



REGIONE PUGLIA



PROVINCIA di FOGGIA



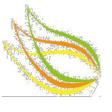
COMUNE di SERRACAPRIOLA



COMUNE di SAN PAOLO DI CIVITATE



COMUNE di TORREMAGGIORE

Proponente	 <b>PACIFICO ACQUAMARINA 2 S.r.l.</b> Sede: Iazza Walther Von Vogelweide, n. 8 - 39100 Bolzano (BZ) Pec: pacificoacquamarina2srl@legalmail.it P.iva: 04351410719	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 monitoraggio	 <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 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
Studio faunistico	<b>Dott. Fabio Mastropasqua</b> Via Padre Pio da Pietrelcina 10   70020 Bitritto (BA) cell. 3201488569 E-Mail: fabiomastro77@gmail.com Collegio Interprovinciale degli Agronomi e degli Agronomi lauerati" matr n. 276	Rappresentazioni fotografiche	 <b>Arch. Gaetano Fornarelli</b> Via Fulcignano Casale 17   73100 Lecce (LE) cell. 3358758545 E-Mail: forgamet@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	Studio agrario e agro-voltaiico	<b>Dott. Agr. Alfonso Mogavero</b> Viale Fortore 9/C 71121 Foggia Tel/Fax: 0881 723673 Cell. 335 6287405 E-Mail: studiomogavero@gmail.com Ordine dottori agronomi di Foggia n. 372
Studio acustico	 <b>STUDIO FALCONE</b> Ingegneria <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	Studio strutturale	 <b>STM TECHNICAL SOLUTIONS</b> <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 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	Consulenza topografica	<b>Geom. Matteo Occhiochiuso</b> Tel. 328 5615292 E-Mail: matteo.occhiochiuso@virgilio.it Collegio dei Circondariale Geometri e Geometri Laureati di Lucera matr. n. 1101

**Opera**

**Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto Agri-Fotovoltaico denominato "TOVAGLIA" da realizzarsi in cave dismesse o da dismettere e recuperare, site in località "Masseria Tovaglia" nel territorio comunale di Serracapriola (FG) per una potenza complessiva di 26,557MWp nonchè delle opere connesse ed infrastrutture indispensabili alla costruzione e all'esercizio dell'impianto**

AUTORITA' PROCEDENTE V.I.A. :  **Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica**      AUTORITA' PROCEDENTE A.U. :  **REGIONE PUGLIA**

**Oggetto**

Nome Elaborato: 96WX1A8\_DocumentazioneSpecialistica\_01.2.pdf

Descrizione Elaborato: Studio meteo-climatico

00	28/10/2022	Progetto definitivo				
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione	

Scala:

Formato: Codice Pratica **96WX1A8**



# STUDIO METEO – CLIMATICO COMUNE DI SERRACAPRIOLA

PROGETTO DI REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGRI-FOTOVOLTAICO  
DENOMINATO “TOVAGLIA”

DOTT.SSA ELISA GATTO  
BIOLOGA



# Sommario

Introduzione .....	2
1. Inquadramento meteo-climatico.....	2
1.1 Qualità climatica dell'area di studio .....	5
1.1.1. Benessere animale .....	6
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. Qualità dell'aria .....	13
3.2. Microclima.....	14
3.2.1. Studio modellistico.....	15
3.2.2. Parametri investigati .....	17
3.2.2.1. Albedo e inquinamento termico .....	17
3.2.2.2. Mean Radiant Temperature e comfort termico.....	18
4. Risultati .....	18
5. Conclusioni .....	20

## 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 2000-2020 dalla stazione meteorologica della Protezione Civile Puglia sita in Lesina (Figura 1), il cui dataset storico è risultato più completo e dettagliato rispetto ad altre stazioni più vicine all'area investigata.

<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»)»"

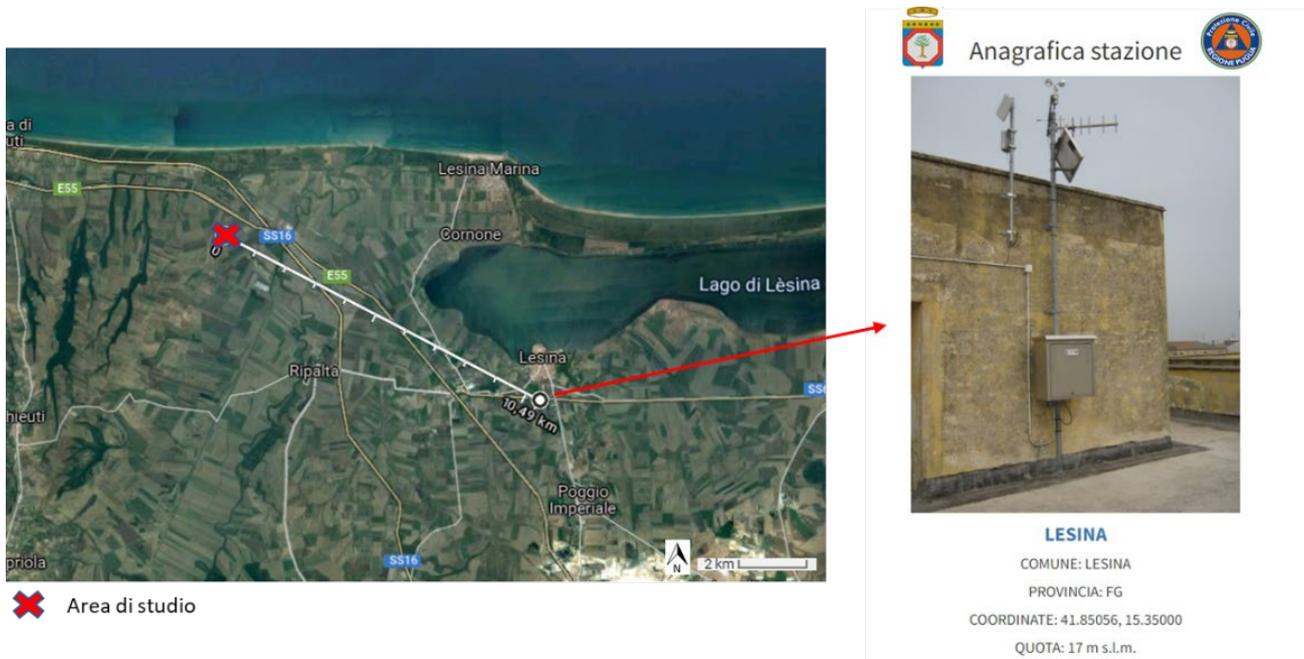


Figure 1. Posizione della stazione meteorologica della Protezione Civile Puglia sita in Lesina a circa 10 km dall'area d'indagine e a 17 m.s.l.m.

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 (Figure 2).

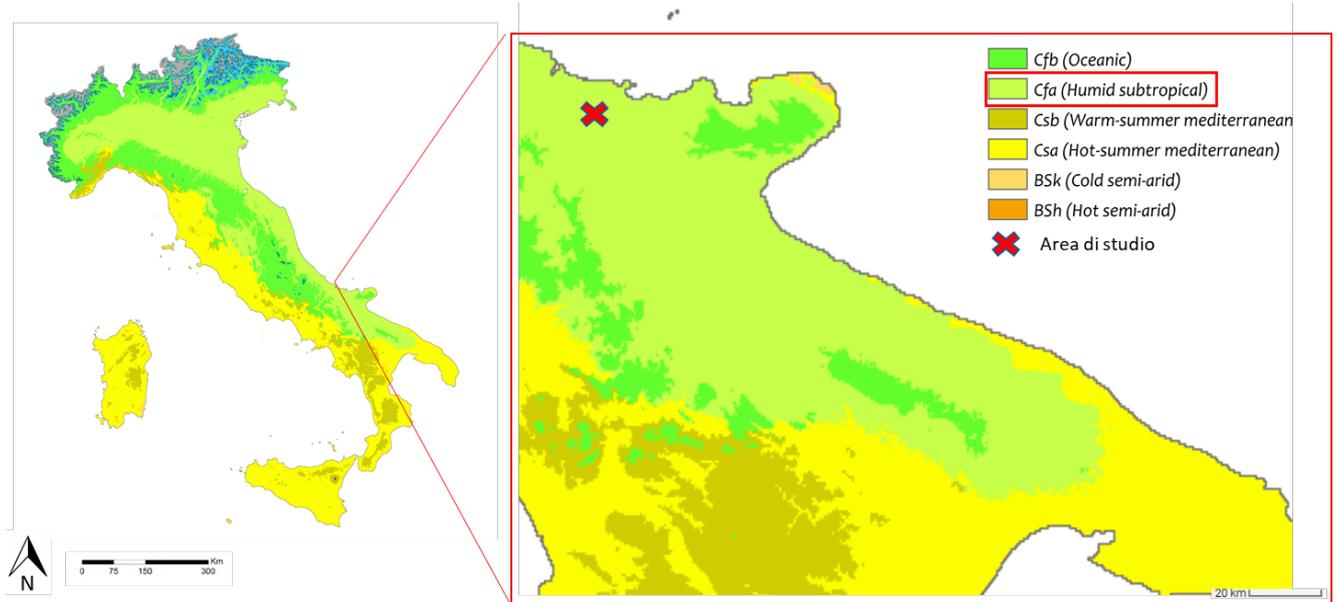


Figura 2. Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

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 2000-2020. Dall'analisi

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

del dataset, emerge che l'area è caratterizzata da una temperatura media annuale di 16 °C e da una piovosità annuale di 682 mm.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie temperatura (°C)	9.2	9.8	12.4	15.4	19.5	24.0	26.5	26.7	22.5	18.5	14.4	10.4
Temperatura minima (°C)	5.8	6.0	8.2	11.0	14.9	19.2	21.9	22.1	18.3	14.5	10.7	7.0
Temperatura massima (°C)	12.6	13.5	16.6	19.9	24.1	28.8	31.2	31.2	26.8	22.4	18.1	13.8
Precipitazioni (mm)	66	58	49	50	43	37	31	34	75	71	82	85
Umidità (%)	74	72	70	69	65	62	59	62	68	74	76	76
Giorni di pioggia (g.)	9	9	8	7	6	3	3	3	7	7	7	10
Ore di sole (ore)	6	7	8	10	12	13	13	12	10	8	7	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 Lesina della Protezione Civile Puglia<sup>4</sup> e si riferiscono al range temporale 2000-2020.

I mesi più caldi dell'anno sono Luglio e Agosto con una temperatura media di 27 °C circa e valori massimi che raggiungono 31 °C, mentre il mese più freddo è Gennaio con una media di 9.2 °C. Il mese più secco è Luglio, con una media di 31 mm di pioggia e un'umidità relativa del 59 %, mentre il mese con maggiori piogge è Dicembre con una media di 85 mm e un'umidità relativa del 76 %. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 54 mm.

Sempre Dicembre ha in media i giorni più piovosi al mese (giorni: 10). Il minor numero di giorni di pioggia si registra nei tre mesi estivi Giugno, Luglio e Agosto (giorni: 3).

Il riferimento principale per definire il **regime anemologico** dell'area in esame è rappresentato dalla "rosa dei venti" rappresentata in Figura 3, calcolata considerando il dataset di dati per l'anno 2020 della stazione meteorologica di Arpa Puglia sita a Foggia. 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 citata 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 78% del totale dei casi analizzati.

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

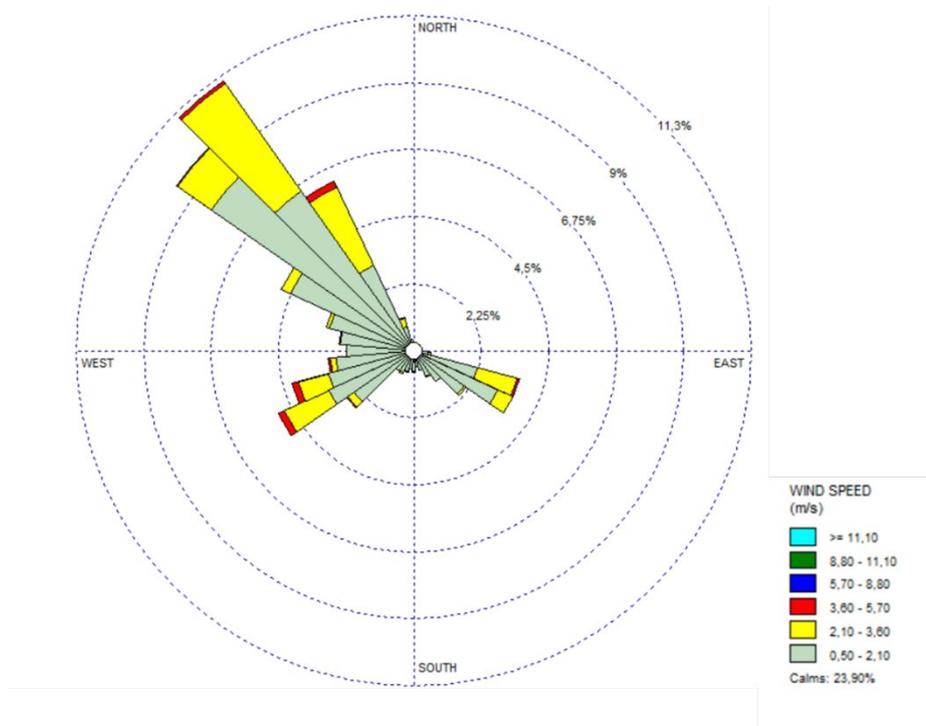


Figura 3. Rosa dei venti calcolata in base ai dati dell'anno 2020 della stazione di monitoraggio meteorologica di Arpa Puglia sita a Foggia.

### 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 4 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).

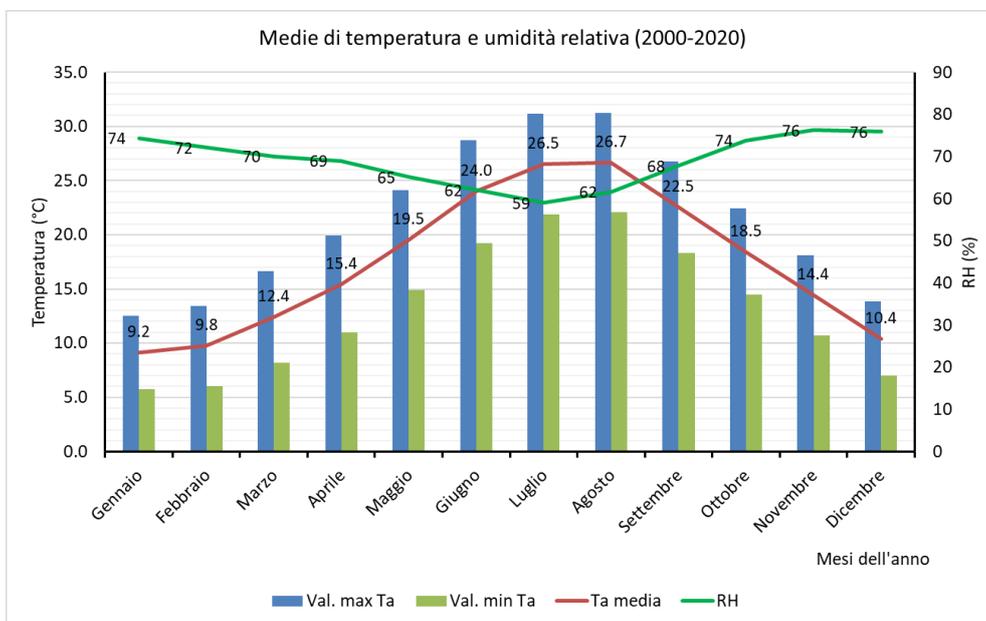


Figura 4. Valori massimi (Val. max Ta), minimi (Val. min Ta) e medi (Ta media) della temperatura (°C) e i valori medi dell'umidità relativa (RH, %).

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.

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 (2000-2020). 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 Giugno Luglio e Agosto rientrano nella categoria di stress lieve.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
THI (°C)	50	51	55	59	65	72	75	75	70	64	58	52

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

<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.

<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

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.

Dai risultati illustrati nella Tabella 4 è possibile osservare che solo per i mesi estivi Giugno, Luglio, Agosto e Settembre, 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	22	23	24	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 analizzando un set di dati degli ultimi 20 anni, 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.

<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.

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.

## 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

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

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

<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

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 **28.54 stress da calore moderato**.

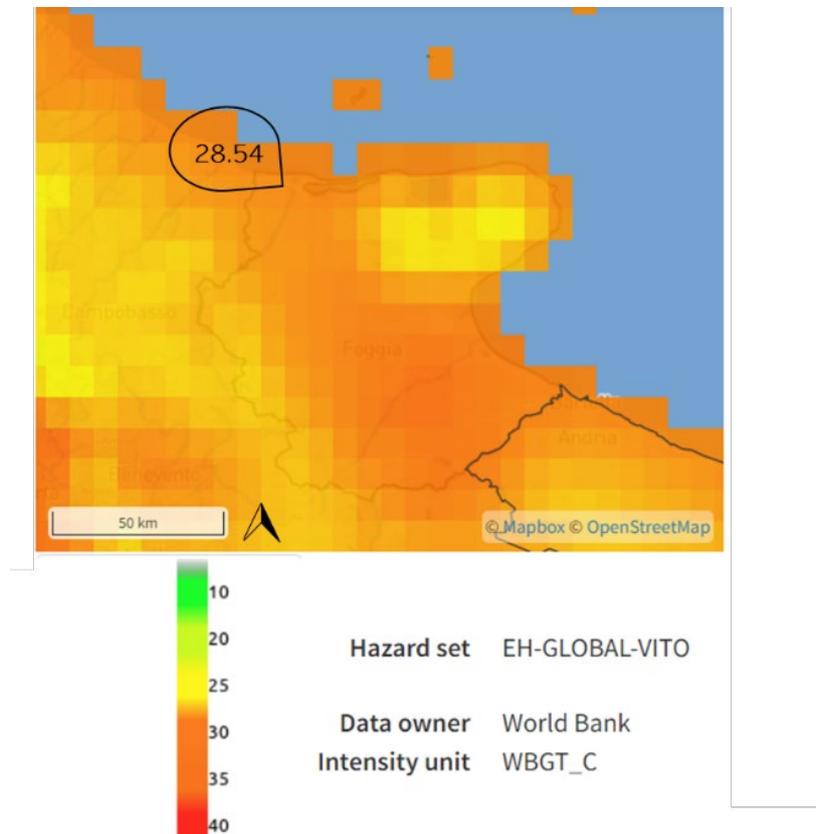


Figura 5. Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello *ThinkHazard!*.

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 6 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.

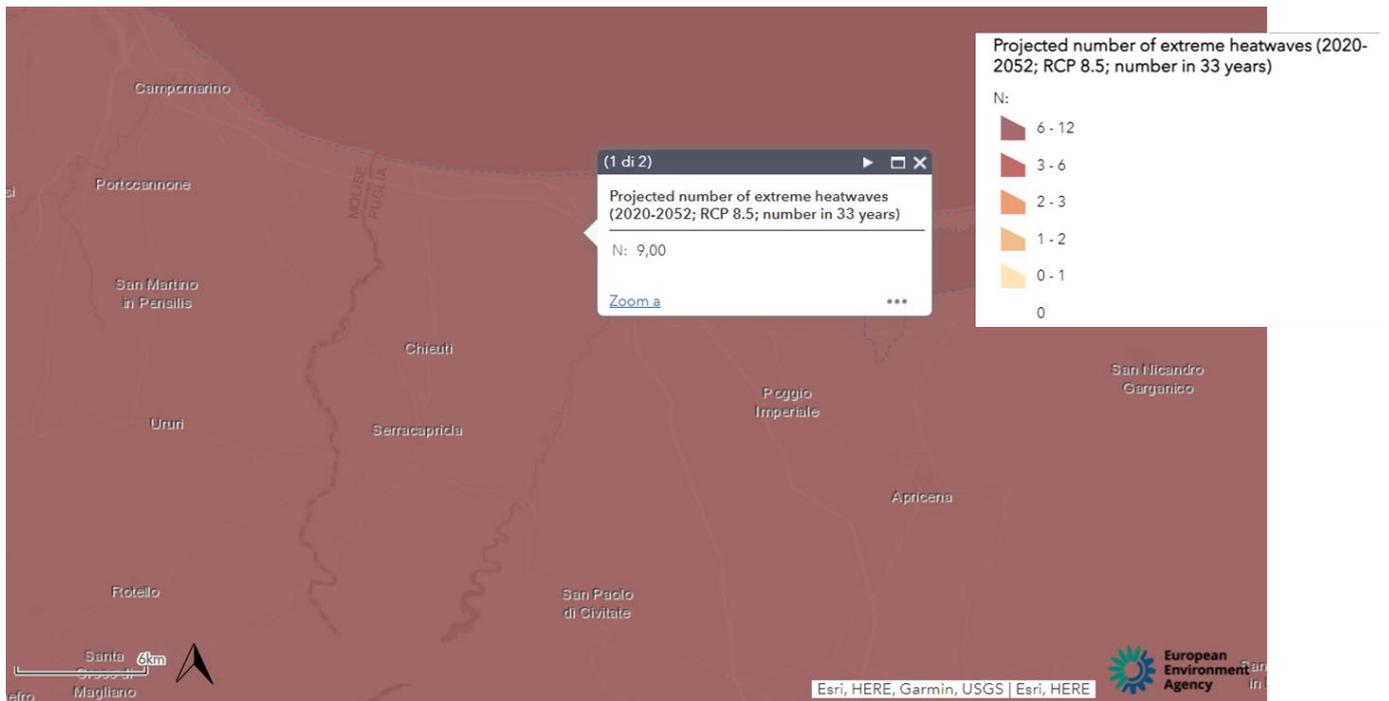


Figura 6. Ondate di calore estreme previste dal modello *Climate-ADAPT* nei 33 anni compresi tra il 2020 e il 2052 nell'area di riferimento

## 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 7 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*.

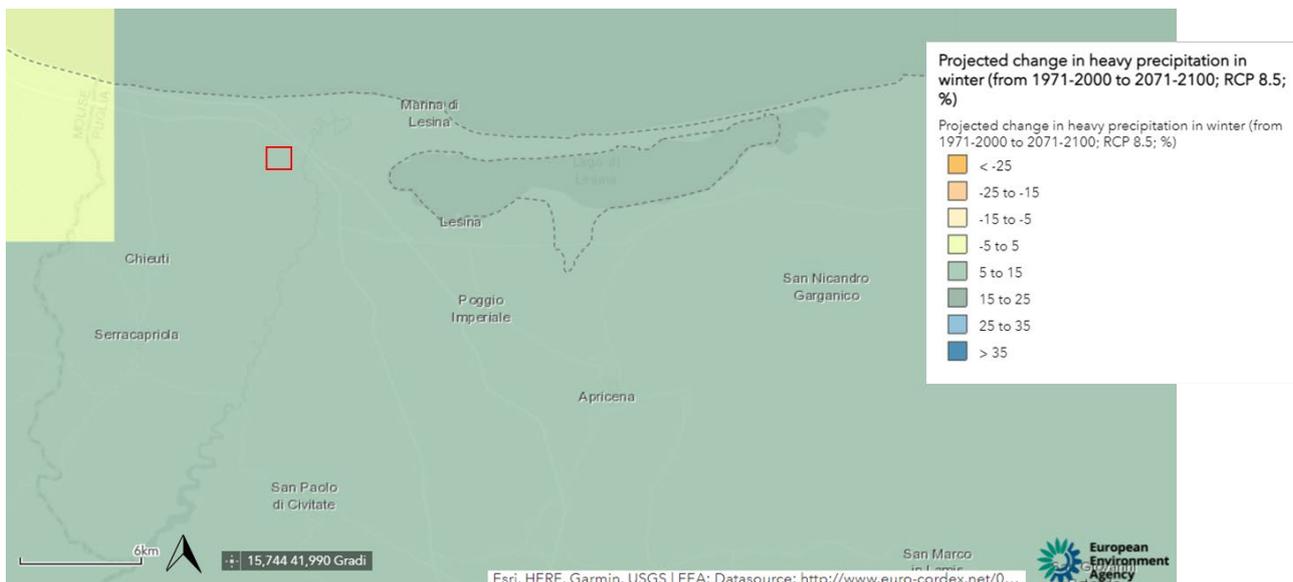


Figura 7. Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

### 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 8 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**.

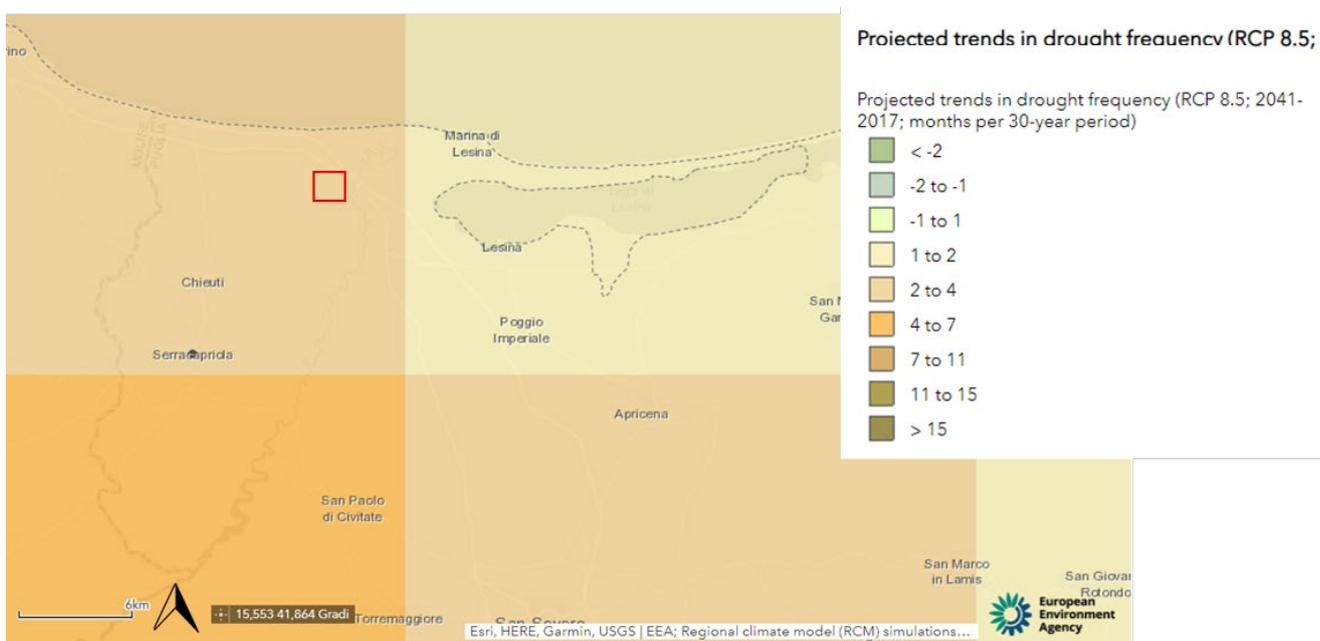


Figura 8. Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

## 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 **75**. 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**.

Per tale ragione, è stato valutato l'impatto ambientale dell'opera e di ciascuna misura adottata nel progetto rispetto ad una situazione senza alcun impatto ambientale<sup>20</sup>. Nello specifico è stato valutato l'impatto delle misure di compensazione e mitigazione sulla **qualità dell'aria** (in termini di gas serra assimilati) e l'impatto sul **microclima** in vari scenari strategici (in termini di temperatura dell'aria, umidità relativa, albedo, temperatura media radiante) attraverso l'analisi della letteratura scientifica e l'utilizzo di dati scientifici inediti elaborati nell'ambito del lavoro scientifico di Semeraro et al. (2020)<sup>21</sup> che sono in fase di pubblicazione su una rivista scientifica con *peer-review*.

---

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

<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 sanno all'ambiente da una prospettiva assoluta e non relativa.*

<sup>21</sup> Semeraro, T.; Aretano, R.; Barca, A.; Pomes, A.; Del Giudice, C.; Gatto, E.; Lenucci, M.; Buccolieri, R.; Emmanuel, R.; Gao, Z.; Scognamiglio, A. *A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems. Land* 2020, 9, 238.

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>22</sup>
Impianto Agri-Fotovoltaico	Nessuna emissione gas serra	Assenza di inquinamento termico
<b>PREVISIONE</b>	Abbattimento gas serra dovuto all'azione della vegetazione <sup>23</sup>	L'aggiunta di vegetazione mitiga il microclima, migliora il comfort termico e compensa l'albedo
<b>OBIETTIVI</b>	Quantificare la rimozione di gas serra	- Quantificare il cambiamento di albedo - Analisi parametri microclimatici Analisi del comfort termico
<b>STRUMENTI</b>	Letteratura scientifica – Database e strumenti vegetazionali	ENVI-met

Tabella 6. Processo e metodologia analitica

### 3.1. Qualità dell'aria

Per i dati relativi al potenziale abbattimento degli inquinanti si è fatto riferimento al progetto “Qualiviva - la qualità nella filiera florovivaistica nazionale attraverso l'utilizzo e la divulgazione delle schede varietali e di un capitolato unico di appalto per le opere a verde”, un progetto di ricerca finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, e allo studio condotto da Sicard et al. (2018)<sup>24</sup> che ha classificato le specie in base alla loro capacità di rimozione di O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>.

Sulla base delle evidenze tecniche scientifiche si è calcolato l'effetto delle misure di compensazione e mitigazione sulla qualità dell'aria e, nello specifico l'effetto di 3196 piante tra *Quercus* spp., *Ulmus* spp., *Prunus* spp., *Pistacia* spp., *Paliurus spina-cristi*.<sup>25</sup> (specie indicate nel progetto di ripristino ecologico).

La Tabella 7 riporta i risultati ottenuti in termini di inquinanti abbattuti (tonnellata/anno). Per alberi di nuovo impianto è possibile calcolare solo il tasso di CO<sub>2</sub> abbattuta, mentre per impianti maturi è stata calcolata la quantità abbattuta per CO<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>.

<sup>22</sup> Nemet Gregory F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

<sup>23</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>24</sup> Sicard, P., Agathokleous, E., Araminiene V., Carrari, E., Hoshika Y., De Marco, A., Paoletti, E., 2018. Should we see urban trees as effective solutions to reduce increasing ozone levels in cities? *Environmental Pollution* 243, 163-176

<sup>25</sup> Sono state considerate le specie per le quali sono disponibili dati scientifici accurati e completi. La stima è dunque suscettibile a variazioni considerando che il numero di piante è superiore a quello indicato.

Misure di compensazione e mitigazione:	
3196 piante ( <i>Quercus</i> spp., <i>Ulmus</i> spp., <i>Prunus</i> spp., <i>Pistacia</i> spp., <i>Euonymus</i> spp.)	
Alberi di nuovo impianto	
CO <sub>2</sub> abbattuta	16.12 t/a
Piante mature	
CO <sub>2</sub> abbattuta	563.48 t/a
O <sub>3</sub> abbattuto	0.47 t/a
NO <sub>2</sub> abbattuto	0.47 t/a
SO <sub>2</sub> abbattuto	0.78 t/a
PM <sub>10</sub> abbattuto	0.58 t/a

Tabella 7. Impatto sulla qualità dell'aria di alcune specie previste nel progetto di ripristino ecologico per le quali sono disponibili dati e studi scientifici per il calcolo degli inquinanti stoccati. L'unità di misura è tonnellata/anno, t/a.

Tale fase di studio conferma quindi l'effetto positivo delle misure di compensazione e mitigazione considerate e dunque l'impatto considerevole delle stesse nell'adattamento ai cambiamenti climatici.

### 3.2. Microclima

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<sup>26</sup>). Tuttavia, in condizioni operative reali, la temperatura del modulo è spesso superiore a 25 °C, causando un'efficienza energetica inferiore. Secondo Bücher (1997)<sup>27</sup> 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 condizioni di stress termico estreme ma che si troverà esposta a ondate di calore analizzando le proiezioni future.

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, sono state previste delle aree destinate alla riforestazione e delle fasce vegetate di mitigazione intorno agli impianti agri-fotovoltaici in linea con quanto emerso in Semeraro et al. (2020) in cui è stata calcolata una diminuzione della temperatura di 2 °C con l'aggiunta di soluzioni naturali (vegetazione e corpi idrici artificiali) in un impianto fotovoltaico.

<sup>26</sup> IEC, 2016. IEC 61215-2:2016: Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures. IEC-IECEE

<sup>27</sup> Bücher, K., 1997. Site dependence of the energy collection of PV modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 47, 85–94.

Nell'ambito di questo progetto sono stati analizzati **5 scenari** (Tabella 8) attraverso il modello di fluidodinamica computazionale (CFD) ENVI-met: **scenario attuale** (ambiente allo stato di fatto), **scenario opera** (moduli fotovoltaici e nessuna opera di mitigazione), **scenario 3 Agri-Fotovoltaico** (moduli fotovoltaici + misure di mitigazione e compensazione + colture: olivo o mandorlo), **scenario 4 Agri-Fotovoltaico** (moduli fotovoltaici + misure di mitigazione e compensazione + colture: erbacee o aromatiche o vite), **scenario 5 Agri-Fotovoltaico** (moduli fotovoltaici + misure di mitigazione e compensazione + pascolo e arnie).

La metodologia adottata e il processo investigativo seguito nel seguente studio sono stati validati scientificamente in pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali con *peer-review*<sup>28</sup>.

### 3.2.1. Studio modellistico

ENVI-met è un modello microclimatico prognostico tridimensionale ad alta risoluzione<sup>29</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 microscala 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:

- 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;

---

<sup>28</sup> Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perroncel, L., Santiago, J.L., 2020. Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland). *Forests*, 11, 228.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perroncel, L., Santiago, J., 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.

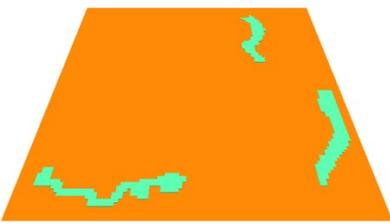
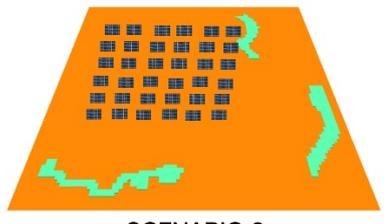
Semeraro, T., Aretano, R., Barca, A., Pomes, A., Del Giudice, C., Gatto, E., Lenucci, M., Buccolieri, R., Emmanuel, R., Gao, Z., Scognamiglio, A., 2020. A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems.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

<sup>29</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.

- 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, *Mean Radiant Temperature*) e il PMV (*Predicted Mean Vote*).

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.

Il set-up del modello 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 300 m (orizzontale) x 300 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 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		Giorno simulato: 13 Luglio 2021  Media Temperatura dell'aria: 28 °C  Valore massimo Temperatura dell'aria: 34 °C	Nessuna.
	 SCENARIO 2	Media Umidità relativa: 65 %  Valore massimo Umidità relativa: 81 %  Velocità del vento: 1.50 m/s	Nessuna.

AGRI-FOTOVOLTAICO	 <b>SCENARIO 3</b>	Direzione del vento: 310°	<p>Fascia di mitigazione che delimita dell'area (arbusti e alberi riportati nel progetto di ripristino ecologico).</p> <p>Forestazione: alberi da fusto (<i>Quercus pubescens</i>, <i>Ulmus glabra</i>, <i>Quercus cerris</i>)</p> <p>Colture: filari di olivo o mandorlo tra i moduli fotovoltaici</p>
	 <b>SCENARIO 4</b>		<p>Fascia di mitigazione che delimita dell'area (arbusti e alberi riportati nel progetto di ripristino ecologico).</p> <p>Forestazione: alberi da fusto (<i>Quercus pubescens</i>, <i>Ulmus glabra</i>, <i>Quercus cerris</i>)</p> <p>Colture: filari di erbacee o vite o aromatiche tra i moduli fotovoltaici</p>
	 <b>SCENARIO 5</b>		<p>Fascia di mitigazione che delimita dell'area (arbusti e alberi riportati nel progetto di ripristino ecologico).</p> <p>Forestazione: alberi da fusto (<i>Quercus pubescens</i>, <i>Ulmus glabra</i>, <i>Quercus cerris</i>)</p> <p>Pascolo e arnie</p>

Tabella 8. Scenari investigati con set-up delle condizioni meteorologiche al contorno e le misure di mitigazione e compensazione considerate per ciascuno. Per ciascuno scenario è riportata l'area 3D ricostruita nel tool SPACES di ENVI-met.

### 3.2.2. Parametri investigati

I parametri investigati per valutare l'impatto sul microclima delle azioni previste nei vari scenari sono stati: **albedo**, **temperatura dell'aria T<sub>air</sub> (°C)**, **umidità relativa RH (%)**, **temperatura media radiante MRT (°C)**.

#### 3.2.2.1. 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>30</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.

### 3.2.2.2. Mean Radiant Temperature e comfort termico

La MRT è stata considerata per il calcolo del **comfort termico**. 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>31</sup>). Essa è espressa dalla formula<sup>32</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  $T_g$  = temperatura di bulbo umido (°C);  $v$  = velocità del vento ( $ms^{-1}$ );  $T_{air}$  = temperatura dell'aria (°C);  $D$  = diametro del globo (m) = 44 mm e  $\epsilon$  = emissività del globo. Il modello simula accuratamente i valori di picco della MRT diurna<sup>33</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. Risultati

La tabella 9 riporta le medie spaziali di  $T_{air}$ ,  $RH$ ,  $Albedo$  e  $MRT$  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  $T_{air}$ ,  $RH$  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 0.02. Confrontando invece lo scenario 1 con gli scenari 3,4,5 (Agri-Fotovoltaico) si ha una

<sup>30</sup> Nemet G. F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

<sup>31</sup> American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) 1992. Standard 55-92: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Georgia

<sup>32</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

<sup>33</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.

diminuzione media pari a 0.03 causato probabilmente dall'aggiunta della vegetazione che, in linea con i valori di albedo della norma UNI 8477, ha un'albedo più o meno uguale a 0.25.

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 che lo scenario 3 (Agri-Fotovoltaico con alberi da fusto e filari di olivo o mandorlo tra i moduli fotovoltaici) ha una **diminuzione media spaziale massima pari a 1.18 °C** rispetto allo scenario attuale (scenario 3). Sempre positivo l'effetto negli altri scenari agri-fotovoltaici con una diminuzione di **1.17** e **1.15 °C** rispettivamente nello **scenario 4 e 5**. Nello scenario 2 (fotovoltaico) si osserva una diminuzione della temperatura impercettibile di 0.02 °C.

I valori di umidità relativa aumentano negli scenari di Agri-Fotovoltaico con le misure di compensazione e mitigazione previste. Confrontando gli scenari simulati con quello attuale si osserva che la presenza di vegetazione provoca un aumento del tasso di umidità relativa pari a 3.37% nello scenario 3, 3.32% e 3.29% rispettivamente nello scenario 4 e 5.

Queste variazioni microclimatiche modificano l'indice MRT nei vari scenari portando quindi ad una variazione del comfort termico. In generale si osserva un **migliore comfort termico negli scenari di Agri-Fotovoltaico con un miglioramento medio massimo di 2 °C** nello scenario 3. Come già osservato in letteratura scientifica, l'aumento della frazione di albedo porta ad un aumento della temperatura radiante media e l'alta riflessione di energia solare può influenzare negativamente il benessere psicofisico ad altezza pedestre<sup>34</sup>.

	Albedo	Tair (°C)	RH (%)	MRT (°C)
SCENARIO 1	0.30	31.98	43.20	49.94
SCENARIO 2	0.28	31.96	43.23	49.90
SCENARIO 3	0.27	30.80	46.57	47.93
SCENARIO 4	0.27	30.81	46.52	47.94
SCENARIO 5	0.27	30.83	46.49	47.94

Tabella 9. 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 meno importante della copertura arborea<sup>35</sup> e che, per i valori di albedo considerati e per gli scenari investigati, **non comporta un rischio di inquinamento termico**.

<sup>34</sup>Wang, B.-L., Takigawa, T., Yamasaki, Y., Sakano, N., Wang, D.-H., Ogino, K., 2008. Symptomdefinitions for SBS (sick building syndrome) in residential dwellings, *Int. J. Hyg. Environ. Health* 211, 114–120.

Lau, S.S.Y., Yang, F., 2009. Introducing healing gardens into a compact university campus: design natural space to create healthy and sustainable campuses, *Landsc.Res.* 34, 55–81.

Lin, T.P., Matzarakis, A., Hwang, R.L. 2010. Shading effect on longterm outdoor thermal comfort. *Build. Environ.* 45, 213–221.

<sup>35</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

In Figura 9 sono riportate le mappe spaziali di  $T_{air}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) alle 15:00 estratte dal modello ad altezza pedestre di 1.5 m per lo scenario 1, 2 e 3 dove le differenze di  $T_{air}$  sono più evidenti, come osservato in Tabella 9.

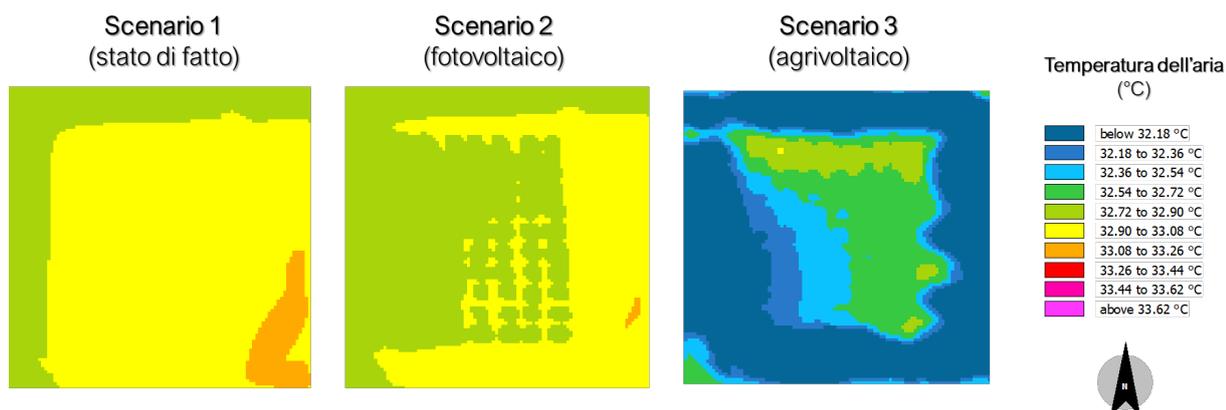


Figura 9. Mappe spaziali di  $T_{air}$  alle 15:00 estratte ad altezza pedestre negli scenari 1, 2, 3.

Dalle mappe spaziali è evidente l'effetto localizzato della vegetazione nello Scenario 3 rispetto allo scenario allo stato di fatto e allo scenario del solo impianto fotovoltaico con una diminuzione riscontrata di circa 1  $^{\circ}\text{C}$ . Una tale diminuzione della temperatura è importante per garantire l'efficienza energetica dell'impianto.

## 5. Conclusioni

Lo studio modellistico di fluidodinamica computazionale condotto per porzioni di area di 300m x 300m 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* e *MRT*, 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>36</sup>.

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.**

<sup>36</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.

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.

**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 1.18 °C.**

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>37</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.

La presenza di alberi ha un effetto significativo sui parametri di comfort termico perché gli alberi impediscono all'energia solare di raggiungere determinate superfici mantenendo così temperature più basse. **La diminuzione di MRT e dunque il conseguente miglioramento del comfort termico registrato nello scenario di Agri-Fotovoltaico con le misure di mitigazione e compensazione previste è di 2 °C.**

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>37</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.