



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Elaborazioni di dati e indici climatici per le
valutazioni energetiche e la previsione
della producibilità da fonti rinnovabili.

Parte III

Domenico Iatauro, Paolo Signoretti
Irena Balog, Giampaolo Caputo, Francesco Spinelli

Report RdS/PTR2021/113

ELABORAZIONI DI DATI E INDICI CLIMATICI PER LE VALUTAZIONI ENERGETICHE E LA PREVISIONE DELLA PRODUCIBILITÀ DA FONTI RINNOVABILI. PARTE III

- Sez. A: Ipotesi di aggiornamento della zonizzazione climatica italiana
- Sez. B: Modelli di previsione per la radiazione solare globale orizzontale

Domenico Iatauro, Paolo Signoretti, Irena Balog, Giampaolo Caputo, Francesco Spinelli (ENEA)

Con il contributo di: A. Benedetti, G. Canneto, C. Felici, R. Siviero (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.25 - Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili – Annualità 3*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Si ringraziano i colleghi Benedetti, Siviero, Canneto e Felici per la loro collaborazione.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 I DATI CLIMATICI NEL CALCOLO DEI FABBISOGNI ENERGETICI: RICHIAMI NORMATIVI	5
2 SEZIONE A: IPOTESI DI AGGIORNAMENTO DELLA ZONIZZAZIONE CLIMATICA ITALIANA.....	7
2.1 IL DPR 412/93 E I GRADI GIORNO	7
2.2 METODOLOGIA ALLA BASE DEI GG DEL DPR 412/93: LO STUDIO ENEA.....	9
2.3 LE STAZIONI DI MISURA A CONFRONTO	11
2.4 IL CALCOLO DEI GRADI GIORNO NELLA STAGIONE DI RISCALDAMENTO SECONDO LA NORMA UNI 10349.....	20
2.5 SINTESI DEI RISULTATI E IMPLICAZIONI	32
3 SEZIONE B: MODELLI DI PREVISIONE PER LA RADIAZIONE SOLARE GLOBALE ORIZZONTALE.....	38
3.1 PREVISIONI DI RADIAZIONE SOLARE	38
3.2 LA RADIAZIONE AL SUOLO	39
3.3 I MODELLI DI TRASMISSIONE DELLA RADIAZIONE IN ATMOSFERA	41
3.4 MODELLI NUMERICI DI PREVISIONE METEOROLOGICA.....	43
3.4.1 MODELLO CLIMATICO GLOBALE (GCM) E MODELLI CLIMATICI REGIONALI (RCM).....	43
4 CONCLUSIONI	79
4.1 SEZIONE A.....	79
4.2 SEZIONE B.....	79
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	80
5.1 SEZIONE A.....	80
5.2 SEZIONE B.....	80
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	81

Sommario

Nelle precedenti annualità sono state elaborate grandezze climatiche a scala sub-oraria da utilizzare nell'analisi energetica degli edifici ad alta efficienza. A partire da grandezze climatiche disponibili, nella terza annualità sono state effettuate ulteriori elaborazioni. Il report è stato suddiviso in due sezioni, ciascuna con differente focus.

Nella sezione A), partendo dai dati orari della norma UNI 10346:2016, relativi alla temperatura dell'aria, sono stati calcolati i Gradi Giorno delle località italiane.

I dati ottenuti sono stati confrontati con quelli attualmente utilizzati per la zonizzazione del territorio italiano ai fini del riscaldamento invernale. L'analisi ha evidenziato come cambierebbe la distribuzione percentuale delle località nelle fasce climatiche attualmente definite e le possibili implicazioni in termini di efficienza energetica degli edifici, legate all'applicazione dei requisiti minimi previsti dalle attuali normative in ambito EPBD.

Nella sezione B) è stato sviluppato un modello di previsione della radiazione solare globale orizzontale per le successive 48 ore. Come esempio si riportano i risultati ottenuti per l'anno 2020 per il sito ENEA Casaccia per il quale si hanno le misure al suolo della grandezza studiata.

I risultati venivano pubblicati giorno per giorno sul sito internet www.previsionirinnovabili.it.

Summary

In previous years, several climatic quantities at sub-hourly scale were developed to be used in the energy analysis of high-efficiency buildings. In the third year, starting from the available quantities, further development have been carried out.

The Report includes two section with different focus: In the section A) starting from the hourly data of the standard UNI 10346:2016, relating to the air temperature, the degree days (HDD) for Italian sites were calculated.

The data obtained were compared with those currently used for the zoning of the Italian territory, carried out in the early 90s. The analysis highlighted how the percentage distribution of Italian sites in the currently defined climatic zone and the possible implications in terms of energy efficiency of buildings, linked to the application of the minimum requirements (MEPS) defined by current regulations in the EPBD framework.

In the section B) a forecasting model for global horizontal solar radiation (GHI) was developed. The results obtained for the year 2020 for the ENEA Casaccia site are reported, for which the ground observation of GHI are available.

The results were published day by day on the website www.previsionirinnovabili.it.

*Bisogna rendere ogni cosa il più semplice possibile,
ma non più semplice di quanto sia possibile
(Albert Einstein)*

*È difficile fare previsioni, soprattutto sul futuro
(Yogi Berra)*

1 Introduzione

1.1 I dati climatici nel calcolo dei fabbisogni energetici: richiami normativi

Le variabili climatiche, come già evidenziato nei Reports precedenti, rivestono un ruolo fondamentale nel bilancio energetico degli edifici. Tra queste, in particolare, la temperatura è alla base della zonizzazione climatica del territorio nazionale prevista dalle attuali normative sull'efficienza energetica. I requisiti minimi per l'involucro edilizio, in caso di nuove costruzioni o riqualificazioni (DM 26/6/2015) [1], sono infatti fissati proprio in funzione della classe climatica di appartenenza della località in cui l'edificio si trova.

La classificazione del territorio nazionale è stata effettuata nei primi anni Novanta (DPR 412/93) [2] ed è basata sui Gradi Giorno (GG), indicatore climatico ricavato dalle serie temporali di temperatura raccolte nei decenni precedenti. In base alla zonizzazione eseguita, il territorio italiano è stato suddiviso in 6 fasce climatiche, dalla A alla F, per le quali è stato inoltre fissato anche il periodo di climatizzazione invernale.

Nei calcoli energetici, in ambito EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), sono invece utilizzati i dati forniti dalle norme UNI 10349-1-2-3 [4] [5] [6], aggiornate nel 2016, in cui, le principali grandezze climatiche sono state ricalcolate, a partire da dati orari, secondo la metodologia degli anni meteorologici tipici (AMT), in accordo alla norma internazionale EN ISO 15927-4 [7], recepita in ambito UNI.

In particolare, le norme 10349 sono così articolate:

- UNI 10349-1 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termoenergetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare oraria nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata.
- UNI/TR 10349-2-Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 2: Dati di progetto.
- UNI 10349-3-Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici.

La UNI 10349-1 fornisce le medie mensili e gli anni-tipo delle principali grandezze climatiche da utilizzare per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici relative a 110 località italiane, in cui si trovano le stazioni di rilevamento dei dati (spesso, ma non sempre, le località coincidono con i capoluoghi di provincia).

La UNI/TR 10349-2 fornisce invece, per le stesse grandezze, i valori di riferimento da utilizzare per la progettazione degli impianti di climatizzazione degli edifici. Tali valori sono quindi quelli necessari per far fronte ai valori di picco delle variabili climatiche esterne, e quindi per un corretto dimensionamento dei generatori.

La UNI 10349-3 fornisce valori di riferimento e i metodi di calcolo di alcuni indicatori climatici caratteristici per le località in esame, quali: Differenze di temperature cumulate a livello orario, per il periodo invernale ed estivo (Gradi Giorno invernali ed estivi), Differenza di umidità massica cumulata, Radiazione solare cumulata, Indice di Severità Climatica.

Tali indicatori possono essere utilizzati sia per le valutazioni di massima legate al consumo energetico degli edifici, sia per la zonizzazione del territorio.

È importante sottolineare che l'attuale classificazione climatica italiana è rimasta quella definita dal DPR 412/1993, come precedentemente detto.

L'eventuale rimodulazione delle zone climatiche in base a dati aggiornati, e le possibili implicazioni sul piano delle prescrizioni normative fissate per il settore edifici, sono oggetto di studio della terza annualità del presente lavoro.

Per quanto riguarda la radiazione solare, vista l'elevata variabilità legata alle condizioni meteorologiche del sito in esame, è apparso opportuno sviluppare un modello di previsione della radiazione globale orizzontale per le successive 48 ore. La previsione oraria della radiazione globale è un dato utile per prevedere la produttività di un eventuale impianto fotovoltaico presente su un edificio e l'illuminamento naturale che è disponibile.

Per l'anno 2020 si sono confrontati due modelli differenti di previsione della radiazione ovvero, WRF-ARW ed ibrido ENEA-WRF.

La previsione fornita, per il sito dell'ENEA Casaccia, ha una risoluzione oraria ed una validità che varia da 24 ore fino a 48 ore. Le verifiche effettuate attraverso l'elaborazione statistica, hanno consentito di valutare il grado di attendibilità della previsione. Le previsioni sono state effettuate ogni giorno e rese pubbliche entro le 23:59 del giorno prima sul sito internet <http://www.previsionirinnovabili.it> gestito dall'ENEA.

In base a quanto detto l'attività della terza annualità è stata focalizzata su un duplice obiettivo:

- 1) Utilizzando le temperature orarie della UNI 10349 sono stati ricalcolati i GG delle località italiane al fine di analizzare una possibile ipotesi di zonizzazione climatica invernale alternativa a quella attuale
- 2) Per la sola radiazione solare, che come evidenziato presenta maggior variabilità, sono stati analizzati modelli di previsione NPW basati su dati sub-orari a bassa scala.

Il Report sarà pertanto suddiviso in due sezioni distinte nelle quali vengono adottate numerazioni autonome relativamente alle figure, tabelle, equazioni e riferimenti bibliografici.

2 Sezione A: Ipotesi di aggiornamento della zonizzazione climatica italiana

2.1 Il DPR 412/93 e i Gradi Giorno

Il DPR 412/93 prevede la suddivisione del territorio nazionale, ai fini del riscaldamento invernale, in sei fasce climatiche, sulla base dei Gradi Giorno (GG) definiti come:

“la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media esterna giornaliera.”

$$GG = \sum_{j=1}^n (20 - T_e) \quad [1]$$

Mediante l'utilizzo di quest'indicatore climatico, basato sulle temperature medie mensili dell'aria, è stato possibile individuare differenti zone climatiche, come mostrato nella Tabella 1, e identificare per ogni zona i periodi di accensione degli impianti termici e le ore massime giornaliere di funzionamento in regime invernale.

Zona Climatica	Gradi Giorno	Periodi	Ore accensione
Zona A	≤ 600	1 Dic.- 15 Mar.	6
Zona B	>600≤900	1 Dic.-31 Mar.	8
Zona C	>900≤1400	15Nov-31 Mar.	10
Zona D	>1400≤2100	1 Nov-15 Apr.	12
Zona E	>2100≤3000	15 Ott.-15Apr.	14
Zona F	>3000	Nessuna limitazione	

Tab.1

Come evidente, località con elevato valore di GG sono caratterizzate da clima più freddo, nel periodo considerato, rispetto a località con numero minore di GG.

Il DPR 412/93 riporta inoltre le categorie di edifici per le quali le disposizioni di accensione degli impianti possono essere applicate limitatamente, nonché ulteriori indicazioni relative alla gestione e la regolazione degli impianti centralizzati.

La figura 1 mostra la distribuzione geografica di circa 8100 località italiane nelle 6 classi climatiche invernali, individuate dal DPR 412/93, mentre nella tabella successiva sono riportate le incidenze percentuali in termini di località e popolazione (fonte PNIEC 2019) [9].

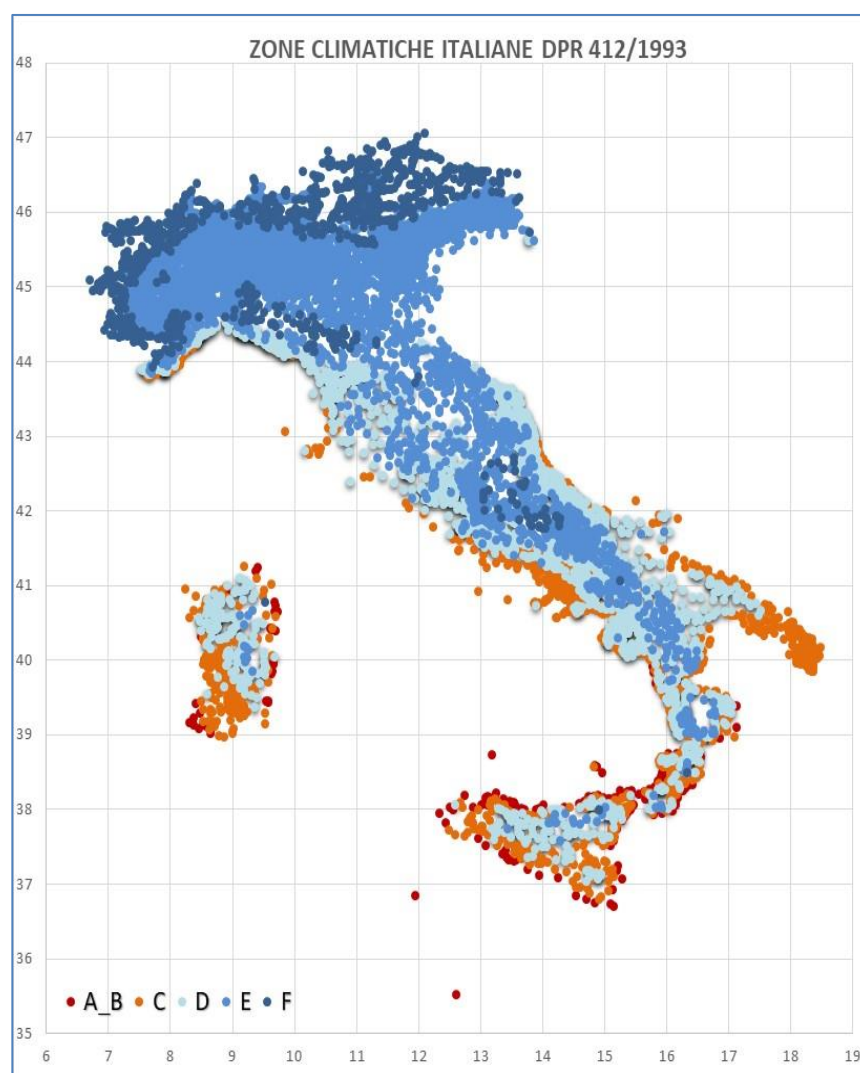


Fig.1

<i>Classe climatica</i>	<i>Numero di Comuni</i>	<i>Numero di Comuni (%)</i>	<i>Popolazione (%)</i>
A	2	0,02	0,04
B	157	1,9	5,3
C	981	12,2	21,2
D	1572	19,8	25,13
E	4176	52,8	45,5
F	1026	13,3	2,7

Tab. 2

Come evidente, il 72,6% dei comuni si concentra nelle classi climatiche D ed E, ed equivale a circa il 71% della popolazione. La fascia A, quella più “calda”, risulta la più esigua con lo 0,02 % (contiene 2 comuni soltanto), mentre nella classe F, che include le località più fredde, con oltre 3000 GG annui, ricade il 13,3% dei comuni.

2.2 Metodologia alla base dei GG del DPR 412/93: lo studio ENEA

Con l'entrata in vigore della Norma 373/76 finalizzata al contenimento dei consumi energetici in ambito civile, si manifestò la necessità di utilizzare un indicatore climatico mediante il quale zonizzare il territorio nazionale e consentire di applicare specifiche indicazioni prescrittive, tenendo conto delle differenti condizioni climatiche della realtà italiana.

I Gradi Giorno, calcolati inizialmente in 103 località sede di osservatori meteorologici, e riportati nel DM 10/3/77, apparvero però non adeguati per una corretta estensione alla totalità dei comuni italiani.

A tal fine, l'ENEA si occupò di ampliare la base dati disponibile e ridefinire metodologia e criteri di calcolo in modo da considerare in maniera più affidabile la morfologia e la diversificata climatologia del territorio italiano. Dallo studio ENEA, pubblicato nel 1989, sono stati derivati i GG riportati nel DPR 412/93. Di seguito una breve sintesi delle procedure applicate.

L'analisi fu basata sulle serie storiche di misure climatiche acquisite da differenti stazioni di rilevamento:

- ITAV (Ispettorato delle Telecomunicazioni e dell'Assistenza di volo Aeronautica Militare)
- UCEA (Ufficio Centrale di Ecologia Agraria)
- SI (Servizio Idrografico del Ministero Lavori Pubblici)

La tabella seguente riepiloga le differenti fonti di acquisizioni dati che ammontano in totale a 872 stazioni.

Fonte acquisizione dati	Numero di anni di rilevamento (serie storiche)					Totale
	7-10	11-14	15-18	19-22	23-27	
ITAV	20	17	32	35	49	153
UCEA	0	2	14	34	0	50
SI	88	202	379	0	0	669
Totale	108	221	425	69	49	872

Tab. 3

L'evidente eterogeneità dei dati raccolti rese necessaria un'analisi dettagliata della consistenza delle varie serie storiche e all'occorrenza la ricostruzione di dati mancanti, mediante opportune tecniche di correlazione statistica.

Una volta ultimata l'analisi e la validazione delle varie serie di misure disponibili, raccolte in un unico data base, furono definiti i metodi di calcolo da adottare per la definizione del periodo di climatizzazione invernale e l'estensione dei GG all'intero territorio nazionale.

Il periodo di riscaldamento preso in considerazione è stato determinato scegliendo il giorno di inizio e di fine periodo, in funzione di una temperatura media giornaliera di soglia di 12 °C.

Poiché in alcune località, soprattutto in zone calde, potevano verificarsi periodi di "oscillazioni" brevi intorno a tale valore, fu inoltre fissato un periodo minimo di 90 giorni, dal 1° dicembre al 28 febbraio.

Per determinare il criterio di estensione dei GG alle località differenti da quelle sedi delle stazioni di misura

un aspetto importante, è stato quello della “coerenza climatologica”, per tenere conto delle condizioni di microclima locale legate alla diversa morfologia del territorio nazionale.

Le differenti prove effettuate su diverse località campione, mostrarono che il criterio inizialmente ipotizzato (DM 10/3/77), in cui i GG venivano corretti sulla base della sola correlazione tra l'altitudine della località in esame era insufficiente per ottenere dei valori attendibili su tutti i comuni italiani.

A tal fine per l'estensione dei GG alle diverse località sono state effettuate delle regressioni, sia a scala regionale che provinciale, prendendo in considerazione varie stazioni meteo collocate nelle aree circostanti caratterizzate da un clima sufficientemente omogeneo.

Individuata l'equazione della retta di regressione, il valore dei GG di una data località è dato da:

$$GG(h) = a + b * h \quad [2]$$

con:

$$a = (\sum_i GG_i * \sum_i h_i^2 - \sum_i h_i GG_i * \sum_i h_i) / \Delta$$

$$b = (N \sum_i h_i GG_i - \sum_i h_i \sum_i GG_i) / \Delta$$

$$\Delta = N \sum_i h_i^2 - (\sum_i h_i)^2$$

in cui:

- N è il numero di località utilizzate
- h_i è l'altitudine della località i-esima
- GG sono i Gradi Giorno della località i-esima

Tale criterio consente di far dipendere i GG di una località da quelli di differenti località limitrofe, considerate climaticamente simili a quella in esame.

Successivamente, per definire una procedura applicabile alla totalità dei comuni italiani si rese necessario introdurre ulteriori opzioni per tenere conto anche di situazioni particolari, in cui la semplice regressione su base locale risultava poco efficace.

In particolare, furono introdotti ulteriori criteri basati su differenti parametri geografici, tra i quali:

- scelta della miglior regressione fra gruppi di località limitrofe;
- differente distanza dalla stazione di riferimento e dislivello altimetrico;
- assegnazione della località di riferimento e correzione altimetrica;
- assegnazione della località di riferimento senza correzione altimetrica;
- media dei GG di differenti località di riferimento limitrofe con o senza correzione altimetrica.

I risultati ottenuti dall'applicazione dei criteri messi a punto furono infine validati statisticamente valutando su base regionale e provinciale, l'errore medio relativo percentuale ottenuto con le regressioni effettuate.

Pur partendo da una base dati estremamente eterogenea e non ottimale in termini di consistenza e distribuzione geografica, lo studio effettuato consentì di individuare una serie di criteri di elaborazione tali da estendere il calcolo dei GG alla totalità dei comuni italiani.

Tale metodologia è stata alla base della zonizzazione del territorio nazionale, in 6 fasce climatiche pubblicata nel DPR 412/93 e tutt'ora in vigore.

2.3 Le stazioni di misura a confronto

Nella fase iniziale dello studio, prima di ricalcolare i GG sulla base dei dati orari della UNI 10349, sono state messe a confronto le misure iniziali dei due data set relativi alle stazioni di misura rappresentative delle province italiane.

È importante infatti considerare che le località di partenza, in cui sono stati rilevati i dati di misura, sono state selezionate con criteri differenti, così come risulta in effetti differente il criterio che le attuali norme indicano per estendere i GG alla totalità dei comuni italiani.

Tali aspetti, legati all'evoluzione delle norme tecniche UNI 10349, relative ai dati climatici da utilizzare nell'ambito dei calcoli energetici in ambito EPBD, saranno ripresi ed approfonditi nei paragrafi successivi.

Di seguito vengono esaminati preliminarmente i GG delle stazioni di misura attraverso alcuni semplici confronti statistici.

La tabella 4 riporta i GG delle diverse stazioni italiane. Questi sono stati individuati selezionando una località di riferimento per ogni provincia, non sempre coincidente con il capoluogo e come già in precedenza sottolineato, applicando criteri differenti. Poiché il numero delle province presenti sul territorio nazionale è cambiato nel corso degli anni passando dalle 98 del 1993 alle 110 della UNI 10349, nella tabella sono state riportate, ai fini di un confronto diretto, soltanto le province presenti in entrambi i data set climatici.

<i>Località</i>	<i>GG UNI 10349</i>	<i>GG DPR 412/93</i>	<i>Δ(%)</i>
AGRIGENTO	1186	729	39%
ALESSANDRIA	2637	2559	3%
ANCONA	1931	1688	13%
AOSTA	2878	2850	1%
ASCOLI PICENO	2292	1698	26%
L'AQUILA	2554	2514	2%
AREZZO	2321	2104	9%
ASTI	2685	2617	3%
AVELLINO	2077	1742	16%
BARI	1759	1185	33%
BERGAMO	2498	2533	-1%
BELLUNO	3069	3043	1%
BENEVENTO	1817	1316	28%
BOLOGNA	2349	2259	4%
BRINDISI	1539	1083	30%
BRESCIA	2497	2410	3%
BOLZANO	2346	2791	-19%
CAGLIARI	1584	990	38%
CAMPOBASSO	2258	2346	-4%
CASERTA	1645	1013	38%
CHIETI	1952	1556	20%

CALTANISSETTA	1395	1550	-11%
CUNEO	2919	3012	-3%
COMO	2665	2228	16%
CREMONA	2634	2389	9%
COSENZA	1640	1317	20%
CATANIA	1265	833	34%
CATANZARO	1984	1328	33%
ENNA	1802	2248	-25%
FORLI - CESENA	2304	2087	9%
FERRARA	2496	2326	7%
FOGGIA	2026	1530	24%
FIRENZE	1835	1821	1%
FROSINONE	1804	2196	-22%
GENOVA	1549	1435	7%
GORIZIA	2265	2333	-3%
GROSSETO	1780	1550	13%
IMPERIA	1456	1201	18%
ISERNIA	2481	1866	25%
CROTONE	1264	899	29%
LECCO	2271	2383	-5%
LECCE	1444	1153	20%
LIVORNO	1897	1408	26%
LATINA	1533	1220	20%
LUCCA	1869	1715	8%
MACERATA	2479	2005	19%
MESSINA	1262	707	44%
MILANO	2274	2404	-6%
MANTOVA	2586	2388	8%
MODENA	2510	2258	10%
MASSA	1716	1525	11%
MATERA	1818	1776	2%
NAPOLI	1546	1034	33%
NOVARA	2871	2463	14%
NUORO	2002	1602	20%
ORISTANO	1571	1059	33%
PALERMO	1121	751	33%
PIACENZA	2464	2715	-10%
PADOVA	2459	2383	3%
PESCARA	1840	1718	7%
PERUGIA	2174	2289	-5%
PISA	1863	1694	9%
PORDENONE	2391	2459	-3%
PRATO	1964	1668	15%

PARMA	2470	2502	-1%
PISTOIA	2106	1885	10%
PESARO - URBINO	2022	2083	-3%
PAVIA	2495	2623	-5%
POTENZA	2321	2472	-7%
RAVENNA	2379	2227	6%
REGGIO CALABRIA	1141	772	32%
REGGIO EMILIA	2515	2560	-2%
RAGUSA	1875	1324	29%
RIETI	2380	2324	2%
ROMA	1643	1415	14%
ROVIGO	2534	2466	3%
SALERNO	1416	994	30%
SIENA	2159	1943	10%
SONDRIO	2787	2755	1%
LA SPEZIA	1960	1413	28%
SIRACUSA	1398	799	43%
SASSARI	1579	1185	25%
SAVONA	1703	1481	13%
TARANTO	1578	1071	32%
TERAMO	1920	1834	4%
TRENTO	2735	2567	6%
TORINO	2648	2617	1%
TRAPANI	1343	810	40%
TERNI	2403	1650	31%
TRIESTE	1848	1929	-4%
TREVISO	2486	2378	4%
UDINE	2384	2323	3%
VARESE	2524	2652	-5%
VERCELLI	2502	2751	-10%
VENEZIA	2388	2345	2%
VICENZA	2277	2371	-4%
VERONA	2415	2468	-2%
VITERBO	2146	1989	7%

Tab. 4

Delle 98 località di riferimento relative alle province italiane, 75 hanno avuto un incremento dei GG e 23 una riduzione. Da notare che le maggiori variazioni percentuale si registrano in Sicilia, in cui si nota un 44% di incremento per la provincia di Messina ed una riduzione del 25% per la provincia di Enna.

Per meglio evidenziare le differenze, in termini di GG, i due set di dati sono stati confrontati mediante scatterplot. Successivamente sono stati calcolati alcuni indici di accostamento comunemente utilizzati.

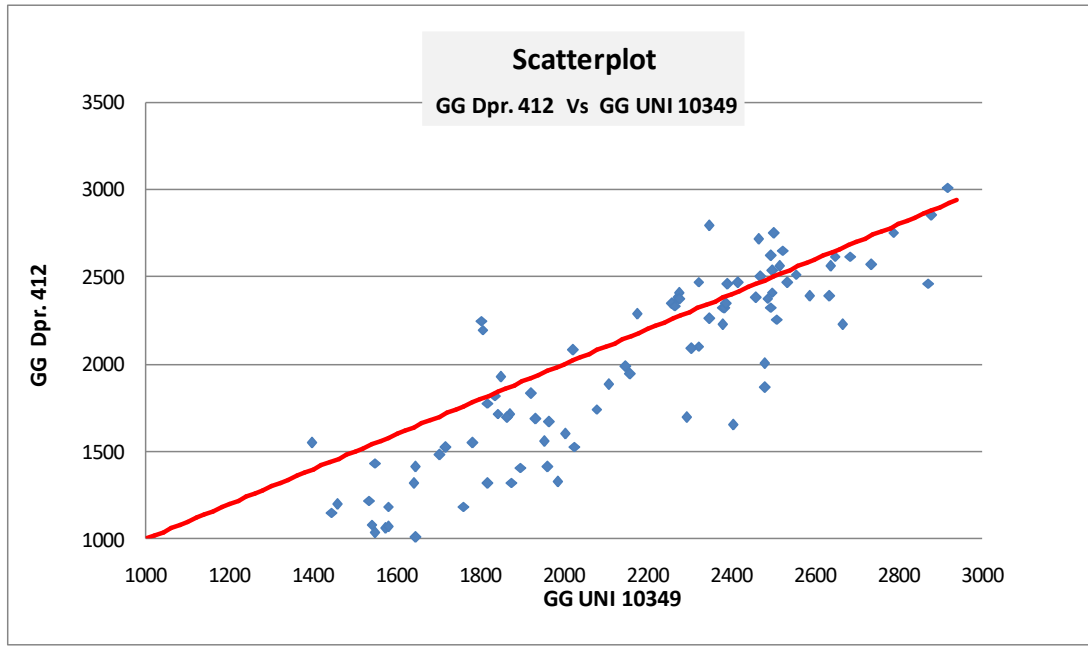


Fig.2

Come evidente i dati tendono ad addensarsi maggiormente nel settore inferiore del grafico, denotando quindi dei valori generalmente più elevati per i GG derivati dalla UNI 10349.

Tali differenze emergono altresì negli indici di accostamento calcolati.

In particolare, sono stati calcolati:

- *Errore medio* (inglese: *Mean Error*, o anche: *Mean Bias Error*, MBE). Si definisce come segue:

$$MBE = \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N e_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad [3]$$

- *Radice dell'errore quadratico medio* (*Root Mean Squared Error*, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad [4]$$

- *Mean Percentage Error* (MPE)

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100 \quad [5]$$

- *Root Mean Squared Percentage Error* (RSMPE)

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{O_i} \right)^2} \times 100 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \right)^2} \quad [6]$$

<i>Indici di Accostamento</i>	
MBE	193
MPE (%)	16,4
RMSE	325
RMSPE (%)	27,5

Tab.5

Il valore assunto dagli indici di accostamento, sia in termini assoluti che relativi, evidenzia delle differenze rilevanti tra i dati di misura rilevati.

Gli indicatori riportati in tabella forniscono un quadro d'insieme delle principali differenze tra i due campioni.

Si riportano di seguito le principali statistiche descrittive relative ai due campioni.

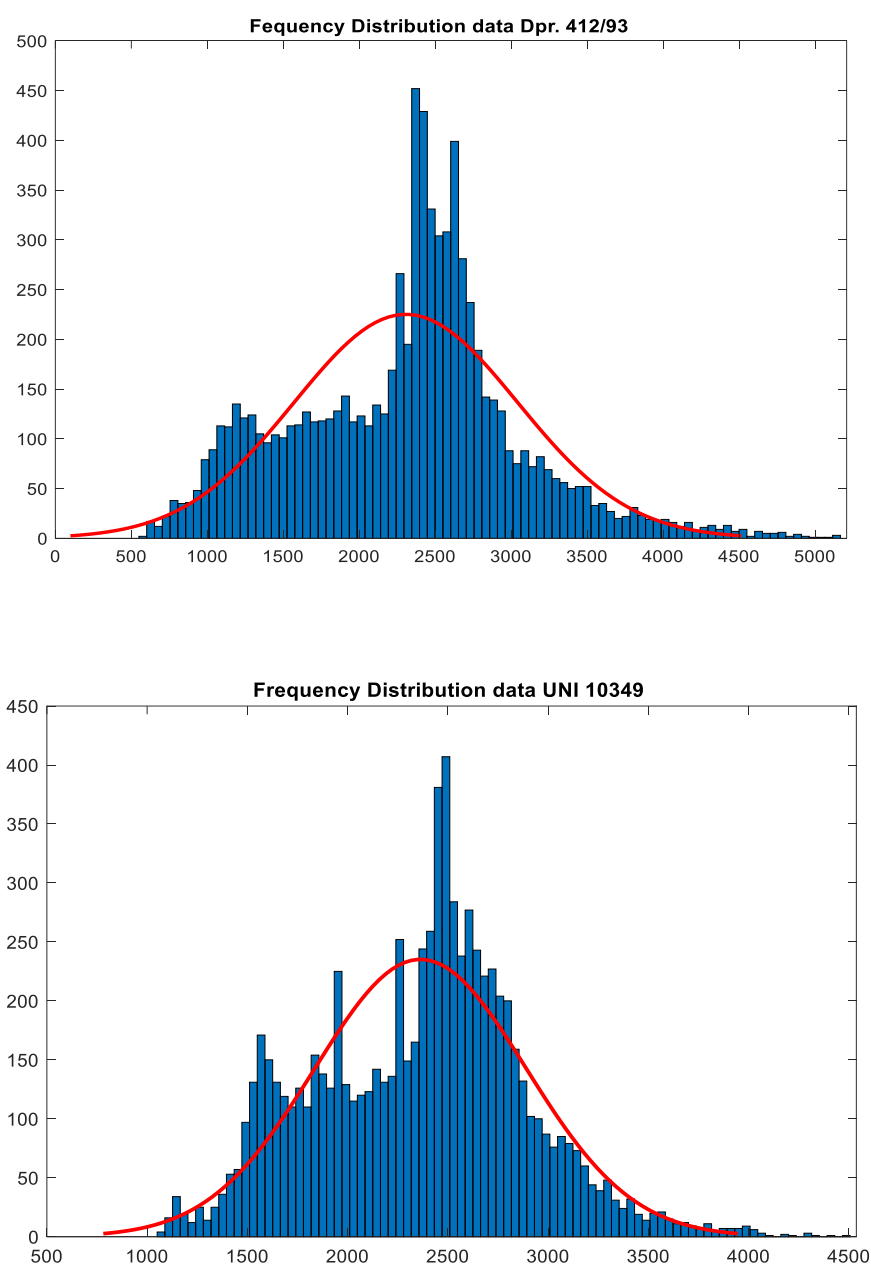
<i>Statistiche descrittive</i>	<i>GG UNI 10349</i>	<i>GG DPR 412/93</i>	<i>D%</i>
Media	2084,4	1887,0	9%
Errore standard	46,8	63,0	-35%
Mediana	2146,0	1936,0	10%
Moda	2321,0	2617,0	-13%
Deviazione standard	465,8	623,9	-34%
Varianza campionaria	217.000,3	389.241,7	-79%
Curtosi	-0,9	-1,1	-23%
Asimmetria	-0,2	-0,2	-18%
Intervallo	1948,0	2336,0	-20%
Minimo	1121,0	707,0	37%
Massimo	3069,0	3043,0	1%
Livello di confidenza (95,0%)	92,9	125,1	-35%

Tab. 6

In particolare, il valor medio relativo ai GG basati sui dati della UNI 10349 risulta del 9,3% superiore a quello delle corrispondenti località di riferimento del DPR 412/93 (10% quello della mediana), a fronte di una deviazione standard minore del 34%.

Nei paragrafi successivi sarà valutato se tale differenza tra le medie dei campioni è statisticamente significativa.

Un quadro maggiormente completo delle differenze riscontrate nei due campioni analizzati emerge dalle distribuzioni in frequenza dei dati, relative ai GG delle località sede di stazioni di rilevamento.



Figg.3-4

Le distribuzioni in termini di frequenza relativa mostrano una prevalenza di valori a partire dalle classi oltre i 2500 GG nei dati delle stazioni della norma UNI 10349.

Il grafico successivo mostra invece gli andamenti in termini di curve di probabilità cumulata CDF (*Cumulative Distribution Function*) [10]

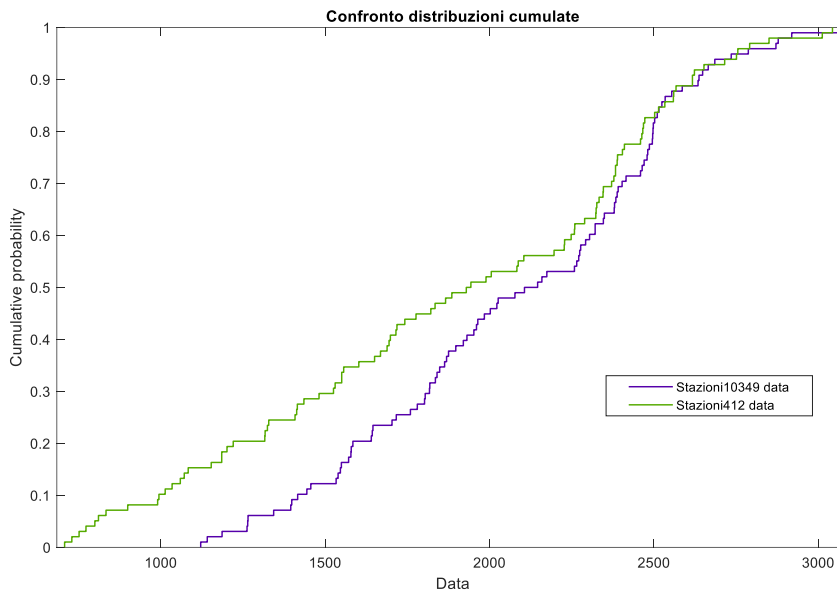


Fig.5

$$Fy(y) = \int_{-\infty}^y Fy(\xi) d\xi = P(Y \leq y) \quad [7]$$

Per come definita, la funzione di probabilità cumulata CDF, rappresenta la probabilità che una determinata percentuale cumulata del campione considerato sia inferiore al corrispondente valore in termini di GG.

Dal grafico vediamo quindi che la distribuzione cumulata relativa ai dati della UNI 10349 è sempre al di sotto della curva dei GG del DPR 412/93 se non per una leggera sovrapposizione per valori molto alti dei Gradi Giorno (>2500).

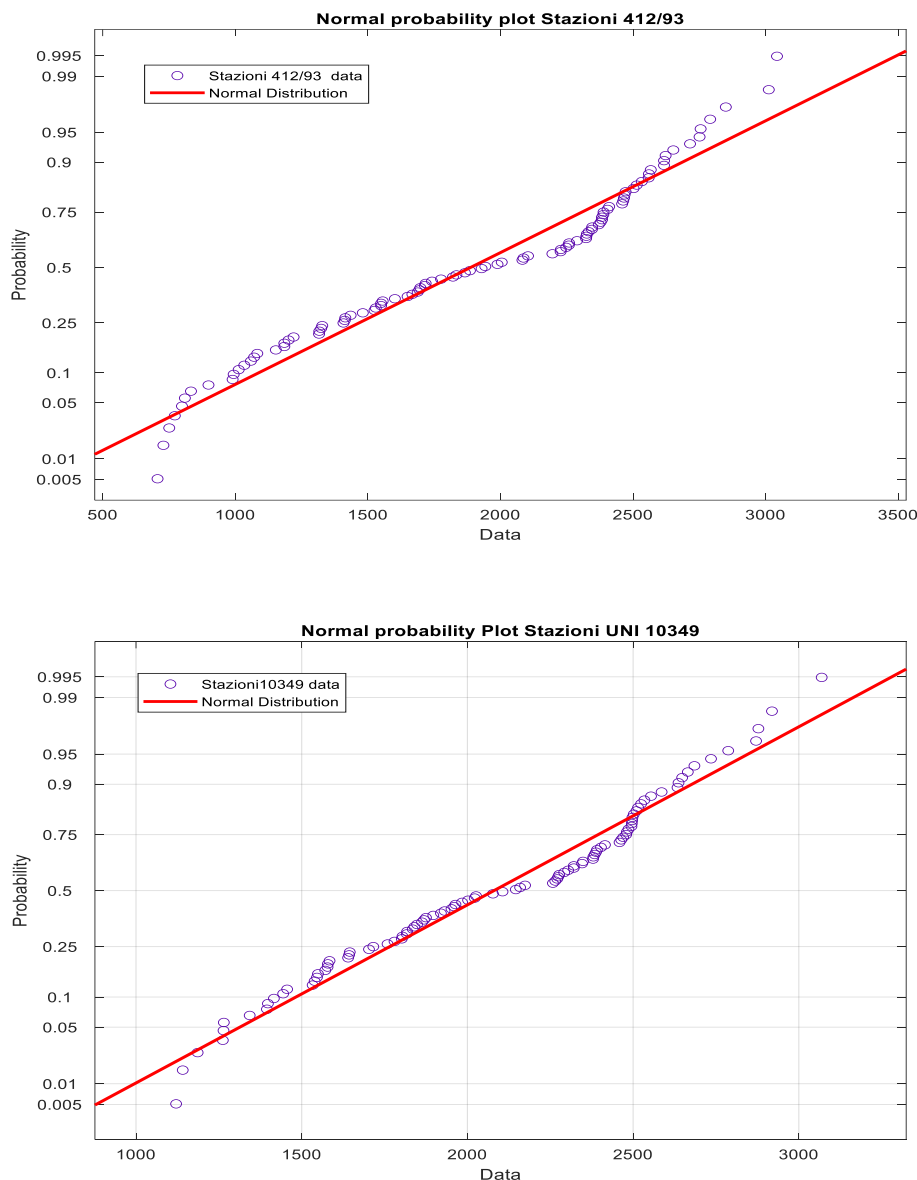
Questo sembrerebbe confermare quanto già visto in termini di distribuzioni relative: dei valori mediamente più alti dei GG per la maggior parte delle località, ma una diversa tendenza per le località particolarmente fredde, probabilmente ricadenti nella classe F.

È importante a riguardo sottolineare alcuni aspetti fondamentali: i GG messi a confronto sono stati soltanto quelli relativi alle province presenti in entrambi i data set, cioè 98: non tutte, infatti, quelle riportate nella attuale norma UNI 10349:2016 (110 province) erano presenti nel DPR 412/93.

Inoltre, le località di riferimento in esame, sedi delle stazioni di misura, sono state selezionate in maniera differente nei due casi esaminati. Nella norma UNI 10349 è stata individuata una sola località come rappresentativa della provincia in esame; per il DPR 412/93, come già accennato, il dato di riferimento fu ottenuto eseguendo delle regressioni tra i dati provenienti da più stazioni in aree geografiche ritenute climaticamente omogenee, o applicando ulteriori criteri finalizzati alla coerenza climatica.

Anche in virtù del differente approccio seguito nell'elaborazione dei due campioni, per completare l'analisi dei dati relativi alle località di misura è apparso interessante verificare, mediante opportuni test, la rilevanza statistica delle differenze riscontrate.

Per determinare il tipo di test da utilizzare, di tipo parametrico o non parametrico, è necessario fare delle verifiche preliminari sulle distribuzioni dei due data set.



Figg. 6-7

I normality plot riportati nelle figure 6 e 7, consentono di considerare le distribuzioni dei due set di dati sostanzialmente di tipo normale. Tale aspetto è stato ulteriormente confermato dai test di Lillefores, eseguiti per entrambi i campioni [11]

La normalità dei dati consente di eseguire il test di Student (test T) per valutare la significatività delle differenze emerse nelle statistiche descrittive, ed in particolare tra le medie.

<i>Test t: due campioni assumendo varianze diverse</i>		
	<i>GG UNI 10349</i>	<i>GG DPR 412</i>
Media	2080,0	1887,0
Varianza	217288,8	389241,7
Osservazioni	98	98
<i>Differenza ipotizzata per le medie</i>	0	
<i>gdl</i>	180	
<i>Statt</i>	2,45	
<i>P(T<=t) una coda</i>	0,01	
<i>t critico una coda</i>	1,65	
<i>P(T<=t) due code</i>	0,02	
<i>t critico due code</i>	1,97	

Tab. 7

In particolare, è stato eseguito il test T di campioni con varianze differenti: il valore della statistica T superiore al valore di soglia critica conferma che le differenze evidenziate sono statisticamente significative.

Sarà interessante verificare come le differenze evidenziate si rifletteranno sulla distribuzione dei circa 8100 località italiane, ottenuti a partire dai dati di riferimento fin qui analizzati.

2.4 Il calcolo dei Gradi Giorno nella stagione di riscaldamento secondo la Norma UNI 10349

La Norma di riferimento per il calcolo dei Gradi Giorno di riscaldamento è la UNI EN ISO 15927-6 [8]. I valori della temperatura di base da utilizzare nei calcoli sono 10 °C, 12 °C, 14 °C, 16 °C, 18 °C, 20 °C. La temperatura base standard consigliata per i calcoli è 12 °C.

La serie italiana delle UNI 10349 sui dati climatici relativi al riscaldamento e raffrescamento degli edifici, oltre a fornire per il territorio italiano, i dati climatici convenzionali necessari per la verifica delle prestazioni energetiche e termoigrometriche degli edifici (UNI 10349-1) completa la UNI EN ISO 15927-6 indicando la metodologia di calcolo per la determinazione dei Gradi Giorno (UNI 10349-3).

I Gradi Giorno (GG) per il periodo di riscaldamento in questa trattazione vengono riferiti ad una temperatura base gradi $\vartheta_b = 20^\circ\text{C}$ e sono calcolati nell'intervallo

15 ottobre - 14 aprile (Totale giorni: 182; Totale ore: 4368)

In questo periodo, le differenze orarie di temperatura sono calcolate ora per ora con le seguenti equazioni:

$$\Delta\theta_h(20) = (20 - \theta_{hm}) \text{ per } \theta_{hm} < 20^\circ\text{C} \quad [8]$$

$$\Delta\theta_h(20) = 0 \text{ per } \theta_{hm} \geq 20^\circ\text{C} \quad [9]$$

Per semplicità di scrittura, dato che ci riferiremo sempre alla temperatura base di 20 °C, ometteremo il richiamo a questo riferimento

Le differenze di temperature orarie cumulate per l'intervallo 15 ottobre - 14 aprile sono calcolate come la somma di valori $\Delta\theta_h$ con l'equazione

$$\theta_{\Sigma h} = \sum_{h=1}^N (20 - \theta_{hm}) \quad [10]$$

La sommatoria indicata consta di un numero di valori pari a $N = 4368$; di questi N valori sarà diverso da zero solo un numero q di valori che verificano la condizione [8].

Non perdendo in generalità, è possibile riscrivere la [10] considerando la sommatoria non estesa a tutti gli N valori ma bensì ai soli q valori diversi da zero:

$$\theta_{\Sigma h} = \sum_{h=1}^q (20 - \theta_{hm}) = (20 \times q) - \sum_{h=1}^q \theta_{hm} \quad [11]$$

Questo tipo di notazione sarà utile in una fase successiva della trattazione.

Le differenze di temperature orarie cumulate possono essere espresse in Gradi Giorno (GG) di riscaldamento utilizzando la seguente equazione

$$\text{GG} = \theta_{\Sigma h(d)} = \frac{\sum_{h=1}^N (20 - \theta_{hm})}{24} = \frac{(20 \times q)}{24} - \frac{\sum_{h=1}^q \theta_{hm}}{24} \quad [12]$$

La Norma UNI 10349 fornisce i dati delle temperature orarie per 110 stazioni di rilevazione dei dati climatici e un criterio per il calcolo dei valori medi mensili della temperatura media giornaliera dell'aria esterna, per

le località diverse dalle stazioni di rilevazione. Non fornisce indicazioni specifiche riguardanti il calcolo della temperatura oraria.

È tuttavia lecito concludere che si debba applicare lo stesso criterio previsto per il calcolo dei valori medi mensili della temperatura media giornaliera.

Ciò premesso, per le località diverse dalle stazioni di rilevazione, che per semplicità indicheremo anche come altre località, la valutazione della temperatura corretta deve tener conto della diversa localizzazione e altitudine, rispetto alla stazione di rilevazione dei parametri climatici, applicando il seguente criterio:

- si identifica la stazione di rilevazione dei parametri climatici di riferimento più vicina in linea d'aria (non necessariamente la stazione di rilevazione dei dati climatici della provincia di appartenenza);
- si apporta una correzione al valore della temperatura della stazione di rilevazione θ_{er} dei parametri climatici di riferimento per tenere conto della differenza di altitudine tra questa e la località considerata, secondo la seguente relazione:

$$\theta_e = \theta_{er} - (z - z_r) \times d \quad [13]$$

Il fattore correttivo della temperatura oraria in funzione della variazione altimetrica d è una costante indipendente ed è definito per ognuna delle 110 stazioni di rilevazione.

Zona Geografica	$d(^{\circ}\text{C}/\text{m})$
ITALIA SETTENTRIONALE TRANSPADANA	1/178
ITALIA SETTENTRIONALE CISPADANA	1/200
ITALIA CENTRALE E MERIDIONALE	1/147
SICILIA	1/174
SARDEGNA	1/192

Tab. 8

Le stazioni di rilevazioni sono riportate nel prospetto 4 della parte 1 della Norma UNI 10349, ordinate per sigla di provincia, per coordinate geografiche e altitudine; nel prospetto 5 della parte 1 sono invece riportati i rispettivi valori medi mensili delle temperature medie giornaliere dell'aria esterna, riferiti alla loro quota di altitudine. Nel prospetto 12 della parte 3 sono invece indicati i valori dei Gradi Giorno (GG) per il periodo di riscaldamento alla temperatura base $\vartheta_b = 20^{\circ}\text{C}$.

Nella tabella a seguire si riportano per le stazioni di rilevazione (non necessariamente coincidenti con il capoluogo di provincia), una sintesi dei dati più significativi dei prospetti citati e l'indicazione delle zone climatiche individuate secondo il criterio definito dal DPR 412/93.

	Località	Lat. ($^{\circ}\text{C}$)	Long. ($^{\circ}\text{C}$)	quota (m)	d [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$]	GG	Zona Climatica
1	AGRIGENTO	37,24	13,64	40	1/174	1186	C
2	ALESSANDRIA	44,94	8,71	90	1/178	2637	E
3	ANCONA	43,62	13,52	91	1/147	1931	D
4	AOSTA	45,74	7,36	545	1/178	2878	E
5	ASCOLI PICENO	42,82	13,52	180	1/147	2292	E
6	L'AQUILA	42,35	13,40	700	1/147	2554	E
7	AREZZO	43,59	11,55	206	1/200	2321	E
8	ASTI	44,92	8,19	175	1/178	2685	E
9	AVELLINO	41,03	14,98	309	1/147	2077	D
10	BARI	41,00	16,75	189	1/147	1759	D

11	BERGAMO	45,72	9,68	290	1/178	2498	E
12	BIELLA	45,47	8,17	226	1/178	2696	E
13	BELLUNO	46,02	11,89	267	1/178	3069	F
14	BENEVENTO	41,05	14,55	270	1/147	1817	D
15	BOLOGNA	44,50	11,33	48	1/200	2349	E
16	BRINDISI	40,56	17,85	53	1/147	1539	D
17	BRESCIA	45,43	10,03	93	1/178	2497	E
18	BAR - ANDR - TRANI	41,25	16,42	63	1/147	1615	D
19	BOLZANO	46,50	11,34	265	1/178	2346	E
20	CAGLIARI	39,32	8,99	20	1/192	1584	D
21	CAMPOBASSO	41,52	14,78	581	1/147	2258	E
22	CASERTA	41,15	14,20	65	1/147	1645	D
23	CHIETI	42,35	14,17	325	1/147	1952	D
24	CARBONIA - IGL.	39,28	8,52	208	1/192	1656	D
25	CALTANISSETTA	37,16	14,33	70	1/174	1395	C
26	CUNEO	44,34	7,56	575	1/178	2919	E
27	COMO	45,72	9,09	322	1/178	2665	E
28	CREMONA	45,45	9,65	96	1/178	2634	E
29	COSENZA	39,52	16,14	185	1/147	1640	D
30	CATANIA	37,44	15,07	10	1/174	1265	C
31	CATANZARO	38,67	16,41	714	1/147	1984	D
32	ENNA	37,52	14,18	350	1/174	1802	D
33	FORLI - CESENA	44,14	12,24	42	1/200	2304	E
34	FERRARA	44,83	11,62	6	1/200	2496	E
35	FOGGIA	41,34	15,38	233	1/147	2026	D
36	FIRENZE	43,77	11,26	70	1/200	1835	D
37	FERMO	43,25	13,75	5	1/147	1957	D
38	FROSINONE	41,64	13,32	179	1/147	1804	D
39	GENOVA	44,37	9,13	50	1/200	1549	D
40	GORIZIA	45,88	13,50	30	1/178	2265	E
41	GROSSETO	42,71	11,14	40	1/200	1780	D
42	IMPERIA	43,82	7,79	61	1/200	1456	D
43	ISERNIA	41,71	14,20	660	1/147	2481	E
44	CROTONE	39,09	17,13	10	1/147	1264	C
45	LECCO	45,84	9,35	237	1/178	2271	E
46	LECCE	40,24	18,44	24	1/147	1444	D
47	LIVORNO	43,58	10,47	15	1/200	1897	D
48	LODI	45,23	9,40	60	1/178	2517	E
49	LATINA	41,47	12,90	23	1/147	1533	D
50	LUCCA	43,90	10,25	5	1/200	1869	D
51	MONZA - BRIAN.	45,54	9,21	142	1/178	2454	E
52	MACERATA	43,13	13,07	581	1/147	2479	E
53	MESSINA	38,14	15,02	70	1/174	1262	C
54	MILANO	45,47	9,22	122	1/178	2274	E
55	MANTOVA	44,97	10,77	22	1/178	2586	E
56	MODENA	44,66	10,92	37	1/200	2510	E
57	MASSA	44,06	10,08	90	1/200	1716	D
58	MATERA	40,66	16,49	475	1/147	1818	D
59	NAPOLI	40,73	14,65	55	1/147	1546	D
60	NOVARA	45,55	8,69	173	1/178	2871	E
61	NUORO	40,34	9,28	490	1/192	2002	D
62	OGLIASTRA	39,79	9,61	46	1/192	1497	D
63	ORISTANO	39,98	8,61	14	1/192	1571	D
64	OLBIA - TEMP.	40,93	9,15	488	1/192	1934	D
65	PALERMO	38,13	13,33	50	1/174	1121	C
66	PIACENZA	45,06	9,68	51	1/200	2464	E
67	PADOVA	45,21	11,74	6	1/178	2459	E
68	PESCARA	42,47	14,22	5	1/147	1840	D
69	PERUGIA	42,95	12,68	220	1/147	2174	E
70	PISA	43,77	10,38	5	1/200	1863	D
71	PORDENONE	45,95	12,65	30	1/178	2391	E

72	PRATO	43,77	11,05	120	1/200	1964	D
73	PARMA	44,80	10,33	57	1/200	2470	E
74	PISTOIA	43,95	10,99	130	1/200	2106	E
75	PESARO - URBINO	43,88	12,87	20	1/147	2022	D
76	PAVIA	45,23	8,68	106	1/178	2495	E
77	POTENZA	40,76	15,98	767	1/147	2321	E
78	RAVENNA	44,42	12,20	2	1/200	2379	E
79	REGGIO CALABRIA	38,11	15,65	15	1/147	1141	C
80	REGGIO EMILIA	44,70	10,63	56	1/200	2515	E
81	RAGUSA	36,95	14,68	650	1/174	1875	D
82	RIETI	42,42	12,81	378	1/147	2380	E
83	ROMA	41,92	12,52	32	1/147	1643	D
84	RIMINI	44,06	12,57	7	1/200	2405	E
85	ROVIGO	45,09	11,72	6	1/178	2534	E
86	SALERNO	40,07	15,52	5	1/147	1416	D
87	SIENA	43,09	11,44	189	1/200	2159	E
88	SONDRIO	46,17	9,87	307	1/178	2787	E
89	LA SPEZIA	44,07	9,94	360	1/200	1960	D
90	SIRACUSA	37,06	15,16	90	1/174	1398	C
91	SASSARI	40,74	8,54	150	1/192	1579	D
92	SAVONA	44,26	8,45	170	1/200	1703	D
93	TARANTO	40,44	17,43	100	1/147	1578	D
94	TERAMO	42,67	13,70	275	1/147	1920	D
95	TRENTO	46,02	11,13	185	1/178	2735	E
96	TORINO	44,96	7,71	226	1/178	2648	E
97	TRAPANI	37,95	12,66	180	1/174	1343	C
98	TERNI	42,53	12,77	370	1/147	2403	E
99	TRIESTE	45,65	13,76	2	1/178	1848	D
100	TREVISIO	45,70	11,95	50	1/178	2486	E
101	UDINE	46,02	13,11	80	1/178	2384	E
102	VARESE	45,81	8,62	193	1/178	2524	E
103	VERBANIA	45,93	8,55	202	1/178	2408	E
104	VERCELLI	45,33	8,39	132	1/178	2502	E
105	VENEZIA	45,35	12,14	0	1/178	2388	E
106	VICENZA	45,72	11,58	182	1/178	2277	E
107	VERONA	45,35	11,01	39	1/178	2415	E
108	MEDIO CAMP.	39,53	8,92	100	1/192	1630	D
109	VITERBO	42,48	12,01	327	1/147	2146	E
110	VIBO VALENTIA	38,68	16,11	498	1/147	1686	D

Tab. 9

Per le altre località, la determinazione della temperatura oraria richiede di individuare quale delle stazioni di rilevazione geograficamente limitrofe è la più vicina in linea d'aria.

Come prima ipotesi semplificativa, note latitudini φ e longitudine λ della località e delle stazioni si può scegliere come riferimento quella stazione per cui risulta minimo il valore (espresso in radianti) della distanza euclidea $\sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\Delta\lambda)^2}$.

Un maggior livello di approssimazione si raggiunge assimilando il globo terrestre ad una sfera di raggio R (≈ 6.371 km), e determinando la distanza D (km) tra due località con la formula del senovero (Harvesine formula) [12]

$$D = c \times R \quad [14]$$

$$\text{dove } c = \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos \varphi_1 \times \cos \varphi_2 \times \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)}$$

Nell'ambito del presente lavoro, le località analizzate sono state 8094 e si riferiscono ai comuni riportati nella Tabella A allegata al DPR 412/93.

Per ognuna di queste località, sono state individuate le stazioni di rilevazione di riferimento applicando, per il calcolo della distanza minima, entrambe le formulazioni esposte. L'applicazione ha evidenziato delle discordanze tra i due metodi, in particolare, in circa l'8,7 % dei casi si hanno delle stazioni di misura differenti per la stessa località e solo il 10% delle stazioni di misura non modifica la numerosità delle località ad esse collegate.

Nella tabella a seguire è riportata una sintesi di alcuni dei risultati ottenuti.

Stazioni di misura		Località				Stazioni di misura		Località			
		Euclide	Harvesine	Variazione				Euclide	Harvesine	Variazione	
1	AGRIGENTO	45	46	1	2,2%	56	MODENA	41	41	0	0,0%
2	ALESSANDRIA	118	112	-6	-5,1%	57	MASSA	84	79	-5	-6,0%
3	ANCONA	33	32	-1	-3,0%	58	MATERA	43	44	1	2,3%
4	AOSTA	97	97	0	0,0%	59	NAPOLI	39	41	2	5,1%
5	ASCOLI PICENO	29	27	-2	-6,9%	60	NOVARA	114	106	-8	-7,0%
6	L'AQUILA	19	18	-1	-5,3%	61	NUORO	56	56	0	0,0%
7	AREZZO	36	33	-3	-8,3%	62	OGLIASTRA	193	191	-2	-1,0%
8	ASTI	132	130	-2	-1,5%	63	ORISTANO	64	58	-6	-9,4%
9	AVELLINO	27	24	-3	-11,1%	64	OLBIA - TEMP.	101	93	-8	-7,9%
10	BARI	9	11	2	22,2%	65	PALERMO	39	45	6	15,4%
11	BERGAMO	139	135	-4	-2,9%	66	PIACENZA	42	36	-6	-14,3%
12	BIELLA	81	78	-3	-3,7%	67	PADOVA	48	50	2	4,2%
13	BELLUNO	46	45	-1	-2,2%	68	PESCARA	73	70	-3	-4,1%
14	BENEVENTO	31	23	-8	-25,8%	69	PERUGIA	150	175	25	16,7%
15	BOLOGNA	100	98	-2	-2,0%	70	PISA	46	49	3	6,5%
16	BRINDISI	61	59	-2	-3,3%	71	PORDENONE	20	18	-2	-10,0%
17	BRESCIA	81	80	-1	-1,2%	72	PRATO	80	74	-6	-7,5%
18	BAR - ANDR- TRANI	54	52	-2	-3,7%	73	PARMA	108	114	6	5,6%
19	BOLZANO	46	44	-2	-4,3%	74	PISTOIA	52	49	-3	-5,8%
20	CAGLIARI	83	85	2	2,4%	75	PESARO - URB.	127	111	-16	-12,6%
21	CAMPOBASSO	83	84	1	1,2%	76	PAVIA	29	25	-4	-13,8%
22	CASERTA	92	99	7	7,6%	77	POTENZA	36	32	-4	-11,1%
23	CHIETI	58	56	-2	-3,4%	78	RAVENNA	106	116	10	9,4%
24	CARBONIA - IGL.	37	37	0	0,0%	79	REGGIO C.	124	116	-8	-6,5%
25	CALTANISSETTA	64	82	18	28,1%	80	REGGIO E.	60	70	10	16,7%
26	CUNEO	72	72	0	0,0%	81	RAGUSA	75	75	0	0,0%
27	COMO	30	31	1	3,3%	82	RIETI	73	89	16	21,9%
28	CREMONA	59	60	1	1,7%	83	ROMA	73	60	-13	-17,8%
29	COSENZA	101	106	5	5,0%	84	RIMINI	60	54	-6	-10,0%
30	CATANIA	22	27	5	22,7%	85	ROVIGO	140	147	7	5,0%
31	CATANZARO	72	80	8	11,1%	86	SALERNO	74	73	-1	-1,4%
32	ENNA	20	27	7	35,0%	87	SIENA	57	65	8	14,0%
33	FORLI - CESENA	21	18	-3	-14,3%	88	SONDRIO	37	38	1	2,7%
34	FERRARA	114	113	-1	-0,9%	89	LA SPEZIA	205	184	-21	-10,2%
35	FOGGIA	115	126	11	9,6%	90	SIRACUSA	161	186	25	15,5%
36	FIRENZE	41	44	3	7,3%	91	SASSARI	61	54	-7	-11,5%
37	FERMO	23	23	0	0,0%	92	SAVONA	36	34	-2	-5,6%
38	FROSINONE	14	14	0	0,0%	93	TARANTO	28	29	1	3,6%
39	GENOVA	6	6	0	0,0%	94	TERAMO	144	130	-14	-9,7%
40	GORIZIA	12	10	-2	-16,7%	95	TRENTO	111	116	5	4,5%
41	GROSSETO	20	17	-3	-15,0%	96	TORINO	41	47	6	14,6%
42	IMPERIA	14	15	1	7,1%	97	TRAPANI	66	69	3	4,5%
43	ISERNIA	45	39	-6	-13,3%	98	TERNI	55	68	13	23,6%
44	CROTONE	51	41	-10	-19,6%	99	TRIESTE	93	91	-2	-2,2%
45	LECCO	28	36	8	28,6%	100	TREVISO	148	155	7	4,7%
46	LECCE	49	49	0	0,0%	101	UDINE	241	234	-7	-2,9%
47	LIVORNO	101	104	3	3,0%	102	VARESE	148	123	-25	-16,9%
48	LODI	47	50	3	6,4%	103	VERBANIA	213	205	-8	-3,8%
49	LATINA	41	38	-3	-7,3%	104	VERCELLI	202	216	14	6,9%
50	LUCCA	25	24	-1	-4,0%	105	VENEZIA	166	156	-10	-6,0%
51	MONZA - BRIAN.	33	32	-1	-3,0%	106	VICENZA	128	138	10	7,8%
52	MACERATA	28	28	0	0,0%	107	VERONA	74	75	1	1,4%
53	MESSINA	52	60	8	15,4%	108	MEDIO CAMP.	102	84	-18	-17,6%
54	MILANO	68	75	7	10,3%	109	VITERBO	128	136	8	6,3%
55	MANTOVA	76	68	-8	-10,5%	110	VIBO VALENTIA	78	84	6	7,7%

Tab. 10

Nelle analisi realizzate si è visto come il criterio per l'identificazione della stazione di riferimento, basato esclusivamente sulla distanza in linea d'aria, porti ad associare località e stazioni di misura con caratteristiche orografiche e climatiche significativamente differenti. Si pensi a situazioni in cui i due siti sono collocati su differenti versanti di rilievi montuosi (in particolare quelli appenninici) o in differenti ambienti climatici, quali le zone interne e le zone litoranee. Alcuni dei casi singolari riguardano le zone a sud del Piemonte, per lo più montuose e collinari che hanno come stazioni di riferimento delle località della riviera Ligure di Levante (*i GG* calcolati a partire dai dati della UNI 10349 sono in media del 30% più bassi di quelli attuali definiti dal DPR 412/93)

L'estensione del criterio di valutazione delle temperature, previsto dalla Norma UNI 10349, per le *località diverse dalle stazioni di rilevazione*, porta a definire una relazione per il calcolo delle temperature orarie θ_{hm} analoga alla [13]

$$\theta_{hm} = \theta_{hmr} - (z - z_r) \times d \quad [15]$$

A partire dalla relazione [14], si possono scrivere le differenze orarie di temperatura con espressioni analoghe alle [8] e [9].

Ciò posto, dette

$$\Delta\theta_{hr} = (20 - \theta_{hmr}) \quad [16]$$

e

$$\Delta z_r = (z - z_r) \quad [17]$$

Le differenze orarie di temperatura delle altre località assumono la seguente forma:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{hr} + \Delta z \times d \text{ per } [\theta_{hmr} - \Delta z_r \times d] < 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad [18]$$

$$\Delta\theta_h = 0 \text{ per } [\theta_{hmr} - \Delta z_r \times d] \geq 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad [19]$$

Le differenze di temperature orarie cumulate per il periodo di riscaldamento delle altre località sono calcolate come la somma di valori $\Delta\theta_h$ con l'equazione

$$\theta_{\Sigma h} = \sum_{h=1}^N [\Delta\theta_{hr} + \Delta z_r \times d] \quad [20]$$

A partire dall'equazione [20], le differenze di temperature orarie cumulate espresse in Gradi Giorno di riscaldamento possono essere scritte come

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^N \Delta\theta_{hr}}{24} \right] + \left[\frac{\sum_{h=1}^N \Delta z_r \times d}{24} \right] \quad [21]$$

Nel caso particolare in cui la variazione altimetrica è nulla ($\Delta z_r=0$) i Gradi Giorno della località in esame coincidono con quelli della stazione di rilevazione:

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^N \Delta\theta_{hr}}{24} \right] = GG_r \quad [22]$$

In termini generali, i Gradi Giorno sono diversi da zero solo per un numero di ore $q \leq N$ per le quali risulta verificata la condizione

$$[\theta_{hmr} - \Delta z_r \times d] < 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad [23]$$

Ai fini della presenta trattazione, per il calcolo dei Gradi Giorno delle *altre località* utilizzeremo un **algoritmo semplificato** GG_{simple}

$$GG_{simple} = [GG_r + 182 \times (\Delta z_r \times d)] \quad [24]$$

e andremo a stimare l'errore atteso ε , rispetto al valore reale dei GG della località in esame

$$GG - GG_{simple} = \varepsilon \quad [25]$$

L'algoritmo semplificato GG_{simple} [24] fornisce un valore approssimato dei Gradi Giorno reali ma ha il vantaggio di utilizzare, una volta individuata la stazione di riferimento della località in esame, dei parametri noti e indipendenti dal tempo, quali i Gradi Giorno e il fattore di correzione della stazione di riferimento e la differenza di altitudine tra questa e la località in esame.

Accanto alla trattazione teorica, al fine di individuare l'andamento dell'errore atteso, sono state effettuate delle simulazioni numeriche per confrontare i risultati dei GG ottenuti dall'utilizzo dell'algoritmo semplificato con quelli derivati dal calcolo effettivo.

Quest'analisi è stata realizzata per 318 località campione con stazioni di misura (27), collocate in diverse aree geografiche, con una prevalenza per quelle con un valore dei GG più contenuti (Agrigento, Trapani, Enna, Messina, Palermo, Catania, Ragusa, Vibo Valentia, Reggio C., Catanzaro, Bari, Potenza, Isernia, L'Aquila, Sassari, Roma, Perugia, Pistoia, Ravenna, Salerno, Imperia, Savona, Cuneo, Sondrio, Torino, Belluno, Bolzano).

Le località campione sono state scelte in modo da esplorare le massime differenze altimetriche su scala provinciale, realizzando in tal modo uno stress-test dell'algoritmo applicato. I risultati forniti rappresentano pertanto una misura dell'ampiezza dell'intervallo di variabilità dell'errore atteso per tutte le località che hanno come stazioni di riferimento le 27 prescelte.

Caso 1

Calcolo dell'errore atteso ε_1 per variazione altimetrica positiva $\Delta z_r = (z - z_r) > 0$

Se indichiamo con m ($\leq q \leq N$) il numero di ore in cui è verificata la condizione

$$\Delta\theta_{hr}(20) = (20 - \theta_{hmr}) \text{ per } \theta_{hmr} < 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad [26]$$

allora per $\Delta z_r = (z - z_r) > 0$ risulta sempre $m \leq q \leq N$ e quindi è possibile riscrivere la [20] nella seguente forma

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta\theta_{hr}}{24} + \frac{\sum_{h=1}^m \Delta z_r \times d}{24} \right] + \left[\frac{\sum_{h=m+1}^q (\Delta\theta_{hr} + \Delta z_r \times d)}{24} \right] \quad [27]$$

ovvero,

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta\theta_{hr}}{24} + m \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \right] + \left[\frac{\sum_{h=m+1}^q (\Delta\theta_{hr} + \Delta z_r \times d)}{24} \right] \quad [28]$$

$$G = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta \theta_{hr}}{24} + m \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \right] + \left[\frac{\sum_{h=m+1}^q (\Delta \theta_{hr} + \Delta z_r \times d)}{24} \right] + \left[N \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} - N \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \right] \quad [29]$$

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta \theta_{hr}}{24} + N \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \right] + \left[\frac{\sum_{h=m+1}^q (\Delta \theta_{hr} + \Delta z_r \times d)}{24} \right] - \left[\frac{\sum_{h=m+1}^N (\Delta z_r \times d)}{24} \right] \quad [30]$$

$$GG = [GG_r + 182 \times (\Delta z_r \times d)] + \frac{\sum_{h=m+1}^q \Delta \theta_{hr}}{24} + (q - m) \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} - (N - m) \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \quad [31]$$

$$GG = GG_{simple} + \left[\frac{\sum_{h=m+1}^q \Delta \theta_{hr}}{24} \right] - (N - q) \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \quad [32]$$

Dalla [31] discende che

$$\varepsilon_1 = \left[\frac{\sum_{h=m+1}^q \Delta \theta_{hr}}{24} \right] - (N - q) \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \quad [33]$$

L'errore atteso ε_1 è una funzione non lineare della variazione altimetrica (il numero di ore q è crescente con Δz_r), e assume sempre valori negativi (è evidentemente nullo per $m=q=N$).

Infatti, il primo termine

$$\left[\frac{\sum_{h=m+1}^q \Delta \theta_{hr}}{24} \right] \quad [34]$$

è per definizione negativo, ($\Delta \theta_{hr} = 20 - \theta_{hmr} < 0$ per $q > m$) mentre il secondo termine

$$(N - q) \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \quad [35]$$

è invece sempre positivo ($N > q$)

Nell'ipotesi assunta di variazione altimetrica positiva $\Delta z_r = (z - z_r) > 0$ l'utilizzo dell'algoritmo semplificato GG_{simple} fornisce una sovrastima dei GG reali della località in esame il cui valore tende a decrescere per $q \rightarrow m$

$$GG - GG_{simple} = \varepsilon_1 < 0 \quad [36]$$

L'equazione [33] evidenzia che con l'incremento della variazione altimetrica il primo termine cresce in valore assoluto, perché aumenta la differenza $q-m$, mentre l'aumento del secondo termine è attenuato dalla riduzione della differenza ($N-q$).

Questo porta ad osservare che l'errore sarà contenuto soprattutto per le località la cui stazione di rilevazione dei parametri climatici ha valori elevati di Gradi Giorno ($m \rightarrow N$). Per quelle la cui stazione di rilevazione ha bassi valori di Gradi Giorno, le differenze saranno maggiori, ma comunque contenute.

Nella tabella 11 sono riportati dei casi rappresentativi per l'individuazione dell'intervallo di variazione dell'errore atteso

Stazione di misura		Località										
	alt. (m)	GG		alt. (m)	Δz (m)	GG	GG _{simatic}	m (h)	q (h)	m-q (h)	ε (GG)	$\varepsilon\%$
BELLUNO	267	3069	Zoppè di Cadore	1460	1193	4289	4289	4361	4368	7	0,2	0%
SIENA	189	2159	Abbadia S. Salvatore	822	633	2734	2734	4354	4368	14	0,3	0,01%
TORINO	226	2648	Sestriere	2035	1809	4498	4498	4349	4368	19	0,6	0,01%
PISTOIA	130	2106	Abetone	1388	1258	3250	3251	4330	4368	38	1,1	0,03%
REGGIO C.	15	1141	Roccaforte	971	956	2298	2326	4045	4367	322	28,2	1,23%
CATANIA	10	1265	Ragalna	830	820	2089	2123	3996	4331	335	34,4	1,65%
MESSINA	70	1262	Floresta	1275	1205	2482	2522	3992	4367	375	40,2	1,62%
PALERMO	50	1121	Prizzi	966	916	1979	2028	3909	4258	349	48,8	2,46%

Tab. 11

In termini assoluti la sovrastima massima riscontrata è di circa 50 GG, (che corrisponde anche al valore massimo assoluto pari a circa il 2,5%); il valore medio non supera invece i 10 GG e quello percentuale è <0,5%.

Caso 2

Calcolo dell'errore atteso ε_2 nell'ipotesi di variazione altimetrica negativa $\Delta z_r = (z - z_r) < 0$

In analogia a quanto esposto nel caso 1, indicato con $q (\leq m \leq N)$ il numero di ore in cui è verificata la condizione

$$\Delta \theta_h = \Delta \theta_{hr} + \Delta z \times d \text{ per } [\theta_{hmr} - \Delta z_r \times d] < 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad [18]$$

allora per $\Delta z_r = (z - z_r) < 0$ risulta sempre $q \leq m \leq N$ e quindi è possibile riscrivere la [20] nella seguente forma

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta \theta_{hr}}{24} + \frac{\sum_{h=1}^m \Delta z_r \times d}{24} \right] - \left[\frac{\sum_{h=q+1}^m (\Delta \theta_{hr} + \Delta z_r \times d)}{24} \right] \quad [37]$$

ovvero,

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta \theta_{hr}}{24} + m \times \frac{\Delta z_r \times d}{24} \right] - \left[\frac{\sum_{h=q+1}^m (\Delta \theta_{hr} + \Delta z_r \times d)}{24} \right] \quad [38]$$

$$G = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta \vartheta_{hr}}{24} + m \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} \right] - \left[\frac{\sum_{h=q+1}^m (\Delta \vartheta_{hr} + \Delta \mathbf{z}_r \times d)}{24} \right] + \left[N \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} - N \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} \right] \quad [39]$$

$$GG = \left[\frac{\sum_{h=1}^m \Delta \vartheta_{hr}}{24} + N \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} \right] - \left[\frac{\sum_{h=q+1}^m (\Delta \vartheta_{hr} + \Delta \mathbf{z}_r \times d)}{24} \right] - \left[(N - m) \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} \right] \quad [40]$$

$$GG = [GG_r + 182 \times (\Delta \mathbf{z}_r \times d)] - \frac{\sum_{h=q+1}^m \Delta \vartheta_{hr}}{24} - (m - q) \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} - (N - m) \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} \quad [41]$$

$$GG = GG_{simple} - \left[\frac{\sum_{h=q+1}^m \Delta \vartheta_{hr}}{24} \right] - (N - q) \times \frac{\Delta \mathbf{z}_r \times d}{24} \quad [42]$$

Dalla [42] discende che

$$\varepsilon_2 = \left[-\frac{\sum_{h=q+1}^m \Delta \vartheta_{hr}}{24} \right] + (N - q) \times \frac{(-\Delta \mathbf{z}_r) \times d}{24} \quad [43]$$

L'errore atteso ε_2 è ancora una funzione non lineare della variazione altimetrica; il primo termine è per definizione sempre negativo ($\Delta \vartheta_{hr} = 20 - \theta_{hmr} > 0$ per $m > q$), il secondo termine è invece sempre positivo ($N > q$ e $\Delta \mathbf{z}_r < 0$)

Nell'ipotesi assunta di variazione altimetrica negativa $\Delta \mathbf{z}_r = (z - z_r) < 0$ l'utilizzo dell'algoritmo semplificato GG_{simple} può comportare, da un punto di vista teorico, sia una sovrastima che una sottostima dei GG reali della località in esame.

$$GG - GG_{simple} = \varepsilon_2 \gtrless 0 \quad [44]$$

Attraverso una simulazione numerica dei valori assunti dai parametri che definiscono l'errore atteso, nelle reali condizioni applicative si può dimostrare che la condizione di sovrastima ($\varepsilon_2 < 0$) non risulta mai verificata e quindi l'applicazione dell'algoritmo semplificato GG_{simple} fornisce al più una sottostima dei GG reali della località in esame.

Questo risultato è quanto ci si attendeva, visto che nella [24] i GG della stazione di riferimento sono calcolati per un numero di ore pari a m mentre la riduzione dovuta alla variazione altimetrica è valutata per l'intero periodo di N ore ($\geq m$).

Entrambi i termini della [43] crescono al diminuire di q ma la crescita del secondo termine è molto più accentuata rispetto alla crescita del primo termine.

Con i reali valori delle grandezze in gioco, i valori più bassi di q riscontrati sono stati alle latitudini più basse per località al livello del mare e con stazioni di misura di riferimento a quote superiori ai 500 m (Catanzaro, Ragusa, Vibo Valentia). Per queste località sono stati trovati i valori maggiori di sottostima sia in termini assoluti che percentuali; la sottostima massima riscontrata è stata di circa 40 GG.

Stazione di misura		Località										
	alt. (m)	GG		alt. (m)	Δz (m)	GG	GG _{simplc}	m (h)	q (h)	m-q (h)	E (GG)	%
CATANZARO	714	1984	Siderno	5	-709	1144	1105	4282	3962	-320	-38,9	-3,40%
VIBO V.	498	1686	Gioia Tauro	29	-469	1139	1106	4276	3886	-390	-33,5	-2,94%
VIBO V.	498	1686	Rosarno	67	-431	1181	1153	4276	3936	-340	-28,6	-2,42%
VIBO V.	498	1686	Galatro	158	-340	1284	1266	4276	4023	-253	-18,7	-1,46%
RAGUSA	650	1875	Modica	296	-354	1522	1507	4238	4132	-106	-15,2	-1,00%
POTENZA	767	2321	Auletta	281	-486	1729	1720	4358	4192	-166	-9,5	-0,55%
CUNEO	575	2919	Saluzzo	340	-235	2679	2678	4362	4358	-4	-0,5	-0,02%
BELLUNO	267	3069	Sernaglia della Battaglia	117	-150	2916	2916	4361	4352	-9	-0,4	-0,01%

Tab. 12

Sintesi del calcolo dell'errore atteso ε

A riepilogo dei casi esaminati (1 e 2), si riporta l'andamento dell'errore in termini di GG in funzione della variazione oraria (m-q) che è a sua volta è proporzionale alla variazione altimetrica.

Attraverso delle simulazioni numeriche sui casi ritenuti più critici, secondo la trattazione proposta, è stato constatato che, in valore assoluto, l'errore medio introdotto dalla formula semplificata, funzione della differenza oraria q-m, è poco superiore a 0,1 GG/h. L'errore percentuale massimo di sovrastima ($q > m$) è risultato inferiore al 2,5%, quello di sottostima ($m > q$) non ha superato il 3,5% mentre il valore medio è risultato $< |0,5\%|$.

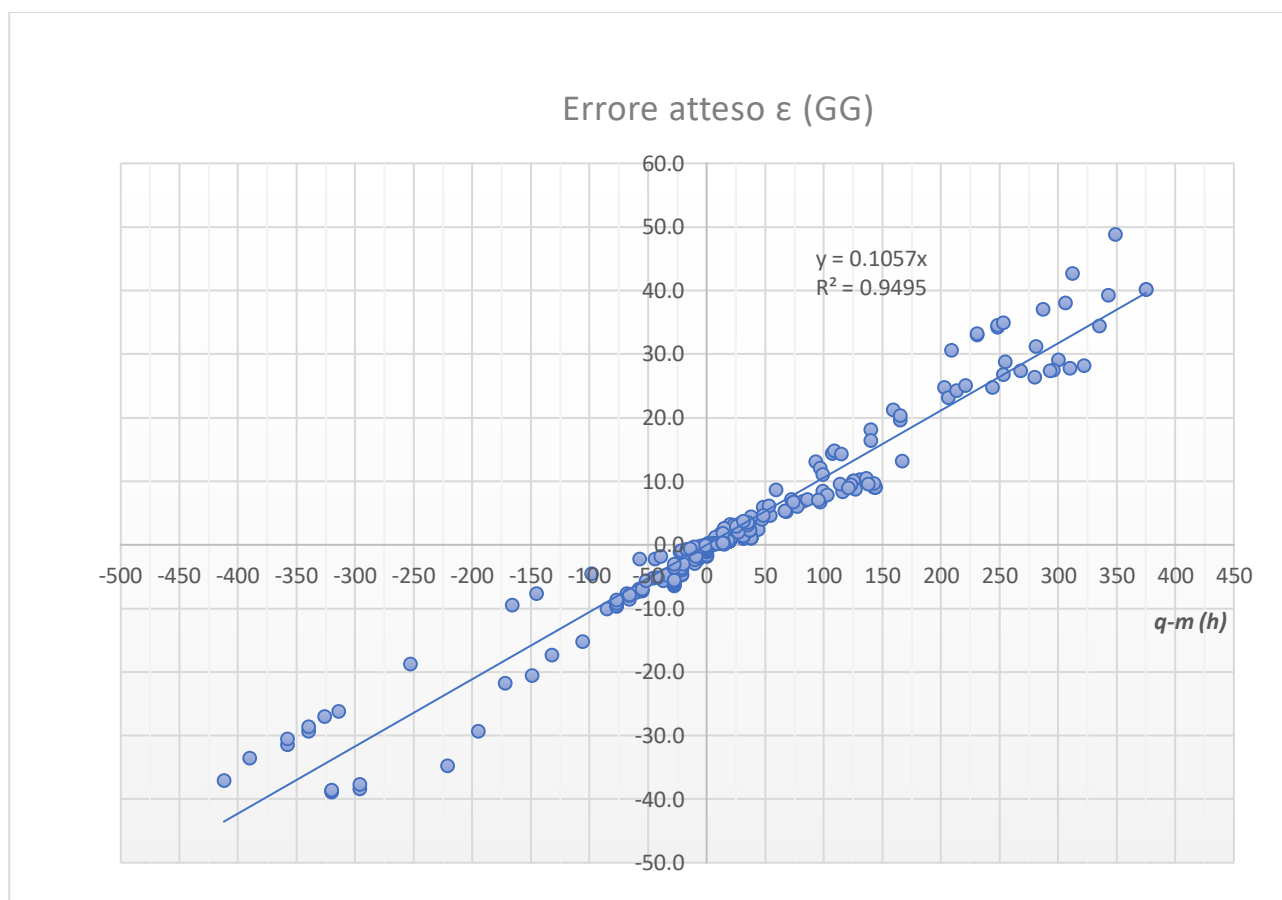


Fig.8

Le simulazioni realizzate hanno mostrato che l'errore introdotto dalla formula semplificata ha scarsa influenza nella definizione delle zone climatiche delle località esaminate. I valori massimi (in termini assoluti e in termini %) dell'errore atteso sono contenuti e concentrati in poche località, caratterizzate da variazioni altimetriche significative e stazioni di misura appartenenti alle zone climatiche C e D.

Come considerazione di carattere generale, si può osservare che le stazioni di misura in queste due zone climatiche sono il 50% delle 110 previste dalla Norma UNI 10349 e hanno un valore medio dei Gradi Giorno prossimo a quello di Perugia (2174 GG). Altresì, per le località le cui stazioni di misura sono nelle zone climatiche C e D, il valore medio della variazione altimetrica positiva è poco superiore ai 200 m e quello della variazione altimetrica negativa è invece di circa – 150 m.

Simulazioni numeriche effettuate con questi valori caratteristici hanno portato a errori percentuali di sovrastima e sottostima non superiori all'0,1%.

2.5 Sintesi dei risultati e implicazioni

Nella tabella a seguire si riporta la sintesi della classificazione delle zone climatiche delle località esaminate, dopo l'aggiornamento ipotizzato:

<i>Riepilogo Complessivo</i>					
<i>FASCIA</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>totale</i>
<i>N</i>	187	2236	4887	784	8094
<i>MEDIA</i>	1248	1758	2536	3297	2365
<i>MAX</i>	1397	2100	3000	4498	4498
<i>MIN</i>	1074	1400	2100	3001	1074

Tab. 13

La tabella 13 evidenzia che il calcolo dei Gradi Giorno a partire dai dati climatici e dalla metodologia prevista dalla Norma UNI 10349 ridisegna in modo significativo le zone climatiche italiane previste dal DPR 412/93.

L'aspetto più evidente riguarda l'assenza di località nelle zone climatiche A e B (scomparsa delle due classi). L'errore introdotto dall'applicazione dell'algoritmo semplificato è nella quasi generalità delle località estremamente contenuto, e pertanto non si possono aspettare modifiche significative sulla numerosità delle zone climatiche rispetto all'applicazione del calcolo esatto.

In particolare, non si possono attendere errori tali da comportare il passaggio di alcune località dalla zona climatica C alla zona B. Il valore minimo trovato per la fascia C è pari a 1075 e si riferisce a quello della località di San Ferdinando (RC) che ha come stazione di riferimento Vibo Valentia.

In questo caso il valore dei Gradi Giorno trovato con l'algoritmo semplificato è sottostimato perché la variazione altimetrica tra la località e la stazione di riferimento è negativa. Il valore esatto, calcolato valutando i dati di temperatura orari di San Ferdinando porta ad un valore dei Gradi Giorno pari a 1112 (>900 GG limite superiore della zona climatica B)

Il valore più piccolo dei Gradi Giorno calcolato con l'algoritmo semplificato ed affetto teoricamente da sovrastima (variazione altimetrica positiva) è quello della località di Capaci e vale 1122 GG (stazione di riferimento: Palermo). Il valore esatto, calcolato valutando i dati di temperatura oraria di Capaci conferma il risultato dei Gradi Giorno ottenuto.

Generalizzando quest'ultimo risultato, trovandosi tutte le stazioni di riferimento in classi non inferiori a C, ed essendo la sottostima del valore atteso legato ad una variazione altimetrica positiva, il più piccolo valore dei GG effettivi delle località esaminate, non potrà mai essere inferiore a quello della stazione di riferimento con il valore minimo di GG, ovvero Palermo (1121 GG).

<i>Risultati delle simulazioni</i>					
<i>Valori sovrastimati</i>					
<i>FASCIA</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>totale</i>
<i>N</i>	61	1394	3546	771	5772
<i>MEDIA</i>	1280	1801	2570	3302	2468
<i>MAX</i>	1393	2100	3000	4498	449
<i>MIN</i>	1122	1400	2100	3001	1122

<i>Valori sottostimati</i>					
<i>FASCIA</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>totale</i>
<i>N</i>	121	829	1294	12	2256
<i>MEDIA</i>	1237	1686	2444	3041	2104
<i>MAX</i>	1397	2098	2991	3065	3065
<i>MIN</i>	1074	1401	2101	3011	1074
<i>Valori esatti</i>					
<i>FASCIA</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>totale</i>
<i>N</i>	5	13	47	1	66
<i>MEDIA</i>	1137	1747	2550	3069	2292
<i>MAX</i>	1141	1957	2919	3069	3069
<i>MIN</i>	1121	1416	2265	3069	1121

Tab. 14

Di seguito il confronto dei risultati con i valori attuali dei Gradi Giorno (DPR 412/93)

		Zone Climatiche					totale
		A_B	C	D	E	F	
DPR 412/93	N. Località	159	986	1604	4274	1071	8094
	GG medi	780	1178	1762	2524	3524	2307
	GG max	900	1400	2100	3000	5165	5165
	GG min	568	901	1401	2101	3001	568
UNI 10349	N. Località	-	187	2236	4887	784	8094
	Variazione %	-100,0%	-81,0%	39,4%	14,3%	-26,8%	
	GG med	-	1248	1758	2536	3297	2365
	GG max	-	1397	2100	3000	4498	4498
	GG min	-	1074	1400	2100	3001	1074

Tab. 15

Partendo dai risultati ottenuti, è possibile fare alcune considerazioni di carattere generale: nell'ipotesi di aggiornamento dell'attuale zonizzazione climatica nazionale, utilizzando i dati orari della norma UNI 10349, si avrebbero delle variazioni significative, in termini di distribuzione dei comuni italiani nelle fasce climatiche precedentemente definite.

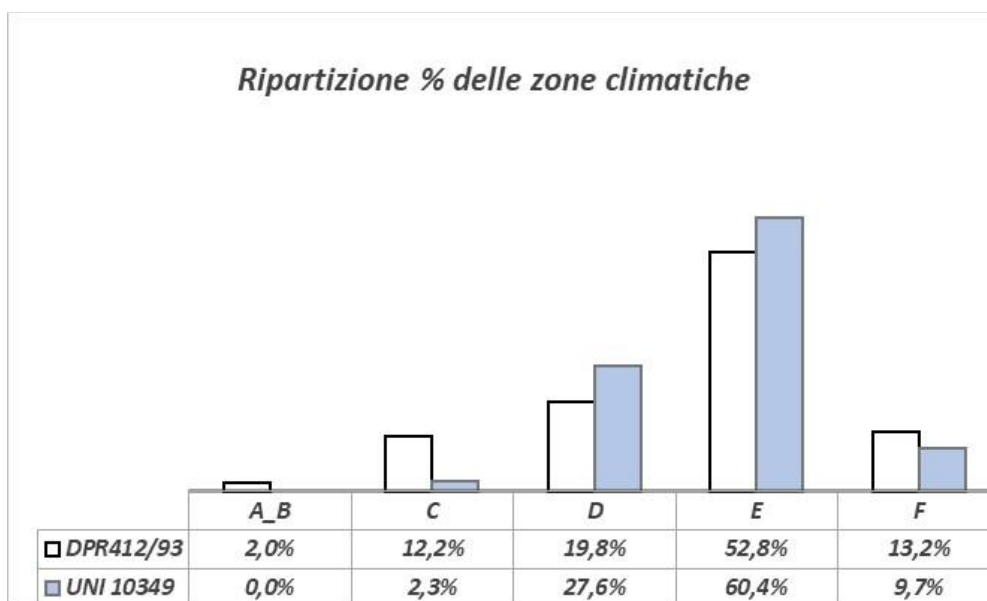


Fig.9

Come evidente dalla fig. 9, in sostanza, nessun comune sarebbe incluso nelle due zone più calde, la A e la B. La zona C diminuirebbe percentualmente del 9,9%, mentre le due classi centrali, D ed E, in cui già in precedenza si concentravano la maggior parte dei comuni italiani aumenterebbero rispettivamente del 7,8% e del 7,6%, coprendo complessivamente circa l'88% delle località. Per la fascia F, la più fredda, risulterebbe invece una leggera riduzione, del 3,5%.

Nella fig.10, di seguito riportata, si osserva la ripartizione delle precedenti fasce climatiche (definite nel DPR 412/93) nella nuova classificazione ipotizzata, mentre nella fig. 11 è possibile vedere la mappa della distribuzione geografica delle località esaminate con le nuove classi climatiche di appartenenza.

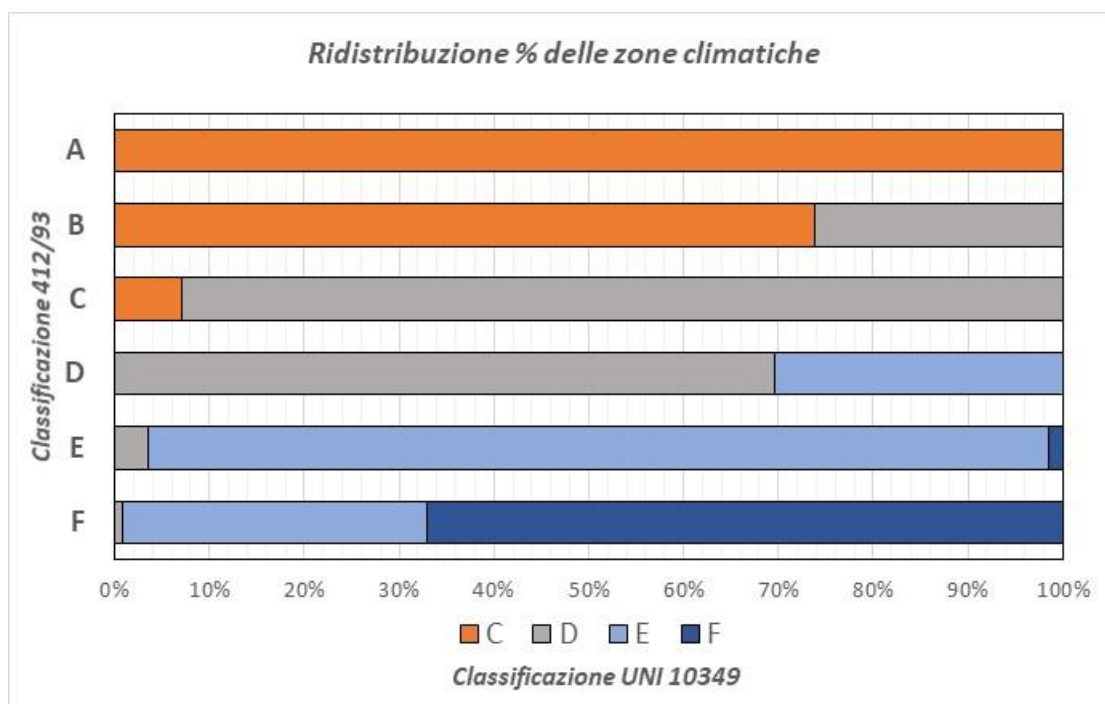


Fig. 10

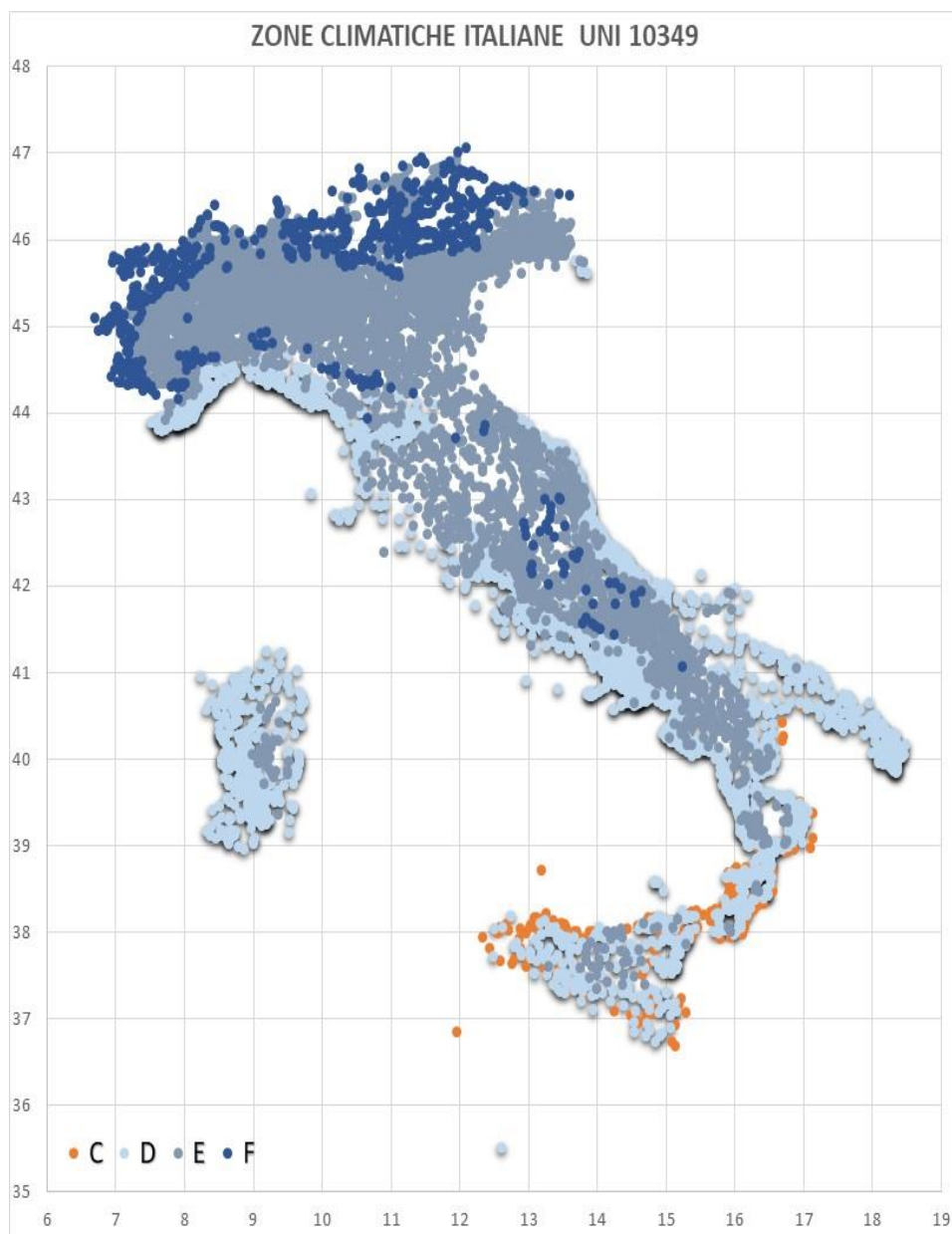


Fig.11

Come già detto nei capitoli introduttivi l'eventuale aggiornamento della zonizzazione climatica nazionale avrebbe conseguenze anche sull'applicazione dei Requisiti Minimi di efficienza energetica, da adottare per la riqualificazione degli edifici.

I Requisiti Minimi degli edifici fissati dal DM. 26/6/2015 variano infatti in base alla zona climatica di appartenenza del sito in esame, come mostrato in tab. 16.

<i>Zona Climatica</i>	<i>Trasmittanza U (W/m² K)</i>			
	<i>Strutture verticali</i>	<i>Serramenti</i>	<i>Coperture</i>	<i>Str. Orizzontali</i>
A e B	0,4	3,00	0,32	0,42
C	0,36	2,00	0,32	0,38
D	0,32	1,8	0,26	0,32
E	0,28	1,4	0,24	0,29
F	0,26	1,00	0,22	0,28

Tab. 16

La scomparsa delle zone climatiche A e B coinvolgerebbe soltanto un numero limitato di località (159), ma potrebbe implicare effetti più rilevanti in termini di conseguenze su scala locale. Queste località sarebbero tra l'altro concentrate, come evidente dalla distribuzione riportata in fig. 11, soprattutto nelle località costiere del sud Italia, Calabria, Sicilia e Sardegna.

Alcune specifiche considerazioni possono essere fatte incrociando i risultati ottenuti con i dati riportati nel PNIEC, in cui viene indicato il numero di edifici presenti in ciascuna delle attuali fasce climatiche.

Zona climatica	Numero edifici non residenziale	m²
zona A	148	173.490
zona B	22.515	23.421.687
zona C	84.233	83.915.666
zona D	102.264	95.050.723
zona E	206.451	125.487.887
zona F	19.119	13.231.516
Totale	434.730	341.280.969

Fig.12 Fonte Mise -PNIEC

Zona climatica	Numero edifici	m ²
zona A	5.217	2.327.200
zona B	710.079	298.025.940
zona C	2.737.222	1.127.236.450
zona D	2.896.204	1.355.373.650
zona E	5.340.672	2.535.572.770
zona F	731.009	268.555.440
Totale	12.420.403	5.587.091.450

Fig.13 Fonte Mise -PNIEC

Dai dati riportati nelle figure 12 e 13, emerge infatti che oltre 733.000 edifici in caso di riqualificazione energetica dovrebbero applicare i requisiti della zona climatica C, più restrittivi in termini di contenimento dei consumi invernali.

Nell'ipotesi di considerare il numero medio di edifici per località (*media aritmetica*), dai dati riportati in fig. 13, emerge che, per i soli edifici residenziali, il 100% di quelli della zona climatica A e circa 74% di quelli della B passerebbero nella zona climatica C (il restante 26% passerebbe invece in classe D).

Visto che, come detto in precedenza, i risultati ottenuti non dipendono soltanto da differenze strettamente climatiche riscontrate nell'analisi delle misure aggiornate, ma anche dai differenti criteri adottati nell'elaborazione dei dati relativi ai comuni italiani, nelle zone coinvolte potrebbero riscontrarsi, per alcune categorie di edifici, problemi di *over heating* in alcuni periodi dell'anno, con conseguenti incrementi dei consumi energetici per la climatizzazione estiva, o possibili situazioni di discomfort per gli utenti coinvolti.

Le classi D ed E si incrementerebbero di un numero di edifici pari, rispettivamente, a circa il 70% e il 16% mentre nella zona climatica più fredda si avrebbe una contrazione del numero di edifici di circa il 22%.

È da segnalare infine che, in funzione dell'appartenenza ad alcune zone climatiche, sono previste agevolazioni fiscali nelle aree non metanizzate del territorio italiano (Legge 448/98 e s.m.i.) [3]. Anche da questo punto di vista, i cambiamenti di fascia climatica di molte località potrebbero comportare per l'utenza costi diversi per il riscaldamento invernale.

3 Sezione B: Modelli di previsione per la radiazione solare globale orizzontale

3.1 Previsioni di radiazione solare

In Italia si è assistito negli ultimi anni ad un'espansione esponenziale dell'installazione d'impianti solari ed in particolare di quelli fotovoltaici. Si presentano quindi due necessità: la prima a scala locale, nella quale i proprietari dei singoli impianti ricavano beneficio dal conoscere in anticipo la radiazione solare che potranno "raccogliere" al fine di gestire opportunamente il proprio impianto, ad esempio per programmare gli interventi di manutenzione nei giorni nei quali è previsto uno scarso soleggiamento oppure per immettere nella rete elettrica l'energia prodotta nei momenti di maggiore remunerazione, alla luce della tariffazione presente sul mercato dell'energia; la seconda necessità a scala nazionale nella quale il Gestore dell'energia deve amministrare tutte le utenze e quindi deve conoscere in anticipo quali saranno le esigenze della rete nei diversi punti del territorio.

Alla luce di questo scenario risulta evidente l'utilità di sviluppare un sistema di previsione della radiazione solare che rappresenta la naturale evoluzione delle previsioni meteorologiche che oggi si sono imposte a tal punto nella mentalità delle persone che anche i singoli cittadini prima di iniziare una qualunque attività, sentono la necessità di informarsi su quale tempo farà. L'evoluzione che si è verificata nel campo delle previsioni meteorologiche ha consentito di raggiungere un grado di affidabilità elevato. Ciò grazie sia all'enorme sviluppo dei calcolatori che ad Internet che mette a disposizione i risultati dei modelli di previsione ad un pubblico vastissimo che spazia dagli addetti ai lavori ai semplici utenti finali.

Esula dagli obiettivi di questo testo narrare la storia dell'evoluzione delle previsioni meteorologiche, basti ricordare che esse richiedono l'impiego di una rete internazionale di raccolta ed accentrimento di dati misurati al suolo ed in quota su tutta la superficie terrestre, di calcolatori potentissimi che elaborano questi dati trovando la soluzione a complicate equazioni matematiche (equazioni differenziali alle derivate parziali) che simulano il comportamento dell'atmosfera. I dati in ingresso sono costituiti dai valori della temperatura, umidità, vento e pressione. Le elaborazioni restituiscono in uscita grandezze derivate quali la copertura nuvolosa, le precipitazioni ecc.. In totale su tutta la terra sono presenti circa 40.000 stazioni tra quelle che effettuano misure al suolo ed in quota, coordinate dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale.

A livello internazionale esistono vari centri di calcolo dedicati alla meteorologia. Per quanto riguarda l'Europa, ad esempio, esiste l'ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) dove viene fatto "girare" un modello che rappresenta l'atmosfera scomposta in 60 livelli verticali, fino a 70 Km di quota, ed una risoluzione orizzontale di 40 Km. Oltre a modelli a scala globale (GM, Global Model), sono stati sviluppati modelli a scala locale (LAM, Limited Area Model) che tengono conto in maniera più dettagliata delle caratteristiche del posto al quale si applicano, ad esempio la vegetazione e l'orografia. I modelli a scala globale servono ad inizializzare quelli a scala locale, cioè questi ultimi utilizzano i dati in uscita dei modelli globali come dati iniziali in entrata e come dati ai bordi dell'area specifica considerata, effettuando così una previsione a partire da un'altra previsione.

L'evoluzione delle previsioni del tempo ha quindi portato allo sviluppo di modelli sempre più specializzati tra i quali quelli che prevedono la radiazione solare. Tali modelli possono quindi essere concettualmente rappresentati dallo sviluppo in sequenza di due fasi successive. La prima è la simulazione del moto atmosferico (termodinamica) e dei fenomeni di trasformazione dell'acqua (nubi, precipitazioni...) ottenibili da una catena modellistica prognostica simile a quelle usate per le previsioni del tempo. La seconda è costituita da un modello di trasferimento radiativo che, utilizzando le variabili atmosferiche sulla verticale previste dal primo modello, calcola su ogni punto le varie componenti della radiazione al suolo.

Il sistema di previsione della radiazione solare sviluppato in ENEA nasce dalla necessità di conoscere in anticipo l'energia solare che sarà disponibile nel breve periodo (domani e dopodomani) al fine di garantire una corretta gestione degli impianti solari per la produzione di energia. L'energia solare è caratterizzata da un'aleatorietà intrinseca e, oltre ad avere interruzioni dovute all'alternanza giorno-notte e a risentire del ciclo stagionale che ne fa variare la disponibilità giornaliera nel corso dell'anno, risente delle condizioni meteorologiche contingenti. Possono verificarsi infatti situazioni nelle quali l'impianto solare è interessato dal passaggio occasionale di nubi che coprono tutto o in parte il sito dell'impianto in giornate altrimenti soleggiate, oppure possono verificarsi situazioni con giorni di maltempo prolungato durante i quali l'impianto non riceve per lungo tempo energia solare. Per programmare la produzione di energia elettrica e la gestione dell'energia accumulata negli impianti solari, è di fondamentale importanza la previsione della produttività dell'impianto nei giorni successivi e quindi della radiazione solare prevista. Non va quindi sottovalutata l'utilità di un uso appropriato delle previsioni di radiazione solare che consentirebbe di risparmiare le spese di acquisto degli apparati di accumulo a volte molto costosi. Infatti, le previsioni debitamente inserite nei programmi di gestione degli impianti solari potrebbero ridurre al minimo indispensabile l'accumulo.

Per l'anno 2020 si sono confrontati due modelli differenti di previsione della radiazione globale orizzontale ovvero, WRF-ARW ed ibrido ENEA-WRF.

La previsione fornita, per il sito dell'ENEA Casaccia, ha una risoluzione oraria ed una validità che varia da 24 ore fino a 48 ore. Le verifiche effettuate attraverso l'elaborazione statistica, hanno consentito di valutare il grado di attendibilità della previsione. Le previsioni sono state effettuate ogni giorno e rese pubbliche entro le 23:59 del giorno prima (entro le 23:59 del 3 marzo 2020 venivano pubblicate le previsioni orarie del 4 marzo 2020 (24h) e del 5 marzo 2020 (48h)) sul sito internet www.previsionirinnovabili.it da noi gestito.

3.2 La radiazione al suolo

Nelle applicazioni energetiche che sfruttano la fonte solare i dispositivi che raccolgono l'energia trasportata dalla radiazione proveniente dal Sole sono posti a livello del suolo, sia che si tratti della superficie captante dei pannelli fotovoltaici o termici, sia che ci si riferisca agli specchi riflettenti di un impianto solare a concentrazione. In tutti questi casi l'irradianza disponibile al suolo è inferiore a quella presente al di fuori dell'atmosfera in quanto intervengono fattori che globalmente determinano un effetto netto attenuativo (Figura 1):

- a) nell'attraversare l'atmosfera – il cui spessore è pari a circa 80 km lungo la verticale; quello che c'è ancora più su è così rarefatto che alle nostre latitudini è ininfluenza ai fini energetici – una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (*scattering*) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapor acqueo, le nubi e gli aerosol). L'attenuazione interessa tutte le lunghezze d'onda dello spettro, però in maniera differenziata, per cui lo spettro elettromagnetico risultante assume un profilo irregolare. La *radiazione solare diretta*, ossia quella costituita dai soli raggi che attraversano lo spessore atmosferico senza esserne perturbati, arriva al suolo da una direzione che, essendo determinata dalla posizione del Sole nella volta celeste, cambia continuamente durante l'intervallo diurno;
- b) la frazione della radiazione solare che invece urta le molecole dell'atmosfera, se non assorbita, è deviata in tutte le direzioni: parte si allontana verso lo spazio e parte raggiunge il suolo: quest'ultima è detta *radiazione solare diffusa* e, ovviamente, proviene da tutte le direzioni dell'emisfero celeste.

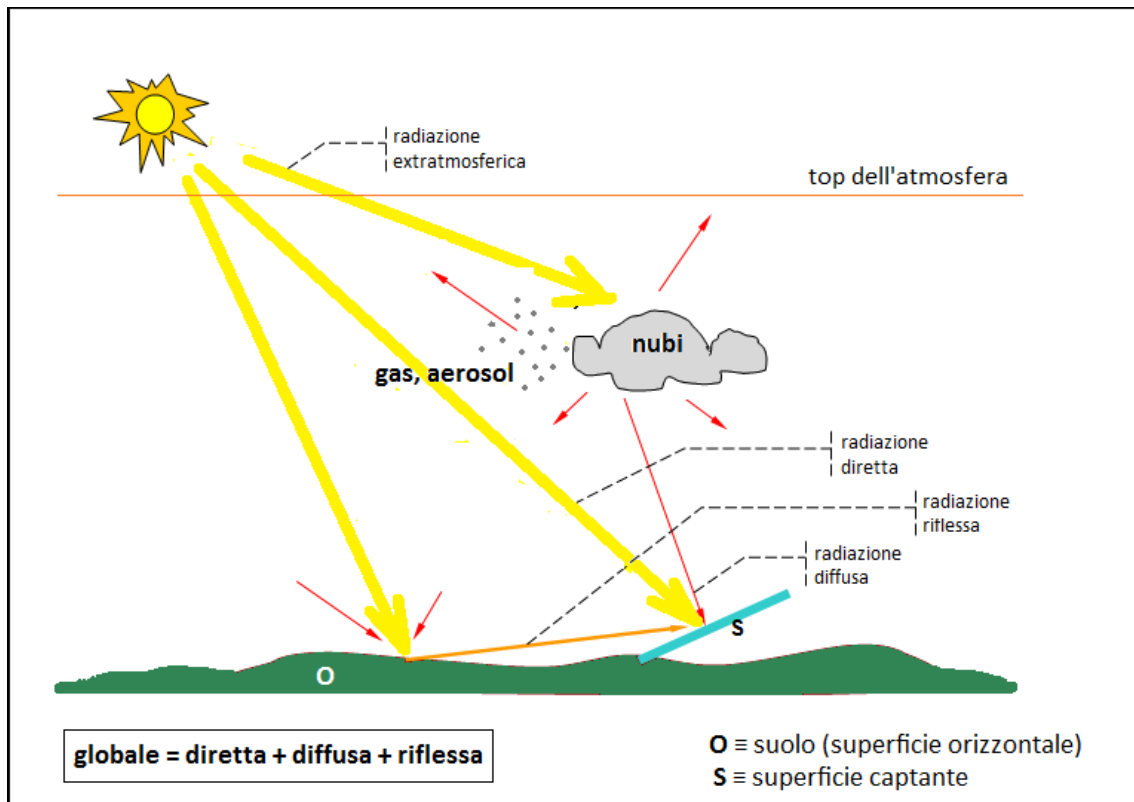


Fig. 1. **Scomposizione della radiazione al suolo nelle sue componenti.** Per una superficie O posta orizzontalmente, la radiazione *globale* è data dalla somma delle componenti *diretta* e *diffusa*; nel caso di superficie inclinata S rispetto al piano orizzontale, alle due componenti diretta e diffusa si aggiunge quella *riflessa* dal suolo.

Si è visto in precedenza che l'irradianza solare alla sommità dell'atmosfera, ortogonalmente alla direzione dei raggi, con la Terra alla distanza 'media' dal Sole, è data dalla costante solare $\dot{I}_{SC} = 1366.9 \text{ W/m}^2$. L'intera potenza della radiazione solare intercettata dal nostro pianeta si otterrà quindi moltiplicando $\dot{I}_{SC}$ per l'area della sezione (approssimativamente) circolare piana mostrata dalla la Terra, ossia πR_E^2 (R_E sta per il suo raggio). Se infine pensiamo di distribuire uniformemente tale potenza su tutta la superficie e vogliamo calcolarne la densità, dobbiamo dividere per $4\pi R_E^2$, che corrisponde all'area di una superficie sferica, cui il contorno della Terra può (di nuovo con approssimazione) essere assimilato. Avremo:

$$\dot{I}_{SC} \frac{\pi R_E^2}{4\pi R_E^2} = \frac{\dot{I}_{SC}}{4} = 342 \text{ W/m}^2 \quad [1]$$

Di questa quantità 'media' teoricamente disponibile alla sommità dell'atmosfera:

- $\cong$ il 30 % raggiunge "direttamente" il suolo;
- $\cong$ il 12 % raggiunge il suolo dopo essere stato diffuso (verso il basso) dalle nubi;
- $\cong$ il 3 % raggiunge il suolo dopo diffusione (verso il basso) da aerosol e gas presenti in atmosfera;
- $\cong$ il 55 % (restante) viene riflesso e rinviato verso lo spazio oppure assorbito ed emesso di nuovo come radiazione infrarossa (le sole *nubi* sono responsabili della frazione più grande: il 29%).

Ovviamente questi valori valgono in media per la Terra nella sua interezza e per un periodo sufficientemente lungo (deve completarsi almeno il ciclo annuale). Nelle situazioni contingenti l'esposizione di un luogo è, infatti, soggetta ad una variabilità estrema, dovuta a molti di fattori fra cui l'alternanza del giorno e la notte, i cicli stagionali e la mutevolezza delle condizioni meteorologiche. Alle nostre latitudini, nelle condizioni più favorevoli, l'attenuazione della radiazione solare a causa del passaggio in atmosfera può ridursi fino al 15÷20% e al suolo possono registrarsi valori d'irradianza sul piano normale ai raggi anche di 1000÷1050 W/m².

In un dato istante l'irradianza solare *globale* che investe una superficie disposta orizzontalmente è data dalla somma delle componenti diretta e diffusa, mentre per una superficie inclinata rispetto al piano orizzontale, alle due componenti diretta e diffusa vi si aggiunge il contributo dell'*irradianza solare riflessa* dal suolo. Considerando per il momento la superficie orizzontale, si può scrivere:

$$\dot{I} = \dot{I}_b + \dot{I}_d \quad [2]$$

in cui con $\dot{I}_b$ è indicata la radiazione diretta, $\dot{I}_d$ indica quella diffusa e infine il simbolo $\dot{I}$ senza alcun pedice indica quella globale. Come si è visto in precedenza, l'irradianza è funzione dell'orientazione della superficie ricevente rispetto alla direzione dei raggi. Infatti, se l'angolo d'incidenza ϑ è nullo, ossia se la superficie è normale ai raggi, l'irradianza è massima, mentre nel caso generale essa si ridurrà di un fattore pari a $\cos \vartheta$ (in particolare $\cos \vartheta_z$ per la giacitura orizzontale). I ragionamenti fatti or ora si applicano bene alla radiazione diretta, la cui direzione è univoca perché individuata dalla posizione del Sole, ma non alla radiazione diffusa, che per definizione proviene da tutte le direzioni dell'emisfero sopra la superficie. Il legame fra l'*irradianza diretta sul piano normale* $\dot{I}_{bn}$ e quella sul piano orizzontale $\dot{I}_b$ è dunque:

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bn} \cos \vartheta_z \quad [3]$$

e l'espressione per la radiazione globale potrà esplicitarsi come segue:

$$\dot{I} = \dot{I}_{bn} \cos \vartheta_z + \dot{I}_d \quad [4]$$

Le considerazioni appena svolte valgono a rigore per le irradianze. Ciò nonostante esse possono essere estese senza pregiudizio ai fini della precisione anche per irradiazioni relative a intervalli finiti di tempo purché non molto lunghi (al più orari). In tal caso per $\cos \vartheta_z$ deve intendersi il valor medio nell'intervallo considerato o, con approssimazione ancora accettabile, si prende per ϑ_z il valore centrale dell'intervallo di riferimento.

3.3 I modelli di trasmissione della radiazione in atmosfera

Perché le formule precedenti siano di una qualche utilità nella stima della radiazione solare al suolo, è necessario disporre di espressioni che correlano le irradianze (diretta normale, diffusa orizzontale e conseguentemente globale orizzontale) alle differenti condizioni del tempo atmosferico. Allo scopo sono qui riassunti schematicamente i diversi fattori che concorrono all'attenuazione della radiazione diretta:

- 1) la lunghezza effettiva del percorso dei raggi,
- 2) il tipo e la densità delle molecole d'aria gassose incontrate durante il percorso,
- 3) l'entità del vapore acqueo (umidità) e degli aerosol (micro-particelle solide inquinanti) presenti e infine

4) l'intensità delle nubi.

Nella letteratura tecnica sono attestati numerosi modelli empirici che mettono in relazione l'irradiazione al suolo con i fattori elencati sopra. L'irradiazione studiata è di volta in volta la diretta, quella diffusa sul piano orizzontale e quella globale (sempre su piano orizzontale); ovvero oraria, giornaliera e giornaliera media mensile.

Riferendoci alla radiazione globale, definiamo il *coefficiente di trasmissione globale* dell'atmosfera K_T come rapporto, sul piano orizzontale, fra la radiazione globale a suolo e quella extraatmosferica:

$$K_T = \frac{\dot{I}}{\dot{I}_o} \quad [5]$$

K_T dipende dalle modalità di diffusione della radiazione solare intercettata dalle molecole presenti in atmosfera (gas, vapore acqueo, aerosol, nubi). Nella situazione ipotetica di assenza di atmosfera, il profilo giornaliero della radiazione solare al suolo su piano orizzontale coinciderebbe con quello extraatmosferico modulato dal termine $\cos \vartheta_z$; la presenza dell'atmosfera sottrae potenza alla componente diretta, in parte compensata dal contributo della radiazione diffusa verso il basso. In condizioni di cielo sereno tutto ciò si traduce in un'attenuazione del valore assoluto dell'irradianza globale e nella modifica del profilo più accentuato per valori bassi di $\cos \vartheta_z$ (primo mattino e tardo pomeriggio; fig. 12); se evidenziamo in K_T il fattore attenuativo K_{Tc} dovuto al cielo sereno, e quello K_c dovuto al fenomeno altrimenti irregolare della presenza variabile delle nubi:

$$K_T = K_{Tc} K_c \quad [6]$$

potremo scrivere per K_{Tc} un'espressione del tipo:

$$K_{Tc} = B \cos^\alpha \vartheta_z \quad [7]$$

in cui il coefficiente B esprime l'attenuazione complessiva e il termine $\cos^\alpha \vartheta_z$, con l'esponente α , corregge il profilo giornaliero per la diffusione nelle ore vicino ai crepuscoli (solitamente si adotta il valore $\alpha = 0.15$).

Il termine B dipende dal carico di vapore acqueo e degli aerosol nell'atmosfera serena. Può essere correlato ai valori "attuali" dei due componenti appena richiamati, utile soprattutto in applicazioni di previsione dell'irradianza a breve termine (da adesso fino a due giorni), oppure tabellato per valori medi mensili, località per località, per ricavare valori medi di stime valevoli per lungo periodo.

Il coefficiente K_c dovuto alla presenza delle nubi è detto *indice di serenità (clear-sky index)*. Per l'atmosfera serena dev'essere: $K_c = 1$; per cielo completamente coperto, un valore accettato è $K_c = 0.04$; nelle situazioni intermedie si scriverà in maniera conveniente in funzione di un appropriato indice di copertura nuvolosa:

$$K_c = K_c(i) \quad [8]$$

Come ripetuto più volte, le considerazioni svolte si applicano alle irradianze e senza pregiudizio eccessivo per l'approssimazione dei risultati, anche alle irradiazioni orarie. Riassumendo, l'irradianza globale orizzontale al suolo si potrà scrivere:

$$I = K_T I_o = I_o B K_c(i) \cos^\alpha \vartheta_z = I_{sc} \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 B K_c(i) \cos^{1+\alpha} \vartheta_z \quad [9]$$

3.4 Modelli numerici di previsione meteorologica

I modelli numerici di previsione meteorologica (NWP Numerical Weather Prediction Models) utilizzano modelli matematici numerici dell'atmosfera e degli oceani per prevedere le condizioni del tempo in base alle condizioni meteorologiche attuali. I primi tentativi di modelli meteorologici iniziarono negli anni '50 con risultati realistici. Numerosi modelli di previsione globali e regionali vengono eseguiti in diversi paesi del mondo utilizzando come input le osservazioni meteorologiche trasmesse da radiosonde, satelliti meteorologici e altri sistemi di osservazione.

I modelli matematici basati sulla fisica dell'atmosfera vengono utilizzati per generare previsioni meteorologiche a breve termine (pochi giorni) o previsioni meteorologiche a lungo termine (fino a 10 giorni). L'elaborazione dei numerosi set di dati e l'esecuzione di complessi calcoli necessari per le moderne previsioni meteorologiche richiedono l'utilizzo di supercomputer. I fattori che influenzano l'accuratezza delle previsioni numeriche includono la quantità e la qualità delle osservazioni utilizzate come input, insieme alle limitazioni dei modelli numerici stessi. Sono ben noti alcuni problemi fondamentali che introducono errori nelle previsioni, come la natura caotica delle equazioni differenziali alle derivate parziali che governano l'atmosfera. È quasi impossibile risolvere esattamente queste equazioni e piccoli errori aumentano nel tempo, raddoppiando circa ogni cinque giorni.

Le equazioni che governano le NWP sono la conservazione della quantità di moto (leggi di Newton), la conservazione della massa, la conservazione dell'energia e la legge dei gas ideali; tutte queste equazioni descrivono il moto dei fluidi. Le equazioni differenziali spaziali e temporali (come è noto, non possono essere risolte esattamente) sono tradotte in codici di calcolo informatico con metodi numerici che presentano le equazioni governanti. A questo sistema di equazioni si sommano parametrizzazioni aggiuntive di altri processi fisici in combinazione con le condizioni iniziali e al contorno prima di essere eseguiti su un determinato dominio (area geografica). Quasi ogni passaggio NWP include stime, approssimazioni e compromessi.

3.4.1 Modello climatico globale (GCM) e Modelli climatici regionali (RCM)

Le previsioni e i modelli climatici vengono suddivisi in due classi, i modelli globali (GCM) che coprono l'intero pianeta e i modelli climatici regionali (RCM). Le informazioni fornite dai GCM hanno solitamente una risoluzione compresa tra 100 e 200 km mentre gli RCM ricoprono un'area geografica limitata, come ad esempio un paese specifico. I risultati di alcuni GCM sono disponibili gratuitamente sui rispettivi siti web (4 corse al giorno). I due modelli numerici globali più noti sono il modello del Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio raggio (ECMWF European Center for Medium-Range Weather Forecast [5]) e il modello globale di previsione del servizio nazionale meteorologico degli Stati Uniti (GFS Global Forecast System [6]). Sono conosciuti rispettivamente come modello europeo e modello americano e forniscono previsioni in tutto il mondo. I risultati dei modelli globali rappresentano le condizioni al contorno e di inizializzazione per gli RCM. Quindi gli RCM possono eseguire calcoli su aree in cui il clima è fortemente influenzato dalla topografia e dall'uso del suolo.

La risoluzione spaziale dei modelli RCM è compresa tra 50 km e 10 km consentendo di risolvere fenomeni meteorologici su scala ridotta che non possono essere rappresentati sulla griglia più grossolana (oltre 100 km) di un modello globale. Questi modelli possono essere configurati molto meglio per un'orografia geografica complessa e utilizzano una maggiore parametrizzazione dei processi atmosferici su piccola scala. L'incertezza e gli errori all'interno dei modelli regionali sono introdotti dal modello globale utilizzato che fornisce le condizioni al contorno, così come gli errori attribuibili al modello regionale stesso. La rappresentazione schematica del processo descritto è presentata in Figura 2.

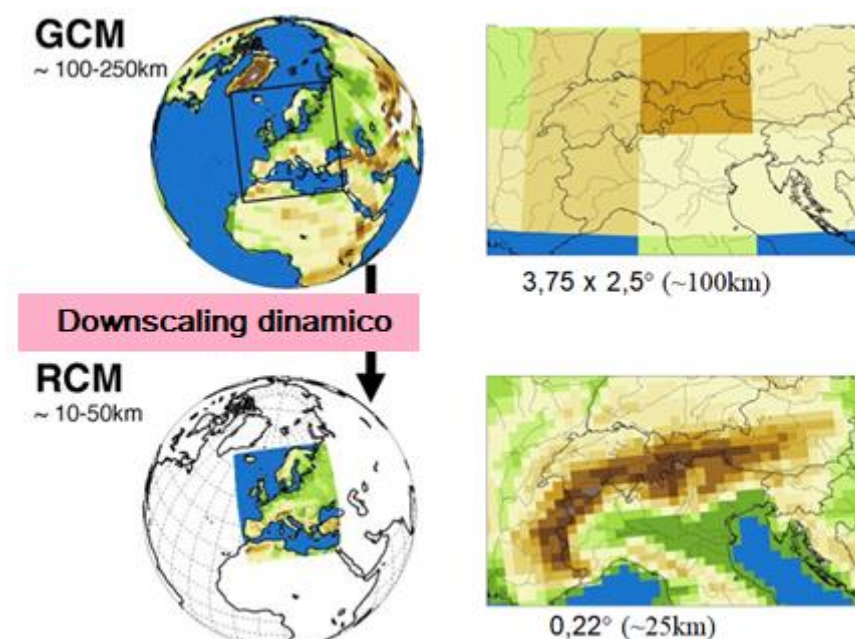


Fig. 2. Interazione schematica tra il modello climatico globale e quello regionale [5]

3.4.2 Parametrizzazioni nei modelli NWP

Alcuni processi meteorologici sono troppo piccoli o troppo complessi per essere inclusi esplicitamente nei modelli di previsione meteorologica numerica. La parametrizzazione è una procedura per rappresentare questi processi mettendo in relazione le variabili coinvolte in funzione della scala che il modello deve risolvere. Un tipico esempio è il cumulonembo, una nube a forte sviluppo verticale che si genera in condizioni di instabilità atmosferica che ha una scala inferiore a 1 chilometro e quindi richiede una griglia ancora più piccola per essere rappresentata fisicamente dalle equazioni del moto dei fluidi.

Alcune parametrizzazioni utilizzati nel modello di calcolo sono: radiazione solare in entrata, diffusione di aerosol e di molecole, assorbimento dell'atmosfera, riflessione/assorbimento da parte delle nuvole, emissione di radiazioni a onde lunghe dalla superficie terrestre, condensazione, turbolenza, riflessione/assorbimento della superficie terrestre, neve, acqua del suolo, scioglimento della neve, copertura di neve/ghiaccio/acqua, topografia, evaporazione, vegetazione, proprietà del suolo, pioggia (raffreddamento), rugosità superficiale, flusso di calore sensibile, convezione profonda (riscaldamento), emissione di onde lunghe dalle nuvole. Le approssimazioni della parametrizzazione fisica e dei metodi numerici delle equazioni fondamentali danno come risultato errori di previsione. I meteorologi hanno ancora molto da imparare sulla fisica dell'atmosfera. Ogni modello ha pro e contro. Con il miglioramento della

tecnologia informatica e delle conoscenze scientifiche, i modelli diventeranno sempre più sofisticati portando a previsioni migliori.

3.4.3 Risoluzione del modello e condizioni iniziali

In un modello previsionale, l'atmosfera è divisa in una griglia tridimensionale e ad ogni punto della griglia vengono forniti i dati assimilati. Queste sono chiamate condizioni iniziali. Quindi, in ogni punto della griglia, le equazioni matematiche vengono tradotte dal codice numerico e fatte avanzare nel tempo. Le uscite sui diversi passaggi temporali specificano il tempo futuro in tutti i punti della griglia. La Figura 3 rappresenta la griglia del modello e la risoluzione del livello dell'atmosfera e a destra l'interazione dettagliata tra le griglie.

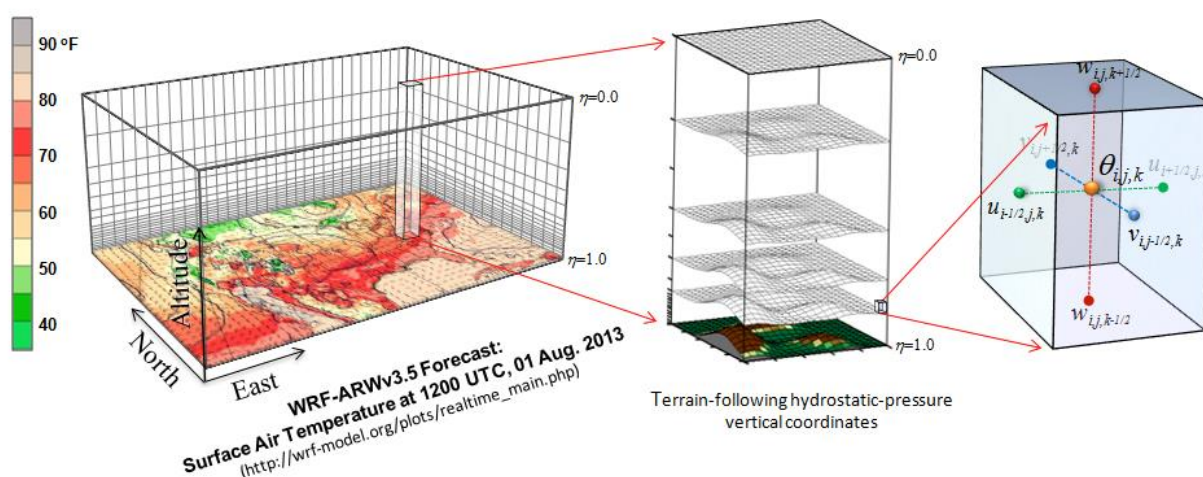


Fig. 3. Esempio di risoluzione della griglia e interazione tra le griglie nei modelli NWP [4]

Le condizioni iniziali definiscono lo stato attuale dell'atmosfera come punto di partenza del calcolo. Tali condizioni possono essere date o tramite osservazioni o con GCM. Le condizioni al contorno definiscono lo stato dell'atmosfera e i bordi del dominio [4].

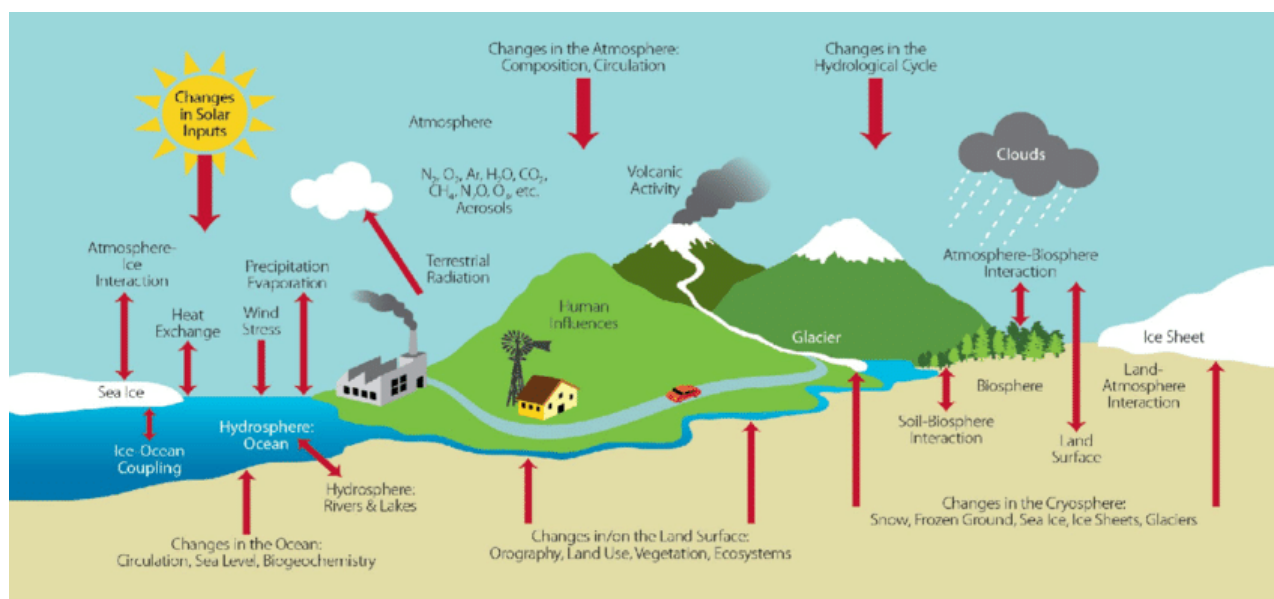


Fig. 4 . Interazioni fisiche tra i processi atmosferici all'interno di un RCM [5]

Le principali componenti fisiche calcolate in ogni griglia all'interno del modello NWP consistono nel calcolo della densità dell'aria, temperatura, pressione, rapporti di miscelazione dell'acqua (vapore, pioggia, neve, ghiaccio), gas e rapporti di miscelazione chimica in fase aerosol.

La scala temporale di ogni modello dipende dall'applicazione e dall'orizzonte previsionale di interesse; si definiscono quattro tipi di predizione:

Previsioni dei parametri meteorologici nel brevissimo periodo (0-3 ore). Le previsioni infra-ora coprono le previsioni da decine di minuti a 1 ora in anticipo con un'elevata frequenza di aggiornamenti.

Previsioni a breve e medio termine fino alle 72 ore successive.

Previsioni a medio e lungo termine coprono periodi che vanno da alcune ore a giorni e/o settimane a venire.

3.4.4 Modello WRF-ARW

Il modello atmosferico WRF (Weather Research and Forecasting model), è un codice open-source sviluppato, a partire dalla fine degli anni '90, dalla collaborazione tra il National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), e l'Air Force Weather Agency (AFWA). WRF è un sistema di previsione numerica di mesoscala di ultima generazione, concepito sia per la ricerca sia per le previsioni operative dello stato del tempo. Consiste di due diversi "core" per la dinamica, di un sistema di data assimilation, e di un architettura software che supporta il calcolo parallelo e la scalabilità del sistema. Il sistema è in grado di simulare le condizioni atmosferiche attraverso un ampio range di scale: dalle decine di metri, fino alle centinaia di km. Si tratta di un modello fluidodinamico completamente comprimibile e non idrostatico in cui vengono conservate le variabili scalari e sono applicati gli schemi di integrazione di Runge-Kutta. La griglia spaziale utilizzata è del tipo Arakawa C-grid. Il WRF è tra i modelli atmosferici più utilizzati nel campo della ricerca scientifica; è disponibile gratuitamente ed è efficiente anche per il calcolo parallelo [4].

3.5 Nostro run del modello WRF-ARW

In questo studio è stato utilizzato il core Advanced Research WRF-ARW. Le condizioni iniziali e al contorno necessarie per le nostre simulazioni con il modello WRF sono ottenute dai campi del modello globale americano GFS (Global Forecast System) [6], distribuite su una griglia di $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. La dimensione della griglia del modello WRF-ARW in questo caso è 10×10 km dove le simulazioni hanno nella griglia 151×151 punti con il centro del dominio computazionale alla latitudine $41,25^\circ$ e longitudine $13,5^\circ$, che copre la regione d'Italia (Figura 5). Una corsa giornaliera del modello WRF inizializzata dalle 00 UTC con i quattro output giornalieri del modello GFS, forniscono campi previsionali a passo orario per le successive 48 ore sul dominio prescelto. Lo schema di Dudhia viene utilizzato per la parametrizzazione della radiazione solare.

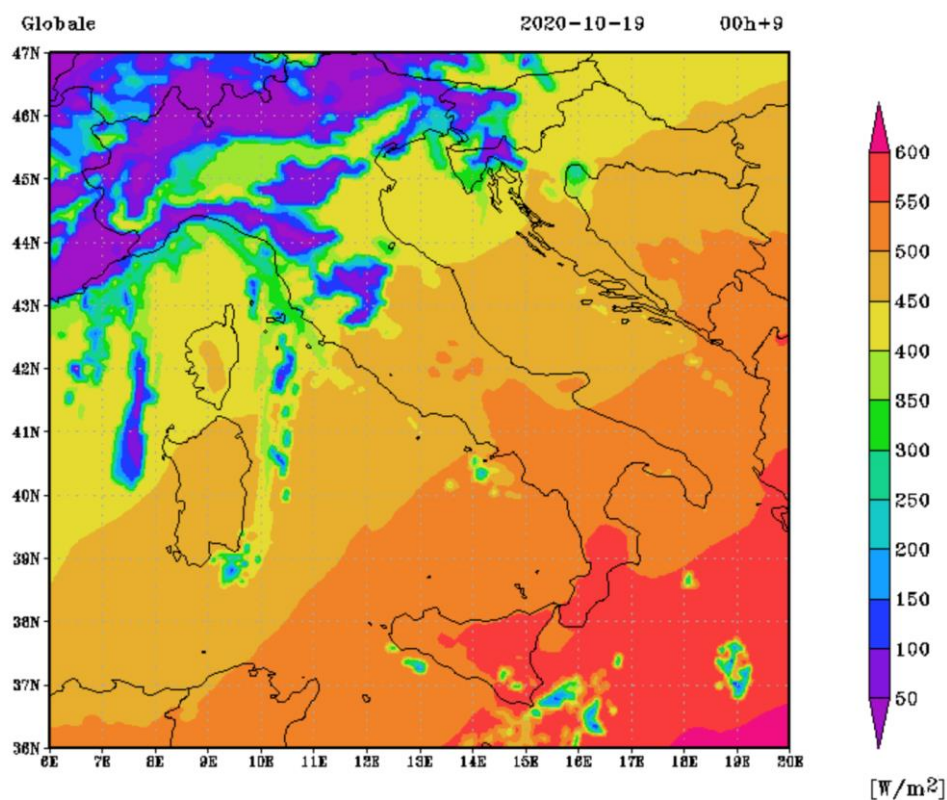


Fig. 5. Dominio di calcolo del modello WRF-ARW

3.6 Risultati

3.6.1 Previsione a 24 ore

3.6.1.1 Risultati anno 2020 previsioni a 24h con WRF-ARW

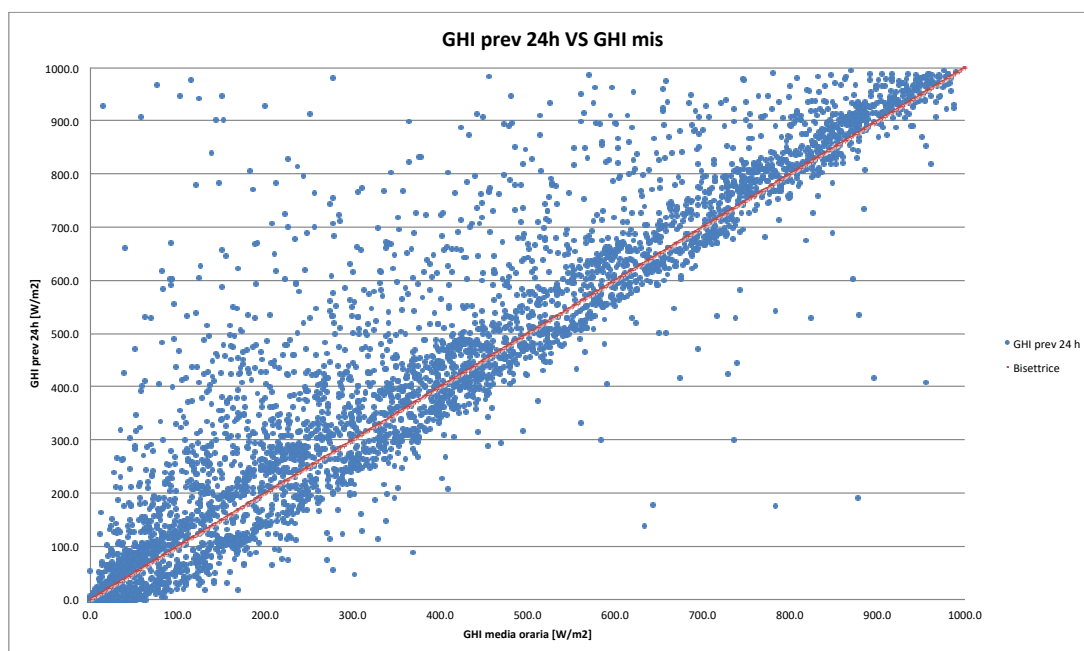


Fig. 6.

L'RMSE annuo ha un valore di 86.3 W/m^2 con un valore percentuale del 45.4% e un nMAE% del 19.3%.

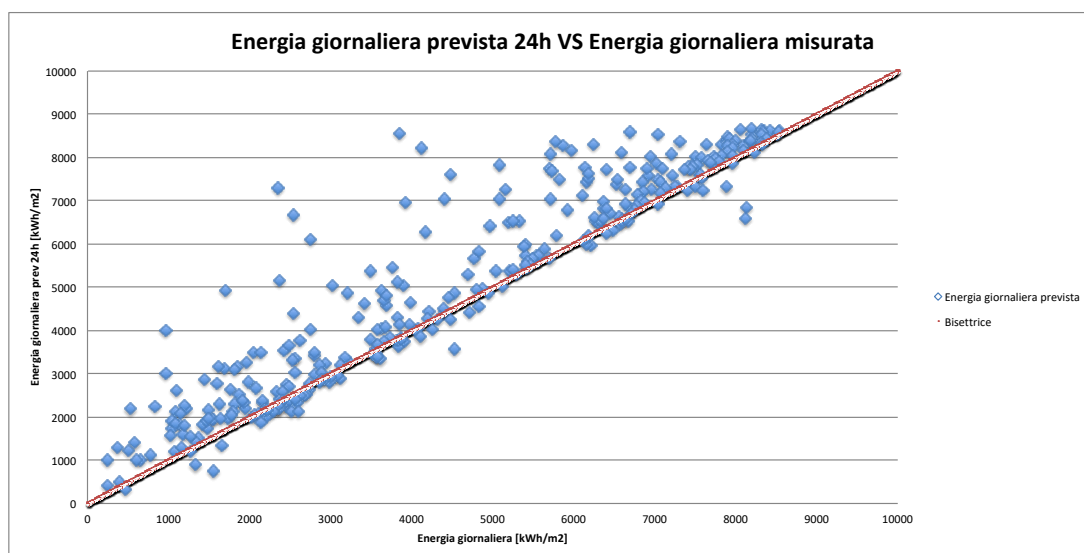


Fig. 7.

Abbiamo suddiviso i giorni in :

- sereni $K_T > 0.65$
- parzialmente nuvolosi $0.35 \leq K_T \leq 0.65$
- nuvolosi $K_T < 0.35$

per l'anno 2020 si sono avuti 167 giorni con un $K_T > 0.65$ e i risultati per questi giorni sono di seguito riportati:

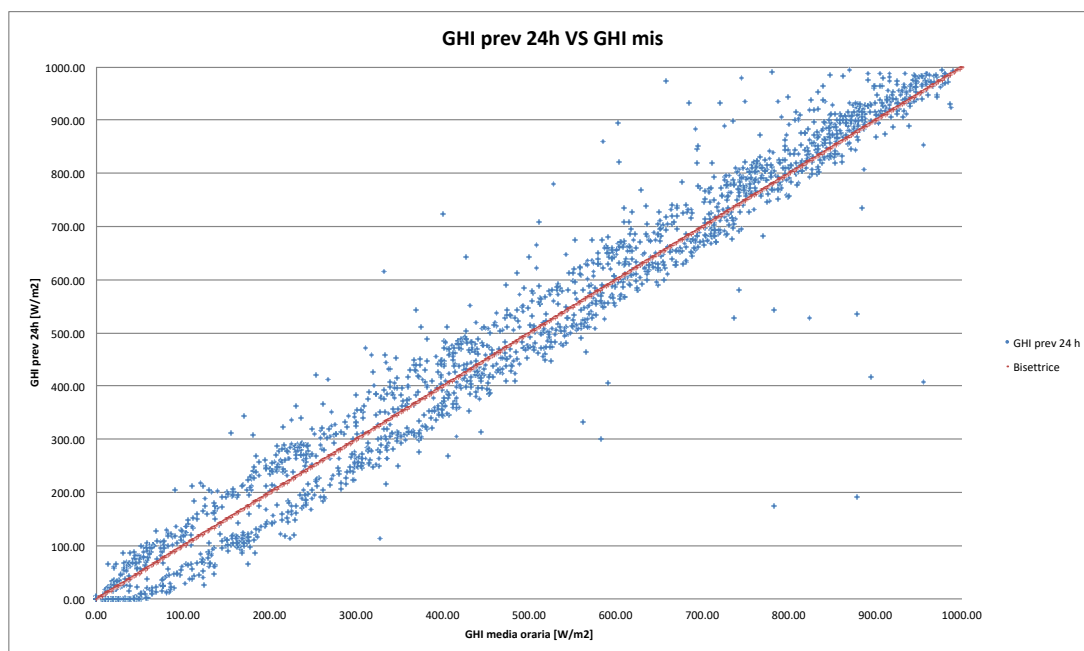


Fig. 8.

L'RMSE annuo ha un valore di 42.7 W/m^2 con un valore percentuale del 16.5% e un nMAE% del 8.5%.

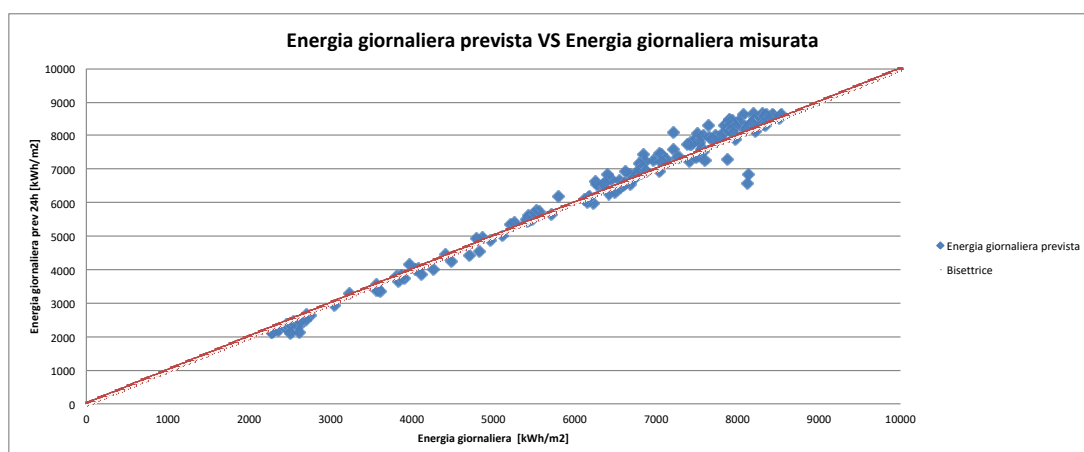


Fig. 9.

Come titolo di esempio si riportano le previsioni di due giorni sereni di maggio:



Fig. 10.

Per questi due giorni si ha:

4/5/2020 RMSE 31.2 W/m² con un valore percentuale del 9.4% e un nMAE% del 6%

7/5/2020 RMSE 30.2 W/m² con un valore percentuale dell'8.8% e un nMAE% del 5.4%

Per l'anno 2020 si sono avuti 149 giorni con un $0.35 \leq K_T \leq 0.65$ (parzialmente nuvolosi) e i risultati per questi giorni sono di seguito riportati:

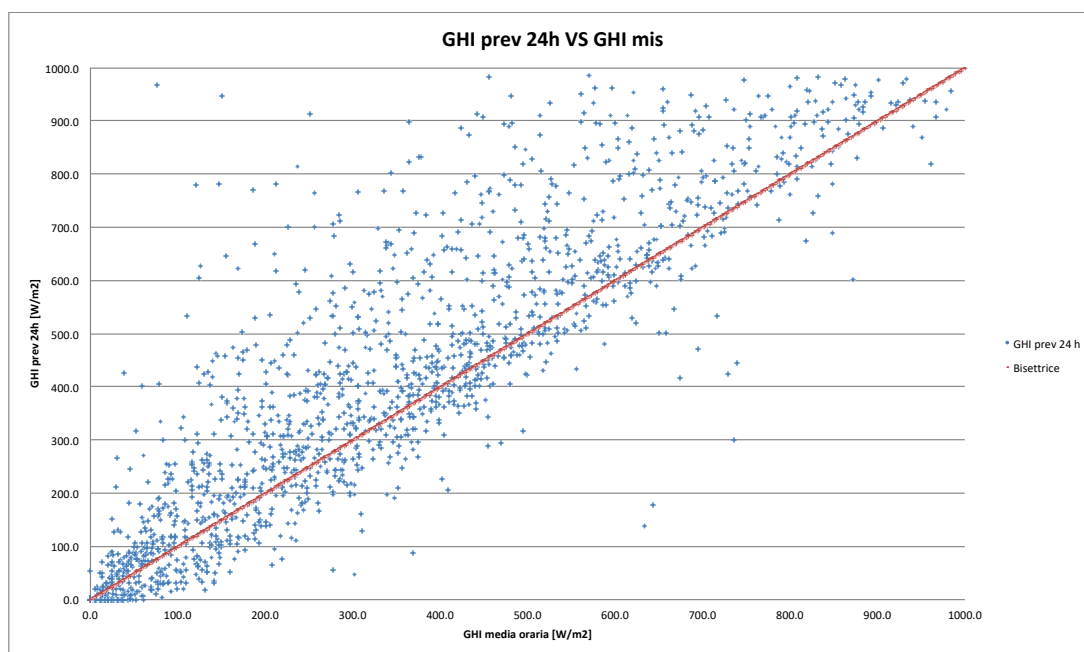


Fig. 11.

L'RMSE annuo ha un valore di 99.5 W/m² con un valore percentuale dell' 62.7% e un nMAE% del 29%.

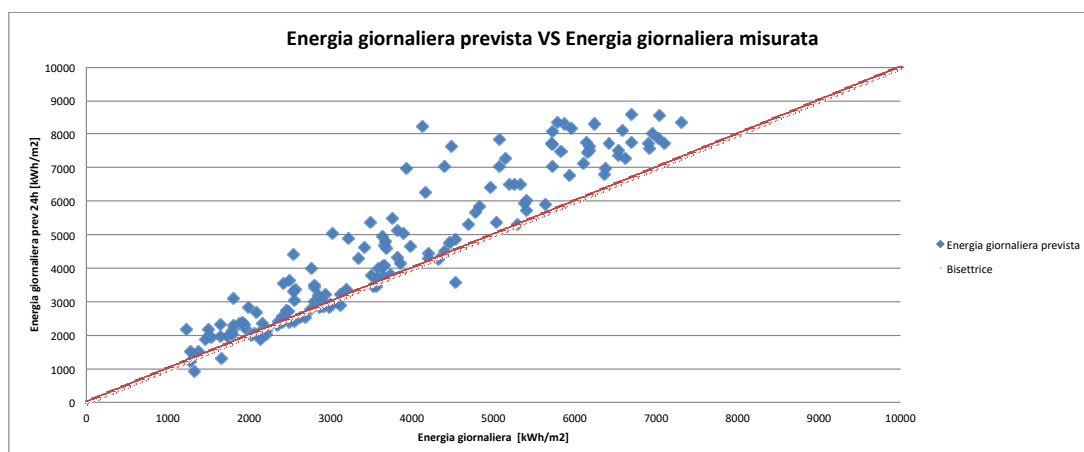


Fig. 12.

Come titolo di esempio si riportano le previsioni di due giorni parzialmente nuvolosi sempre di maggio:

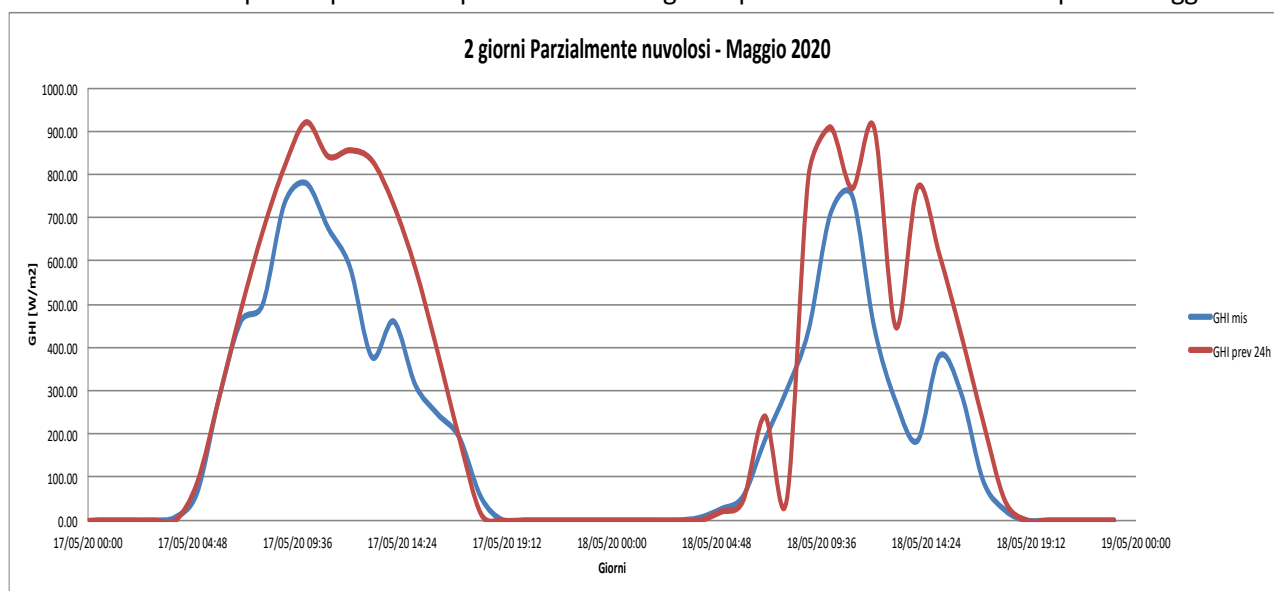


Fig. 13.

Per questi due giorni si ha:

17/5/2020 RMSE 148.7 W/m² con un valore percentuale del 62.2 % e un nMAE% del 36%

18/5/2020 RMSE 195 W/m² con un valore percentuale del 112.2% e un nMAE% del 63.6%.

Ed infine per l'anno 2020 si sono avuti 50 giorni con un $K_T < 0.35$ (nuvolosi) e i risultati per questi giorni sono di seguito riportati:

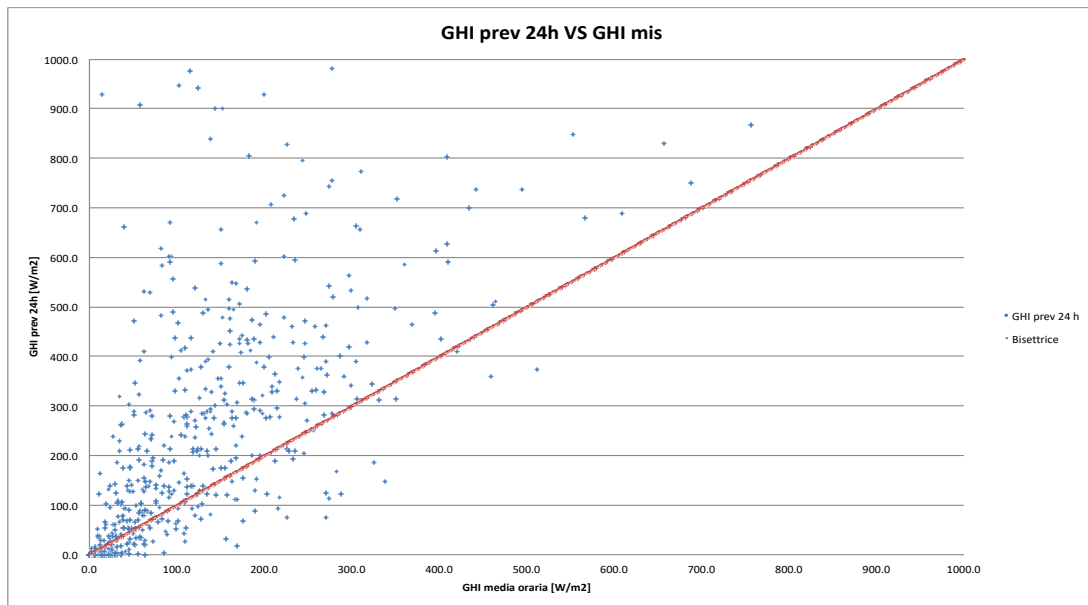


Fig. 14.

L'RMSE annuo ha un valore di 137.6 W/m^2 con un valore percentuale dell' 242.4% e un nMAE% del 104%.

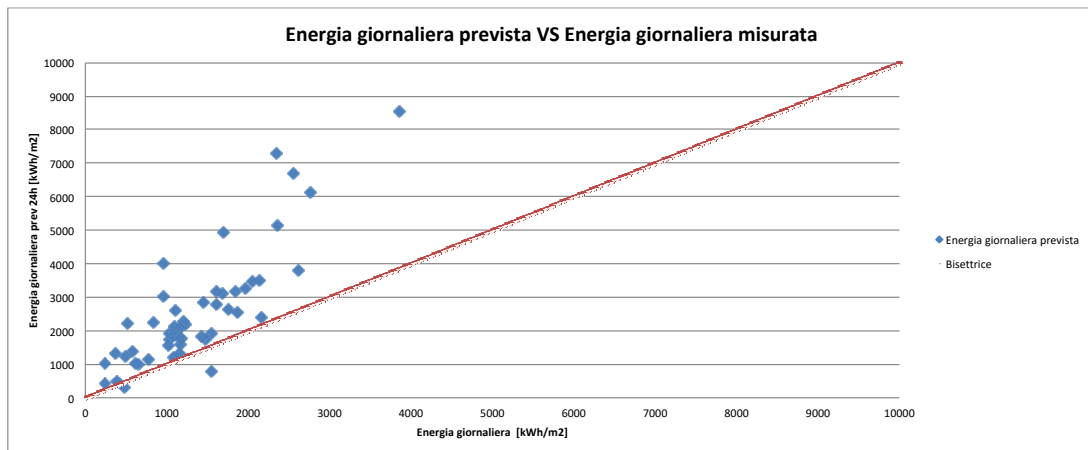


Fig. 15.

Come titolo di esempio si riportano le previsioni di due giorni nuvolosi di febbraio:

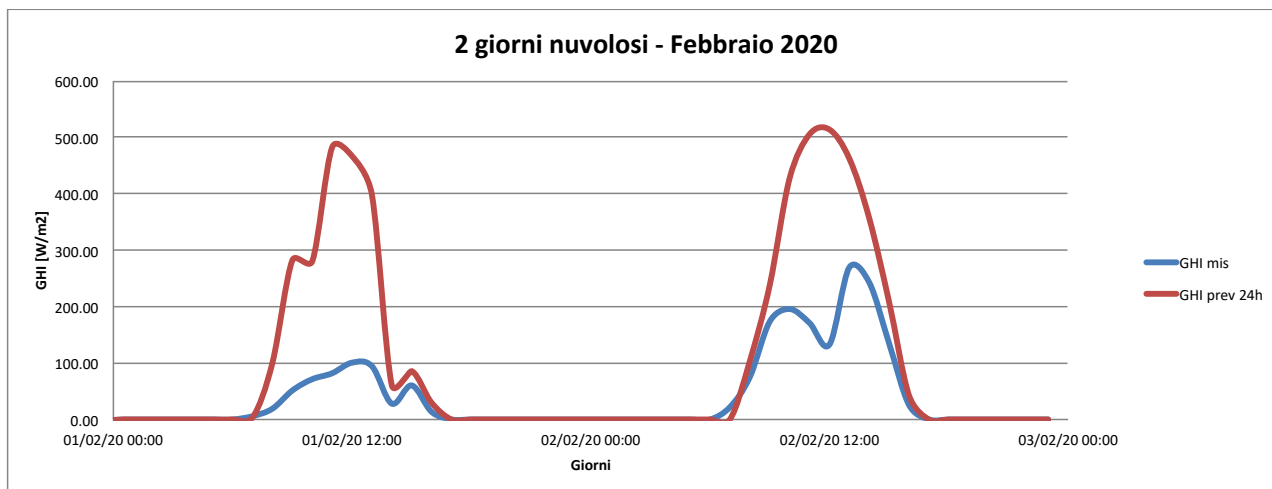


Fig. 16.

Per questi due giorni si ha:

1/2/2020 RMSE 143.3 W/m² con un valore percentuale del 652.9 % e un nMAE% del 316.8%

2/2/2020 RMSE 124.6 W/m² con un valore percentuale del 207% e un nMAE% del 101.1%.

Di seguito sono riassunti i risultati divisi per mese:

Giorni Gennaio	Energia giornaliera misurata [Wh/m²]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m²]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	2358.1	2196.8	20.80	11.19	21.17	0.67	1.07	SERENO
2	2341.3	2212.8	20.84	11.15	21.37	0.67	1.06	SERENO
3	2359.4	2190.6	28.79	15.17	29.28	0.67	1.08	SERENO
4	1487.9	2160.3	76.29	55.78	123.06	0.42	0.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	2455.9	2250.1	21.89	10.83	21.39	0.69	1.09	SERENO
6	2514.4	2283.7	21.80	10.05	20.80	0.70	1.10	SERENO
7	1951.8	2195.4	47.69	33.62	58.64	0.54	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	2454.5	2295.1	19.40	9.43	18.97	0.68	1.07	SERENO
9	2460.3	2338.6	20.07	10.07	19.58	0.68	1.05	SERENO
10	1636.3	2313.2	63.89	43.96	93.71	0.45	0.71	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	2473.0	2356.0	19.11	9.79	18.55	0.67	1.05	SERENO
12	2508.5	2388.1	18.78	9.44	17.96	0.67	1.05	SERENO
13	2161.0	2339.9	23.76	13.04	26.39	0.58	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	2365.2	2417.6	30.90	15.14	31.35	0.63	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	2547.5	2447.2	19.92	10.11	18.77	0.67	1.04	SERENO
16	2518.4	2119.7	34.87	16.89	33.23	0.66	1.19	SERENO
17	2491.3	2387.1	24.77	13.31	23.86	0.64	1.04	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	1229.5	2185.3	105.55	89.02	206.04	0.31	0.56	NUVOLOSO
19	2594.1	2327.4	23.17	11.55	21.44	0.66	1.11	SERENO
20	1040.1	1752.5	79.43	87.72	183.29	0.26	0.59	NUVOLOSO
21	2333.7	2571.2	39.30	21.07	40.41	0.58	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	2748.4	2631.0	21.31	9.85	18.61	0.67	1.04	SERENO
23	2710.0	2672.9	19.41	9.37	17.19	0.66	1.01	SERENO
24	1110.1	2605.3	137.80	141.01	297.93	0.27	0.43	NUVOLOSO
25	1731.8	1964.0	35.70	20.81	49.47	0.41	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	1882.7	2364.6	56.53	36.40	72.07	0.44	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	2742.8	2790.6	36.73	16.19	32.14	0.64	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	246.6	1010.9	57.97	315.58	564.23	0.06	0.24	NUVOLOSO
29	1993.5	2819.0	77.36	44.42	93.14	0.45	0.71	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	3040.6	2922.2	25.66	10.20	20.25	0.68	1.04	SERENO
31	826.3	2250.8	128.36	184.45	372.85	0.18	0.37	NUVOLOSO

Tab. 1.

Giorni Febbraio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	526.8	2191.8	143.31	316.78	652.90	0.12	0.24	NUVOLOSO
2	1444.1	2860.6	124.59	101.11	207.06	0.31	0.50	NUVOLOSO
3	2561.8	3031.2	45.87	22.11	42.97	0.55	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	2080.4	2663.3	59.15	32.44	68.23	0.44	0.78	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	3230.0	3286.1	39.39	16.61	29.27	0.67	0.98	SERENO
6	3616.9	3345.5	32.32	11.86	21.44	0.74	1.08	SERENO
7	3562.1	3385.7	29.57	11.18	19.92	0.72	1.05	SERENO
8	3568.6	3435.4	28.94	10.58	19.46	0.72	1.04	SERENO
9	2564.2	3346.6	80.05	40.71	74.92	0.51	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	373.7	1295.7	81.69	256.30	524.63	0.07	0.29	NUVOLOSO
11	2801.3	3417.3	57.34	26.16	49.13	0.54	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	3560.0	3580.4	26.68	9.46	17.99	0.68	0.99	SERENO
13	2422.9	3547.4	91.90	49.91	91.03	0.46	0.68	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	3839.0	3636.8	25.96	8.90	16.23	0.72	1.06	SERENO
15	3918.5	3734.5	30.98	10.30	18.98	0.73	1.05	SERENO
16	3836.5	3778.1	26.56	9.31	16.62	0.70	1.02	SERENO
17	3814.1	3771.7	29.49	10.45	18.55	0.69	1.01	SERENO
18	3494.8	3786.2	34.87	13.16	23.95	0.63	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	1683.1	3115.7	148.87	107.69	212.27	0.30	0.54	NUVOLOSO
20	4267.4	4012.0	28.94	8.52	16.28	0.75	1.06	SERENO
21	4072.4	4037.1	29.13	9.99	17.17	0.70	1.01	SERENO
22	4046.5	3999.3	23.15	7.56	13.73	0.69	1.01	SERENO
23	3627.9	4050.6	44.19	16.37	29.23	0.61	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	3969.8	4129.3	23.89	6.87	14.44	0.66	0.96	SERENO
25	3183.4	3369.6	61.12	24.71	46.08	0.53	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	3591.0	4014.5	78.17	20.96	52.24	0.59	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	4414.1	4457.0	49.57	13.25	26.95	0.71	0.99	SERENO
28	4832.3	4554.1	27.94	7.55	13.88	0.77	1.06	SERENO
29	3818.2	4316.1	58.50	21.46	36.77	0.60	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 2.

Giorni Marzo	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	1092.5	2144.4	89.78	103.53	197.22	0.17	0.51	NUVOLOSO
2	1198.7	2283.3	107.85	103.88	215.94	0.19	0.52	NUVOLOSO
3	2492.1	3658.3	122.47	70.39	117.94	0.38	0.68	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	4214.9	4438.8	54.95	15.34	31.29	0.64	0.95	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	3687.9	4575.0	87.54	31.49	56.97	0.55	0.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	3343.6	4294.6	96.55	38.53	69.30	0.49	0.78	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	3992.3	4637.5	91.51	26.67	55.01	0.58	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	4878.8	4975.3	35.45	10.76	17.44	0.71	0.98	SERENO
9	3562.1	3451.2	33.27	12.73	22.41	0.51	1.03	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	4800.6	4939.0	43.07	11.68	21.53	0.68	0.97	SERENO
11	5112.3	5015.9	26.54	7.53	12.46	0.72	1.02	SERENO
12	3893.5	5041.8	95.22	31.80	58.69	0.54	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	1699.5	4933.6	227.80	192.05	321.70	0.23	0.34	NUVOLOSO
14	961.4	3993.8	214.47	316.80	535.36	0.13	0.24	NUVOLOSO
15	5214.0	5375.1	50.17	12.05	23.09	0.70	0.97	SERENO
16	5419.0	5420.2	27.37	7.66	12.12	0.72	1.00	SERENO
17	3762.1	5461.3	134.37	53.28	85.72	0.50	0.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	5442.4	5483.9	40.05	11.26	17.66	0.71	0.99	SERENO
19	5556.5	5600.3	28.27	7.67	12.21	0.72	0.99	SERENO
20	5515.1	5652.6	31.38	7.76	13.66	0.71	0.98	SERENO
21	4777.0	5661.4	87.44	23.22	43.93	0.61	0.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	4534.1	3576.1	156.40	39.41	82.79	0.57	1.27	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	6221.5	5977.3	27.19	6.21	10.49	0.78	1.04	SERENO
24	6161.5	6005.0	29.26	6.78	11.40	0.76	1.03	SERENO
25	5705.3	5664.4	61.44	15.21	25.84	0.70	1.01	SERENO
26	1547.5	764.2	69.92	57.50	108.44	0.19	2.02	NUVOLOSO
27	3657.3	4691.4	154.87	62.52	101.63	0.44	0.78	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	3413.3	4626.0	138.86	49.73	97.64	0.41	0.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	5400.6	6008.9	68.36	13.57	30.38	0.64	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	5408.5	5738.6	64.53	14.14	28.63	0.64	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	5297.9	5277.6	74.03	17.42	33.54	0.62	1.00	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 3.

Giorni Aprile	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	6684.9	6531.4	29.89	6.68	10.73	0.78	1.02	SERENO
2	6309.8	6468.7	62.25	10.47	23.68	0.73	0.98	SERENO
3	6571.9	6452.5	27.78	6.56	10.14	0.75	1.02	SERENO
4	6595.1	6582.5	29.80	7.18	10.85	0.75	1.00	SERENO
5	6276.1	6527.6	43.71	10.10	16.72	0.71	0.96	SERENO
6	6338.8	6530.4	27.13	6.73	10.27	0.71	0.97	SERENO
7	6554.4	6636.0	30.74	7.52	11.25	0.73	0.99	SERENO
8	6452.1	6689.7	34.07	8.07	12.67	0.71	0.96	SERENO
9	6691.2	6844.0	26.65	6.35	9.56	0.73	0.98	SERENO
10	6817.4	6874.4	27.91	6.53	9.83	0.74	0.99	SERENO
11	6820.6	6929.4	30.00	7.01	10.56	0.73	0.98	SERENO
12	6631.0	6934.1	38.91	8.83	14.08	0.71	0.96	SERENO
13	5190.6	6510.6	138.41	31.73	64.00	0.55	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	1606.4	2776.3	169.10	117.17	252.63	0.17	0.58	NUVOLOSO
15	7400.9	7228.8	33.68	7.23	10.92	0.78	1.02	SERENO
16	6832.5	7172.7	59.14	12.52	20.78	0.71	0.95	SERENO
17	6591.4	6525.1	88.29	18.94	32.15	0.68	1.01	SERENO
18	4963.3	6413.5	105.57	31.95	51.05	0.51	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	3922.0	6966.1	211.83	78.38	129.63	0.40	0.56	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	1154.8	2083.8	100.23	100.29	208.31	0.12	0.55	NUVOLOSO
21	2552.5	6679.3	297.77	166.31	279.98	0.26	0.38	NUVOLOSO
22	1552.3	1927.3	59.42	56.49	91.86	0.16	0.81	NUVOLOSO
23	5931.4	6774.1	124.21	24.52	50.26	0.59	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	7045.7	7483.7	61.23	10.90	20.86	0.70	0.94	SERENO
25	7217.8	7581.5	34.63	6.74	11.51	0.72	0.95	SERENO
26	7583.3	7527.2	30.56	6.57	9.67	0.75	1.01	SERENO
27	7550.8	7592.8	29.60	5.98	9.41	0.74	0.99	SERENO
28	4406.8	7030.5	180.13	59.76	98.10	0.43	0.63	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	5829.4	7482.6	125.97	31.82	51.86	0.57	0.78	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	6532.3	7381.6	95.46	17.71	35.07	0.63	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 4.

Giorni Maggio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	5081.3	7049.8	139.52	40.24	65.90	0.49	0.72	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	6366.1	6802.5	85.31	17.86	32.16	0.61	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	7573.8	7603.0	36.40	7.11	11.53	0.72	1.00	SERENO
4	7960.9	7859.7	31.21	6.04	9.41	0.76	1.01	SERENO
5	6701.5	7778.0	76.55	17.67	27.42	0.63	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	6137.3	7778.7	138.07	27.56	53.99	0.58	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	8225.8	8105.8	30.22	5.43	8.82	0.77	1.01	SERENO
8	7724.4	7859.1	40.30	8.22	12.52	0.72	0.98	SERENO
9	7209.5	8076.8	94.46	16.12	31.44	0.67	0.89	SERENO
10	6413.1	7710.5	100.24	23.09	37.51	0.60	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	7493.3	7895.9	43.58	7.71	13.96	0.69	0.95	SERENO
12	5705.7	7738.1	140.74	35.66	59.20	0.53	0.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	5158.7	7265.6	141.54	43.69	65.85	0.47	0.71	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	5084.9	7836.6	198.00	54.93	93.45	0.46	0.65	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	7512.9	8036.4	72.92	14.21	23.29	0.68	0.93	SERENO
16	2756.8	6105.6	239.37	123.57	208.39	0.25	0.45	NUVOLOSO
17	5732.4	7701.0	148.75	36.01	62.28	0.52	0.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	4170.5	6268.9	195.00	63.60	112.21	0.38	0.67	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	6953.7	8013.0	81.90	19.89	28.27	0.63	0.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	6628.8	7263.1	145.77	29.94	52.78	0.59	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	8316.6	8432.2	36.32	6.96	10.48	0.74	0.99	SERENO
22	8191.4	8384.2	43.77	8.51	12.82	0.73	0.98	SERENO
23	8098.1	8277.9	32.02	6.23	9.49	0.72	0.98	SERENO
24	7829.6	8299.9	34.44	6.86	10.56	0.69	0.94	SERENO
25	7877.1	7309.3	84.01	14.72	25.60	0.70	1.08	SERENO
26	8121.7	6585.8	203.89	27.30	60.25	0.72	1.23	SERENO
27	8394.0	8548.7	46.05	8.74	13.17	0.74	0.98	SERENO
28	7582.8	8000.8	60.77	11.60	19.23	0.67	0.95	SERENO
29	2354.8	7281.3	386.07	224.59	393.48	0.21	0.32	NUVOLOSO
30	4485.6	7613.6	215.07	74.00	115.07	0.39	0.59	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	7307.3	8353.9	142.05	19.66	46.66	0.64	0.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 5.

Giorni Giugno	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	8131.4	6835.7	138.06	21.81	40.75	0.71	1.19	SERENO
2	7883.9	8374.7	71.08	12.25	21.64	0.69	0.94	SERENO
3	8205.8	8538.9	41.42	8.21	12.11	0.71	0.96	SERENO
4	5867.6	8285.0	153.53	41.94	62.80	0.51	0.71	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	5720.1	8087.3	171.06	41.46	71.77	0.50	0.71	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	8438.6	8575.0	24.86	4.85	7.07	0.73	0.98	SERENO
7	5967.2	8171.8	153.82	37.73	61.87	0.52	0.73	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	6585.9	8119.5	117.94	23.49	42.98	0.57	0.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	6697.9	8598.9	155.35	29.62	55.67	0.58	0.78	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	5783.1	8351.5	174.38	46.20	72.37	0.50	0.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	3854.7	8551.8	364.75	126.15	227.10	0.33	0.45	NUVOLOSO
12	8350.5	8627.8	31.85	6.09	9.15	0.72	0.97	SERENO
13	6113.2	7110.3	123.42	29.10	48.45	0.53	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	7891.2	8432.9	57.72	10.51	17.56	0.68	0.94	SERENO
15	7637.3	8306.9	80.06	12.60	25.16	0.66	0.92	SERENO
16	6544.8	7495.4	152.02	31.35	55.74	0.56	0.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	7037.8	8538.2	100.91	21.80	34.41	0.60	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7895.5	8473.9	46.94	9.45	14.27	0.68	0.93	SERENO
19	6246.1	8299.2	163.30	35.58	62.75	0.54	0.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	8547.3	8612.6	33.24	5.59	9.33	0.73	0.99	SERENO
21	7024.1	7856.6	117.92	20.61	40.29	0.60	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	8507.8	8523.3	26.57	5.23	7.50	0.73	1.00	SERENO
23	8426.2	8615.9	30.50	6.26	8.69	0.72	0.98	SERENO
24	8194.0	8673.2	53.27	8.46	15.60	0.70	0.94	SERENO
25	8301.9	8584.2	29.12	5.85	8.42	0.71	0.97	SERENO
26	8064.4	8635.5	57.65	10.14	17.16	0.69	0.93	SERENO
27	8314.1	8660.4	36.67	7.33	10.59	0.72	0.96	SERENO
28	8329.7	8603.7	31.54	6.34	9.09	0.72	0.97	SERENO
29	8315.8	8533.1	27.57	5.45	7.96	0.72	0.97	SERENO
30	8196.4	8421.9	33.37	6.84	9.77	0.71	0.97	SERENO

Tab. 6.

Giorni Luglio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	8201.7	8436.4	35.30	6.84	10.33	0.71	0.97	SERENO
2	7932.9	8436.1	36.27	7.26	10.97	0.69	0.94	SERENO
3	8008.2	8405.3	28.62	5.28	8.58	0.69	0.95	SERENO
4	4129.5	8230.4	330.2	102.52	191.93	0.36	0.50	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	8531.8	8590.9	29.24	5.88	8.23	0.74	0.99	SERENO
6	8384.1	8458.4	28.82	5.99	8.25	0.73	0.99	SERENO
7	7953.2	8320.8	39.96	7.70	12.06	0.69	0.96	SERENO
8	8171.4	8357.5	28.45	5.84	8.36	0.71	0.98	SERENO
9	8179.5	8373.7	32.40	6.35	9.51	0.71	0.98	SERENO
10	8181.2	8387.6	28.53	5.81	8.37	0.71	0.98	SERENO
11	7898.9	8275.4	33.93	6.87	10.31	0.69	0.95	SERENO
12	7961.4	8228.5	28.76	5.89	8.67	0.70	0.97	SERENO
13	7501.8	7322.9	132.44	19.19	42.37	0.66	1.02	SERENO
14	8324.0	8332.6	30.47	6.34	8.78	0.73	1.00	SERENO
15	7094.7	7731.9	47.59	10.53	16.10	0.63	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	6926.9	7570.1	95.97	17.65	33.25	0.61	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	6148.6	7438.0	127.71	25.67	49.85	0.55	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7426.4	7742.2	45.94	8.94	14.85	0.66	0.96	SERENO
19	8339.8	8301.6	28.47	5.84	8.19	0.74	1.00	SERENO
20	8094.3	8157.5	29.95	6.17	8.88	0.72	0.99	SERENO
21	7902.2	8127.6	36.28	7.05	11.02	0.71	0.97	SERENO
22	7817.9	8067.6	37.08	7.12	11.38	0.70	0.97	SERENO
23	7729.9	8028.9	31.66	6.61	9.83	0.70	0.96	SERENO
24	7748.6	7957.8	31.39	6.34	9.72	0.70	0.97	SERENO
25	7955.2	8061.0	22.78	4.44	6.87	0.72	0.99	SERENO
26	7655.2	7929.8	40.98	8.39	12.85	0.70	0.97	SERENO
27	7787.8	7926.9	26.88	5.81	8.28	0.71	0.98	SERENO
28	7687.5	7885.7	30.52	6.55	9.53	0.70	0.97	SERENO
29	7415.4	7808.8	34.66	7.48	11.22	0.68	0.95	SERENO
30	7528.2	7816.1	30.15	6.40	9.61	0.69	0.96	SERENO
31	7456.3	7800.4	33.03	7.19	10.63	0.69	0.96	SERENO

Tab. 7.

Giorni Agosto	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	7443.7	7723.6	30.32	6.57	9.77	0.69	0.96	SERENO
2	7371.6	7715.5	32.83	7.09	10.69	0.69	0.96	SERENO
3	6177.1	7510.1	99.78	23.33	38.77	0.58	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	6913.0	7732.8	100.80	14.81	35.00	0.65	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	6177.1	7629.8	108.40	25.52	42.12	0.58	0.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	7598.5	7244.7	31.14	6.73	9.84	0.72	1.05	SERENO
7	5719.9	7053.3	143.05	29.90	60.02	0.54	0.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	6853.4	7430.2	58.39	12.75	20.45	0.65	0.92	SERENO
9	7289.1	7319.0	32.51	6.13	10.71	0.70	1.00	SERENO
10	7074.9	7431.7	37.49	8.10	12.72	0.68	0.95	SERENO
11	7253.8	7316.2	23.66	5.15	7.83	0.70	0.99	SERENO
12	7130.2	7293.6	29.25	6.34	9.84	0.69	0.98	SERENO
13	6971.1	7276.1	34.52	7.55	11.89	0.68	0.96	SERENO
14	6866.4	7219.6	39.06	8.83	13.65	0.67	0.95	SERENO
15	6791.7	7156.9	71.60	11.01	25.30	0.67	0.95	SERENO
16	7073.4	7184.6	28.18	6.52	9.56	0.70	0.98	SERENO
17	6371.6	6986.2	80.20	14.01	30.21	0.63	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	5334.9	6524.3	109.04	25.44	49.05	0.53	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	7045.2	6924.9	23.15	4.99	7.89	0.71	1.02	SERENO
20	6831.4	7006.8	34.50	8.41	12.12	0.69	0.97	SERENO
21	6878.0	6952.3	26.07	5.97	9.10	0.70	0.99	SERENO
22	6766.0	6886.9	25.41	6.00	9.01	0.69	0.98	SERENO
23	6752.8	6789.8	27.60	6.42	9.81	0.70	0.99	SERENO
24	6406.2	6821.4	34.64	8.18	12.98	0.66	0.94	SERENO
25	6631.7	6566.8	29.72	6.80	10.76	0.69	1.01	SERENO
26	6711.8	6698.0	24.45	5.97	8.74	0.70	1.00	SERENO
27	6257.3	6618.3	37.19	8.22	14.26	0.66	0.95	SERENO
28	6367.5	6583.6	32.98	8.27	12.43	0.68	0.97	SERENO
29	5255.3	6522.1	151.29	31.75	69.09	0.56	0.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	2620.6	3774.1	95.88	46.23	87.80	0.28	0.69	NUVOLOSO
31	774.2	1121.0	57.93	90.81	179.57	0.08	0.69	NUVOLOSO

Tab. 8.

tab 9

Giorni Settembre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	6173.0	6139.3	24.36	6.00	9.47	0.67	1.01	SERENO
2	5035.2	5374.2	108.00	29.80	51.48	0.55	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	6489.4	6312.4	35.95	8.21	13.30	0.72	1.03	SERENO
4	6414.5	6263.2	28.53	6.89	10.67	0.71	1.02	SERENO
5	6179.2	6189.8	30.24	7.77	11.75	0.69	1.00	SERENO
6	5799.1	6185.6	38.40	7.57	15.89	0.65	0.94	SERENO
7	6119.7	6091.2	25.38	6.57	9.95	0.69	1.00	SERENO
8	5381.5	5948.2	76.84	16.29	34.27	0.61	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	5636.2	5886.5	34.52	9.14	14.70	0.65	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	4833.8	5816.6	86.01	21.85	42.70	0.56	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	3492.3	5380.4	184.37	59.81	126.70	0.41	0.65	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	5533.5	5748.0	44.61	12.22	19.35	0.65	0.96	SERENO
13	5568.4	5731.9	27.02	7.49	11.64	0.66	0.97	SERENO
14	5492.1	5653.7	33.53	9.08	14.65	0.66	0.97	SERENO
15	5437.6	5599.5	25.84	7.16	11.41	0.66	0.97	SERENO
16	5470.2	5507.2	26.26	6.62	11.52	0.67	0.99	SERENO
17	5402.3	5512.8	24.60	6.83	10.93	0.66	0.98	SERENO
18	5249.2	5413.3	29.56	8.09	13.52	0.65	0.97	SERENO
19	4696.3	5281.9	61.55	15.66	31.45	0.59	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	4526.8	4869.0	64.43	19.81	34.16	0.57	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	3635.8	4925.5	130.34	44.67	86.04	0.46	0.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	3821.6	5122.1	109.73	35.40	68.91	0.49	0.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	3025.3	5028.5	153.97	71.63	122.15	0.39	0.60	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	3213.2	4882.1	136.31	56.53	101.81	0.42	0.66	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	3666.7	4066.8	156.19	51.70	102.23	0.48	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	2368.9	5157.1	210.95	117.70	213.72	0.32	0.46	NUVOLOSO
27	573.8	1402.2	85.09	168.62	355.91	0.08	0.41	NUVOLOSO
28	2151.6	2394.9	50.73	29.80	56.59	0.29	0.90	NUVOLOSO
29	4958.2	4872.5	34.58	10.33	16.74	0.68	1.02	SERENO
30	3682.6	4804.6	100.74	34.24	65.65	0.51	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 9.

Giorni Ottobre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	4462.9	4741.4	64.49	17.18	34.68	0.62	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	2548.1	4397.3	136.59	75.41	128.65	0.36	0.58	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	1851.2	3185.5	134.13	82.14	173.89	0.26	0.58	NUVOLOSO
4	2057.0	3479.8	127.03	71.38	148.22	0.30	0.59	NUVOLOSO
5	4319.5	4250.7	54.96	16.10	30.53	0.63	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	4392.5	4505.1	45.65	15.09	24.94	0.64	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	2763.9	4011.6	126.38	46.78	109.74	0.41	0.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	4714.1	4424.8	29.19	8.34	14.86	0.70	1.07	SERENO
9	4484.0	4261.8	31.18	8.70	16.69	0.68	1.05	SERENO
10	4205.5	4285.1	45.62	14.86	26.04	0.64	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	1617.6	3180.5	128.68	99.64	190.93	0.25	0.51	NUVOLOSO
12	2977.6	2803.9	64.32	27.75	51.85	0.46	1.06	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	3852.8	4142.1	63.53	20.82	39.57	0.61	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	2145.0	3481.8	116.85	64.61	130.74	0.34	0.62	NUVOLOSO
15	3524.1	3453.5	83.91	31.37	57.14	0.57	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	2537.7	3330.6	104.45	56.21	98.78	0.41	0.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	3735.4	3838.6	41.60	14.67	26.73	0.61	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	4113.4	3865.7	27.67	8.90	16.14	0.68	1.06	SERENO
19	3873.8	3828.6	38.38	12.62	23.78	0.65	1.01	SERENO
20	3862.1	3800.5	23.44	8.36	14.57	0.66	1.02	SERENO
21	3652.5	3740.7	56.48	19.24	37.11	0.63	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	3578.2	3687.1	44.19	14.76	29.64	0.62	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	1962.4	3249.2	100.68	68.76	123.13	0.35	0.60	NUVOLOSO
24	1767.3	2653.1	88.46	51.35	120.13	0.32	0.67	NUVOLOSO
25	2805.1	3482.6	61.95	26.13	53.00	0.51	0.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	1866.1	2532.0	65.37	41.52	84.08	0.34	0.74	NUVOLOSO
27	2808.8	2986.3	57.43	27.31	49.07	0.52	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	3584.3	3404.9	28.72	11.24	19.23	0.67	1.05	SERENO
29	3111.8	2884.2	26.22	11.64	20.22	0.59	1.08	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	2934.7	3223.1	50.99	23.72	41.70	0.56	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	3118.0	3217.8	55.27	20.51	42.54	0.61	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 10.

Giorni Novembre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	2857.4	3192.6	44.18	17.84	37.11	0.56	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	1802.5	3096.7	102.74	71.80	136.80	0.36	0.58	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	2896.2	3033.5	37.16	16.91	30.80	0.58	0.95	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	964.8	3015.8	155.33	212.57	386.37	0.20	0.32	NUVOLOSO
5	1480.9	1747.4	53.82	35.37	87.22	0.31	0.85	NUVOLOSO
6	3085.6	2947.4	21.27	8.54	16.54	0.65	1.05	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	2997.3	2925.0	20.31	8.76	16.26	0.63	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	2925.8	2863.2	27.96	12.77	22.94	0.63	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	2897.9	2855.9	22.65	9.84	18.76	0.63	1.01	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	2867.1	2806.9	26.14	10.94	21.89	0.63	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	2454.6	2739.6	34.67	16.36	33.90	0.54	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	2221.1	2018.2	38.51	21.43	41.61	0.50	1.10	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	2488.9	2699.4	23.72	11.33	22.87	0.56	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	1418.3	1819.1	55.67	43.51	94.20	0.32	0.78	NUVOLOSO
15	1810.7	2289.8	42.45	29.83	56.27	0.42	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	497.0	1234.8	60.70	165.36	293.11	0.12	0.40	NUVOLOSO
17	2408.1	2572.7	20.60	9.31	20.53	0.57	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	2694.7	2525.5	21.89	9.86	19.49	0.64	1.07	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	2634.7	2514.1	20.85	9.73	19.00	0.63	1.05	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	659.1	1005.4	80.26	141.45	292.24	0.16	0.66	NUVOLOSO
21	2687.0	2496.8	21.88	9.88	19.54	0.66	1.08	SERENO
22	2626.6	2492.1	19.48	8.66	17.80	0.65	1.05	SERENO
23	2555.1	2414.5	21.02	10.12	19.74	0.64	1.06	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	2413.6	2376.2	24.69	12.85	24.55	0.61	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	1936.7	2331.7	56.84	30.03	70.44	0.49	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	2614.0	2144.4	51.48	22.44	47.27	0.67	1.22	SERENO
27	1796.8	2133.7	48.06	28.66	64.20	0.47	0.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	1371.7	1524.7	49.89	44.81	87.29	0.36	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	1467.8	1900.0	59.98	44.97	98.07	0.39	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	2346.5	2269.1	18.44	9.86	18.86	0.62	1.03	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 11.

Giorni Dicembre	Energia giornaliera misurata [Wh/m ²]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m ²]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	1080.4	1193.2	53.41	53.26	118.64	0.29	0.91	NUVOLOSO
2	473.6	327.1	13.88	34.24	70.33	0.13	1.45	NUVOLOSO
3	1656.9	1331.0	84.79	67.78	122.83	0.45	1.24	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	1160.4	1296.4	51.73	51.32	106.99	0.32	0.90	NUVOLOSO
5	1028.8	1557.5	65.74	77.04	153.36	0.28	0.66	NUVOLOSO
6	393.4	489.8	27.04	78.14	164.98	0.11	0.80	NUVOLOSO
7	1540.4	1937.6	72.91	57.24	113.60	0.43	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	605.0	1019.0	58.03	90.22	230.20	0.17	0.59	NUVOLOSO
9	1131.7	1822.4	62.51	71.52	132.56	0.32	0.62	NUVOLOSO
10	1174.9	1589.1	62.84	66.87	128.37	0.33	0.74	NUVOLOSO
11	2185.6	2147.4	25.32	12.72	27.80	0.62	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	1330.3	905.2	47.01	40.40	84.81	0.38	1.47	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	2269.4	2124.9	18.29	9.68	19.35	0.65	1.07	SERENO
14	2296.8	2130.8	20.39	10.63	21.30	0.66	1.08	SERENO
15	1337.0	1387.8	31.27	24.75	56.14	0.39	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	2137.2	2068.1	15.55	9.89	17.47	0.62	1.03	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	2021.1	1993.6	29.99	19.02	35.61	0.59	1.01	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	2117.5	2069.9	18.36	11.66	20.81	0.62	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	1045.1	1921.3	74.36	86.98	170.75	0.30	0.54	NUVOLOSO
20	1785.4	2038.6	42.95	25.21	57.74	0.52	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	2070.3	2056.8	16.80	10.37	19.48	0.60	1.01	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	1636.9	1962.0	65.15	42.38	95.52	0.48	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	1490.3	1976.3	39.03	33.27	62.85	0.43	0.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	1269.0	1540.9	49.09	46.06	92.85	0.37	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	1082.3	1846.3	73.58	79.76	163.16	0.32	0.59	NUVOLOSO
26	1273.5	1192.5	67.28	51.28	126.79	0.37	1.07	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	2221.2	2151.7	16.96	9.78	18.32	0.64	1.03	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	243.5	425.0	29.07	94.12	286.49	0.07	0.57	NUVOLOSO
29	2140.1	1870.6	36.27	21.00	40.67	0.62	1.14	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	1188.4	1787.9	79.99	87.18	161.53	0.34	0.66	NUVOLOSO
31	1917.9	2396.4	46.58	25.26	58.29	0.55	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 12.

	Energia Mensile Misurata [Wh/m ²]	Energia Mensile Prevista 24h [Wh/m ²]	Energia Mensile Misurata / Energia Mensile Prevista 24h	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni [Wh/m ²]	Energia Mensile Prevista 24h Giorni Sereni [Wh/m ²]	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni / Energia Mensile Prevista 24h Giorni Sereni
Gennaio	65314.87	71759.91	0.91	38084.31	35632.28	1.07
Febbraio	92721.71	102149.53	0.91	58548.01	57142.95	1.02
Marzo	127963.85	145366.72	0.88	60026.96	60109.11	1.00
Aprile	172607.55	193138.32	0.89	128965.64	131112.56	0.98
Maggio	205150.57	237835.73	0.86	118111.99	119275.41	0.99
Giugno	221074.28	249494.87	0.89	147631.84	152029.47	0.97
Luglio	238074.52	250508.62	0.95	213774.81	219538.21	0.97
Agosto	197709.01	211014.35	0.94	152365.34	156160.61	0.98
Settembre	140027.94	157560.94	0.89	80286.24	81220.37	0.99
Ottobre	99227.48	112329.90	0.88	24631.71	23586.26	1.04
Novembre	65878.69	71986.13	0.92	7927.49	7133.28	1.11
Dicembre	45304.37	50556.95	0.90	4566.15	4255.62	1.07
Anno 2020	1671054.83	1853701.96	0.90	1034920.50	1047196.13	0.99

Tab. 13.

y=mx+q	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Anno
m	1	1.015	1.026	1.032	1.043	1.036	1.018	1.041	1.027	1.052	1.014	1.012	1.037
q	7.94	11.453	18.864	20.625	31.995	28.2	10.712	6.906	18.974	10.58	7.193	6.3	13.612
R2	0.88	0.917	0.876	0.915	0.874	0.911	0.958	0.966	0.9	0.886	0.898	0.834	0.921
Sereni	15	15	11	19	15	18	27	22	14	6	3	2	167
m	0.964	0.978	1.012	1.021	1	1.027	1.021	1.012	1.012	0.972	0.901	0.942	1.017
q	-3.02	-0.338	-2.42	-1.444	2.42	0.977	1.78	-0.666	-0.268	-2.598	-0.181	-0.965	-1.481
R2	0.982	0.982	0.983	0.985	0.96	0.98	0.988	0.99	0.98	0.984	0.968	0.987	0.983
Parzialmente Nuvolosi	11	10	15	7	14	11	4	7	13	18	22	17	149
m	1.086	1.127	1.06	1.134	1.17	1.11	1.04	1.118	1.079	1.049	1.024	0.978	1.115
q	5.96	6.53	16.8	40.785	27.94	44.152	59.624	18.166	26.909	6.05	3.44	3.816	12.515
R2	0.911	0.938	0.861	0.876	0.891	0.89	0.76	0.917	0.854	0.903	0.941	0.872	0.89
Nuvolosi	5	4	5	4	2	1	0	2	3	7	5	12	50
m	1.638	1.66	1.837	1.49	1.6	1.152		1.2	1.222	1.574	1.5	1.32	1.51
q	20.894	28.648	18.168	33.657	108.2	171.25		16.716	37.909	5.22	10.663	4.39	21.271
R2	0.621	0.61	0.583	0.539	0.46	0.35		0.821	0.652	0.862	0.653	0.753	0.622

Tab. 14.

3.6.1.2 Risultati anno 2020 previsioni a 24h con modello ibrido ENEA-WRF

Il modello è stato così impostato:

- da una serie storica di dati acquisiti di radiazione globale orizzontale per la località studiata (Casaccia) è stato calcolato un valore mensile del coefficiente B ;
- dal modello WRF-ARW si prende la previsione oraria a 24 e 48h della copertura nuvolosa e quindi si calcola il coefficiente K_c (clear-sky index);
- dalla formula (9) si calcola la radiazione orizzontale globale al suolo.

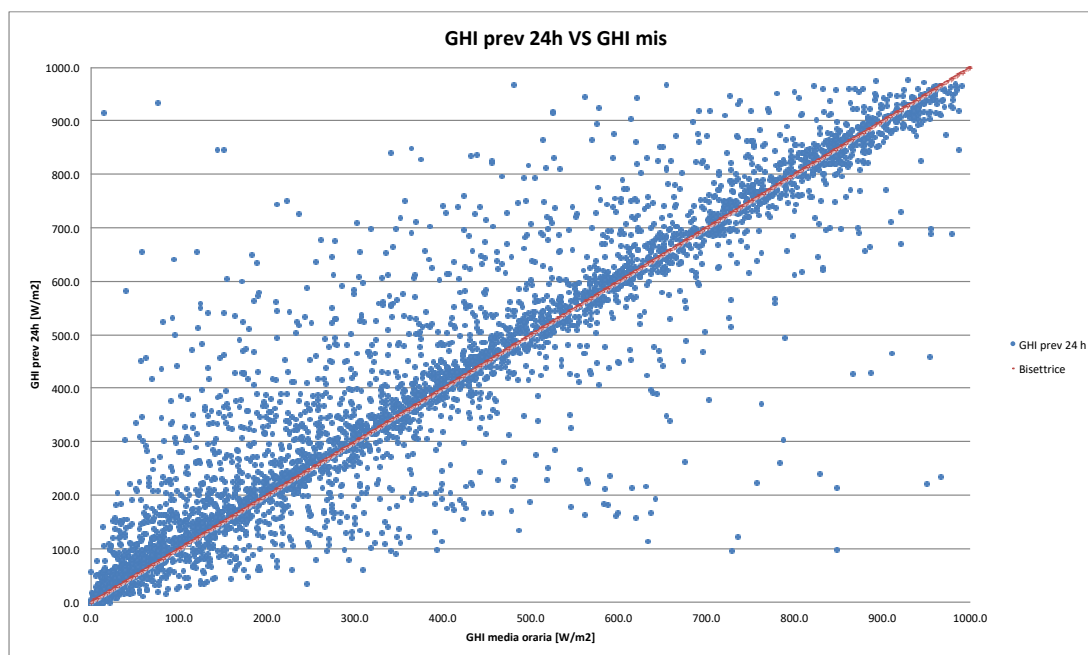


Fig. 17.

L'RMSE annuo ha un valore di 73.8 W/m^2 con un valore percentuale del 38.8% e un nMAE% del 14.9%.

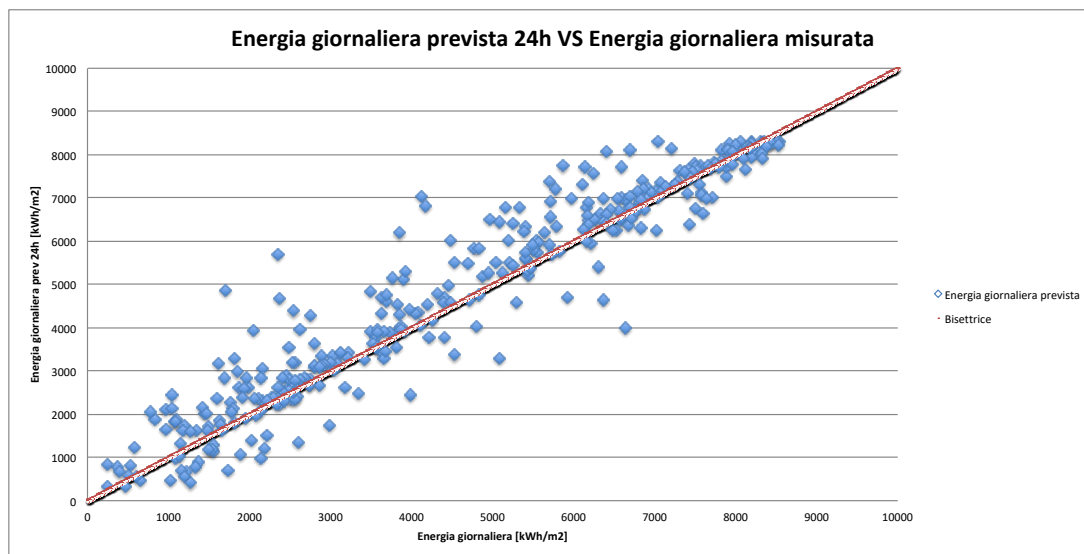


Fig. 18.

Abbiamo suddiviso i giorni in :

- sereni $K_T > 0.65$
- parzialmente nuvolosi $0.35 \leq K_T \leq 0.65$
- nuvolosi $K_T < 0.35$

per l'anno 2020 si sono avuti 167 giorni con un $K_T > 0.65$ (sereni) e i risultati per questi giorni sono di seguito riportati:

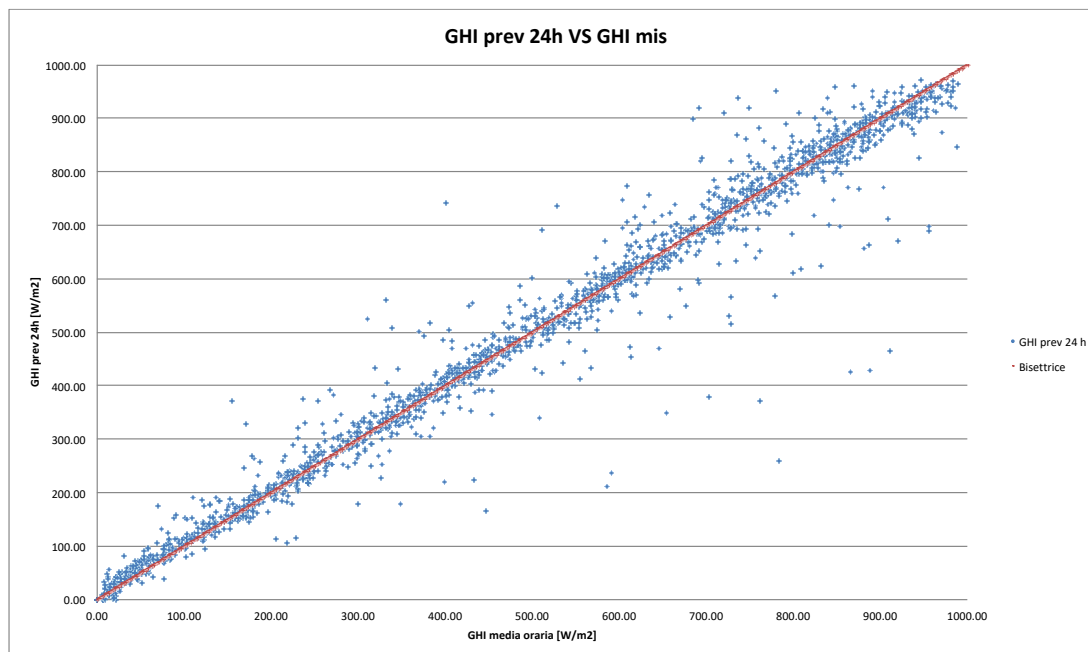


Fig. 19.

L'RMSE annuo ha un valore di 35.2 W/m^2 con un valore percentuale dell' 13.5% e un nMAE% del 5%.

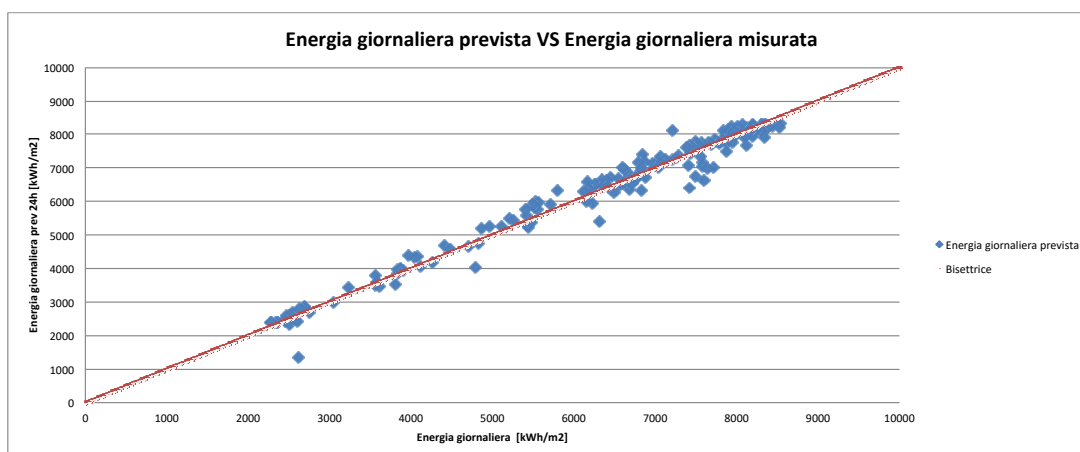


Fig. 20.

Come titolo di esempio si riportano le previsioni di due giorni sereni di maggio:

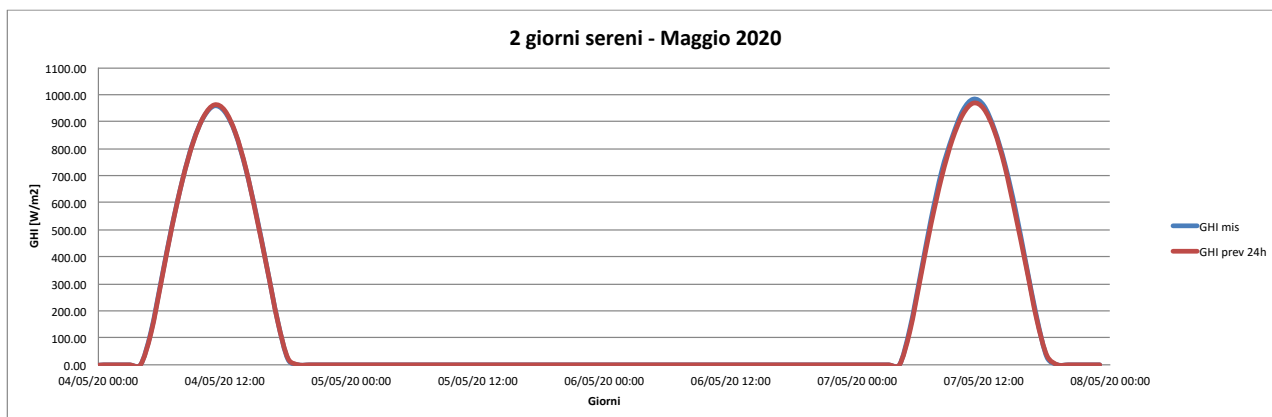


Fig. 21.

Per questi due giorni si ha:

4/5/2020 RMSE 2.8 W/m² con un valore percentuale del 0.83% e un nMAE% del 0.57%

7/5/2020 RMSE 10 W/m² con un valore percentuale dell'2.9% e un nMAE% del 2.1%

Per l'anno 2020 si sono avuti 149 giorni con un $0.35 \leq K_T \leq 0.65$ (parzialmente nuvolosi) e i risultati per questi giorni sono di seguito riportati:

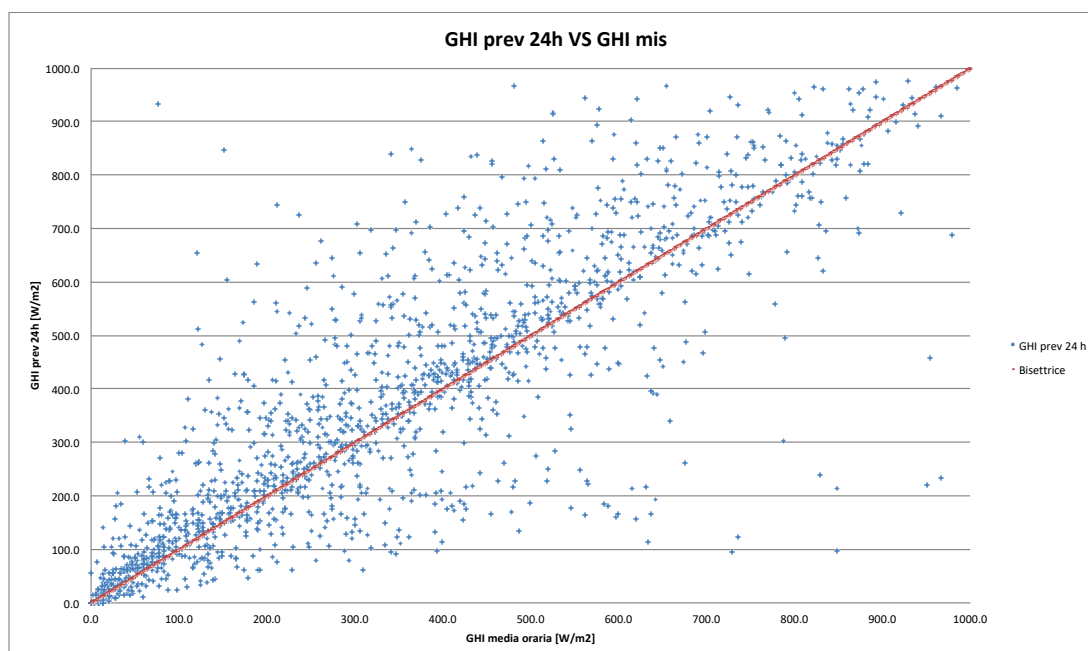


Fig. 22.

L'RMSE annuo ha un valore di 94.1 W/m² con un valore percentuale dell' 59.3% e un nMAE% del 26.1%.

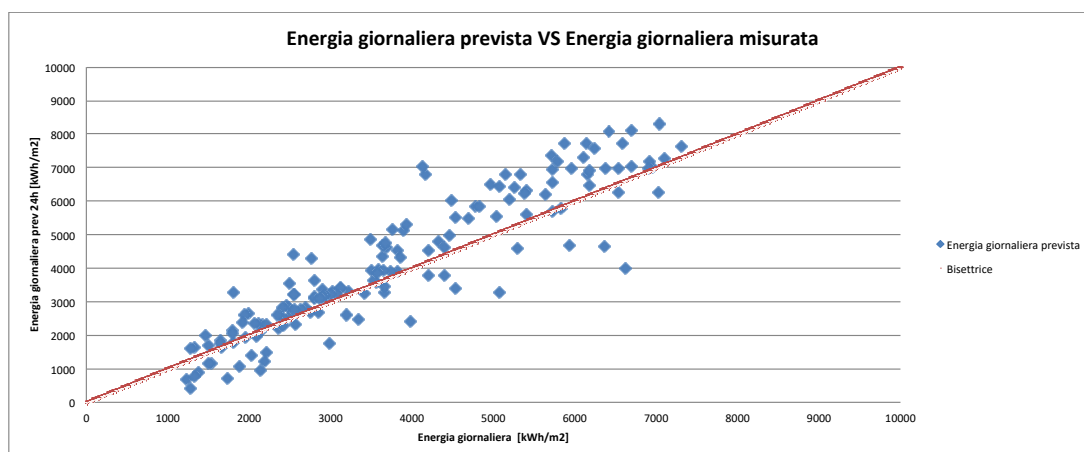


Fig. 23.

Come titolo di esempio si riportano le previsioni di due giorni parzialmente nuvolosi sempre di maggio:

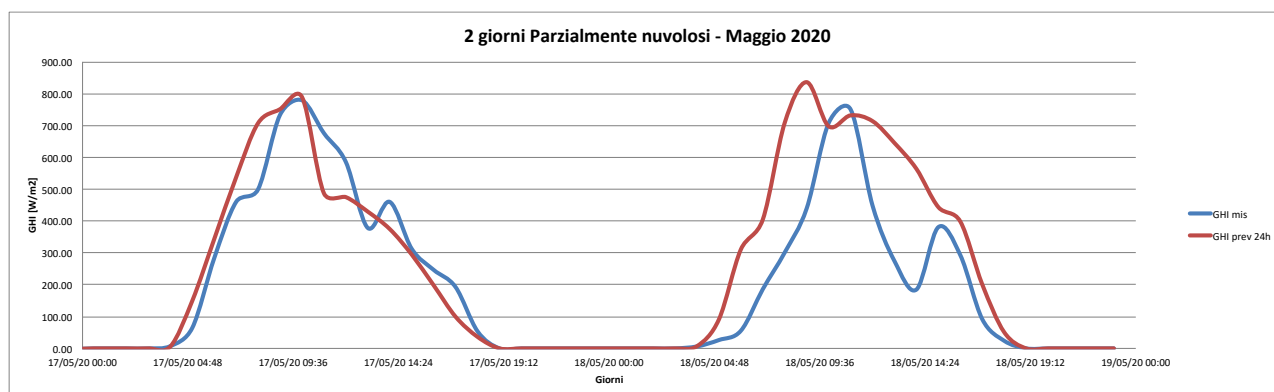


Fig. 24.

Per questi due giorni si ha:

17/5/2020 RMSE 73.5 W/m² con un valore percentuale del 30.7 % e un nMAE% del 18.7%

18/5/2020 RMSE 184 W/m² con un valore percentuale del 106% e un nMAE% del 64%.

Ed infine per l'anno 2020 si sono avuti 50 giorni con un $K_T < 0.35$ (nuvolosi) e i risultati per questi giorni sono di seguito riportati:

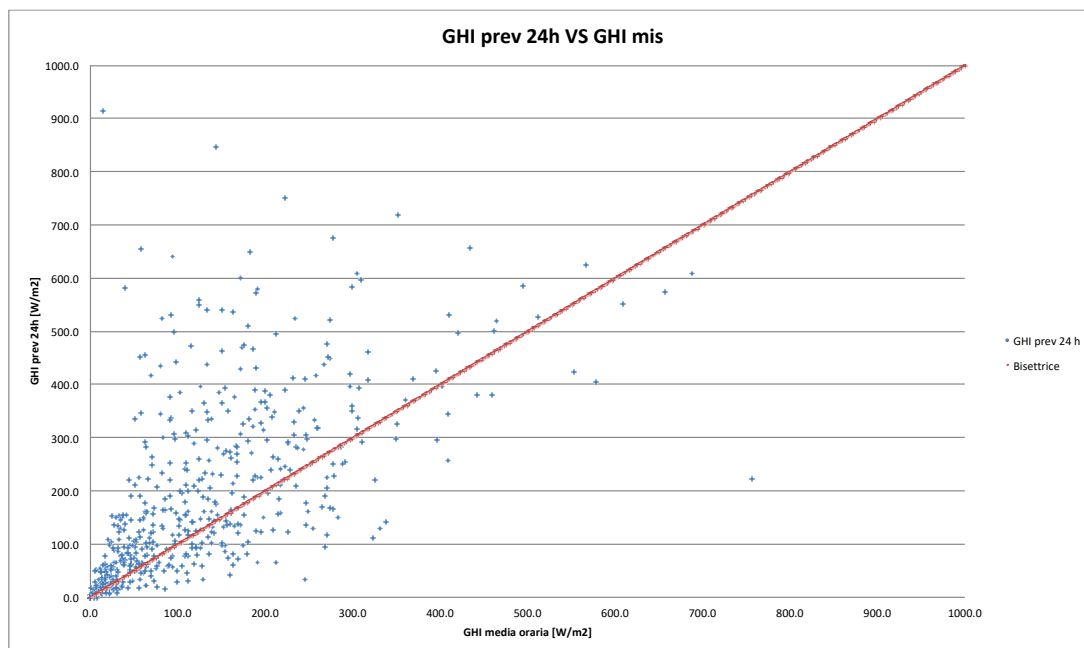


Fig. 25.

L'RMSE annuo ha un valore di 97 W/m^2 con un valore percentuale dell' 170.8% e un nMAE% del 72%.

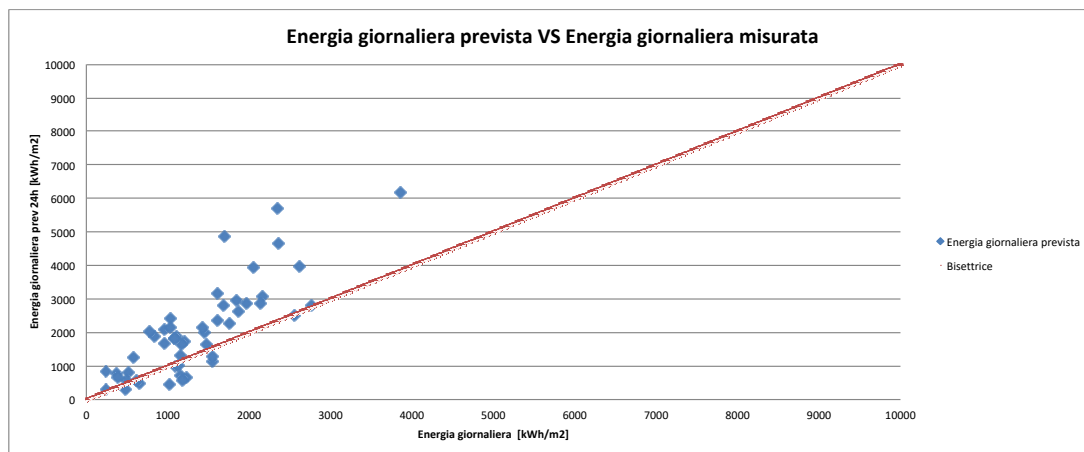


Fig. 26.

Come titolo di esempio si riportano le previsioni di due giorni nuvolosi di febbraio:

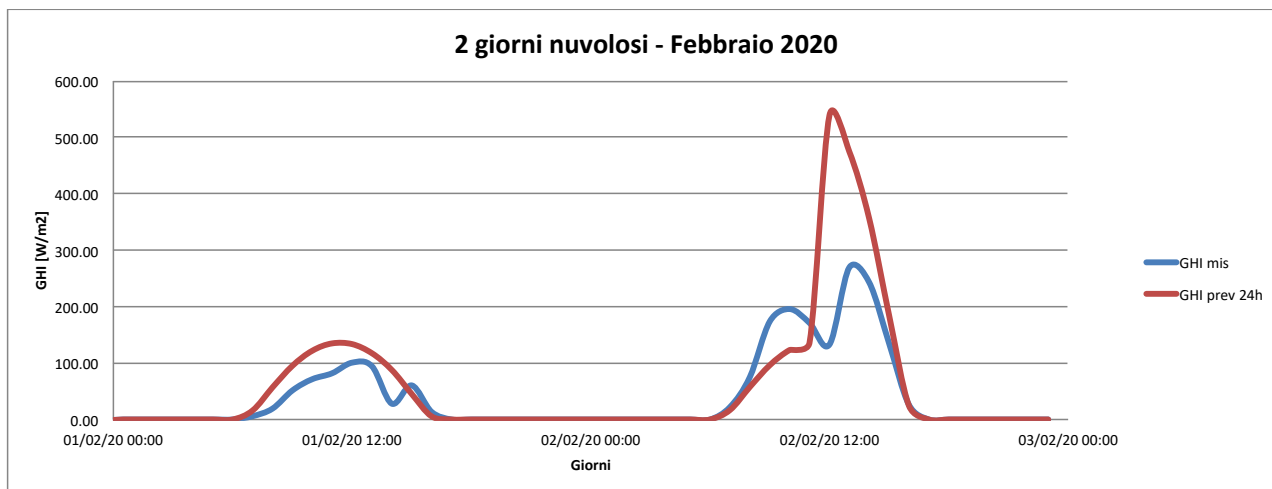


Fig. 27.

Per questi due giorni si ha:

1/2/2020 RMSE 24.3 W/m² con un valore percentuale del 111 % e un nMAE% del 63.2%

2/2/2020 RMSE 99 W/m² con un valore percentuale del 164.7% e un nMAE% del 68.2%.

Di seguito sono riassunti i risultati divisi per mese:

Giorni Gennaio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	2358.1	2381.8	3.26	1.30	3.32	0.67	0.99	SERENO
2	2341.3	2392.4	5.38	2.75	5.52	0.67	0.98	SERENO
3	2359.4	2404.1	11.08	6.13	11.27	0.67	0.98	SERENO
4	1487.9	1706.0	32.81	28.40	52.92	0.42	0.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	2455.9	2430.5	2.02	1.05	1.98	0.69	1.01	SERENO
6	2514.4	2445.2	5.08	2.75	4.85	0.70	1.03	SERENO
7	1951.8	1913.2	9.35	5.52	11.50	0.54	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	2454.5	2477.8	2.16	1.02	2.11	0.68	0.99	SERENO
9	2460.3	2495.5	3.65	1.83	3.56	0.68	0.99	SERENO
10	1636.3	1864.0	23.18	14.88	34.00	0.45	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	2473.0	2585.8	8.28	4.56	8.03	0.67	0.96	SERENO
12	2508.5	2607.0	7.05	3.93	6.75	0.67	0.96	SERENO
13	2161.0	2304.7	17.36	8.54	19.28	0.58	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	2365.2	2207.6	60.96	28.02	61.86	0.63	1.07	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	2547.5	2676.6	9.84	5.07	9.27	0.67	0.95	SERENO
16	2518.4	2322.9	24.60	8.88	23.45	0.66	1.08	SERENO
17	2491.3	2566.1	14.84	7.31	14.29	0.64	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	1229.5	670.6	61.63	46.50	120.31	0.31	1.83	NUVOLOSO
19	2594.1	2419.7	21.93	9.66	20.29	0.66	1.07	SERENO
20	1040.1	2433.4	113.84	134.64	262.69	0.26	0.43	NUVOLOSO
21	2333.7	2217.1	26.82	14.15	27.58	0.58	1.05	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	2748.4	2678.1	14.05	5.46	12.27	0.67	1.03	SERENO
23	2710.0	2815.0	8.16	4.08	7.23	0.66	0.96	SERENO
24	1110.1	1883.9	93.06	98.45	201.20	0.27	0.59	NUVOLOSO
25	1731.8	704.0	89.32	59.35	123.78	0.41	2.46	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	1882.7	1074.8	62.59	42.91	79.79	0.44	1.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	2742.8	2666.1	30.02	11.92	26.27	0.64	1.03	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	246.6	833.8	46.30	238.17	450.70	0.06	0.30	NUVOLOSO
29	1993.5	2625.3	55.61	31.69	66.94	0.45	0.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	3040.6	2994.0	12.25	5.36	9.67	0.68	1.02	SERENO
31	826.3	1876.3	87.52	127.08	254.20	0.18	0.44	NUVOLOSO

Tab. 15.

Giorni Febbraio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	526.8	814.3	24.37	63.28	111.01	0.12	0.65	NUVOLOSO
2	1444.1	2009.2	99.10	68.21	164.69	0.31	0.72	NUVOLOSO
3	2561.8	3206.9	49.84	25.35	46.69	0.55	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	2080.4	1960.3	79.90	40.43	92.17	0.44	1.06	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	3230.0	3425.5	30.82	9.00	22.90	0.67	0.94	SERENO
6	3616.9	3469.2	11.95	4.76	7.93	0.74	1.04	SERENO
7	3562.1	3513.6	6.01	2.30	4.05	0.72	1.01	SERENO
8	3568.6	3558.6	4.62	1.70	3.11	0.72	1.00	SERENO
9	2564.2	2331.1	100.51	46.97	94.07	0.51	1.10	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	373.7	781.6	33.77	111.77	216.88	0.07	0.48	NUVOLOSO
11	2801.3	3103.0	57.09	28.16	48.91	0.54	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	3560.0	3775.2	15.95	6.05	10.75	0.68	0.94	SERENO
13	2422.9	2295.7	85.33	45.64	84.52	0.46	1.06	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	3839.0	3873.1	9.84	2.94	6.15	0.72	0.99	SERENO
15	3918.5	3922.7	5.22	1.64	3.19	0.73	1.00	SERENO
16	3836.5	3972.7	9.41	3.55	5.89	0.70	0.97	SERENO
17	3814.1	3550.1	26.30	8.07	16.55	0.69	1.07	SERENO
18	3494.8	3917.2	40.20	12.20	27.60	0.63	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	1683.1	2827.1	163.21	123.17	232.72	0.30	0.60	NUVOLOSO
20	4267.4	4176.3	6.65	2.13	3.74	0.75	1.02	SERENO
21	4072.4	4355.2	21.09	6.94	12.43	0.70	0.94	SERENO
22	4046.5	4319.5	25.01	8.94	14.83	0.69	0.94	SERENO
23	3627.9	4345.2	56.53	20.39	37.40	0.61	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	3969.8	4403.3	42.32	12.87	25.59	0.66	0.90	SERENO
25	3183.4	2616.9	87.44	32.97	65.92	0.53	1.22	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	3591.0	3965.4	108.60	30.72	72.58	0.59	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	4414.1	4689.6	38.79	7.86	21.09	0.71	0.94	SERENO
28	4832.3	4747.9	6.42	2.00	3.19	0.77	1.02	SERENO
29	3818.2	3876.9	70.23	21.11	44.14	0.60	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 16.

Giorni Marzo	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	1092.5	974.8	39.62	42.68	87.04	0.17	1.12	NUVOLOSO
2	1198.7	1743.6	77.35	77.11	154.85	0.19	0.69	NUVOLOSO
3	2492.1	3547.6	105.68	55.30	101.77	0.38	0.70	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	4214.9	3772.4	107.22	22.50	61.05	0.64	1.12	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	3687.9	4620.6	87.51	31.09	56.95	0.55	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	3343.6	2460.5	166.42	64.30	119.45	0.49	1.36	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	3992.3	2441.4	155.88	48.77	93.71	0.58	1.64	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	4878.8	5182.1	25.97	6.61	12.78	0.71	0.94	SERENO
9	3562.1	3586.0	70.53	27.24	47.52	0.51	0.99	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	4800.6	4029.4	99.94	22.49	49.96	0.68	1.19	SERENO
11	5112.3	5273.1	10.22	3.14	4.80	0.72	0.97	SERENO
12	3893.5	5121.5	110.46	40.52	68.09	0.54	0.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	1699.5	4872.2	215.29	186.69	304.04	0.23	0.35	NUVOLOSO
14	961.4	2100.3	111.11	132.49	277.35	0.13	0.46	NUVOLOSO
15	5214.0	5516.7	38.26	6.07	17.61	0.70	0.95	SERENO
16	5419.0	5576.1	9.47	2.90	4.20	0.72	0.97	SERENO
17	3762.1	5150.2	105.92	37.71	67.57	0.50	0.73	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	5442.4	5215.9	42.14	8.09	18.58	0.71	1.04	SERENO
19	5556.5	5753.0	12.63	3.54	5.46	0.72	0.97	SERENO
20	5515.1	5811.4	23.50	6.41	10.23	0.71	0.95	SERENO
21	4777.0	5840.1	79.32	22.26	39.85	0.61	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	4534.1	3376.9	204.69	57.25	108.34	0.57	1.34	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	6221.5	5953.3	21.65	5.20	8.35	0.78	1.05	SERENO
24	6161.5	6009.4	10.58	2.60	4.12	0.76	1.03	SERENO
25	5705.3	5902.0	38.62	8.72	16.24	0.70	0.97	SERENO
26	1547.5	1139.1	47.10	35.53	73.04	0.19	1.36	NUVOLOSO
27	3657.3	3290.8	120.74	43.14	79.23	0.44	1.11	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	3413.3	3247.0	167.69	64.75	117.91	0.41	1.05	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	5400.6	5614.8	102.28	21.95	45.45	0.64	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	5408.5	6336.6	75.13	17.32	33.34	0.64	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	5297.9	4583.4	128.90	25.83	58.39	0.62	1.16	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 17.

Giorni Aprile	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	6684.9	6368.3	18.88	4.74	6.78	0.78	1.05	SERENO
2	6309.8	5396.7	95.39	14.47	36.28	0.73	1.17	SERENO
3	6571.9	6477.1	6.66	1.47	2.43	0.75	1.01	SERENO
4	6595.1	6531.0	4.94	1.07	1.80	0.75	1.01	SERENO
5	6276.1	6502.6	26.81	5.17	10.25	0.71	0.97	SERENO
6	6338.8	6637.5	20.77	4.82	7.86	0.71	0.96	SERENO
7	6554.4	6690.0	8.93	2.15	3.27	0.73	0.98	SERENO
8	6452.1	6741.9	17.83	4.49	6.63	0.71	0.96	SERENO
9	6691.2	6793.3	7.45	1.66	2.67	0.73	0.98	SERENO
10	6817.4	6844.1	2.62	0.54	0.92	0.74	1.00	SERENO
11	6820.6	6900.3	5.84	1.36	2.05	0.73	0.99	SERENO
12	6631.0	6949.8	20.60	4.81	7.45	0.71	0.95	SERENO
13	5190.6	6030.7	93.45	23.52	43.21	0.55	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	1606.4	2353.3	87.12	62.48	130.16	0.17	0.68	NUVOLOSO
15	7400.9	7094.4	19.33	4.14	6.27	0.78	1.04	SERENO
16	6832.5	6320.3	53.73	8.61	18.87	0.71	1.08	SERENO
17	6591.4	7000.3	40.06	8.05	14.59	0.68	0.94	SERENO
18	4963.3	6499.5	129.62	35.28	62.68	0.51	0.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	3922.0	5296.6	140.51	50.54	85.98	0.40	0.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	1154.8	1326.2	30.19	33.09	62.74	0.12	0.87	NUVOLOSO
21	2552.5	2504.7	130.42	55.12	122.63	0.26	1.02	NUVOLOSO
22	1552.3	1275.9	26.02	22.90	40.23	0.16	1.22	NUVOLOSO
23	5931.4	4691.1	221.46	41.26	89.61	0.59	1.26	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	7045.7	7213.9	45.49	5.76	15.50	0.70	0.98	SERENO
25	7217.8	7252.4	32.36	6.14	10.76	0.72	1.00	SERENO
26	7583.3	7137.2	43.31	6.40	13.71	0.75	1.06	SERENO
27	7550.8	7327.3	16.36	3.51	5.20	0.74	1.03	SERENO
28	4406.8	3780.4	114.01	38.09	62.09	0.43	1.17	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	5829.4	5775.3	134.91	31.79	55.54	0.57	1.01	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	6532.3	6263.3	54.22	11.16	19.92	0.63	1.04	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 18.

Giorni Maggio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	5081.3	3293.3	118.19	35.19	55.82	0.49	1.54	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	6366.1	4655.9	162.52	27.66	61.27	0.61	1.37	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	7573.8	7746.8	37.19	6.58	11.78	0.72	0.98	SERENO
4	7960.9	7955.7	2.76	0.57	0.83	0.76	1.00	SERENO
5	6701.5	7045.8	54.01	12.12	19.34	0.63	0.95	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	6137.3	7725.9	155.46	33.19	60.79	0.58	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	8225.8	8064.7	10.04	2.10	2.93	0.77	1.02	SERENO
8	7724.4	7010.6	106.61	13.96	33.12	0.72	1.10	SERENO
9	7209.5	8133.7	76.40	13.46	25.43	0.67	0.89	SERENO
10	6413.1	8086.9	114.87	26.10	42.99	0.60	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	7493.3	7805.3	49.70	6.78	15.92	0.69	0.96	SERENO
12	5705.7	7387.0	147.87	32.52	62.20	0.53	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	5158.7	6779.5	105.79	31.88	49.22	0.47	0.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	5084.9	6450.2	126.45	32.71	59.68	0.46	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	7512.9	7725.5	55.79	10.87	17.82	0.68	0.97	SERENO
16	2756.8	2813.3	33.30	19.83	28.99	0.25	0.98	NUVOLOSO
17	5732.4	5679.7	73.50	18.69	30.77	0.52	1.01	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	4170.5	6805.3	184.87	64.55	106.39	0.38	0.61	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	6953.7	7016.3	112.92	24.09	38.97	0.63	0.99	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	6628.8	4008.1	276.78	50.73	100.21	0.59	1.65	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	8316.6	8104.6	14.67	2.95	4.23	0.74	1.03	SERENO
22	8191.4	7955.1	24.37	4.48	7.14	0.73	1.03	SERENO
23	8098.1	8150.0	7.80	1.06	2.31	0.72	0.99	SERENO
24	7829.6	8119.5	22.99	3.88	7.05	0.69	0.96	SERENO
25	7877.1	7484.6	46.84	7.18	14.27	0.70	1.05	SERENO
26	8121.7	7666.3	111.37	12.33	32.91	0.72	1.06	SERENO
27	8394.0	8231.2	32.86	6.07	9.40	0.74	1.02	SERENO
28	7582.8	7059.0	47.71	8.55	15.10	0.67	1.07	SERENO
29	2354.8	5695.2	287.56	152.78	293.08	0.21	0.41	NUVOLOSO
30	4485.6	6024.8	154.62	48.85	82.73	0.39	0.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	7307.3	7632.0	168.64	24.91	55.39	0.64	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 19.

Giorni Giugno	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	8131.4	8185.3	53.96	7.85	15.93	0.71	0.99	SERENO
2	7883.9	7710.9	52.35	9.79	15.94	0.69	1.02	SERENO
3	8205.8	8211.6	22.84	4.16	6.68	0.71	1.00	SERENO
4	5867.6	7736.5	130.16	32.51	53.24	0.51	0.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	5720.1	6927.7	104.29	24.55	43.76	0.50	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	8438.6	8245.2	19.77	3.52	5.62	0.73	1.02	SERENO
7	5967.2	6984.8	105.55	24.41	42.45	0.52	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	6585.9	7725.4	92.16	18.03	33.58	0.57	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	6697.9	8116.4	124.22	21.22	44.51	0.58	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	5783.1	7202.0	134.81	33.91	55.95	0.50	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	3854.7	6202.9	209.99	69.79	130.74	0.33	0.62	NUVOLOSO
12	8350.5	8299.1	13.21	2.39	3.80	0.72	1.01	SERENO
13	6113.2	7310.9	108.70	24.00	42.67	0.53	0.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	7891.2	8141.5	50.41	7.85	15.33	0.68	0.97	SERENO
15	7637.3	6993.2	99.38	16.96	31.23	0.66	1.09	SERENO
16	6544.8	6977.0	136.22	29.24	49.95	0.56	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	7037.8	8317.9	101.35	19.38	34.56	0.60	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7895.5	7889.7	59.64	9.96	18.13	0.68	1.00	SERENO
19	6246.1	7587.2	115.06	22.16	44.21	0.54	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	8547.3	8320.3	24.09	4.91	6.76	0.73	1.03	SERENO
21	7024.1	6263.7	118.40	17.26	40.46	0.60	1.12	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	8507.8	8311.2	13.96	2.81	3.94	0.73	1.02	SERENO
23	8426.2	8308.9	9.21	1.89	2.62	0.72	1.01	SERENO
24	8194.0	8305.8	35.74	3.52	10.47	0.70	0.99	SERENO
25	8301.9	8302.0	6.15	1.27	1.78	0.71	1.00	SERENO
26	8064.4	8297.4	40.60	3.80	12.08	0.69	0.97	SERENO
27	8314.1	8292.1	9.60	1.68	2.77	0.72	1.00	SERENO
28	8329.7	8286.1	5.80	1.21	1.67	0.72	1.01	SERENO
29	8315.8	8261.2	5.79	1.21	1.67	0.72	1.01	SERENO
30	8196.4	8271.8	11.26	1.78	3.30	0.71	0.99	SERENO

Tab. 20.

Giorni Luglio	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	8201.7	8251.3	10.39	1.97	3.04	0.71	0.99	SERENO
2	7932.9	8242.3	23.12	3.90	6.99	0.69	0.96	SERENO
3	8008.2	8232.5	20.86	3.66	6.25	0.69	0.97	SERENO
4	4129.5	7044.4	255.1	71.05	148.28	0.36	0.59	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	8531.8	8210.7	22.66	4.31	6.37	0.74	1.04	SERENO
6	8384.1	8198.6	14.23	2.80	4.07	0.73	1.02	SERENO
7	7953.2	8071.2	25.78	4.31	7.78	0.69	0.99	SERENO
8	8171.4	8172.4	5.55	1.06	1.63	0.71	1.00	SERENO
9	8179.5	8158.1	11.45	1.88	3.36	0.71	1.00	SERENO
10	8181.2	8143.2	7.53	1.42	2.21	0.71	1.00	SERENO
11	7898.9	8100.1	12.41	2.55	3.77	0.69	0.98	SERENO
12	7961.4	8080.8	8.77	1.52	2.64	0.70	0.99	SERENO
13	7501.8	6745.9	125.42	19.00	40.12	0.66	1.11	SERENO
14	8324.0	8040.0	23.71	4.56	6.83	0.73	1.04	SERENO
15	7094.7	7260.6	48.08	8.21	16.27	0.63	0.98	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	6926.9	7208.0	107.78	18.22	37.34	0.61	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	6148.6	6782.7	61.28	11.98	23.92	0.55	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7426.4	6390.1	132.25	21.82	42.74	0.66	1.16	SERENO
19	8339.8	7911.0	28.96	5.72	8.33	0.74	1.05	SERENO
20	8094.3	7900.6	12.22	2.51	3.62	0.72	1.02	SERENO
21	7902.2	7868.3	20.33	3.25	6.17	0.71	1.00	SERENO
22	7817.9	7846.3	16.63	2.52	5.10	0.70	1.00	SERENO
23	7729.9	7823.7	6.99	1.31	2.17	0.70	0.99	SERENO
24	7748.6	7800.3	8.42	1.55	2.61	0.70	0.99	SERENO
25	7955.2	7776.3	22.25	4.54	6.71	0.72	1.02	SERENO
26	7655.2	7751.5	22.49	3.37	7.05	0.70	0.99	SERENO
27	7787.8	7726.1	8.15	1.59	2.51	0.71	1.01	SERENO
28	7687.5	7699.9	7.14	1.49	2.23	0.70	1.00	SERENO
29	7415.4	7673.1	14.27	3.48	4.62	0.68	0.97	SERENO
30	7528.2	7645.5	9.69	2.00	3.09	0.69	0.98	SERENO
31	7456.3	7617.2	9.68	2.24	3.12	0.69	0.98	SERENO

Tab. 21.

Giorni Agosto	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	7443.7	7459.2	7.09	1.54	2.29	0.69	1.00	SERENO
2	7371.6	7605.0	13.74	3.20	4.47	0.69	0.97	SERENO
3	6177.1	6463.6	52.32	10.87	20.33	0.58	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	6913.0	6978.7	86.48	11.20	30.02	0.65	0.99	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	6177.1	6886.9	63.70	14.47	24.75	0.58	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	7598.5	6632.3	82.57	13.03	26.08	0.72	1.15	SERENO
7	5719.9	6557.1	89.88	16.29	37.71	0.54	0.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	6853.4	7413.1	45.56	8.17	15.96	0.65	0.92	SERENO
9	7289.1	7378.8	23.02	4.54	7.58	0.70	0.99	SERENO
10	7074.9	7343.8	16.02	3.80	5.43	0.68	0.96	SERENO
11	7253.8	7308.1	22.25	4.71	7.36	0.70	0.99	SERENO
12	7130.2	7271.8	9.19	1.99	3.09	0.69	0.98	SERENO
13	6971.1	7129.0	18.89	4.10	6.50	0.68	0.98	SERENO
14	6866.4	7197.3	20.89	4.82	7.30	0.67	0.95	SERENO
15	6791.7	7159.1	72.16	8.88	25.50	0.67	0.95	SERENO
16	7073.4	7120.2	5.04	0.98	1.71	0.70	0.99	SERENO
17	6371.6	6983.7	58.76	9.76	22.13	0.63	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	5334.9	6792.4	110.96	27.82	49.92	0.53	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	7045.2	7000.4	5.69	1.20	1.94	0.71	1.01	SERENO
20	6831.4	6959.6	11.48	2.26	4.03	0.69	0.98	SERENO
21	6878.0	6738.1	10.16	2.51	3.55	0.70	1.02	SERENO
22	6766.0	6699.4	5.91	1.40	2.10	0.69	1.01	SERENO
23	6752.8	6660.0	7.37	1.52	2.62	0.70	1.01	SERENO
24	6406.2	6620.1	29.05	5.50	10.89	0.66	0.97	SERENO
25	6631.7	6579.6	15.29	3.46	5.53	0.69	1.01	SERENO
26	6711.8	6538.6	12.60	2.86	4.50	0.70	1.03	SERENO
27	6257.3	6497.0	32.74	5.44	12.56	0.66	0.96	SERENO
28	6367.5	6454.8	20.20	3.71	7.61	0.68	0.99	SERENO
29	5255.3	6412.1	134.84	24.29	61.58	0.56	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	2620.6	3968.3	137.44	72.29	125.87	0.28	0.66	NUVOLOSO
31	774.2	2035.2	85.04	162.88	263.62	0.08	0.38	NUVOLOSO

Tab. 22.

Giorni Settembre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	6173.0	6576.4	31.82	7.02	12.37	0.67	0.94	SERENO
2	5035.2	5526.4	84.06	24.33	40.07	0.55	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	6489.4	6244.1	41.13	7.22	15.21	0.72	1.04	SERENO
4	6414.5	6431.7	9.89	2.38	3.70	0.71	1.00	SERENO
5	6179.2	6382.4	19.32	3.44	7.51	0.69	0.97	SERENO
6	5799.1	6332.7	55.80	9.53	23.09	0.65	0.92	SERENO
7	6119.7	6282.4	10.57	2.66	4.14	0.69	0.97	SERENO
8	5381.5	6231.7	77.57	15.80	34.59	0.61	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	5636.2	6180.6	36.63	9.66	15.60	0.65	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	4833.8	5826.0	82.42	22.28	40.92	0.56	0.83	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	3492.3	4850.9	141.94	42.06	97.54	0.41	0.72	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	5533.5	6020.2	43.74	9.60	18.97	0.65	0.92	SERENO
13	5568.4	5967.2	24.70	7.16	10.65	0.66	0.93	SERENO
14	5492.1	5913.8	26.49	7.68	11.58	0.66	0.93	SERENO
15	5437.6	5302.8	16.06	4.46	7.09	0.66	1.03	SERENO
16	5470.2	5365.3	58.47	13.47	25.65	0.67	1.02	SERENO
17	5402.3	5752.0	21.81	6.61	9.69	0.66	0.94	SERENO
18	5249.2	5419.4	29.59	8.60	13.53	0.65	0.97	SERENO
19	4696.3	5487.9	52.27	17.32	26.71	0.59	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	4526.8	5503.5	78.45	23.67	41.59	0.57	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	3635.8	4686.5	108.51	39.60	71.63	0.46	0.78	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	3821.6	4535.1	82.47	24.64	51.79	0.49	0.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	3025.3	3337.9	93.62	40.90	74.27	0.39	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	3213.2	3306.9	80.45	33.91	60.09	0.42	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	3666.7	3467.0	91.98	31.72	60.20	0.48	1.06	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	2368.9	4658.4	186.63	103.30	189.08	0.32	0.51	NUVOLOSO
27	573.8	1241.1	47.14	116.29	197.15	0.08	0.46	NUVOLOSO
28	2151.6	3067.0	117.58	65.18	131.16	0.29	0.70	NUVOLOSO
29	4958.2	5249.6	26.67	6.46	12.91	0.68	0.94	SERENO
30	3682.6	4754.9	98.09	32.44	63.93	0.51	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 23.

Giorni Ottobre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	4462.9	4978.8	65.68	13.05	35.32	0.62	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	2548.1	4379.8	129.98	71.88	122.42	0.36	0.58	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	1851.2	2966.9	99.68	61.10	129.23	0.26	0.62	NUVOLOSO
4	2057.0	3939.4	137.49	91.51	160.41	0.30	0.52	NUVOLOSO
5	4319.5	4790.9	58.39	13.97	32.44	0.63	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	4392.5	4596.7	28.09	6.90	15.35	0.64	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	2763.9	4278.7	131.09	54.81	113.84	0.41	0.65	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	4714.1	4633.8	10.99	3.12	5.60	0.70	1.02	SERENO
9	4484.0	4581.4	16.27	3.88	8.71	0.68	0.98	SERENO
10	4205.5	4529.0	36.27	8.86	20.70	0.64	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	1617.6	3182.9	113.84	96.77	168.91	0.25	0.51	NUVOLOSO
12	2977.6	1747.7	121.77	43.52	98.15	0.46	1.70	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	3852.8	4317.9	60.99	15.67	37.99	0.61	0.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	2145.0	2850.3	80.61	46.99	90.20	0.34	0.75	NUVOLOSO
15	3524.1	3639.9	61.71	21.80	42.03	0.57	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	2537.7	3205.9	60.54	31.35	57.26	0.41	0.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	3735.4	3882.0	53.38	18.99	34.29	0.61	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	4113.4	4063.4	7.24	2.57	4.22	0.68	1.01	SERENO
19	3873.8	4013.1	25.21	5.19	15.62	0.65	0.97	SERENO
20	3862.1	3963.0	13.58	4.05	8.44	0.66	0.97	SERENO
21	3652.5	3922.7	45.50	11.26	29.90	0.63	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	3578.2	3873.0	35.77	10.17	23.99	0.62	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	1962.4	2842.7	61.74	44.86	75.51	0.35	0.69	NUVOLOSO
24	1767.3	2266.4	53.63	36.09	72.83	0.32	0.78	NUVOLOSO
25	2805.1	3124.5	46.34	19.17	39.65	0.51	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	1866.1	2622.9	72.04	45.50	92.66	0.34	0.71	NUVOLOSO
27	2808.8	3629.9	62.75	29.76	53.62	0.52	0.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	3584.3	3582.5	15.47	4.90	10.36	0.67	1.00	SERENO
29	3111.8	3401.8	28.35	11.83	21.86	0.59	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	2934.7	3153.5	38.22	17.11	31.26	0.56	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	3118.0	3443.6	51.89	12.88	39.94	0.61	0.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 24.

Giorni Novembre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	2857.4	2664.1	38.23	17.30	32.11	0.56	1.07	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	1802.5	3276.9	115.59	81.80	153.90	0.36	0.55	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	2896.2	3356.1	40.72	15.88	33.74	0.58	0.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	964.8	1658.1	52.76	71.85	131.24	0.20	0.58	NUVOLOSO
5	1480.9	1638.4	26.92	23.26	43.62	0.31	0.90	NUVOLOSO
6	3085.6	3170.9	11.74	5.43	9.13	0.65	0.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	2997.3	3199.5	13.97	6.74	11.18	0.63	0.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	2925.8	3161.6	20.59	8.06	16.89	0.63	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	2897.9	3124.3	16.52	7.81	13.68	0.63	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	2867.1	3087.6	18.38	8.47	15.39	0.63	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	2454.6	2887.9	40.74	18.72	39.84	0.54	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	2221.1	1508.4	66.27	33.59	71.61	0.50	1.47	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	2488.9	2818.1	36.03	17.25	34.74	0.56	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	1418.3	2149.7	58.14	51.57	98.38	0.32	0.66	NUVOLOSO
15	1810.7	1792.7	32.02	19.41	42.44	0.42	1.01	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	497.0	576.2	18.34	49.56	88.55	0.12	0.86	NUVOLOSO
17	2408.1	2833.1	41.20	17.65	41.07	0.57	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	2694.7	2817.4	8.61	4.55	7.66	0.64	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	2634.7	2786.8	11.61	5.77	10.58	0.63	0.95	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	659.1	482.7	29.45	52.27	107.24	0.16	1.37	NUVOLOSO
21	2687.0	2842.4	10.79	5.79	9.63	0.66	0.95	SERENO
22	2626.6	2812.9	13.78	7.09	12.59	0.65	0.93	SERENO
23	2555.1	2784.2	15.97	8.97	15.00	0.64	0.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	2413.6	2541.9	28.84	13.12	28.68	0.61	0.95	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	1936.7	2590.9	67.02	40.85	83.06	0.49	0.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	2614.0	1351.7	105.05	48.29	96.45	0.67	1.93	SERENO
27	1796.8	2121.4	48.92	33.13	65.34	0.47	0.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	1371.7	878.6	52.61	36.82	92.06	0.36	1.56	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	1467.8	2010.0	50.53	36.94	82.62	0.39	0.73	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	2346.5	2608.2	18.15	11.15	18.56	0.62	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 25.

Giorni Dicembre	Energia giornaliera misurata [Wh/m2]	Energia giornaliera prevista 24h [Wh/m2]	RMSE	nMAE%	RMSE%	KT mis	Energia giornaliera misurata / Energia giornaliera prevista 24h	
1	1080.4	1819.4	73.25	76.27	162.72	0.29	0.59	NUVOLOSO
2	473.6	327.8	15.90	36.92	80.55	0.13	1.44	NUVOLOSO
3	1656.9	1624.8	69.34	47.50	100.44	0.45	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	1160.4	689.8	38.72	40.55	80.09	0.32	1.68	NUVOLOSO
5	1028.8	456.4	47.14	55.64	109.97	0.28	2.25	NUVOLOSO
6	393.4	669.0	33.44	84.02	204.02	0.11	0.59	NUVOLOSO
7	1540.4	1185.4	47.90	37.48	74.63	0.43	1.30	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	605.0	555.9	22.40	40.77	88.86	0.17	1.09	NUVOLOSO
9	1131.7	1034.7	41.12	41.81	87.20	0.32	1.09	NUVOLOSO
10	1174.9	1628.0	52.99	42.56	108.26	0.33	0.72	NUVOLOSO
11	2185.6	1201.0	80.00	45.05	87.85	0.62	1.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	1330.3	792.3	58.68	42.91	105.85	0.38	1.68	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	2269.4	2394.1	9.52	5.50	10.07	0.65	0.95	SERENO
14	2296.8	2385.5	7.71	3.86	8.06	0.66	0.96	SERENO
15	1337.0	1636.6	35.02	32.98	62.87	0.39	0.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	2137.2	2089.0	18.27	10.22	20.52	0.62	1.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	2021.1	1401.9	53.69	30.96	63.76	0.59	1.44	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	2117.5	2361.8	17.06	11.53	19.34	0.62	0.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	1045.1	2130.8	85.91	103.88	197.29	0.30	0.49	NUVOLOSO
20	1785.4	2057.8	34.88	16.08	46.88	0.52	0.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	2070.3	2348.7	20.02	13.45	23.21	0.60	0.88	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	1636.9	1758.8	55.89	39.37	81.94	0.48	0.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	1490.3	1174.9	35.54	27.50	57.24	0.43	1.27	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	1269.0	414.9	69.48	67.31	131.40	0.37	3.06	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	1082.3	1826.9	59.29	68.80	131.48	0.32	0.59	NUVOLOSO
26	1273.5	1599.7	46.69	37.40	87.99	0.37	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	2221.2	2305.5	8.43	4.92	9.11	0.64	0.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	243.5	325.4	16.53	76.00	162.93	0.07	0.75	NUVOLOSO
29	2140.1	969.4	100.31	55.73	112.49	0.62	2.21	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	1188.4	566.5	50.98	52.33	102.95	0.34	2.10	NUVOLOSO
31	1917.9	2396.4	46.58	25.26	58.29	0.55	0.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO

Tab. 26.

	Energia Mensile Misurata [Wh/m2]	Energia Mensile Prevista 24h [Wh/m2]	Energia Mensile Misurata / Energia Mensile Prevista 24h	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni [Wh/m2]	Energia Mensile Prevista 24h Giorni Sereni [Wh/m2]	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni / Energia Mensile Prevista 24h Giorni Sereni
Gennaio	65314.87	67673.41	0.97	38084.31	38126.42	1.00
Febbraio	92721.71	97803.39	0.95	58548.01	59752.52	0.98
Marzo	127963.85	134042.59	0.95	60026.96	60222.39	1.00
Aprile	172607.55	173975.49	0.99	128965.64	128178.56	1.01
Maggio	205150.57	214311.90	0.96	118111.99	117212.71	1.01
Giugno	221074.28	233985.68	0.94	147631.84	146633.32	1.01
Luglio	238074.52	240372.61	0.99	213774.81	212076.94	1.01
Agosto	197709.01	206843.20	0.96	152365.34	153765.31	0.99
Settembre	140027.94	155901.77	0.90	80286.24	83240.02	0.96
Ottobre	99227.48	114404.86	0.87	24631.71	24837.24	0.99
Novembre	65878.69	71532.59	0.92	7927.49	7007.01	1.13
Dicembre	45304.37	44128.88	1.03	4566.15	4779.66	0.96
Anno 2020	1671054.83	1754976.37	0.95	1034920.50	1035832.10	1.00

Tab. 27.

y=mx+q	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Anno
m	0.967	1	0.967	0.971	0.965	0.987	0.971	1	1.013	1.035	1.026	0.883	0.988
q	6.016	6.25	13.795	8.796	21.809	21.718	12.232	11.723	19.472	15.686	5.401	5.5	11.685
R2	0.911	0.924	0.848	0.94	0.877	0.942	0.968	0.97	0.934	0.905	0.922	0.802	0.932
Sereni	15	15	11	19	15	18	27	22	14	6	3	2	167
m	0.999	1.011	0.99	0.988	0.978	0.99	0.975	0.998	1.014	0.993	0.851	1.02	0.988
q	0.216	1.535	2.818	1.64	4.764	1.175	5.66	3.142	5.362	2.6	3.6	2.61	3.15
R2	0.995	0.992	0.982	0.989	0.977	0.988	0.988	0.992	0.99	0.995	0.876	0.998	0.988
Parzialmente Nuvolosi	11	10	15	7	14	11	4	7	13	18	22	17	149
m	0.914	1	0.942	0.938	0.972	1.018	0.97	1.056	1.038	1.035	1.05	0.84	1
q	3.858	4.9	14.192	22.734	26.571	38.837	49.455	16.384	22.261	12.413	4.666	4.9	12.6
R2	0.894	0.861	0.759	0.8	0.784	0.896	0.81	0.934	0.9	0.908	0.94	0.822	0.864
Nuvolosi	5	4	5	4	2	1	0	2	3	7	5	12	50
m	1.189	1.23	1.457	0.686	0.935	0.923		0.9762	1.062	1.335	1.242	1	1.128
q	20.026	15.374	11.326	28.62	77.642	110		56	49.377	17.618	2.217	4.961	20.296
R2	0.51	0.507	0.56	0.541	0.34	0.487		0.582	0.592	0.824	0.864	0.654	0.6

Tab. 28.

3.6.2 Previsioni a 48 ore

Per le previsioni a 48 ore si riportano solo le tabelle riassuntive e i confronti con quelle a 24 ore.

3.6.2.1 Modello WRF-ARW

	Energia Mensile Misurata [Wh/m2]	Energia Mensile Prevista 48h [Wh/m2]	Energia Mensile Misurata / Energia Mensile Prevista 48h	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni [Wh/m2]	Energia Mensile Prevista 48h Giorni Sereni [Wh/m2]	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni / Energia Mensile Prevista 48h Giorni Sereni
Gennaio	65314.87	73346.02	0.89	38084.31	36128.82	1.05
Febbraio	92721.71	100071.29	0.93	58548.01	56588.41	1.03
Marzo	127963.85	144454.21	0.89	60026.96	60274.27	1.00
Aprile	172607.55	191242.83	0.90	128965.64	131739.35	0.98
Maggio	205150.57	227418.48	0.90	118111.99	119789.18	0.99
Giugno	221074.28	250388.82	0.88	147631.84	154166.46	0.96
Luglio	238074.52	250839.60	0.95	213774.81	220185.00	0.97
Agosto	197709.01	210171.34	0.94	152365.34	155206.87	0.98
Settembre	140027.94	159548.44	0.88	80286.24	80408.71	1.00
Ottobre	99227.48	113589.17	0.87	24631.71	23472.46	1.05
Novembre	65878.69	73198.59	0.90	7927.49	7173.43	1.11
Dicembre	45304.37	52664.82	0.86	4566.15	4238.75	1.08
Anno 2020	1671054.83	1846933.60	0.90	1034920.50	1049371.71	0.99

Tab. 29.

y=mx+q	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Anno
m	1.0125	1	1.02	1.034	1.031	1.044	1.024	1.029	1.031	1.055	1.025	0.999	1.034
q	9.695	9.51	18.772	17.58	21.298	27.109	9.235	8.939	20.965	11.933	7.874	9.921	13.424
R2	0.861	0.917	0.87	0.926	0.885	0.914	0.965	0.957	0.9	0.881	0.89	0.802	0.922
Sereni	15	15	11	19	15	18	27	22	14	6	3	2	167
m	0.97	0.971	1.011	1.026	1.014	1.041	1.025	1.02	1	0.966	0.908	0.938	1.021
q	-2.221	-0.867	-1.584	-1.231	0.074	1.044	1.374	-0.2	-0.975	-2.291	-0.439	-0.991	-1.8
R2	0.98	0.977	0.984	0.988	0.966	0.986	0.991	0.986	0.987	0.985	0.973	0.987	0.984
Parzialmente Nuvolosi	11	10	15	7	14	11	4	7	13	18	22	17	149
m	1.095	1.102	1.047	1.134	1.1	1.098	1.059	1.111	1.107	1.056	1.024	0.97	1.098
q	6.24	5.745	19.198	25.389	15.846	42.433	51.199	20.816	23.403	7.216	3.405	5.755	11.664
R2	0.903	0.926	0.825	0.882	0.856	0.876	0.79	0.908	0.87	0.914	0.939	0.863	0.88
Nuvolosi	5	4	5	4	2	1	0	2	3	7	5	12	50
m	1.645	1.774	1.615	1.361	1.511	1.151		0.736	1.416	1.58	1.87	1.293	1.482
q	27.459	18.138	20.265	43.543	92.502	171.83		48.847	57	7.266	5.071	10.796	25.635
R2	0.561	0.708	0.573	0.527	0.53	0.348		0.446	0.65	0.817	0.792	0.674	0.621

Tab. 30.

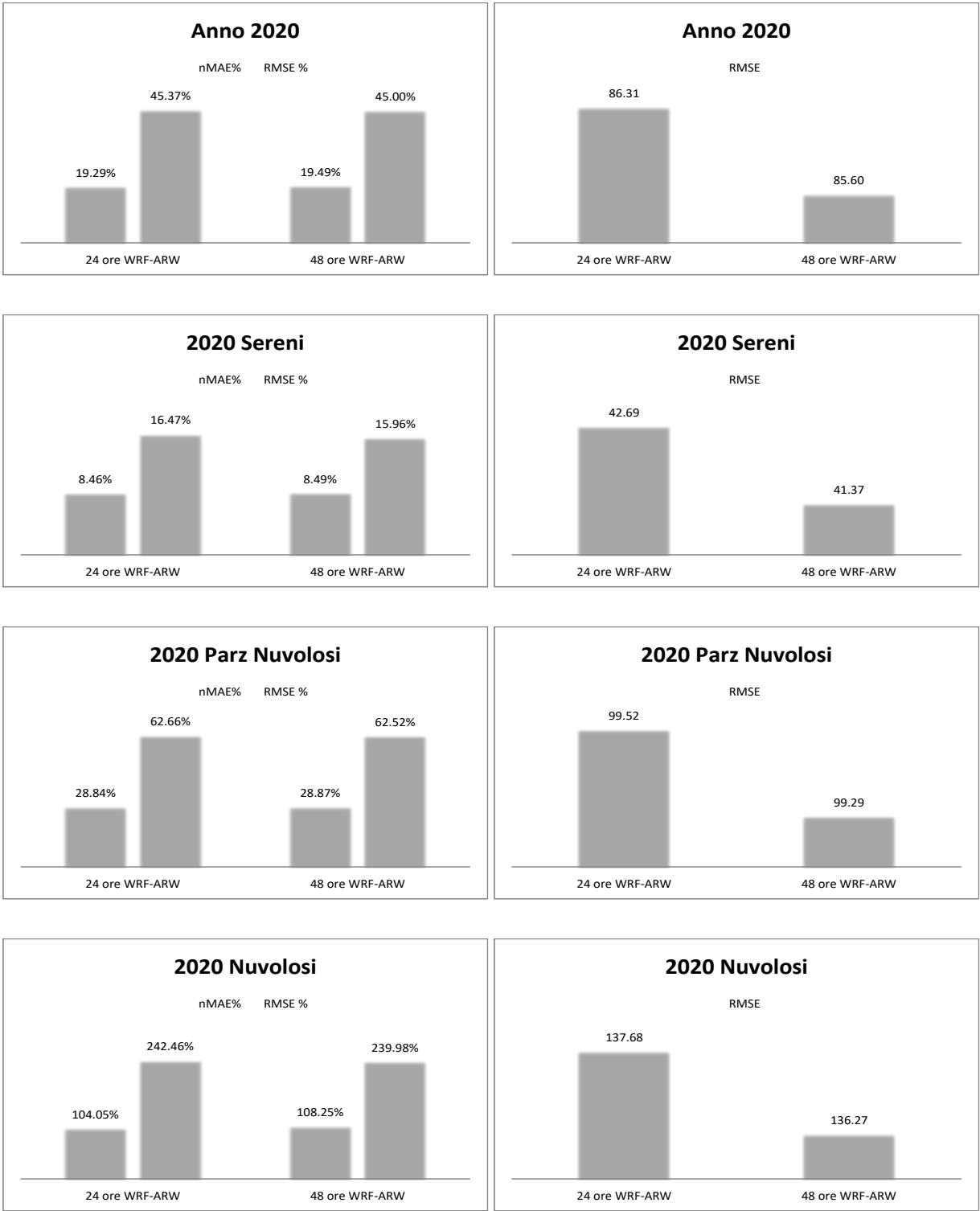


Fig. 28.

3.6.2.2 Modello ibrido ENEA-WRF

	Energia Mensile Misurata [Wh/m2]	Energia Mensile Prevista 48h [Wh/m2]	Energia Mensile Misurata / Energia Mensile Prevista 48h	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni [Wh/m2]	Energia Mensile Prevista 48h Giorni Sereni [Wh/m2]	Energia Mensile Misurata Giorni Sereni / Energia Mensile Prevista 48h Giorni Sereni
Gennaio	65314.87	69824.93	0.94	38084.31	37697.77	1.01
Febbraio	92721.71	89725.82	1.03	58548.01	58065.09	1.01
Marzo	127963.85	139177.69	0.92	60026.96	59071.87	1.02
Aprile	172607.55	175330.82	0.98	128965.64	124366.43	1.04
Maggio	205150.57	210601.28	0.97	118111.99	114921.05	1.03
Giugno	221074.28	237678.37	0.93	147631.84	146049.70	1.01
Luglio	238074.52	239885.09	0.99	213774.81	210200.50	1.02
Agosto	197709.01	205564.88	0.96	152365.34	151195.75	1.01
Settembre	140027.94	155708.45	0.90	80286.24	82342.10	0.98
Ottobre	99227.48	115116.58	0.86	24631.71	24837.24	0.99
Novembre	65878.69	71385.35	0.92	7927.49	8114.38	0.98
Dicembre	45304.37	47224.73	0.96	4566.15	4779.66	0.96
Anno 2020	1671054.83	1757223.99	0.95	1034920.50	1021641.55	1.01

Tab. 31.

y=mx+q	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Anno
m	0.985	0.942	0.969	0.96	0.938	0.993	0.972	0.978	0.987	1.034	1	0.913	0.977
q	7.32	3.423	20.321	13.471	24.287	25.191	11.282	16.4	24.17	16.782	7.284	7.846	14.087
R2	0.898	0.9	0.817	0.892	0.844	0.922	0.964	0.953	0.9	0.898	0.88	0.788	0.909
Sereni	15	15	11	19	15	18	27	22	14	6	3	2	167
m	0.993	0.979	0.964	0.952	0.962	0.986	0.972	0.98	1	0.993	0.992	1.02	0.975
q	0.386	1.96	4.588	3.25	3.554	0.987	3.48	3.7	5.2	2.6	3.484	2.61	3.152
R2	0.988	0.967	0.952	0.956	0.967	0.989	0.99	0.984	0.986	0.99	0.983	0.998	0.98
Parzialmente Nuvolosi	11	10	15	7	14	11	4	7	13	18	22	17	149
m	0.962	0.868	0.992	1	0.93	1.053	1.015	1.023	0.996	1.027	0.984	0.876	1
q	5.718	4.47	20.144	18.3	24.402	40.707	52.32	22.641	28.52	12.746	3	6.843	13.345
R2	0.856	0.776	0.744	0.8	0.743	0.887	0.798	0.914	0.842	0.917	0.918	0.788	0.84
Nuvolosi	5	4	5	4	2	1	0	2	3	7	5	12	50
m	1.47	0.719	1.33	1.36	1.174	1.041		1.165	1.01	1.416	1.86	1.036	1.3
q	18	15.921	26.787	16	110.13	147.83		76.976	67.741	17.7	2	7.86	24.116
R2	0.678	0.512	0.471	0.567	0.391	0.356		0.57	0.457	0.8	0.81	0.681	0.582

Tab. 32.

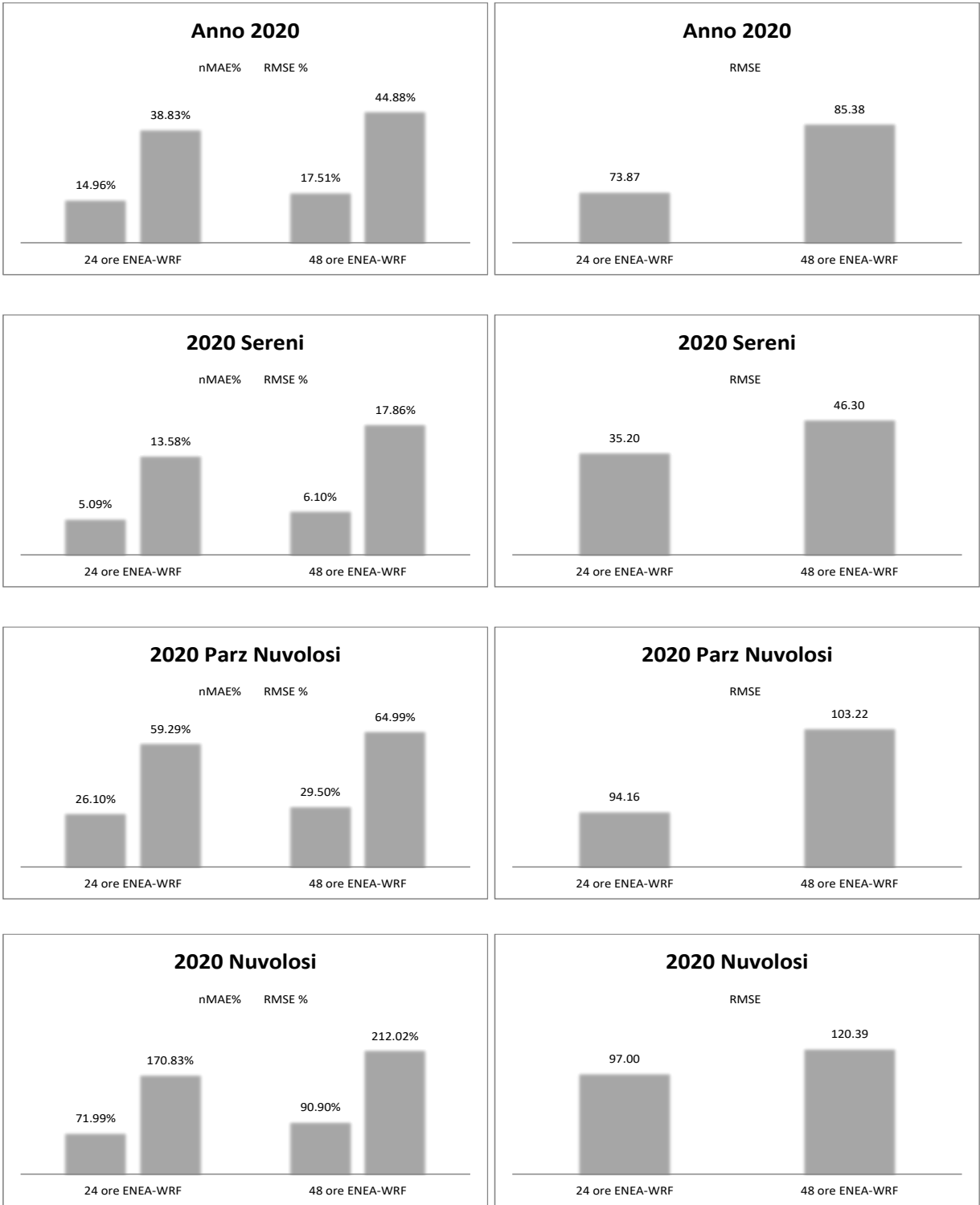


Fig. 29.

3.6.3 Confronto dei due modelli

Il confronto tra i due modelli è schematizzato nei grafici seguenti:

3.6.3.1 Previsioni a 24 ore

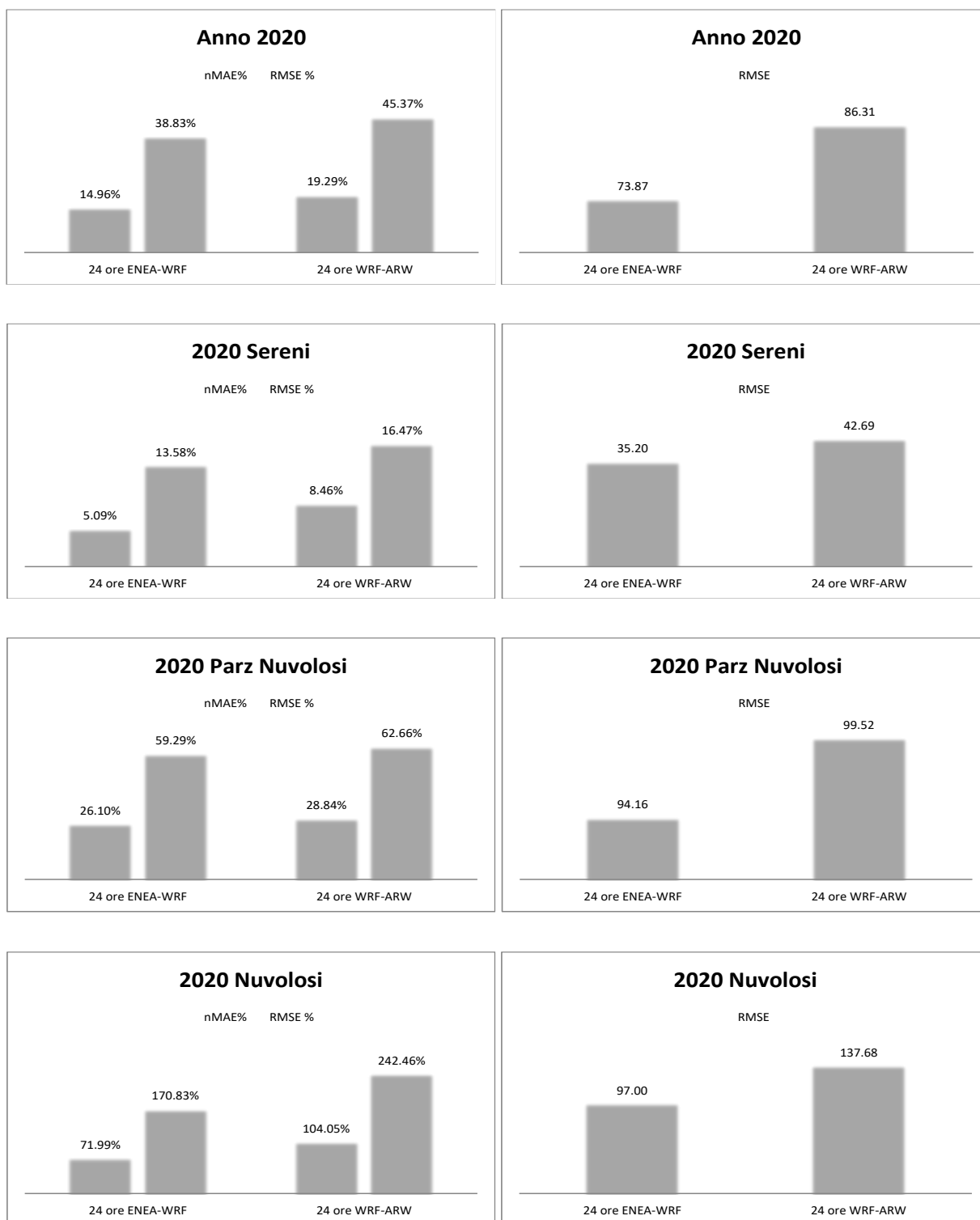


Fig. 30.

3.6.3.2 Previsioni a 48 ore

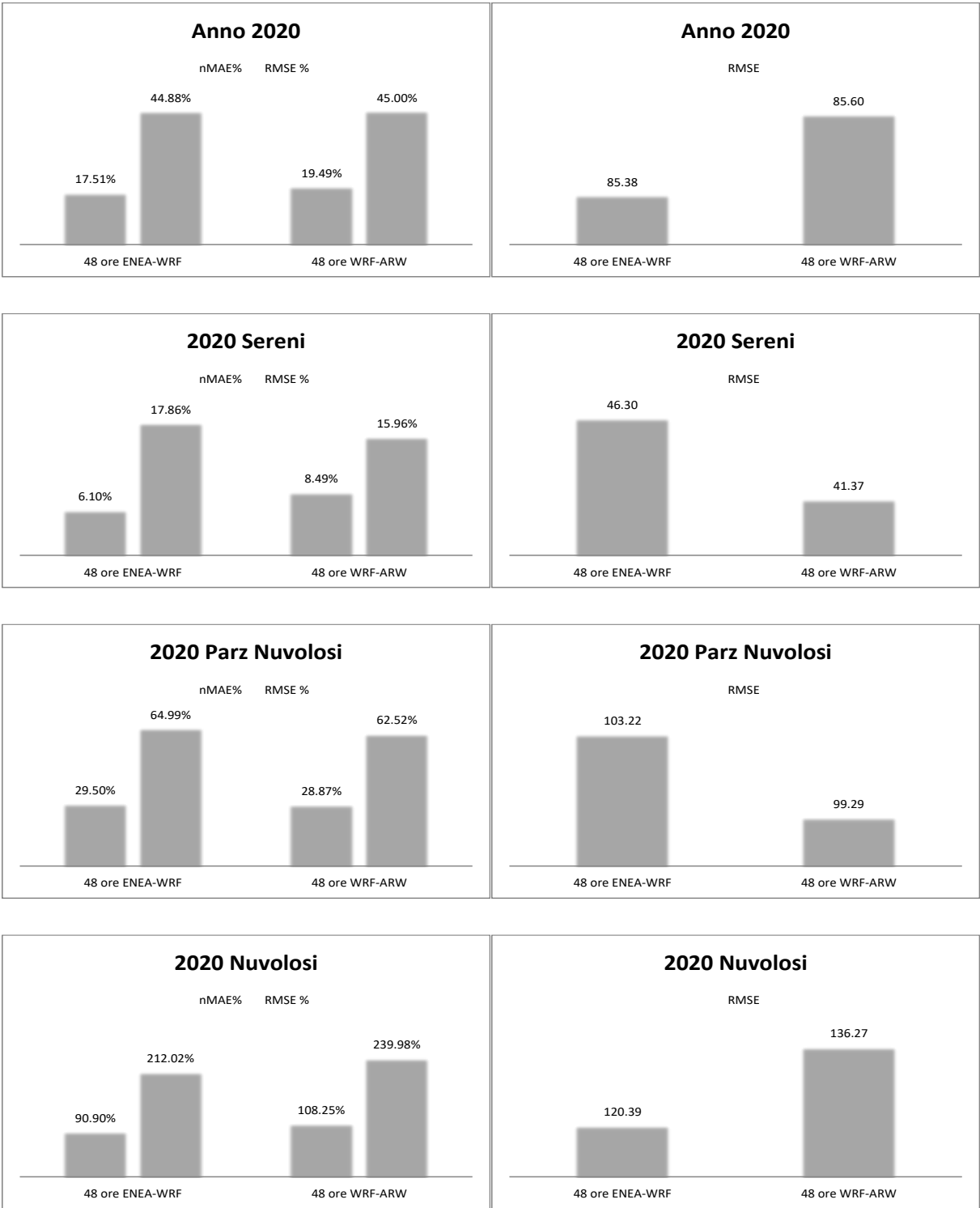


Fig. 31.

4 Conclusioni

4.1 Sezione A

Obiiettivo dello studio svolto è stato quello di mettere a confronto i GG attualmente definiti per i Comuni italiani dal DPR 412/93, con quelli ottenuti dai dati climatici della UNI 10349, utilizzati nelle analisi energetiche degli edifici.

Preliminarmente sono state confrontati i GG di riferimento per le 98 province italiane, presenti in entrambi i data set, evidenziandone le differenze sul piano statistico. Successivamente l'analisi comparativa è stata estesa alla totalità delle circa 8100 località ed è stata analizzata la differente distribuzione in classi climatiche rispetto a quella attuale.

Per il calcolo dei GG si è fatto riferimento alla metodologia prevista dalla Norma UNI 10349 a partire dai dati orari di temperatura di 110 stazioni di misura. Per l'estensione della metodologia ci si è riferiti ad un algoritmo di calcolo semplificato che ha consentito la valutazione dei Gradi Giorno delle località esaminate con scostamenti medi esigui rispetto ($<1\%$) al calcolo esatto.

Dai risultati ottenuti, emerge che nessuna delle località esaminate risulterebbe inclusa nelle due zone più calde, la A e la B. La zona C diminuirebbe percentualmente di circa il 10%, le due classi centrali, D ed E arriverebbero a coprire circa l'88% delle località, mentre la fascia F, più fredda, risulterebbe leggermente ridotta del 3,5%.

È importante sottolineare che, i risultati ottenuti non dipendono soltanto da differenze strettamente climatiche riscontrate nell'analisi delle misure aggiornate, ma anche dai differenti criteri adottati nell'elaborazione dei dati, nonché da alcune anomalie dovute probabilmente ad una selezione non ottimale delle stazioni di misura dei dati climatici delle Norme UNI 10349.

In una ipotesi di aggiornamento dell'attuale zonizzazione delle classi climatiche invernali, basate sui Gradi Giorno del DPR 412/93, con i dati climatici delle attuali Norme UNI 10349 sarebbe opportuna una revisione dei dati di misura e dei criteri di estensione previsti dalla stessa Norma.

4.2 Sezione B

In questo lavoro abbiamo presentato la capacità del modello WRF di prevedere la radiazione solare. Abbiamo confrontato due strade di previsione della radiazione utilizzando il modello WRF. Una è quella di prendere tal quale il valore della radiazione elaborata dal modello WRF-ARW e l'altra è quella di prendere come output dal modello WRF la copertura nuvolosa e la piovosità e da queste due variabili calcolare il fattore K_c (indice di serenità) che va ad attenuare il valore della radiazione a cielo sereno della località studiata. Dal confronto dei risultati ottenuti dai due modelli risulta che la seconda strada dà migliori risultati soprattutto per le previsioni a 24 ore. In assoluto i due modelli hanno mostrato ottimi risultati per le giornate serene, giornate con maggiore radiazione e quindi con maggiore produttività energetica. Per le giornate parzialmente nuvolose e nuvolose l'errore aumenta notevolmente per il dato orario ma come energia giornaliera dà sempre risultati molto soddisfacenti.

Il lavoro proseguirà nel migliorare il modello ibrido ENEA-WRF per le giornate non serene anche se si è vincolati nella bontà del modello meteorologico che ci fornisce i valori di copertura nuvolosa e di piovosità.

5 Riferimenti bibliografici

5.1 Sezione A

- [1] DPR 26 agosto 1993, n. 412 "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10"
- [2] Decreto interministeriale 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici"
- [3] Legge 23 dicembre 1998, n. 448 "Misure di finanza pubblica per la stabilizzazione e lo sviluppo"
- [4] UNI 10349-1:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata".
- [5] UNI/TR 10349-2:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 2: Dati di progetto".
- [6] UNI 10349-3:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici".
- [7] EN ISO 15927-4:2005 "Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling"
- [8] UNI EN ISO 15927-6:2008 "Prestazione termoigrometrica degli edifici - Calcolo e presentazione dei dati climatici - Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)"
- [9] Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030. MISE-MATTM-MIT (2019)
- [10] MATLAB Statistics and machine learning-URL:
https://www.mathworks.com/help/stats/index.html?s_tid=CRUX_lftnav
- [11] Richard M. Heiberger, Burt Holland, "Statistical Analysis and Data Display", Springer 2015
- [12] Ersan Z.G, Zontul M., Yelmen I., "Map matching with kalman filter and location estimation" Cumhuriyet Sci. J., 41(1) (2020) 43-48
- [13] Terrinoni L., Signoretti P., Iatauro D., Integrazione dell'indice di severità climatica ENEA nella nuova norma UNI10349 3 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Differenze di temperature cumulate (gradi giorno e altri indici sintetici). Report di Ricerca di Sistema RdS/2013/154. 2013

5.2 Sezione B

- [1] F. Spinelli, A. Benedetti, E.G. Cogliani, R. Siviero, "Definizione di una procedura per la caratterizzazione meteorologica di un sito per la localizzazione di un impianto solare a concentrazione", ENEA DTE/STT/2012/02
- [2] F. Spinelli, E.G. Cogliani, A. Maccari, M. Milone, "La misure e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare per la pubblicazione dei dati", ENEA, SOL/RS/2007/21
- [3] P.M. Jimenez, J.P.Hacker, J.Dudhia, S.E.Haupt, J.A.Ruiz-Arias, C.A.Gueymard, G.Thompson, T.Eidhammer and A. Deng, "WRF-SOLAR, Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power Prediction", American Meteorological Society, doi:10.1175/BAMS-D-14-00279.1 (2016)
- [4] WRF-ARW, Users guide v3.9, <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>, doi:10.5065/D6MK6B4K
- [5] NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- [6] NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration

6 Abbreviazioni ed acronimi

I_{sc}	-	Costante solare
$\dot{I}$	-	Irradianza solare globale
$\dot{I}_0$	-	Radianza globale extraatmosferica
$\dot{I}_b$	-	Irradianza solare diretta
$\dot{I}_d$	-	Irradianza solare diffusa
$\dot{I}_{bn}$	-	Irradianza diretta sul piano normale
$\cos \vartheta_z$	-	Angolo d'incidenza per la giacitura orizzontale
K_T	-	Coefficiente di trasmissione globale dell'atmosfera
K_c	-	Coefficiente di trasmissione globale alla presenza delle nubi
K_{Tc}	-	Coefficiente di trasmissione globale al cielo sereno
B	-	l'attenuazione complessiva
GHI	–	Irradianza globale orizzontale
GG	–	Gradi giorno
HDD	–	Heating Degree Days
NWP	–	Modelli numerici di previsione (Numerical Weather Prediction model)
GCM	–	Modello climatico globale (Global Climatic Model)
RCM	-	Modelli climatici regionali (Regional Climatic Model)
GFS	–	Global Forecasting System, modello globale operativo
WRF	–	Weather Research and Forecasting model
WRF-ARW	–	Weather Research and Forecasting model, Advanced Research
ENEA-WRF	–	Modello ibrido sviluppato con input dei dati WRF
nMAE%	-	Normalized Mean Absolute Error percent
RMSE	-	Root Mean Square Error
RMSE%	-	Root Mean Square Error percent