gachkar, S., Gachkar, D., Karimi, A., 2021. Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors. *Urban Climate*, 40, 100993

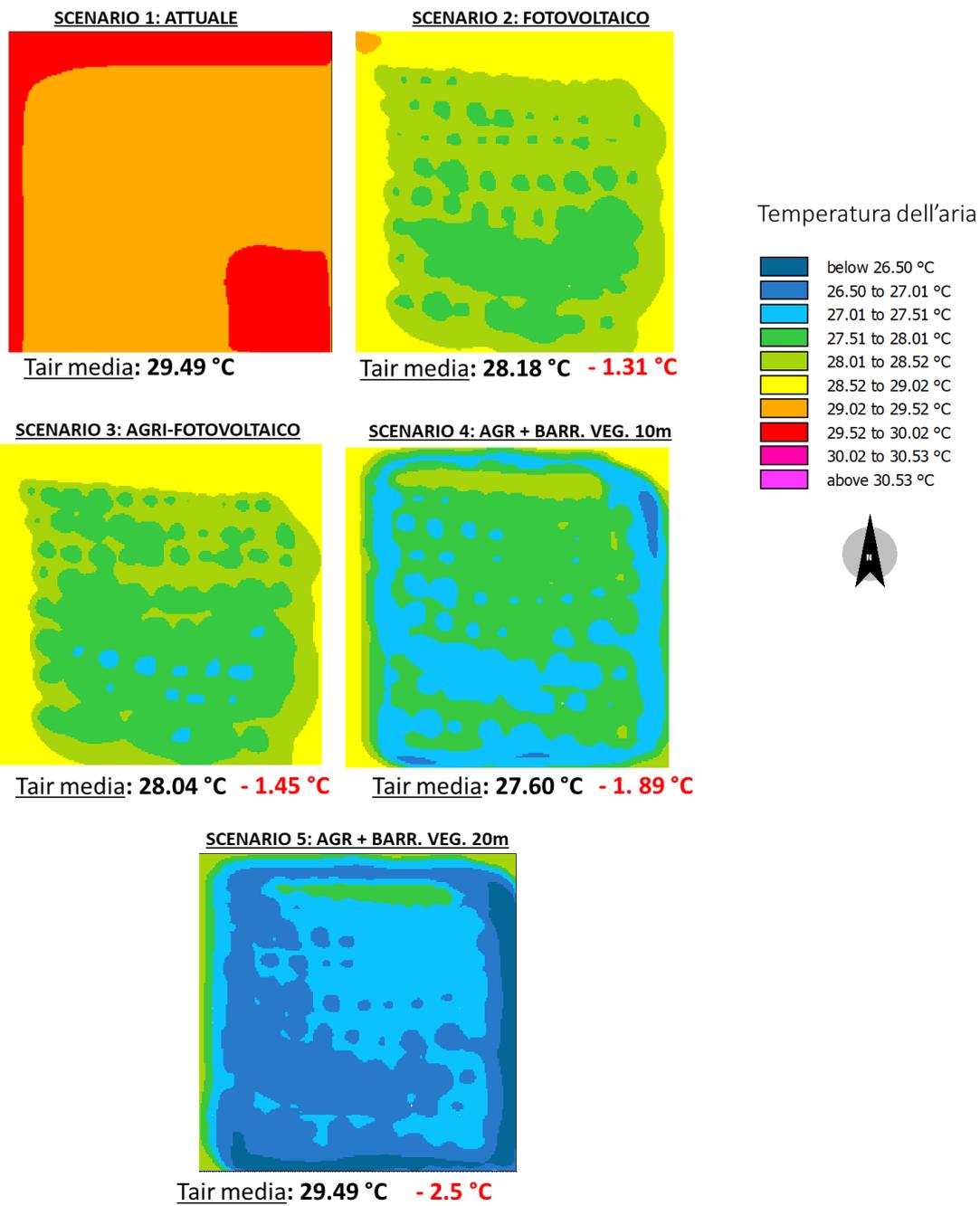


Figura 10. Mappe spaziali di Tair alle 15:00 estratte ad altezza pedestre negli scenari esaminati. In rosso è riportata la differenza media rispetto allo scenario 1 attuale.

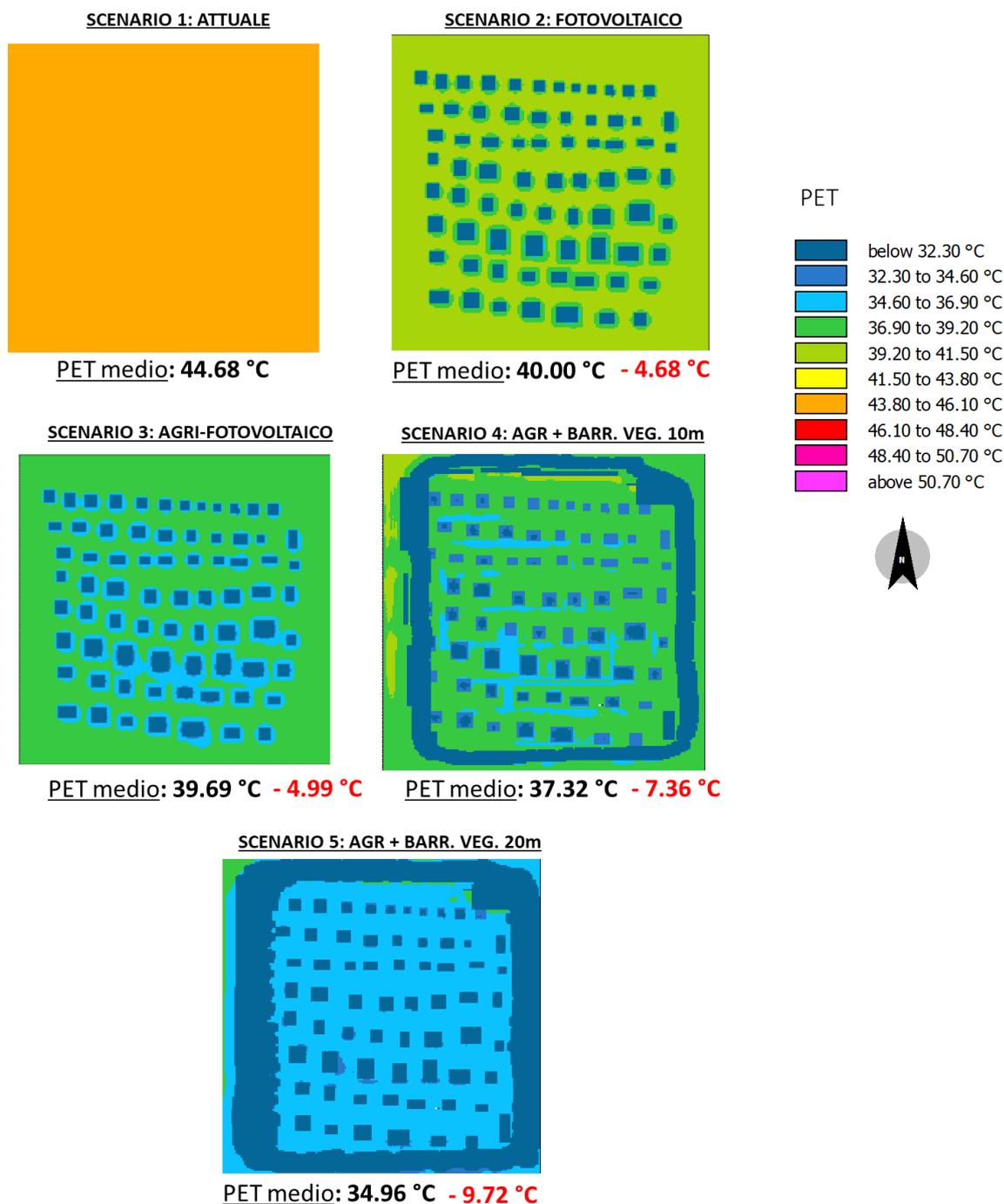


Figura 11. Mappe spaziali di PET alle 15:00 estratte ad altezza pedestre negli scenari esaminati. In rosso è riportata la differenza media rispetto allo scenario 1 attuale.

Dalle mappe spaziali è evidente l'effetto localizzato della vegetazione nello Scenario 4 e 5 sia sulla temperatura dell'aria che sull'indice PET. Una tale diminuzione della temperatura è importante per garantire l'efficienza energetica dell'impianto e la riduzione della richiesta idrica.

## 6. Conclusioni

Lo studio modellistico di fluidodinamica computazionale condotto per porzioni di area di 500m x 500m ha permesso di valutare gli effetti sul microclima derivanti dalla realizzazione di un impianto agri-fotovoltaico. Al fine di valutare la potenzialità delle strategie di mitigazione e compensazione previste e

quantificare la variazione dei parametri di *albedo*, *Tair*, *RH*, *RH del suolo*, *MRT* e *PET* sono stati simulati diversi scenari che sono stati confrontati con lo scenario allo stato di fatto.

Le aree simulate possono essere replicate nello spazio e dunque i risultati ottenuti possono ritenersi validi per l'intera area di intervento.

I risultati sono in linea con quanto già osservato in letteratura scientifica e cioè che la **vegetazione** svolge **funzioni regolatrici** nel controllo delle condizioni **micrometeorologiche** e sulla percezione di comfort termico attraverso ombreggiamento ed evapotraspirazione<sup>31</sup>.

Nello specifico, dai risultati ottenuti con il modello ENVI-met e analizzando nello specifico i dati della temperatura media radiante si ha evidenza che il maggior ombreggiamento dovuto alla presenza di pannelli solari **riduce la domanda di acqua necessaria alle coltivazioni** e in tal modo può ridurre i rischi sulla produzione dovuti ai cambiamenti climatici (eventi siccitosi). In un contesto climatico europeo, è stato osservato che l'ombreggiamento comporta un **risparmio idrico** compreso fra il 14 ed il 29% a seconda del livello di ombreggiamento realizzato<sup>32</sup>. Inoltre, l'aumento dell'umidità relativa dell'aria nelle zone sottostanti i moduli produce da un lato effetti favorevoli sulla crescita delle piante e dall'altro riduce la temperatura media dei moduli con evidenti **vantaggi nella conversione in energia elettrica**.

Per tale ragione **è importante dotare l'impianto di aree imboschite e fasce di mitigazione che limitino le alte temperature nei mesi più caldi e garantiscano un'alta efficienza energetica**.

Inoltre, tale azione di mitigazione microclimatica della vegetazione è di strategica importanza considerata la presenza, nel progetto, di aree destinate al pascolo e in linea con quanto riportato nella sottosezione 1.1. riguardo la relazione tra stress termico e benessere animale.

Si è osservato, inoltre, che la barriera vegetazionale ha un effetto anche **sull'abbattimento delle polveri e dei prodotti fitosanitari trasportati per effetto della deriva**.

**Non vi sono prove di effetti negativi significativi connessi agli effetti diretti e indiretti primari della misura nel corso del suo ciclo di vita in relazione all'obiettivo ambientale dell'adattamento ai cambiamenti climatici.**

Da come si è visto, sebbene l'albedo diminuisca, **l'effetto della vegetazione porta comunque un effetto positivo sulla temperatura dell'aria con una diminuzione massima registrata di 2.5 °C. Il miglioramento massimo del comfort termico, misurato in termini in PET, è di 9.72 °C.**

I risultati si riferiscono ad una giornata estiva caratterizzata da una situazione di stress termico. Tale condizione risulta critica sia per l'efficienza energetica che per la produzione agricola e quindi di particolare interesse considerato il possibile peggioramento delle condizioni climatiche e degli eventi

---

<sup>31</sup> 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.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perronace, L., Santiago, J., 2021a. *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., 2021b. *Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy)*. *Climate*, 9, 116.

<sup>32</sup> Marrou, H., Dufour, L., Wery, J. 2013. *How Does a Shelter of Solar Panels Influence Water Flows in a Soil-Crop System?* In: *European Journal of Agronomy* 50, 38-51.

estremi nell'area esaminata. Considerato ciò, per evitare drastiche diminuzioni della temperatura in giornate invernali si suggerisce la messa a dimora di specie vegetali caducifoglie alternate a specie sempreverdi. Come già riscontrato in letteratura, infatti, con tale approccio si evitano situazioni di *discomfort* termico dovuto a basse temperature<sup>33</sup>.

Quanto riscontrato è in linea con diversi studi nel settore del fotovoltaico che confrontano il calore emesso da una centrale termoelettrica convenzionale con l'incremento di energia assorbita per la diminuzione dell'albedo<sup>34</sup>. I pannelli causano un effetto che mediamente è 30 volte minore rispetto a quello dovuto all'incremento di gas serra che si verifica con la combustione di gas naturale, carbone e olio combustibile; anche sommando tutte le ipotesi più sfavorevoli (impianti posti in luoghi con albedo relativamente alte come il deserto, basso rendimento dei pannelli ecc.), il fotovoltaico rimane una soluzione migliore.

Un impianto agri-fotovoltaico così progettato può **essere considerato un importante elemento del paesaggio per mitigare il cambiamento climatico sia a livello locale che globale, aumentando l'efficienza delle strategie di energia rinnovabile.**

---

<sup>33</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.

<sup>34</sup> Nemet Gregory F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

Claude-Alain R., 2001. Solar energy and global heat balance of a city. *Solar Energy*, 70, 255-261.