



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione dei potenziali siti di installazione di impianti solari dal punto di vista radiativo

F. Spinelli, I. Balog, A. Benedetti, R. Siviero, G. Caputo

Caratterizzazione dei potenziali siti di installazione di impianti solari dal punto di vista radiativo

F. Spinelli, I. Balog, A. Benedetti, R. Siviero, G. Caputo (ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – 1^a annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Progetto 1.9 Solare Termodinamico

Linea di attività: LA 1.42 - *Ibridizzazione e integrazione di impianti CSP con altre tecnologie energetiche: caratterizzazione meteorologica dei siti*

Responsabile del Progetto: Alberto Giaconia, ENEA

Indice

SOMMARIO / <i>ABSTRACT</i>	4
ACRONIMI, ABBREVIAZIONI, GRANDEZZE, UNITÀ DI MISURA	5
1 INTRODUZIONE	8
2 LA DISPONIBILITÀ DEI DATI	9
3 L'ANNO METEOROLOGICO TIPICO.....	12
3.1 ANNO METEOROLOGICO TIPICO PER LA RADIAZIONE SOLARE	12
4 CONFRONTI PER LA RADIAZIONE SOLARE.....	14
4.1 CONFRONTI FRA MISURE E STIME	15
4.2 CONFRONTI FRA ANNI METEOROLOGICI TIPICI PER LA RADIAZIONE	26
5 CONCLUSIONI	31
6 SVILUPPI FUTURI	32
APPENDICE 1 — I DATI ENEA DA FONTE SATELLITARE.....	33
A1.1 LE IMMAGINI SATELLITARI METEOSAT DI COPERTURA NUVOLOSA	33
A1.2 MODELLI PER LA RADIAZIONE SOLARE AL SUOLO.....	33
A1.3 LE MAPPE DI RADIAZIONE DELL'ENEA	36
A1.4 SOLARITALY : L'ATLANTE ITALIANO DELLA RADIAZIONE SOLARE	39
APPENDICE 2 — IRRADIANZA EXTRA-ATMOSFERICA SUL PIANO ORIZZONTALE	41
APPENDICE 3 — ANNO METEOROLOGICO TIPICO PER LA RADIAZIONE SOLARE: PROCEDURA DI CALCOLO.....	42
APPENDICE 4 — PARAMETRI O INDICI STATISTICI	45
APPENDICE 5 — TABELLE E GRAFICI.....	50
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI / <i>REFERENCES</i>	64

Sommario / Abstract

Negli ultimi anni la produzione di energia da fonti rinnovabili ha conosciuto uno sviluppo straordinario a livello mondiale, e anche in Italia; tra di esse, la fonte solare fornisce un contributo significativo. Esistono molteplici tipologie di impianti di produzione energetica che utilizzano l'energia solare come fonte primaria e fra queste si annoverano gli impianti solari a concentrazione, i quali utilizzano selettivamente la componente *diretta* della radiazione solare globale (*Direct Normal Irradiance*, DNI). Poiché quest'ultima attraversa l'atmosfera prima di giungere al suolo, ne consegue che il funzionamento e le prestazioni degli impianti solari sono pesantemente influenzati dalle condizioni del tempo meteorologico e dal clima dei siti che li ospitano; in questo studio, pertanto, è stata delineata una procedura per la caratterizzazione meteorologica di un sito per la localizzazione di un impianto CSP.

Le grandezze meteo che influiscono sul funzionamento di un impianto CSP sono la DNI, la quale veicola l'energia solare che giunge al suolo e da utilizzare come fonte primaria per la trasformazione in forma utile per l'uso finale, la temperatura, il vento e l'umidità. In questo studio viene presa in considerazione solo la DNI essendo il parametro "energetico".

La disponibilità dei dati di misura ha reso possibile i confronti con le stime della radiazione solare (GHI e DNI) ricavabili dalle immagini satellitari di copertura nuvolosa grazie all'applicazione di modelli sviluppati in ENEA. Le stime ENEA sono disponibili per qualunque località italiana, a partire dal 2006, con frequenza che si spinge fino a singoli valori per quarto d'ora. In questo lavoro il confronto con le misure è stato effettuato con i dati orari estratti dalle mappe in corrispondenza della località di Casaccia per tutto il periodo che va dal 2006 al 2015. Il confronto fra misure e stime ha provato che queste ultime costituiscono uno strumento sufficientemente accurato per la valutazione del potenziale radiativo solare al suolo.

La metodologia di calcolo più utile e utilizzata per questo tipo di valutazioni si basa sulla stesura dell'*anno meteorologico tipico* (AMT), costituito dai valori orari di un anno delle grandezze meteo coinvolte. Si parla poi dell'*AMT per la radiazione solare* quando le irradianze solari sono, come nel caso di applicazioni alla tecnologia CSP, le più significative in relazione alle finalità perseguite. Pertanto, nel caso della Casaccia, si è provveduto a redigere l'anno tipico con le irradianze globale e diretta ricavate da fonte satellitare grazie ai modelli ENEA.

Acronimi, abbreviazioni, grandezze, unità di misura

AMI	Aeronautica Militare Italiana
AMT	Anno meteorologico tipico
AMTRS	Anno meteorologico tipico per la radiazione solare
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
CNR-IFA	Istituto di fisica dell'Atmosfera del CNR
CSN	Casale di San Nicola (località)
CSP	Impianto di potenza a concentrazione solare (Concentrated Solar Power)
CTI	Comitato Termotecnico Italiano
Df. HI	Irradia[nza zione] diffusa sul piano orizzontale
DNI	Irradia[nza zione] diretta normale (Direct Normal Irradia[nce tion])
EHI	Irradia[nza zione] extra-atmosferica su piano orizzontale
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
ENI	Irradia[nza zione] extra-atmosferica su piano normale
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GMT	Tempo medio di Greenwich (Greenwich Mean Time)
GHI	Irradia[nza zione] globale su piano orizzontale (Global Horizontal Irradia[nce tion])
HRV	(immagini METEOSAT) High Resolution Visible
ISO	International Organization for Standardization
MAE	Mean Absolute Error (Errore assoluto medio)
MAE%	Percent Mean Absolute Error (Errore assoluto medio percentuale)
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MBE	Mean Bias Error (Errore medio)
MBE%	Percent Mean Bias Error (Errore medio percentuale)
MiSE	Ministero dello Sviluppo Economico
MPE	Mean Percentage Error
NREL	National Renewable Energy Laboratory (agenzia americana)
RAN	Rete Agrometeorologica Nazionale
RMSE	Root Mean Square Error (Radice dell'errore quadratico medio)
RMSE%	Percent Root Mean Square Error (Radice dell'errore quadratico medio percentuale)
RMSPE	Root Mean Square Percentage Error
SAM	System Advisor Model
SI	Sistema internazionale delle unità di misura
TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Test Reference Year
UNI	Ente nazionale italiano di unificazione
WMO	World Meteorological Organization
WU	Weather Underground

Simbolo	Grandezza	Acronimo	Unità di misura
E_0	Fattore di eccentricità dell'orbita terrestre		adimensionale
H	Irradiazione		$J m^{-2}, kWhm^{-2}$
I, I_{gh}	Irradianza solare globale (su piano) orizzontale <i>Global Horizontal Irradiance</i>	GHI	$W m^{-2}$
I_b, I_{bh}	Irradianza solare diretta (su piano) orizzontale		$W m^{-2}$
I_{bn}	Irradianza solare diretta (su piano) normale <i>Direct Normal Irradiance</i>	DNI	$W m^{-2}$
I_d, I_{dh}	Irradianza solare diffusa (su piano) orizzontale	Df.HI	$W m^{-2}$
I_0	Irradianza extra-atmosferica (su piano) orizzontale <i>Extraterrestrial Horizontal Irradiance</i>	EHI	$W m^{-2}$
I_{0n}	Irradianza extra-atmosferica (su piano) normale <i>Extraterrestrial Normal Irradiance</i>	ENI	$W m^{-2}$
I_{sc}	Costante solare		$1367 W m^{-2}$
k	Frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale (orizz.)		adimensionale
K_c	Indice di cielo sereno <i>clear-sky index</i>		adimensionale
K_T	Coefficiente di trasmissione globale <i>Clearness index</i>		adimensionale
K_{Tc}	Coefficiente di trasmissione globale per cielo sereno (anche: Indice di chiarezza) <i>Clear-sky transmittance</i>		adimensionale
i	Indice di copertura nuvolosa		adimensionale
r, r_0	Distanza Sole-Terra (corrente e media)		km
α, β	Parametri del modello di Boland-Ridley		adimensionali
ϑ_z	Angolo zenitale		$grado (^{\circ}), rad$

Nota: nel testo gli acronimi DNI e GHI sono usati sia nell'accezione di *irradianza* sia in quella di *irradiazione* (giornaliera, giornaliera media mensile o annua). Nel primo caso, trattandosi di potenza per unità di superficie, l'unità di misura è il W/m^2 ; invece le irradiazioni corrispondono dimensionalmente all'energia per unità di superficie e si esprimono in J/m^2 , MJ/m^2 o kWh/m^2 .

Convenzione: tutte le irradiazioni sono affette da due pedici, il primo dei quali si riferisce al tipo:

- 0 : extra-atmosferico
- g : globale
- b : diretto
- d : diffuso

e il secondo all'orientazione della superficie "incisa":

- n : normale
- h : orizzontale.

Simboli per le unità di misura:

Unità di misura	Simbolo	
metro	<i>m</i>	Lunghezza
grado *	°	Angolo piano
radiante	<i>rad</i>	Angolo piano
joule	<i>J</i>	Energia
watt	<i>W</i>	Potenza

(*) Unità non SI

Prefissi (nelle unità di misura)	Nome	Valore
<i>n</i>	nano	10 ⁻⁹
<i>c</i>	centi	10 ⁻²
<i>k</i>	kilo	10 ³
<i>M</i>	mega	10 ⁶

Altri simboli	Significato
÷	intervallo

1 Introduzione

In risposta all'esigenza di alleggerire la pressione ambientale rappresentata dalle fonti fossili, ma anche per motivazioni geo-economiche, negli ultimi anni la produzione di energia da fonti rinnovabili ha conosciuto uno sviluppo straordinario a livello mondiale e, in particolare, anche in Italia [1]; in questo quadro, la fonte solare fornisce un contributo significativo. Esistono molteplici tipologie di impianti di produzione energetica che utilizzano l'energia solare come fonte primaria: impianti termici, fotovoltaici, solari a concentrazione. Poiché l'energia primaria è trasportata dalla radiazione solare e dovendo quest'ultima attraversare l'atmosfera prima di giungere al suolo, il funzionamento e le prestazioni degli impianti solari sono pesantemente influenzati dalle condizioni del tempo meteorologico e dal clima dei siti che li ospitano.

In questo studio sarà delineata una procedura per la caratterizzazione meteo-climatica di una località data, con particolare attenzione agli aspetti importanti per il funzionamento degli impianti CSP e sulla base dei dati *storici* recenti della radiazione solare. Si farà espresso riferimento alla località della Casaccia, dove si trova il Centro Ricerche dell'ENEA, anche in considerazione del fatto che il centro ospita una stazione meteo per la misura al suolo delle tre irradianze (globale, diretta e diffusa).

Lo sviluppo naturale di questo lavoro consisterà poi nel puntare maggiore attenzione alle *previsioni*¹ della radiazione solare: infatti, prevedere la radiazione solare nasce dalla necessità di conoscere in anticipo l'energia solare che sarà disponibile nel breve periodo, cioè nel giorno attuale, domani e dopodomani, al fine di garantire una corretta gestione della produzione di energia.

Le condizioni meteo-climatiche influenzano le prestazioni di un impianto CSP. La radiazione solare — specificatamente, la sua componente *diretta* — costituisce la fonte primaria stessa che viene utilizzata dall'impianto per produrre energia (elettricità o calore). La radiazione solare è caratterizzata da una aleatorietà intrinseca: oltre ad avere le interruzioni dovute all'alternanza giorno-notte, e risentire del ciclo stagionale che ne fa variare la disponibilità giornaliera nel corso dell'anno, risente anche delle condizioni meteorologiche contingenti. Della radiazione solare, pertanto, interesserà sia stimare l'ammontare sul lungo periodo, al fine di accertare la convenienza economica dell'installazione per l'intero periodo di funzionamento, sia conoscere i particolari della sua variabilità meteorologica, per poter modulare la produzione istante per istante.

¹ Conviene qui precisare la differenza tra *stima* e *previsione* della radiazione solare. La stima definisce le caratteristiche climatiche del sito a partire da dati storici ed ha valore statistico, la previsione invece, anche se si basa necessariamente sulla conoscenza dei dati storici relativi al sito da considerare, si rivolge al futuro e fornisce valori in maniera deterministica.

2 La disponibilità dei dati

È possibile caratterizzare una località dal punto di vista meteo-climatico qualora siano disponibili le misure delle grandezze fisiche di interesse – irradianza solare, temperatura dell’aria ecc. – per un periodo di tempo adeguato. Tale periodo deve sicuramente abbracciare la variabilità stagionale del clima, pertanto non può essere più corto di un anno. Però, per stime affidabili per il lungo termine, occorrono misure ininterrotte per un numero di anni comparabile con la vita prevista dell’impianto. Infine, anche la frequenza di acquisizione è importante: ad esempio, poiché l’irradianza solare varia nel corso della giornata, anche in condizioni di cielo sereno, fra zero (all’alba e al tramonto) e un valore massimo (a mezzogiorno solare), occorre che questa grandezza sia campionata più volte al giorno; di norma, una frequenza di acquisizione oraria è adeguata per la maggior parte degli scopi.

L’attesa di diversi anni per completare la campagna di acquisizione dei dati meteo, in modo che si possa disporre di un dataset statisticamente adeguato per le analisi, confligge con la tempistica della realizzazione dell’impianto: per valutare la convenienza economica già in fase di progettazione, infatti, occorre una stima a lungo termine del potenziale solare radiativo del sito prescelto, e questa è disponibile solo alla fine del programma pluriennale di misurazione. Per questi motivi, diventano preziose altre fonti di dati, acquisiti in precedenza per finalità differenti. Le principali sono:

1. dati satellitari. Di solito si tratta di immagini della superficie terrestre registrate dai satelliti meteorologici; lo strato informativo delle immagini può essere un particolare parametro atmosferico (copertura nuvolosa, contenuto di vapore acqueo ecc.) oppure una grandezza calcolata a partire dal dato misurato dal sensore (irradianza solare nei diversi intervalli dello spettro elettromagnetico ecc.). Trasformate le immagini in modo da produrre lo strato informativo che interessa, ad esempio la DNI, si procede all’estrazione dei dati per una singola località geografica. Ciò è possibile in quanto – essendo le immagini georeferenziate – dalla conoscenza delle coordinate geografiche si risale alla posizione (*pixel*) della località all’interno dell’immagine. Le serie storiche delle immagini si differenziano: **a**) per la porzione di superficie terrestre rappresentata, che dipende dalla posizione e dal movimento del satellite (satelliti geostazionari, polari ecc.); **b**) dalla frequenza delle acquisizioni (ogni quarto d’ora, orarie, giornaliere ecc.); infine **c**) dalla risoluzione spaziale, ovvero dall’area del terreno di cui ogni pixel è rappresentativo. In ENEA l’attività di raccolta, archiviazione e pubblicazione dei dati di radiazione solare dedotti da fonte satellitare è iniziata sin dagli anni Novanta del secolo scorso e prosegue tuttora: fonte, metodi, modelli e dati sono descritti in appendice 1. Per questo lavoro, condotto con riferimento alla località della Casaccia, le cui coordinate geografiche sono²:

latitudine	42°03.0' Nord
longitudine	12°18.0' Est da Greenwich

sono stati estratti dalle mappe i dati orari, giornalieri, mensili e annui dell’irradianza globale orizzontale (*Global Horizontal Irradiance*, GHI), nonché quelli delle sue componenti diffusa (*Diffuse Horizontal Irradiance*, Df.HI) e diretta normale (DNI), per gli anni dal 2006 al 2015 (serie storica di 10 anni);

² A rigore, dovrebbe essere precisato il riferimento geografico (*datum*) rispetto al quale le coordinate sono espresse: Roma40, ED50, WGS84; in pratica, poiché qui le coordinate sono date con precisione fino al decimo di primo, le differenze fra i tre sistemi sono ininfluenti.

2. reti di stazioni di misurazione delle grandezze meteorologiche. Ad esempio, il Ministero delle Politiche Agricole gestisce la *Rete Agrometeorologica Nazionale* (RAN) [2] costituita da poco meno di cinquanta stazioni sparse uniformemente sul territorio nazionale, ognuna delle quali rileva con frequenza oraria le principali grandezze meteo d'interesse per l'agricoltura: temperatura dell'aria, pressione, vento, piovosità e umidità. Molte misurano anche la radiazione solare, limitandosi però alla sola GHI, per cui la DNI va ricavata dall'altra ricorrendo a modelli studiati ad hoc [3,4,5]. Va detto che, di solito, nelle correlazioni presenti in letteratura viene studiata la dipendenza della radiazione diffusa orizzontale dalla GHI (misurata): in tal caso la DNI si ricava per differenza. Altri enti hanno approntato sul territorio di propria competenza reti di acquisizione meteo per rispondere ai propri scopi istituzionali (Aeronautica Militare, Regioni ecc.). Il vantaggio della presenza di queste reti è che dispongono oramai di serie storiche pluridecennali di misure, per cui le analisi sintetiche per caratterizzare singole località sotto il profilo radiativo possono essere fatte subito senza aspettare i tempi di una nuova campagna di acquisizione da attuare ad hoc. Per converso, lo svantaggio più evidente è rappresentato dal fatto che i siti prescelti per ospitare impianti solari non coincidono quasi mai con località dove le stazioni sono già installate. A questa difficoltà sopperisce la *tecnica d'interpolazione geografica (spaziale)*, grazie alla quale le grandezze meteo da riferire al proprio sito possono calcolarsi con opportune "medie" a partire dai valori misurati presso le stazioni geograficamente vicine. Sono disponibili numerosissime tecniche di interpolazione spaziale (semplice media dei punti vicini, inverso [del quadrato] della distanza, kriging ecc.), però nessuno è ottimo per tutte le situazioni, per cui il problema va studiato caso per caso. Sotto questo aspetto la radiazione solare non pone difficoltà eccessive in quanto varia con regolarità da punto a punto sul suolo terrestre.

3. rete solarimetrica dell'ENEA. Nel corso degli anni, a supporto delle proprie attività di ricerca e sviluppo nel settore solare termodinamico, l'ENEA ha installato alcune centraline per la misurazione della radiazione solare. L'installazione è stata decisa presso propri centri di ricerca o località individuate di volta in volta per l'insediamento di impianti di ricerca. In tabella 1 è mostrato l'elenco completo delle stazioni e in figura 1 la loro localizzazione geografica. Ogni centralina misura sia la GHI, sia le sue componenti Df.HI e DNI, mentre la frequenza temporale è di una registrazione ogni cinque minuti e, per la sola stazione di Casaccia, a partire da gennaio 2015, anche una registrazione al minuto. Nel frattempo, due stazioni sono state dismesse. Casaccia opera da novembre 2001 ed è tuttora in funzione; in questo arco di tempo ha permesso di realizzare un database che consiste oramai di più di diciotto anni di dati. Il database è prezioso perché sono misurate direttamente tutte e tre le componenti dell'irradianza e non è necessario ricorrere alle correlazione per ricavare una di esse dalle restanti due; anzi, la disponibilità contestuale delle terne di valori (GHI, Df.HI e DNI) permette di stabilire nuove correlazioni valide per il territorio italiano. Per questo studio sono stati utilizzati i dati misurati dalla centralina di Casaccia, dal 2002 al 2015 (14 anni); per effettuare i confronti, le misure sono state convertite nei corrispondenti valori orari, giornalieri, mensili e annuali;

Tabella 1 Rete solarimetrica dell'ENEA. Anagrafica.

Denominazione	Coordinate		Inizio funzionamento
	latitudine	longitudine	
Casaccia	42°03'	12°18'	nov. 2001
Trisaia	40°10'	16°39'	feb-2002
Montalto di Castro	42°22'	11°31'	feb-2002
Specchia	39°57'	18°16'	mag-2002
Priolo Gargallo	37°08'	15°13'	lug-2003
Mereto di Tomba	41°22'	11°31'	mag-2012



Figura 1. Rete solarimetrica dell'ENEA. Dislocazione geografica delle stazioni di rilevamento.

4. software di simulazione. Alcuni software di simulazione³ permettono di stimare i valori delle grandezze meteorologiche – temperatura, umidità, pressione, irradiazioni e altre ancora – per qualunque località geografica scelta dall'utente. Di norma si tratta di valori orari di un "anno tipico" costruito in modo che sia rappresentativo delle condizioni meteorologiche della località. Il database incorporato nel programma si appoggia a misure effettuate presso un insieme di stazioni meteo dislocate in maniera geograficamente uniforme e ricava dalle misure un profilo annuo coerente. Per le località differenti

³ ad esempio *Meteonorm* [6].

dalle stazioni di misura, i profili dell'anno tipico sono ricavati per interpolazione geografica. Per questo studio, è stato prodotto con il software Meteororm l'anno meteorologico tipico (vedi oltre) della Casaccia, costituito dagli 8760 valori orari in un singolo anno, delle tre grandezze di interesse: GHI, DNI e Df.HI.

3 L'anno meteorologico tipico

3.1 Anno meteorologico tipico per la radiazione solare

Sebbene sia desiderabile che la serie storica delle misure disponibili sia almeno decennale, per applicazioni particolari è richiesta la collezione completa di un solo anno di dati che sia rappresentativa dell'intera serie pluriennale. Questa esigenza ricorre, ad esempio, nell'input delle simulazioni per la progettazione degli impianti (solari, fotovoltaici ecc.)⁴, per la stima dei fabbisogni energetici degli edifici, e per lo studio del comportamento dell'ambiente sottoposto a sollecitazioni antropiche (diffusione d'inquinanti ecc.) e/o naturali. L'anno meteorologico tipico (AMT) o *Typical Meteorological Year* (TMY) risponde a questa esigenza [8,9]. Si tratta di una collezione di 8760 (= 365 x 24) dati orari della grandezza meteo-climatica d'interesse, estratta dalla serie pluriennale disponibile, e scegliendo, per ciascuno dei dodici mesi, l'intero mese di dati dell'anno fra quelli presenti nella serie che più si avvicina alla media pluriennale. Il "grado di vicinanza" è stabilito sulla base di appropriati criteri statistici. L'anno tipico sarà costituito giustapponendo in sequenza i dati dei dodici mesi così scelti. In tal modo:

- a) mese per mese il *valor medio* di ciascuna grandezza sarà prossimo a quello della serie pluriennale di partenza (caratterizzazione climatologica del sito, ossia a lungo termine);
- b) le *sequenze orarie e giornaliere* presenti nell'anno tipico riprodurranno in modo sufficientemente realistico gli andamenti effettivamente riscontrabili nei dati registrati (caratterizzazione meteorologica del sito, ossia a breve termine).

A seconda delle finalità per le quali è costruito, un anno tipico può differire da un altro sia per il metodo statistico adottato per stabilire il criterio di vicinanza di un mese alla media, sia per la scelta delle grandezze meteo-climatiche che vi dovranno far parte. Riguardo al primo aspetto, numerose metodologie sono state studiate, messe a punto e codificate da enti di normazione nazionali, organizzazioni professionali e infine istituti di ricerca (ad esempio, quella che fa uso della *statistica di Finkelstein-Schafer* [11]). Riguardo al secondo aspetto, un anno tipico può prendere in considerazione più di una grandezza meteo-climatica.

⁴ Un software deputato allo scopo e particolarmente versatile e completo, sia per la numerosità di tipo di impianto di cui è corredato, sia per l'estensione delle analisi, anche economiche, che è in grado di effettuare, è il *System Advisor Model* (SAM) [10], sviluppato dal *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) americano.

In Italia, diversi enti hanno prodotto AMT differenti per finalità:

- Anni meteorologici tipici del Comitato Termotecnico Italiano (CTI). Il CTI, nell'ambito dello stesso Accordo di Programma MiSE-ENEA, ha allestito un AMT per ciascuna delle 110 province reperendo i dati di altrettante stazioni poste nelle città capoluogo o, se lì non disponibili, in località prossime ad esse [12,13,14,15,16]. I dati provengono da reti di stazioni meteoclimatiche gestite da più enti, di estensione regionale, e le stazioni stesse sono state selezionate tenendo conto in generale delle prescrizioni della World Meteorological Organization (WMO, [17]). In ottemperanza ai criteri stabiliti nella norma UNI EN ISO 15927-4 [18], gli AMT sono stati costruiti essenzialmente per stimare l'energia necessaria per la climatizzazione estiva e invernale degli edifici. Pertanto le grandezze sono la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la pressione parziale di vapore, la velocità del vento e le tre irradiazioni solari (globale, diffusa e diretta); peraltro, delle tre irradiazioni, solo quella globale (su piano orizzontale) è effettivamente misurata presso le stazioni, mentre le restanti due sono stimate da questa ricorrendo a modelli. L'intero lavoro è confluito nella revisione e aggiornamento dei dati climatici delle norme UNI inerenti al riscaldamento e raffrescamento degli edifici [19,20,21]. La frequenza dei valori tabellati è oraria. Per le località differenti dalle stazioni utilizzate per la redazione degli AMT, si dovrebbe far riferimento alla stazione più vicina in linea d'aria; così, per Casaccia, la stazione pertinente è quella situata nel centro abitato della città di Roma, che però dista circa 20 km in linea d'aria ed è posta ad un'altitudine inferiore di circa 100 metri: per questo motivo l'AMT *provinciale* del CTI non è qui direttamente utilizzabile per il confronto con le altre fonti di dati.
- itMeteoData. Un'altra fonte di AMT per le località italiane è costituita dal progetto *itMeteoData* curato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna e da NIER Ingegneria S.p.A. Sul sito Internet dedicato al progetto [22] sono descritte le diverse tipologie di AMT prodotti: per il fotovoltaico, per il solare termico, per l'eolico e quello ambientale. La differenziazione tipologica si basa sulle grandezze meteoclimatiche incluse nei dati: ad esempio, l'AMT fotovoltaico riporta i soli dati (orari) di temperatura e radiazione globale. Le località censite sono numerose (oltre 560, sempre per il fotovoltaico). Dal sito Internet è possibile scaricare i singoli AMT.
- Dati climatici "De Giorgio". Sono AMT molto datati, preparati dall'Istituto di Fisica dell'Atmosfera del CNR (CNR-IFA) utilizzando serie storiche di misurazioni 1951-1970 e provenienti dalle stazioni del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana (AMI). Anche la procedura di allestimento dell'anno tipico [23] è differente da quella descritta qui, sebbene la finalità sia la stessa. Nell'ottica del presente studio, occorre precisare che nel database "De Giorgio" la fonte primaria per i dati della radiazione solare è costituita dalle misure giornaliere della GHI presso alcune stazioni dell'AMI a partire dal 1958; dalle misure giornaliere sono stati ricavati i profili orari medi, e i valori orari così ottenuti sono stati poi separati nelle componenti diffusa e diretta. Profili orari (medi) di globale, diretta e diffusa orizzontali sono tutti ottenuti a partire dal solo dato giornaliero di globale e ricorrendo al modello di Collares-Pereira e A. Rabl [24]. Le stazioni di acquisizioni meteo dell'AMI incluse nel database "De Giorgio" sono oltre 60 e per quelle prive del dato di misura, la radiazione solare fu stimata per interpolazione geografica dalle stazioni vicine. Il confronto con i valori più recenti dell'irradiazione nelle località italiane mostrano che nel database "De Giorgio" i valori dell'irradiazione solare risultano generalmente sottostimati.
- Meteonorm. Si tratta di un software per la generazione degli AMT per qualunque località della Terra. La differenza sostanziale rispetto a tutti gli altri database sinora elencati, è che in questo caso la località

stessa può essere designata in base alle sue coordinate geografiche e pertanto può corrispondere virtualmente a qualunque punto della superficie terrestre. In realtà il database è costituito dai dati di misura di oltre 8000 stazioni meteo sparse nel mondo e l'AMT per un dato sito è ottenuto per interpolazione geografica dalle stazioni spazialmente vicine. Per ciascuna stazione sono state reperite serie storiche pluriennali di numerose grandezze meteo (temperatura, precipitazione, umidità, vento, irraggiamento) e molte altre sono calcolate da queste (illuminamento naturale ecc.). I valori orari degli AMT non corrispondono a misure effettive ma piuttosto a *dati sintetici* che cercano di riprodurre fedelmente i profili riscontrati nelle serie storiche pluriennali delle misure disponibili (variabilità e irregolarità temporali, valori massimi e minimi, valori medi a lungo termine): l'idea è che se i profili sintetici catturano gli aspetti importanti degli andamenti meteoroclimatici del luogo, possono essere ben proficuamente utilizzati negli studi di simulazione. I formati di output degli AMT generati sono molteplici, inclusi quelli richiesti dai software di simulazione già menzionati. Per quanto riguarda l'irradianza solare, essendo misurata di norma solo quella globale orizzontale (GHI), Meteonorm stima la DNI e la diffusa dalla globale ricorrendo a modelli. Infine, per quanto riguarda i siti della regione italiana, è stato notato che i valori delle irradianze solari sono generalmente sottostimati.

- Anni meteorologici tipici ENEA riferiti alla radiazione solare. Sono allestiti utilizzando la serie storica decennale 2006÷2018 delle irradianze solari estratte dalle mappe satellitari elaborate dall'ENEA. Mese per mese, la scelta dell'anno da includere nell'AMT è effettuata seguendo il criterio proposto da Finkelstein-Schafer, mentre la grandezza che ne *pilota* la scelta è la GHI poiché è l'irradianza che nel modello ENEA si ricava per prima e con migliore accuratezza dal dato di copertura nuvolosa. L'estrazione dei valori è possibile per qualunque località italiana. Le grandezze incluse nell'AMT sono la GHI, la DNI, la GI (globale su piano inclinato e orientato) e DI (irradianza diretta riferita a qualunque altra orientazione che non sia necessariamente normale ai raggi). Ad esse si aggiungono ulteriori grandezze ancillari quali l'irradianza extra-atmosferica (orizzontale e normale), gli angoli che individuano la posizione del Sole ora per ora (zenitale e azimutale) e, infine, per ogni giorno dell'anno, gli istanti dell'alba e del tramonto: tutti parametri necessari per valutare correttamente il potenziale radiativo solare del luogo e per il dimensionamento ottimale (prima) e gestione efficiente (poi) degli impianti. Ancora, ai valori orari si accompagnano le sintesi giornaliere e giornaliere medie mensili. Infine, sono presenti tabelle per il conteggio del numero di ore/anno in cui l'irradianza attesa è maggiore di soglie definite. Recentemente, l'AMT sviluppato dall'ENEA si è ampliato con l'aggiunta dei parametri dell'illuminamento naturale globale e diffuso, e viene utilizzato in applicazioni di efficientamento energetico nell'edilizia residenziale e terziaria.

4 Confronti per la radiazione solare

La DNI è il dato meteoroclimatico di input più importante per valutare un impianto CSP sotto il profilo della produzione d'energia. Ciò è vero tanto nella fase di progettazione, per stabilirne la produttività⁵ teorica a partire dal valor medio annuo di lungo termine, e decidere quindi sulla "finanziabilità" del progetto stesso, quanto nella fase operativa, per controllarne le prestazioni alla luce della DNI che si è resa disponibile anno per anno in conseguenza delle condizioni meteorologiche. Ai livelli d'insolazione riscontrabili in Italia, le analisi finanziarie che accompagnano i progetti per la realizzazione di impianti CSP mostrano che il ricorso a

⁵ o "producibilità", com'è di moda adesso.

questa fonte di produzione di energia può essere economicamente conveniente solo per impianti installati al Centro o al Sud. È pertanto altamente desiderabile che la radiazione solare sia misurata e/o stimata con la maggiore precisione possibile, perché pochi percento in più o in meno di DNI annua prevedibile sono cruciali ai fini decisionali.

Idealmente la fonte di dati più affidabile ed esauriente è costituita dalle misurazioni al suolo, effettuate con frequenza oraria e per un tempo adeguato (più di un anno). D'altra parte si è visto che sono disponibili più metodi per acquisire il dato di DNI, perché nessuno è preferibile sotto tutti gli aspetti: la precisione e accuratezza del dato, la tempestività e infine, la durata e onerosità dell'acquisizione. Nel seguito verranno operati i confronti fra le diverse fonti DNI, e anche della GHI che è correlata alla precedente, in modo che, nelle situazioni specifiche, si abbia sempre una valutazione di quanto la fonte adottata possa differire da quella di riferimento (da preferire quando disponibile). Come si è detto, la località prescelta è Casaccia, che ospita il più importante centro di ricerche dell'ENEA, e per la quale nel tempo si sono rese disponibili numerose fonti di dati di radiazione solare. Queste sono:

- a) misure al suolo (ENEA): si tratta delle misure di GHI e DNI effettuate presso la stazione di acquisizione di Casaccia delle rete solarimetrica dell'ENEA, dal 2002 al 2015 (14 anni di dati);
- b) stime satellitari (ENEA): sono i valori estratti dalle mappe ottenute elaborando le immagini satellitari METEOSAT di copertura nuvolosa, dal 2006 al 2015 (10 anni). Le mappe sono georeferenziate e l'estrazione è effettuata in corrispondenza della posizione del sito di Casaccia in esse;
- c) anno meteorologico tipico ENEA per la radiazione solare, ricavato dalla serie storica 2006÷2015 delle stime satellitari;
- d) anno meteorologico tipico generato dal software Meteonorm;

A seconda della tipologia dei dati usati, il confronto sarà effettuato mediante diagrammi di profili temporali, diagrammi a dispersione o curve di valori sopra soglie (cumulate).

4.1 Confronti fra misure e stime

Le figure da 2 a 5 riportano come esempio gli andamenti orari della GHI e della DNI, misurate al suolo e stimate da satellite con il modello ENEA, per alcuni periodi, ciascuno dei quali costituito da sei giorni consecutivi.

Sebbene per gli impianti CSP la DNI è il parametro meteorologico più importante, i confronti sono effettuati sistematicamente anche per le GHI in quanto questi ultimi sono più diretti e significativi, mentre quelli per le DNI meno immediati e precisi. Infatti:

- a) riguardo alla GHI: essa è relativamente più facile da misurare e, inoltre, l'indice di copertura nuvolosa (ICN), che è il dato di input nei modelli ENEA della radiazione solare, si correla direttamente all'entità dell'attenuazione *globale* dell'irradianza [si veda in appendice 1];

- b) riguardo alla DNI: la sua misurazione è oltremodo *delicata* (la strumentazione incorpora parti in movimento, che devono *puntare* continuamente verso il Sole); le stime, poi, possono ottenersi ⁶ se sono note le GHI: è comprensibile che la successione di più calcoli comporti pertanto una perdita inevitabile di precisione nel passare da un valore intermedio a quello finale.

Nelle figure sono omesse le ore notturne fra un giorno e l'altro in quanto per esse, essendo nulli i valori di irradianza, il confronto è inutile. Per dare maggiore rappresentatività agli esempi, gli intervalli temporali sono stati scelti in modo da comprendere sia periodi invernali che estivi, e da includere giorni non solo sereni ma anche con diverso grado di nuvolosità. I mesi prescelti, gennaio e luglio del 2007, fanno ovviamente parte dei periodi in cui i dati di entrambe le fonti sono disponibili (2006÷2015). I grafici mostrano che globalmente c'è buon accordo fra misure al suolo e stime da satellite. L'accordo è maggiore nei profili dei giorni sereni, in quando l'andamento dell'insolazione al suolo è quello (assolutamente regolare) del profilo a campana⁷ ed è *modellizzabile* con maggiore facilità.

⁶ Normalmente le stime DNI si ottengono suddividendo la GHI nelle sue componenti diffusa e diretta orizzontali e riportando poi quest'ultima dal riferimento orizzontale a quello normale [vedasi sempre in appendice 1].

⁷ Più precisamente, l'andamento giornaliero è ben modellizzato da una curva espressa mediante un'opportuna potenza del coseno dell'angolo zenitale [si vedano (2) e (3) e figura 24, nell'appendice 1. L'esponente α del coseno vale all'incirca 0.15 per l'irradianza al suolo. Al top dell'atmosfera, senza l'effetto di attenuazione di questa, è invece $\alpha = 1$: si veda la (10) in appendice 2].

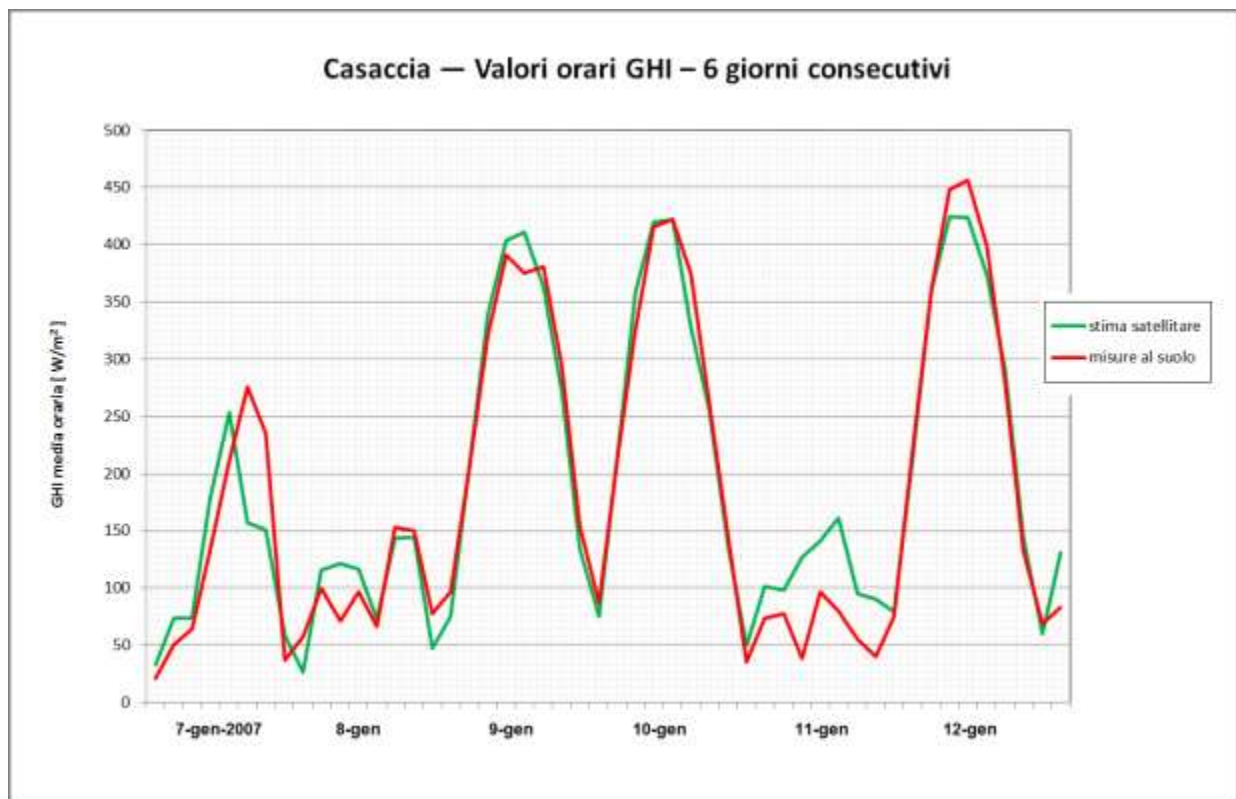


Figura2. Casaccia, andamento della GHI per sei giorni consecutivi (gennaio 2007). Confronto fra misure al suolo e stime da satellite (modello ENEA)

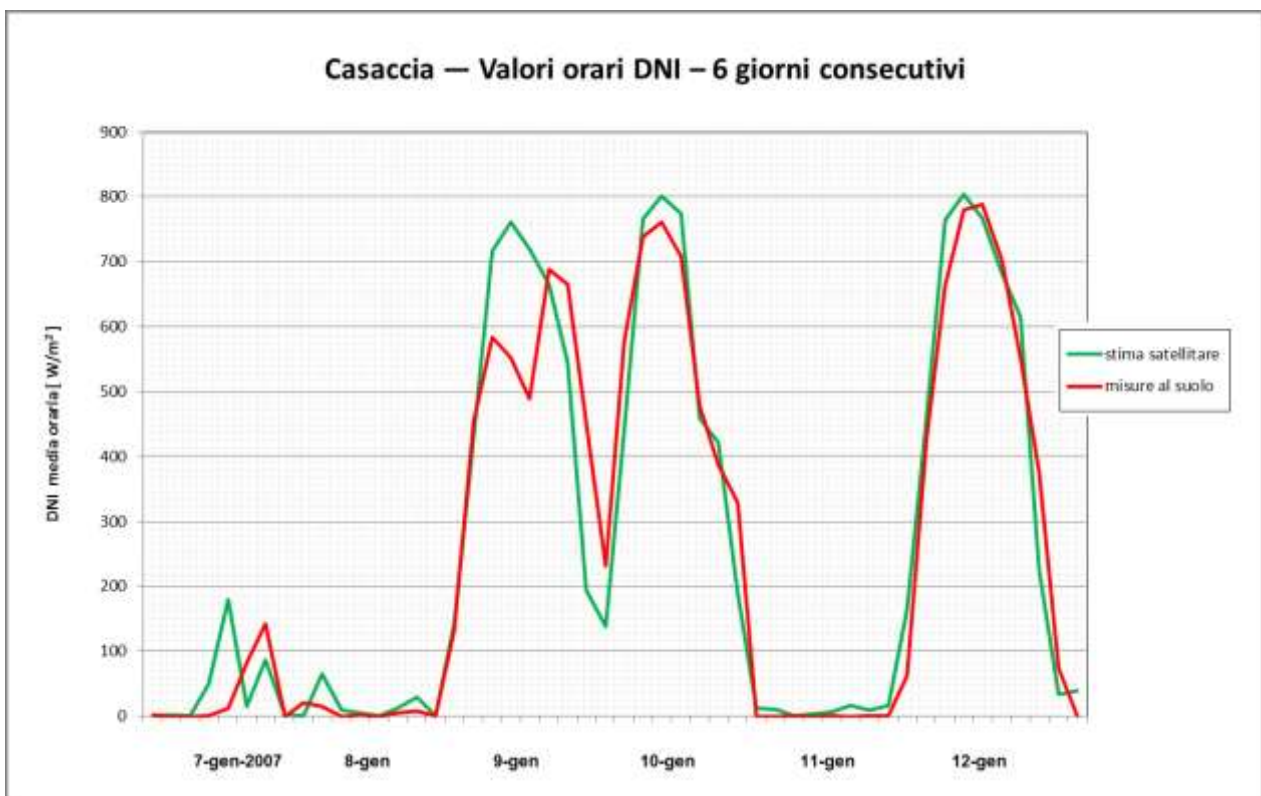


Figura 3. Casaccia, andamento della DNI per sei giorni consecutivi (gennaio 2007). Confronto fra misure al suolo e stime da satellite (modello ENEA)

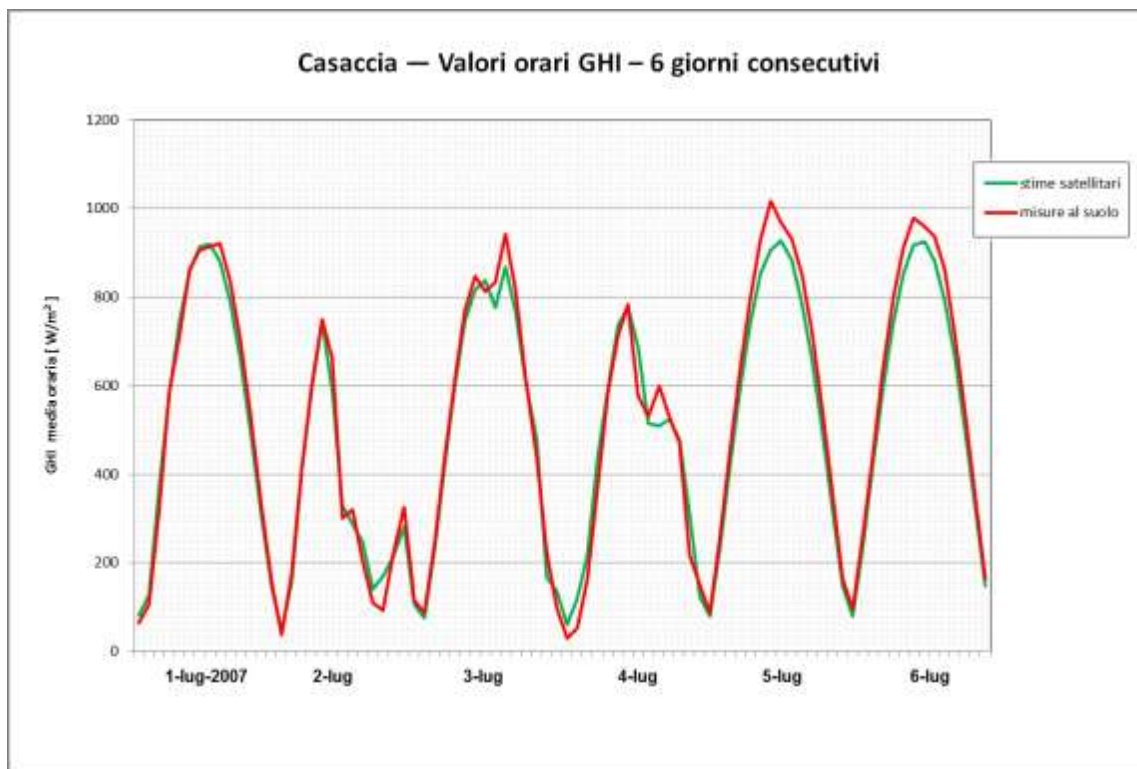


Figura4. Casaccia, andamento della GHI per sei giorni consecutivi (luglio 2007). Confronto fra misure al suolo e stime da satellite (modello ENEA)

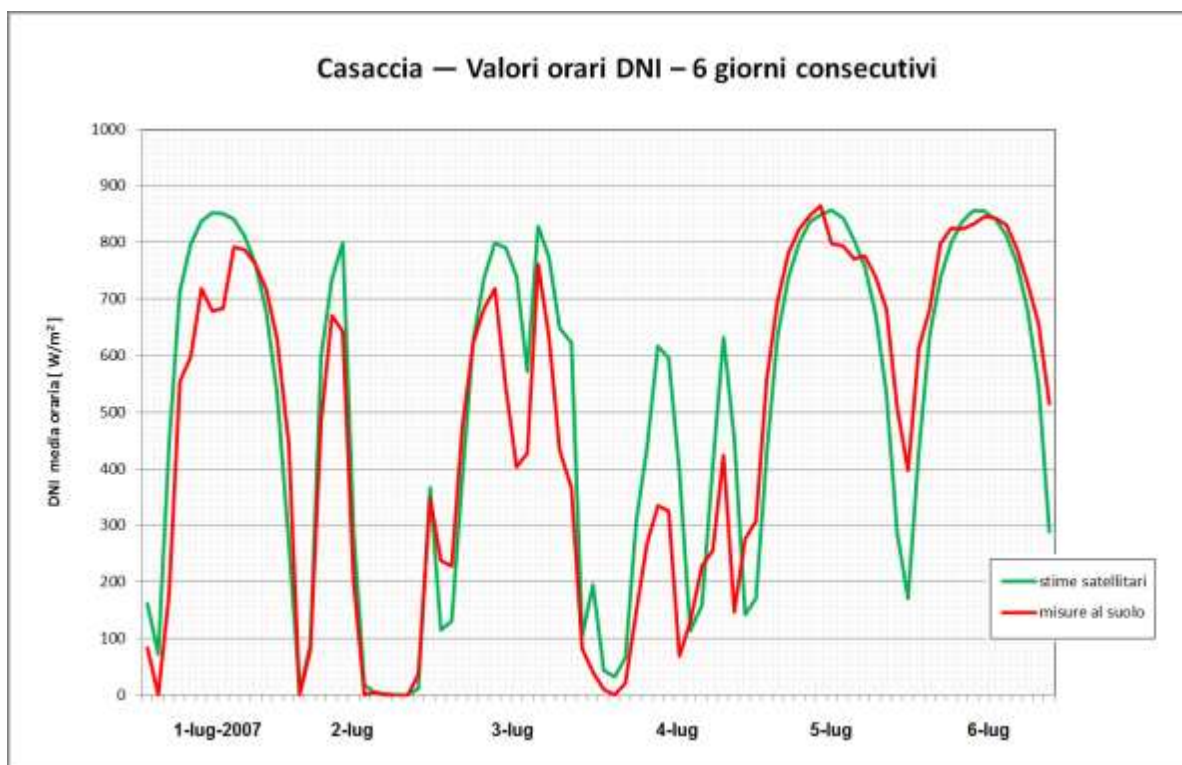


Figura 5. Casaccia, andamento della DNI per sei giorni consecutivi (luglio 2007). Confronto fra misure al suolo e stime da satellite (modello ENEA)

I profili per intervalli temporali danno la possibilità di controllare solo qualitativamente se l'accordo fra due fonti sia accettabile. Per una valutazione quantitativa, invece, sono più efficaci i diagrammi a dispersione: in quelli delle figure 6 e 7 sono confrontate le misure e le stime dei dati orari rispettivamente di GHI e DHI, acquisiti in Casaccia per l'intero periodo 2006÷2015. Nel confronto sono incluse solo le (coppie delle) misure e stime relative agli intervalli diurni e che hanno superato i criteri di validazione. Ciò spiega il motivo per cui i dati di GHI sono molto più numerosi (27515 contro 9654): essendo la misurazione della GHI più facile e conseguentemente più affidabile, i valori acquisiti e scartati sono meno numerosi; comunque, anche per la DNI la numerosità dei dati validi resta tale da dare significatività alla statistica del confronto.

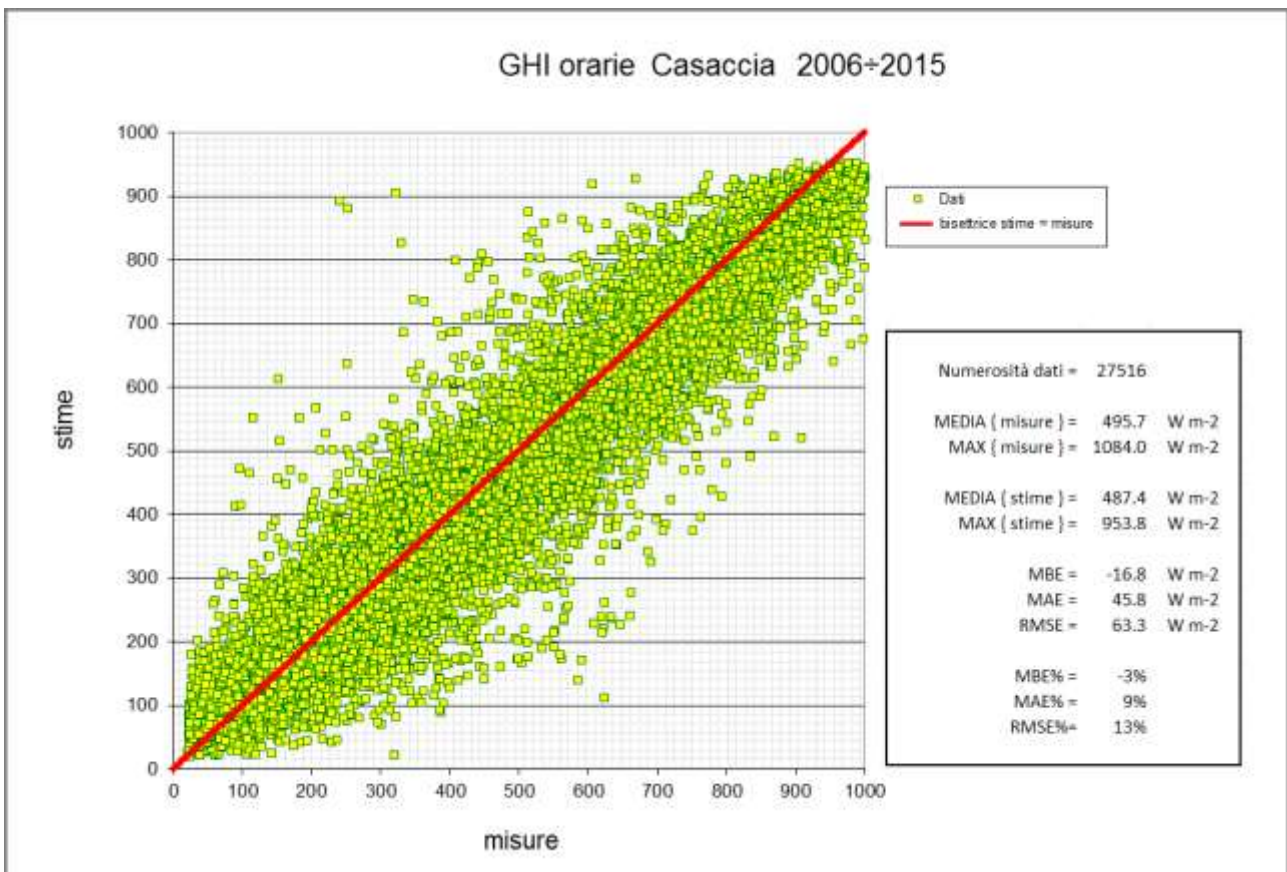


Figura 6. Casaccia, diagramma di dispersione della GHI oraria: stime vs misure, periodo 2006÷2015

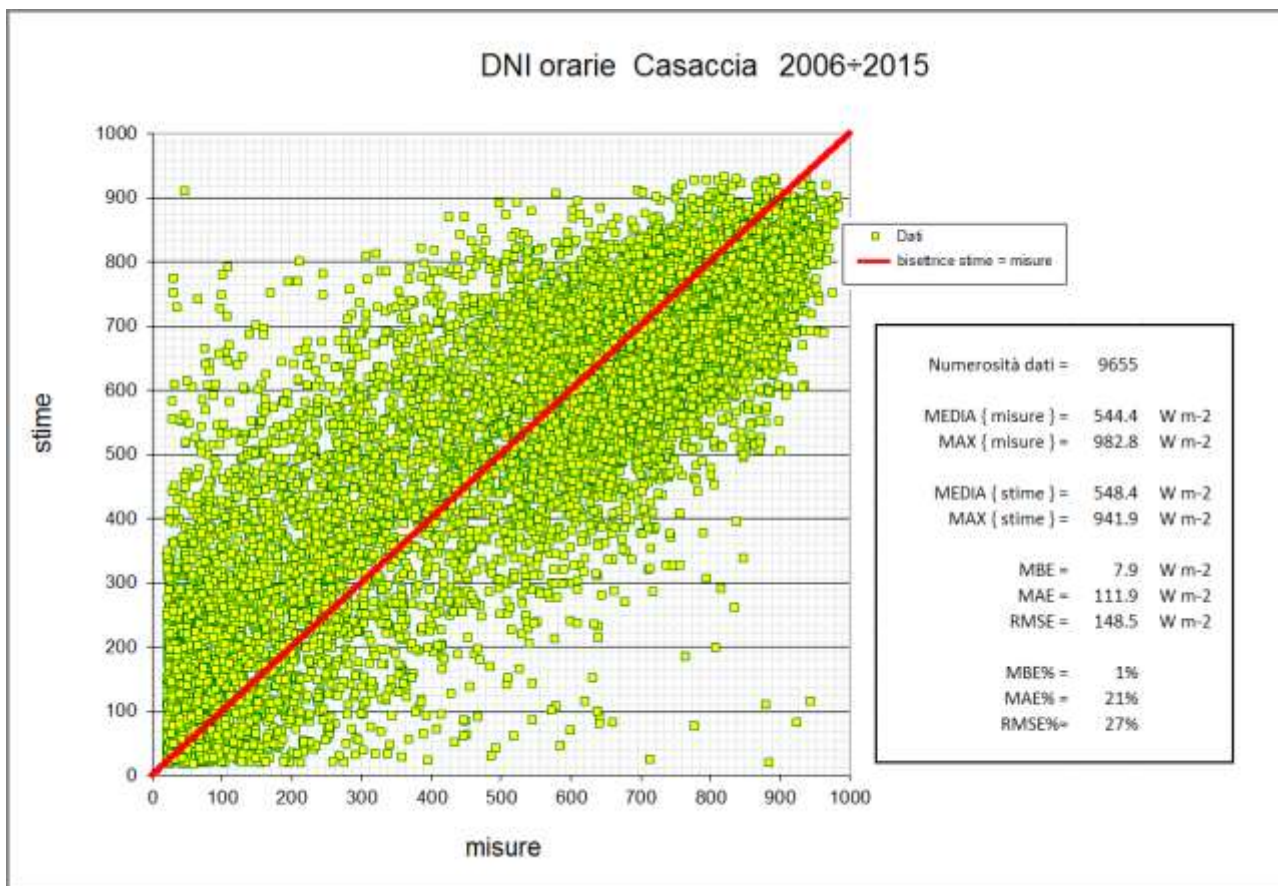


Figura 7. Casaccia, diagramma di dispersione della DNI oraria: stime vs misure, periodo 2006÷2015

In tutti i diagrammi a dispersione presentati in questo lavoro, punti situati sulla bisettrice (in rosso nelle figure) corrispondono a coppie di valori (*misura, stima*) uguali, mentre punti distanti corrispondono a valori differenti. Per apprezzare quantitativamente tali *distanze*, ovvero le differenze fra coppie di serie di valori corrispondenti, la statistica definisce moltissimi parametri e *indici di accostamento*, e nella presentazione dei risultati si ricorre normalmente a più di uno giacché nessun indice, singolarmente, coglie in toto tutti gli aspetti delle differenze stesse⁸. In questo contesto si forniranno per ogni confronto i valori di tre indici, ossia: l'errore medio (*mean bias error*, MBE), l'errore assoluto medio (*Mean Absolute Error*, MAE) e la radice della media dei quadrati degli errori (*Root Mean Square Error*, RMSE); inoltre, tutti e tre sono dati sia in termini assoluti — e trattandosi di differenze di irradianze sono espressi in $W m^{-2}$ —, sia in termini relativi, espressi in percento rispetto alla media delle misure.

I grafici precedenti mostrano che le stime sono sufficientemente *accurate* rispetto alle misure, infatti il MBE è pari a $-16.8 W m^{-2}$ (-3%) per l'irradianza globale e $+7.9 W m^{-2}$ (+1%) per la diretta normale. La dispersione, misurata per mezzo del RMSE, non è invece trascurabile: $63.8 W m^{-2}$ (13%) per la GHI e circa $148 W m^{-2}$ (27%) per la DNI. Si constata infine che, complessivamente, gli indici per la DNI forniscono valori peggiori rispetto alla GHI.

⁸ In appendice 4 è un elenco ragionato dei diversi indici di accostamento, con definizioni e descrizione della loro adeguatezza nel cogliere i due diversi aspetti delle differenze fra serie di dati corrispondenti, ossia la *precisione* e l'*esattezza* (o *accuratezza*).

Poiché gli indici di accostamento possono variare da un periodo all'altro, è utile controllare anche singoli anni. Pertanto nelle figure 8 e 9 sono mostrati i confronti orari per un anno particolare, il 2011: si può constatare che gli indici risultano allineati con quelli dell'intero decennio 2006÷2015.

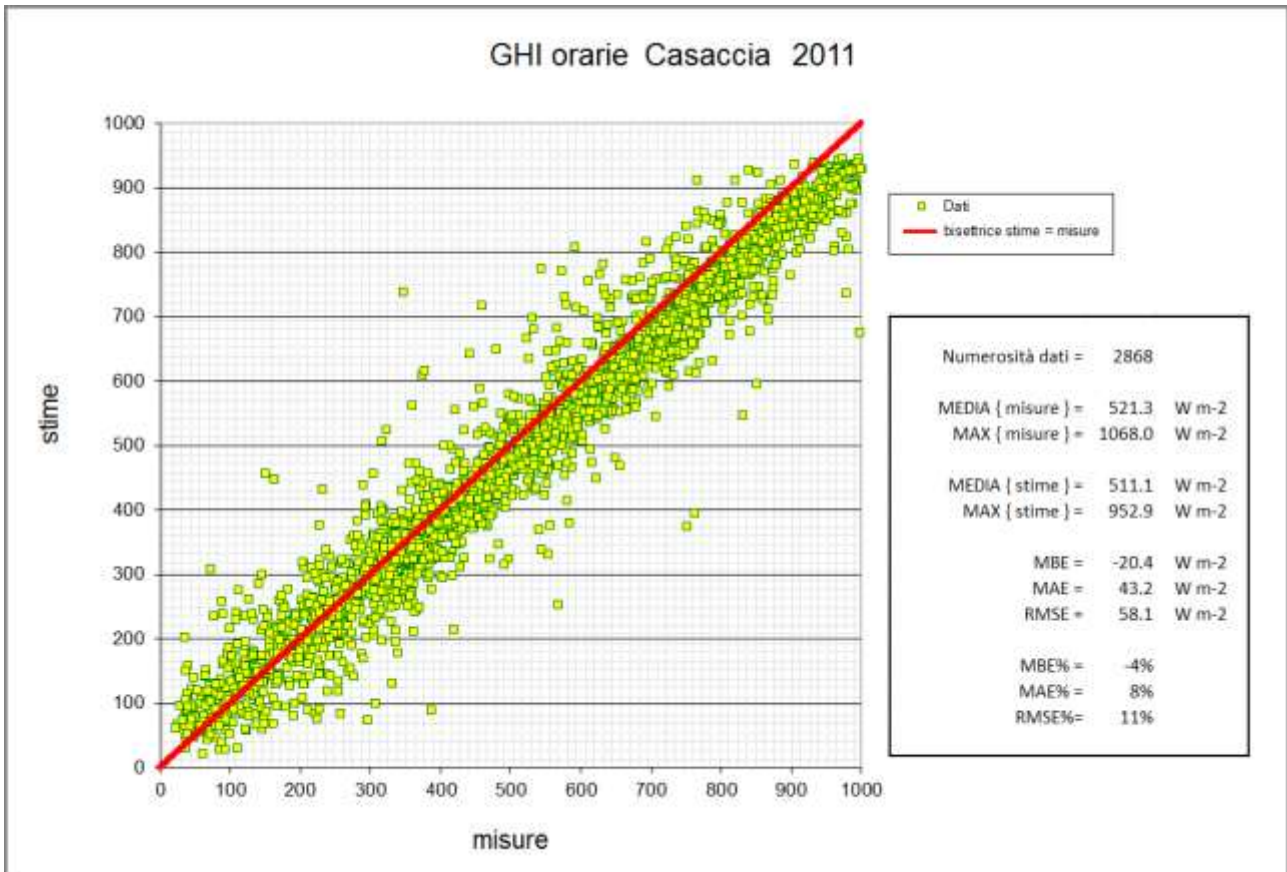


Figura 8. Casaccia, diagramma di dispersione della GHI oraria: stime vs misure, anno 2011

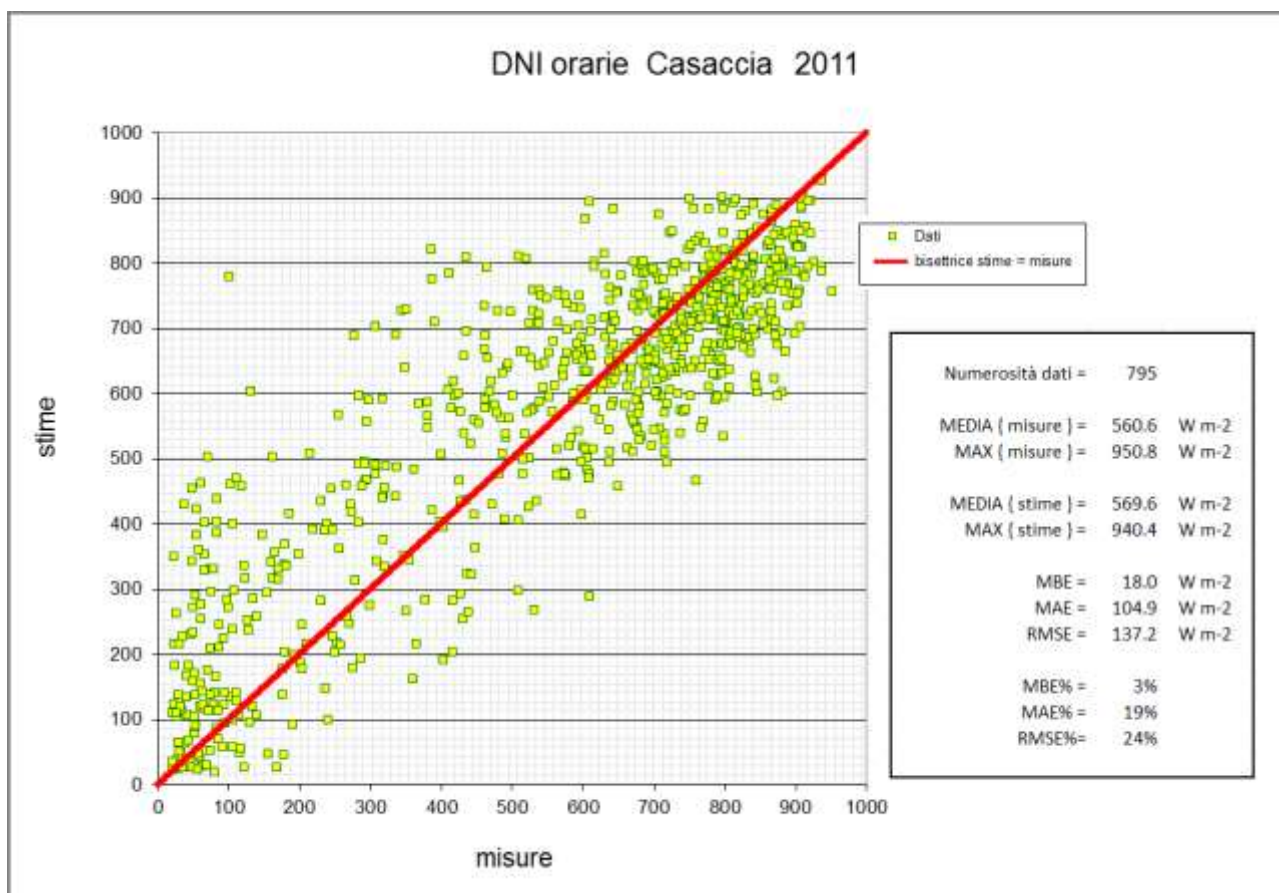


Figura 9. Casaccia, diagramma di dispersione della DNI oraria: stime vs misure, anno 2011

Per un esame quantitativo completo, occorre ripetere i confronti fra misure e stime per tutte le possibili situazioni:

- per la GHI e DNI;
- per i dati orari, giornalieri e giornalieri medi mensili;
- per l'intero periodo 2006÷2015 e per singoli anni.

I grafici seguenti esemplificano tutte queste situazioni.

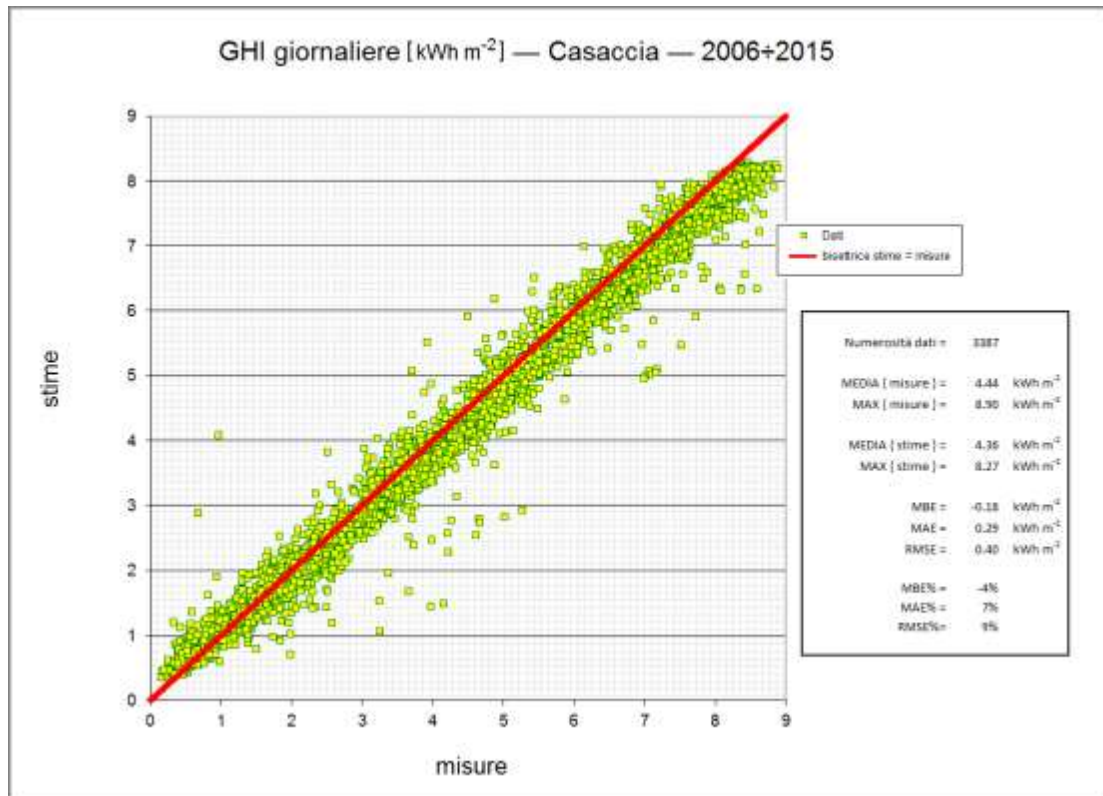


Figura 10. Casaccia, diagramma di dispersione della GHI giornaliera: stima vs misure, periodo 2006÷2015

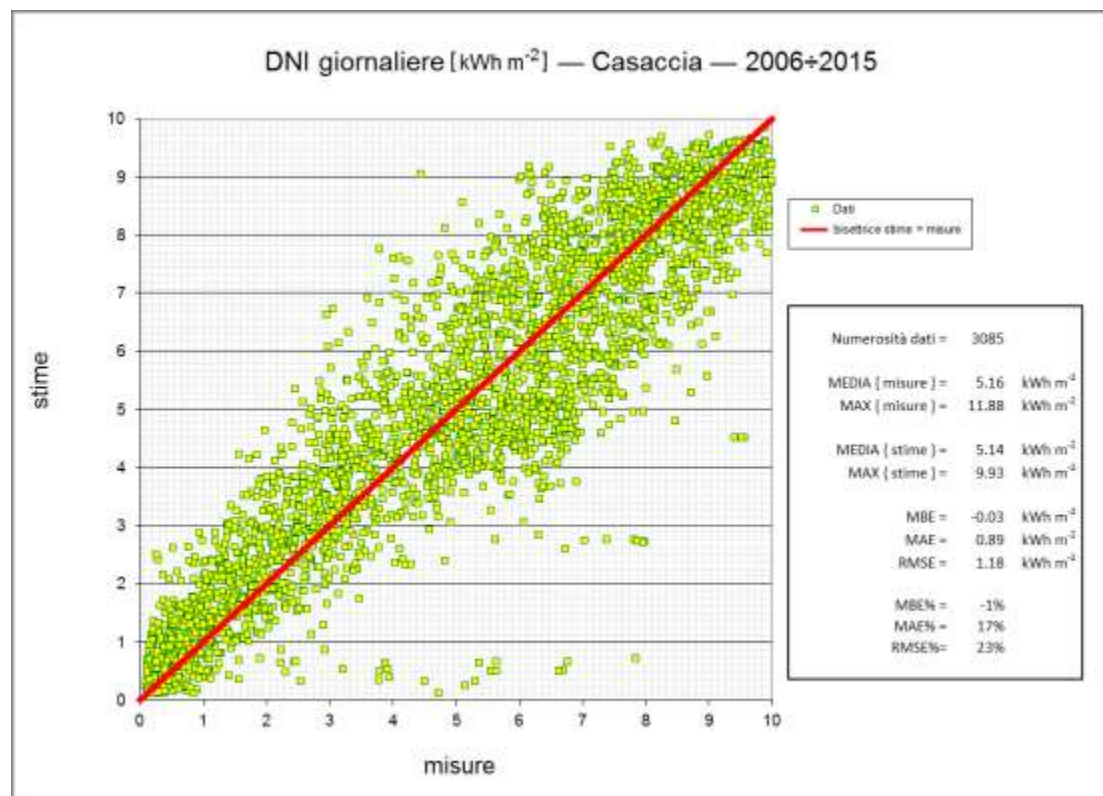


Figura 11. Casaccia, diagramma di dispersione della DNI giornaliera: stima vs misure, periodo 2006÷2015

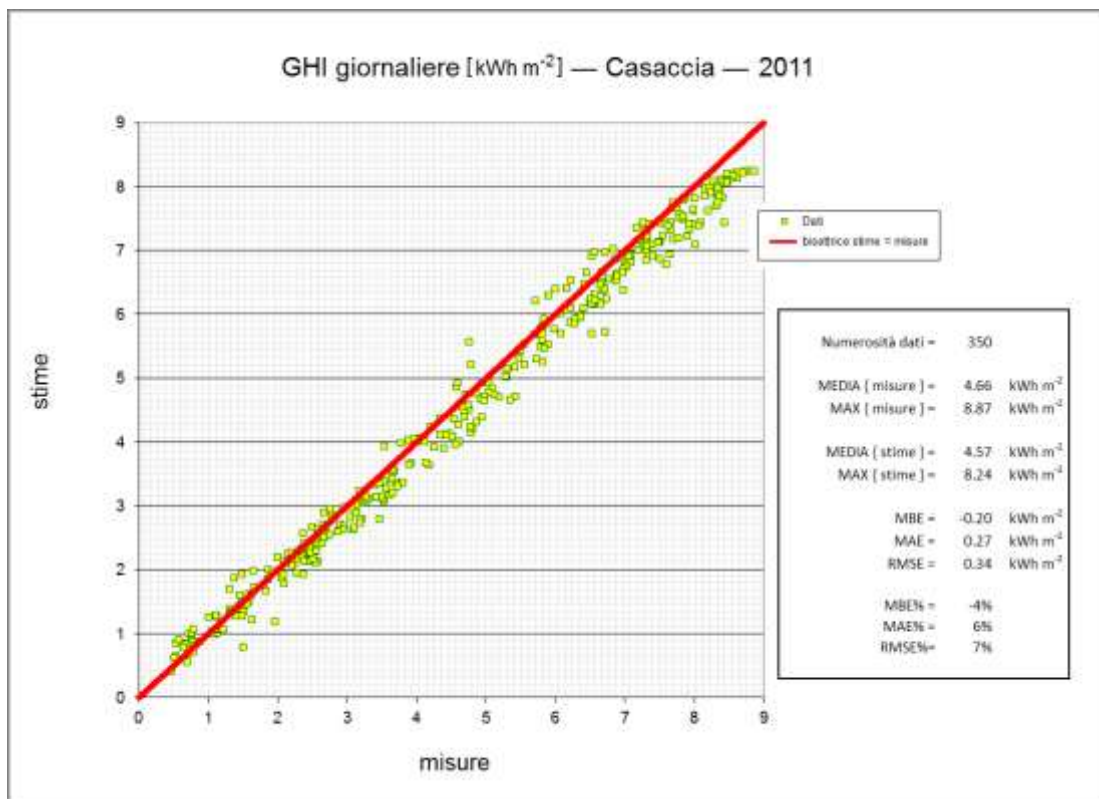


Figura 12. Casaccia, diagramma di dispersione della GHI giornaliera: stime vs misure, anno 2011

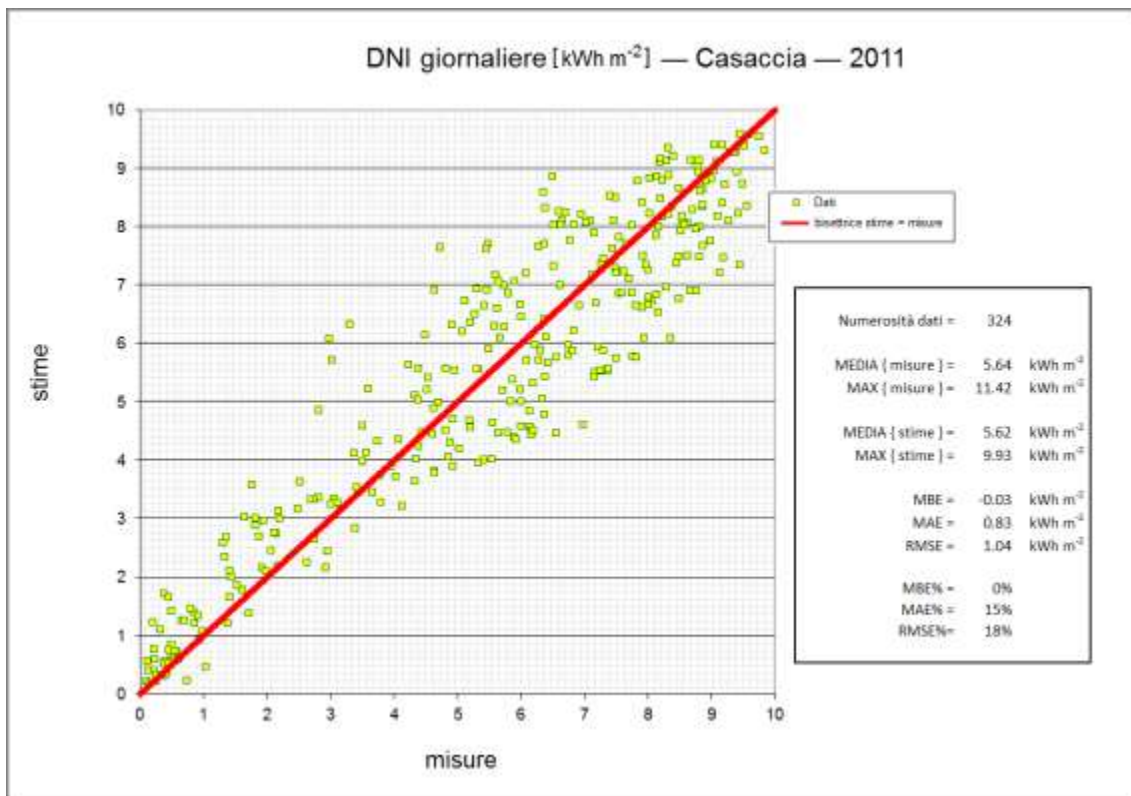


Figura 13. Casaccia, diagramma di dispersione della DNI giornaliera: stime vs misure, anno 2011

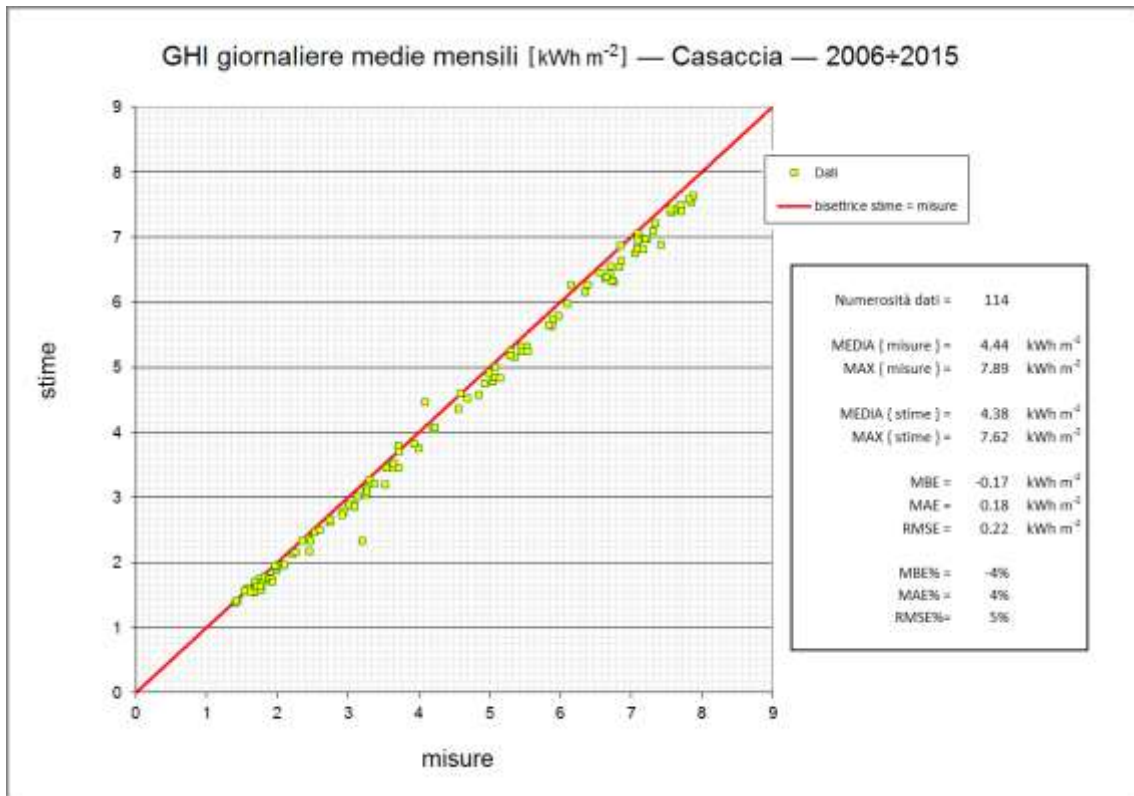


Figura 14. Casaccia, diagramma di dispersione della GHI giornaliera media mensile: stima vs misure, periodo 2006÷2015

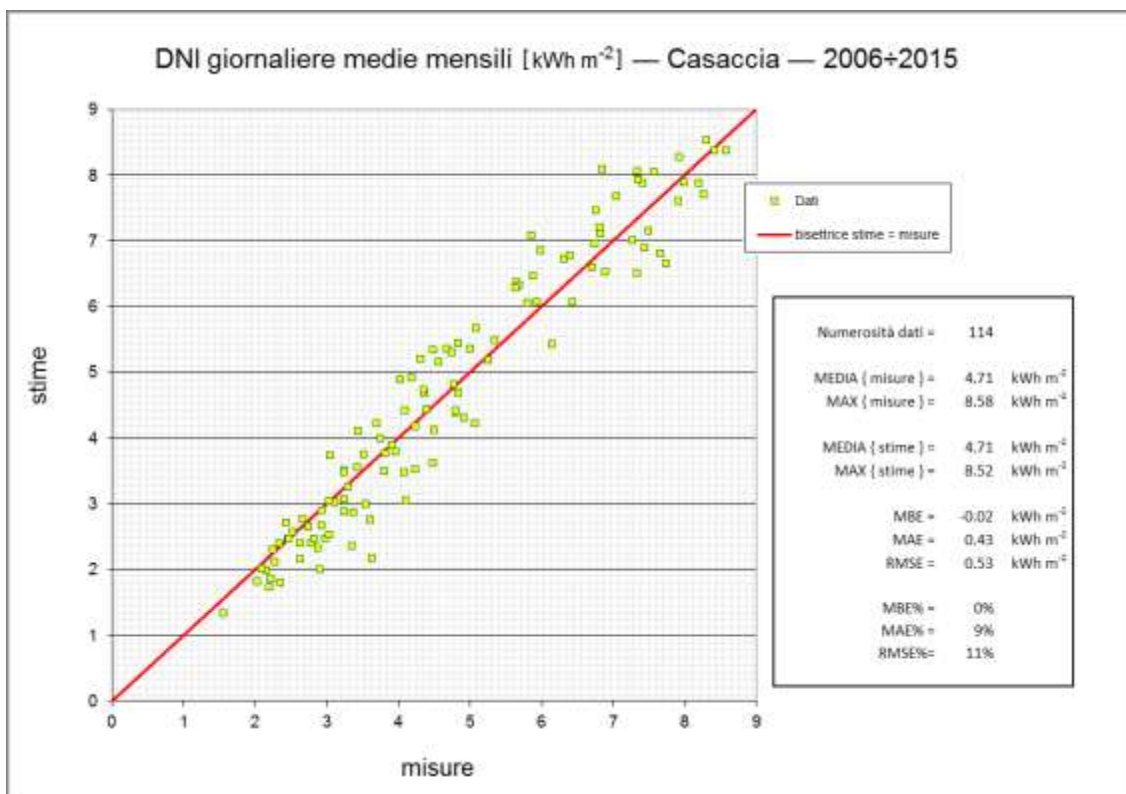


Figura 15. Casaccia, diagramma di dispersione della DNI giornaliera media mensile: stima vs misure, periodo 2006÷2015

Gli indici migliorano passando dai dati orari a quelli giornalieri e poi a quelli giornalieri medi mensili. Le tabelle che seguono mostrano i dati riassuntivi (il valore medio è riferito alle misure):

- per le irradianze *orarie*:

	Numerosità dei dati	Valore medio	MBE		RMSE	
		W m ⁻²	W m ⁻²	%	W m ⁻²	%
GHI	27516	495.7	-16.8	-3	63.3	13
DNI	9655	544.4	7.9	1	148.5	27

- per le irradiazioni *giornaliere*:

	Numerosità dei dati	Valore medio	MBE		RMSE	
		kWh m ⁻²	kWh m ⁻²	%	kWh m ⁻²	%
GHI	3387	4.44	-0.18	-4	0.40	9
DNI	3085	5.16	-0.03	-1	1.18	23

- per le irradiazioni *giornaliere medie mensili*:

	Numerosità dei dati	Valore medio	MBE		RMSE	
		kWh m ⁻²	kWh m ⁻²	%	kWh m ⁻²	%
GHI	114	4.44	-0.17	-4	0.22	5
DNI	114	4.71	-0.02	0	0.53	11

4.2 Confronti fra anni meteorologici tipici per la radiazione

Delle tre fonti disponibili per Casaccia: misure, stime e dati sintetici dell'AMT Meteonorm, solo le prime due sono state utilizzate nei confronti mostrati fin qui. Il motivo è che finora si è ricorso alle sovrapposizioni degli andamenti orari e ai diagrammi di dispersione, e questi due strumenti sono applicabili solo a coppie di serie di dati (orari, giornalieri, mensili, annui) acquisiti *contemporaneamente* o per *medesimi intervalli temporali*. In un anno tipico, al contrario, i dati vengono "depurati" dal loro riferimento annuale, per cui i dati orari e giornalieri che vi compaiono non fanno riferimento ad alcun anno particolare, bensì genericamente all'intero intervallo di anni utilizzato per la sua costruzione. D'altra parte, se la costruzione dell'AMT è stata effettuata correttamente, dovendo esso fornire stime attendibili per il lungo termine, i valori mensili e quello annuo dovrebbero essere confrontabili e risultare ampiamente sovrapponibili. Pertanto, qui di seguito sono confrontati i dati giornalieri medi mensili e annui della GHI e della DNI ricavati dagli AMT calcolati per le tre fonti:

- misure ENEA dell'intervallo 2006-2015;
- stime satellitari ENEA dell'intervallo 2006-2015;
- dati sintetici Meteonorm.

Le tabelle 2 e 3 e le figure 16 e 17 riassumono i risultati. Assumendo come valori di riferimento le misure, si vede che le stime ottenute con la modellizzazione dell'ENEA sono sostanzialmente concordanti, mentre i dati Meteonorm se ne discostano notevolmente, più precisamente sottostimano i valori delle misurazioni. In termini numerici, considerando ad esempio la DNI, si ha che mentre la stima ENEA annua (1738 kWh/m²) è di poco inferiore (-2%) alla corrispondente misura (1773 kWh/m²), il dato Meteonorm (1629 kWh/m²) differisce invece dell'8% circa per difetto. Queste differenze si apprezzano anche visivamente nei profili

annui delle DNI g.m.m. mostrate in figura 17: nei mesi in cui la DNI g.m.m. è più elevata — quelli che contribuiscono in misura maggiore all’ammontare totale annuo — i profili delle misure e delle stime ENEA sono sostanzialmente sovrapposti, mentre quello Meteonorm se ne discosta verso il basso.

Infine, confrontando il grafico della GHI (figura 16) con quello della DNI (figura 17) si vede che nel primo caso l’accordo fra le tre fonti è complessivamente migliore. Ciò è dovuto al fatto che la GHI è “modellizzabile” in maniera più immediata rispetto alla DNI, mentre quest’ultima è normalmente derivata dall’altra.

Tabella 2

Casaccia — GHI giornaliera media mensile e annua [kWh/m²] — AMT			
	misure ENEA	stime ENEA	dati sintetici Meteonorm
gen	1.75	1.70	1.78
feb	2.75	2.49	2.69
mar	3.64	3.75	3.90
apr	5.47	5.24	4.88
mag	6.65	6.54	6.27
giu	7.20	6.97	6.88
lug	7.43	7.38	7.17
ago	6.40	6.43	6.17
set	4.85	4.57	4.54
ott	3.26	3.09	2.98
nov	1.97	1.95	1.96
dic	1.43	1.62	1.51
anno	1610	1577	1546

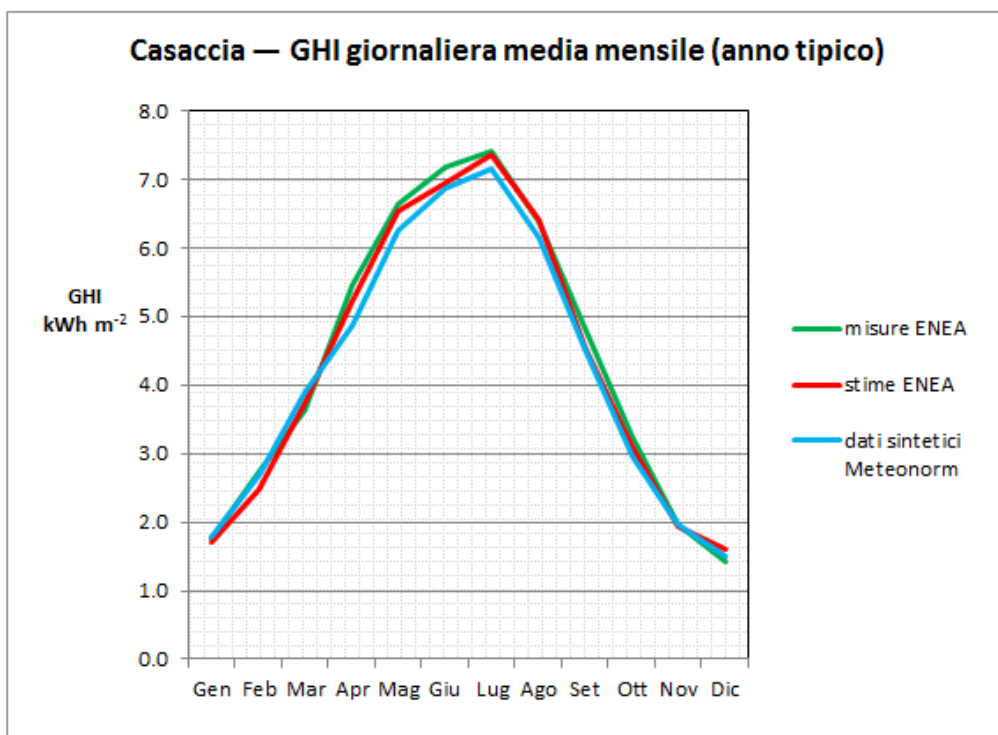


Figura 16. Casaccia — Profili della GHI giornaliera media mensile (anno tipico).

Tabella 3

DNI giornaliera media mensile e annua [kWh/m²] — Casaccia — AMT

	misure ENEA	stime ENEA	dati sintetici Meteonorm
Gen	2.84	2.3	2.76
Feb	3.57	2.9	3.41
Mar	3.99	4.17	4.13
Apr	5.67	5.35	4.10
Mag	6.45	6.77	6.11
Giu	7.21	7.2	6.14
Lug	7.81	8.04	7.27
Ago	6.67	7.15	6.57
Set	5.20	4.69	4.53
Ott	3.86	3.5	3.46
Nov	2.60	2.39	2.37
Dic	2.31	2.52	2.58
anno	1773	1738	1629

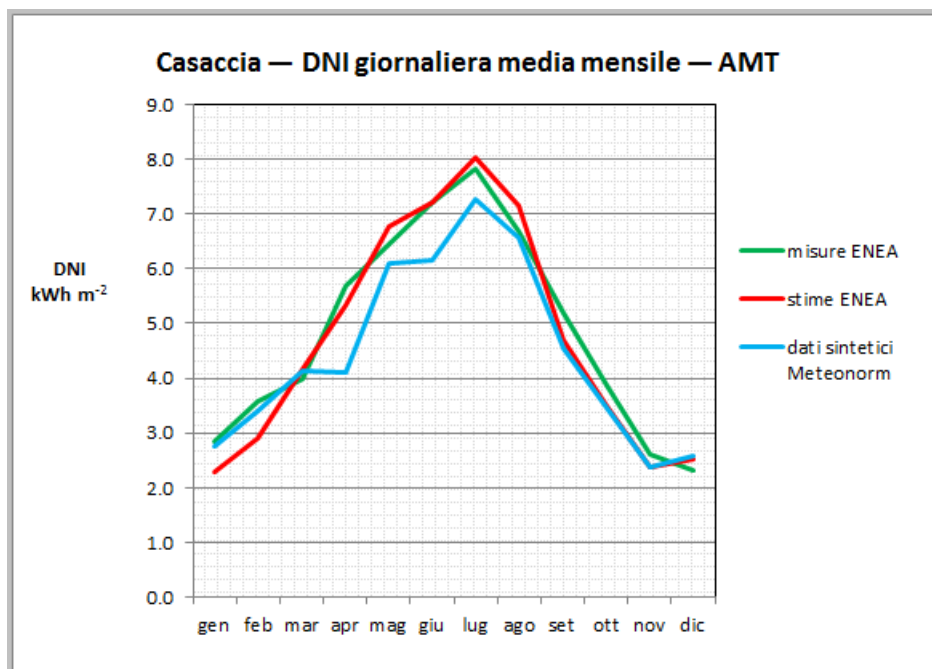


Figura 17. Casaccia — Profili della DNI giornaliera media mensile (anno tipico).

Le differenze a livello giornaliero medio mensile, appena viste fra le misure e le stime ENEA da un lato e i dati Meteonorm dall'altro, si riscontrano anche all'esame delle irradianze orarie. Nella figura 19, ad esempio, sono mostrati i grafici del *numero di ore sopra soglia* della DNI desunti dagli AMT delle tre fonti. Le ordinate riportano i valori della DNI che fungono da soglie, mentre in ascissa sono riportati il numero delle ore annue in cui la DNI è risultata superiore a tali soglie. Come termine di paragone, nella figura sono riportati anche il numero totale di ore presenti in un anno e quello delle sole ore diurne — di notte la DNI è nulla — per Casaccia (la durata del giorno dipende, tra l'altro, dalla latitudine e pertanto differisce da una località all'altra). Come si vede, c'è sostanziale sovrapposizione fra i due grafici delle fonti ENEA, mentre quello di Meteonorm si discosta dai primi (per numero di ore, che risulta inferiore) nell'intervallo dei valori intermedi della DNI, ossia fra 400 e 800 W/m².

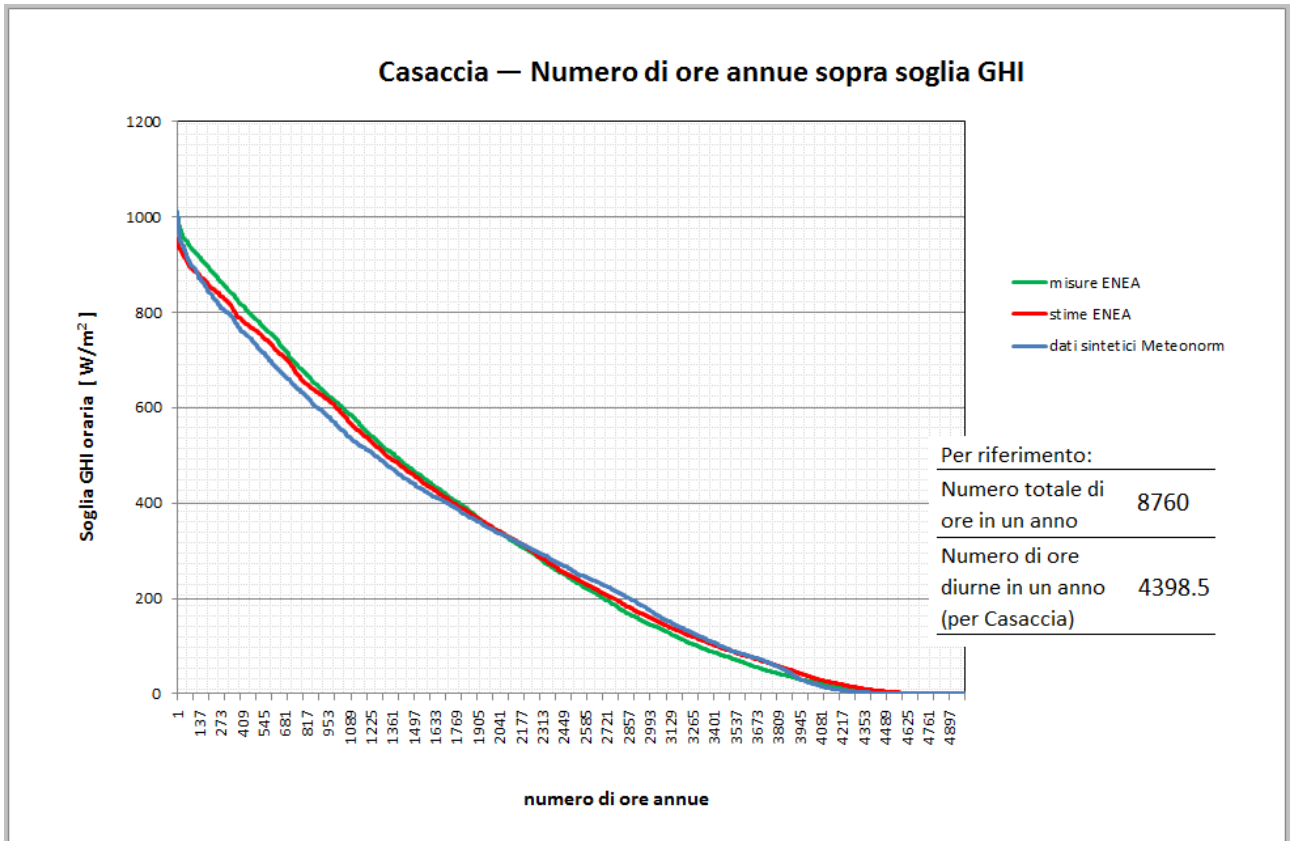


Figura 18. Casaccia — Numero di ore annue sopra soglia per la GHI.

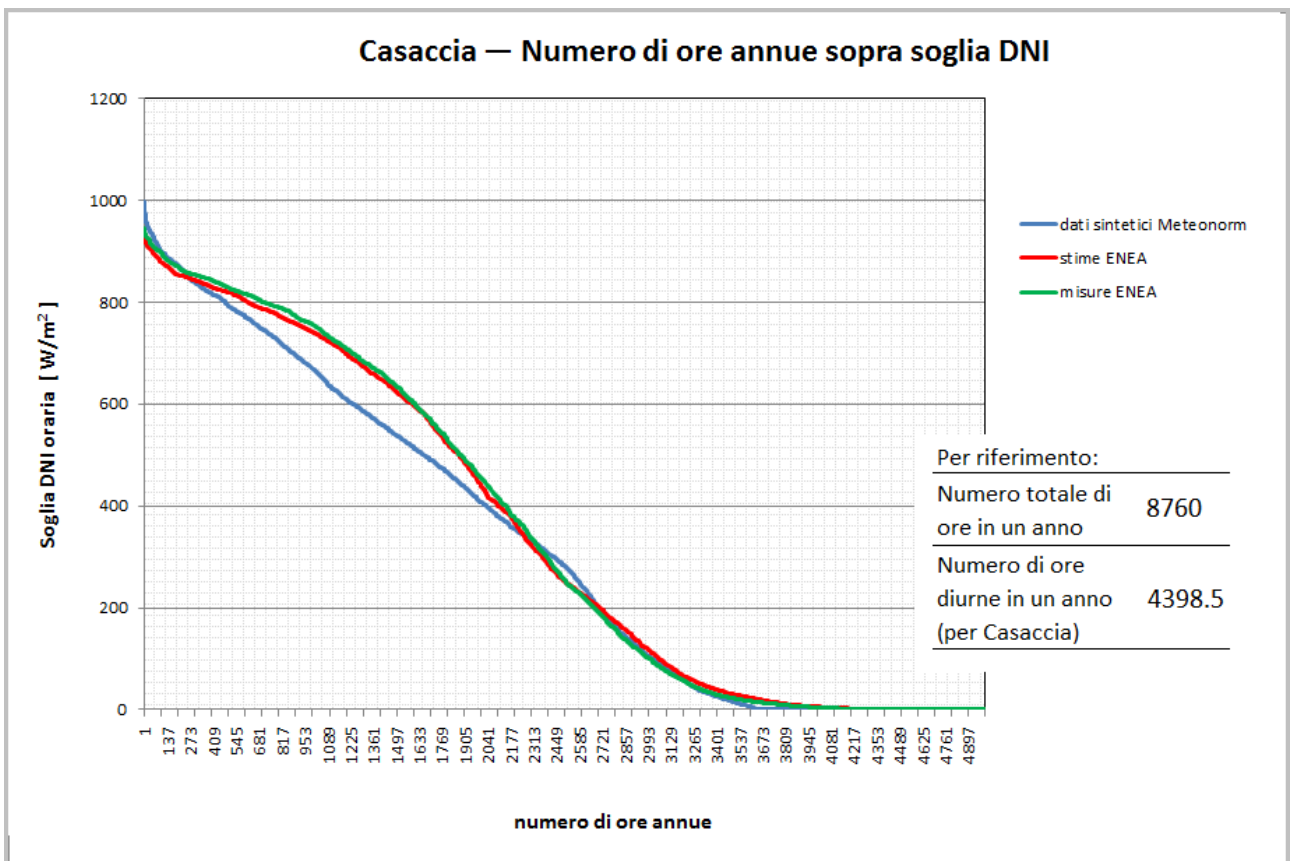


Figura 19. Casaccia — Numero di ore annue sopra soglia per la DNI.

5 Conclusioni

L'attività descritta in questo rapporto si prefiggeva lo scopo di definire una procedura per la caratterizzazione meteorologica di un sito per la localizzazione di un impianto CSP. Lo studio è stato svolto con riferimento alla Casaccia, perché sono state acquisite nel tempo le irradianze solari globale (orizzontale: GHI) e diretta (normale: DNI).

La disponibilità dei dati di misura ha reso possibile i confronti con le stime della radiazione solare (ancora, in termini di GHI e DNI) ricavabili dalle immagini satellitari di copertura nuvolosa grazie all'applicazione di modelli sviluppati in ENEA. Le stime ENEA sono disponibili per qualunque località italiana, a partire dal 2006, con frequenza che si spinge fino a singoli valori per quarto d'ora. In questo lavoro il confronto con le misure è stato effettuato con i dati orari estratti dalle mappe in corrispondenza della località di Casaccia per tutto il periodo che va dal 2006 al 2015. Il confronto fra misure e stime ha provato che queste ultime costituiscono uno strumento sufficientemente accurato per la valutazione del potenziale radiativo solare al suolo.

La metodologia di calcolo più utile e utilizzata per questo tipo di valutazioni si basa sulla stesura dell'*anno meteorologico tipico* (AMT), costituito dai valori orari di un anno delle grandezze meteo coinvolte. Si parla poi dell'*AMT per la radiazione solare* quando le irradianze solari sono, come nel caso di applicazioni alla tecnologia CSP, le più significative in relazione alle finalità perseguite. Pertanto, nel caso della Casaccia, si è provveduto a redigere l'anno tipico con le irradianze globale e diretta ricavate da fonte satellitare grazie ai modelli ENEA.

6 Sviluppi futuri

Nel futuro, s'intende:

- continuare con la misurazione della radiazione solare a intervalli orari e sub-orari mediante la rete solarimetrica dell'ENEA e in particolare con la centralina di Casaccia;
- migliorare la modellistica per la stima della radiazione solare globale (GHI) e diretta (DNI) al fine di rendere accessibile il dato satellitare già abbondantemente disponibile, per tutte le località in cui i dati di misura non sono subito disponibili e una campagna lunga e onerosa si rivelerebbe intempestiva rispetto ai tempi di realizzazione dell'impianto preconizzato;
- completare la stazione solarimetrica di Casaccia dotandola di sensori per la misurazione di tutte le altre grandezze meteorologiche (temperatura, umidità e vento) che servono a caratterizzare compiutamente una località dal punto di vista delle condizioni meteorologiche e, in particolare, a definire modalità con cui le condizioni meteo influenzano la progettazione e l'esercizio degli impianti CSP. In tal modo la disponibilità di serie storiche di parametri meteo misurati nello stesso luogo e negli stessi istanti fornirebbe la garanzia di congruenza a tutte le analisi in cui la conoscenza congiunta di più parametri è essenziale.
- infine, verrà puntata maggiore attenzione alle *previsioni* della radiazione solare, per conoscere in anticipo l'energia solare che sarà disponibile nel breve periodo, cioè nel giorno attuale, domani e dopodomani, al fine di garantire una corretta gestione dell'energia prodotta.

Appendice 1 — I dati ENEA da fonte satellitare

A1.1 Le immagini satellitari METEOSAT di copertura nuvolosa

In ENEA l'attività di raccolta, archiviazione e pubblicazione dei dati di radiazione solare è iniziata sin dagli anni Novanta del secolo scorso e prosegue tuttora. Uno dei metodi di ottenimento dei dati procede dall'elaborazione delle immagini satellitari di copertura nuvolosa [26,27,28,29,30]. Tali immagini sono acquisite dall'*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) [31], nell'intervallo $500 \div 900 \text{ nm}$ dello spettro elettromagnetico, intervallo che cade quasi per intero nella banda *visibile*. Dal 2006 le immagini sono ottenute con frequenza pari una ogni 15 minuti e presentano un dettaglio spaziale che alle nostre latitudini è pari a circa $1 \times 1.5 \text{ km}^2$ per pixel (HRV, *High Resolution Visible*) [32]. Per i propri scopi l'ENEA utilizza un ritaglio che copre la sola regione italiana; il dato di copertura nuvolosa è espresso in una scala numerica che si estende sull'intervallo $0 \div 255$. La disponibilità di mappe, se correttamente georeferenziate, permettono di estrarne i dati virtualmente per qualunque località della superficie terrestre rappresentata.

Le immagini satellitari di *copertura nuvolosa* mostrano la superficie del pianeta così come viene vista dal satellite al momento della loro "cattura" e dunque forniscono una misura del coefficiente di riflessione (*albedo*) della superficie riflettente, che può essere uno strato di nubi, in caso di cielo coperto, oppure direttamente il suolo terrestre quando sussistono condizioni di cielo sereno. Poiché in assenza di nubi (ossia per condizioni di *cielo sereno*) il comportamento dell'atmosfera ai fini dell'attenuazione dei raggi solari che l'attraversano è ben caratterizzato, la variabilità della radiazione che giunge al suolo – una volta che si è tenuto in debito conto della posizione relativa fra Sole e Terra nei diversi periodi dell'anno e nei diversi momenti del giorno – è attribuibile in prima approssimazione alla minore o maggiore quantità di nubi presenti a causa delle condizioni meteorologiche del momento. Gli algoritmi messi a punto in ENEA, basati su appropriati modelli di comportamento dell'atmosfera, consentono di stimare il dato di radiazione a partire da un opportuno *indice di copertura nuvolosa* che si ottiene confrontando l'immagine 'attuale' del pianeta visto dal satellite, con una sua rappresentazione riferita a condizioni di cielo sereno. L'indice così calcolato varierà fra zero (cielo sereno in assenza di nubi) e uno (cielo completamente coperto di nubi). Nella figura 1 sono mostrate due di tali immagini: quella di sinistra è stata registrata dal satellite meteorologico in una giornata particolarmente nuvolosa e la regione italiana si intravede parzialmente sotto la coltre delle nubi, mentre l'altra si riferisce allo stesso periodo temporale e corrisponde alla situazione priva di nubi.

A1.2 Modelli per la radiazione solare al suolo

La radiazione solare che giunge al suolo risente delle vicissitudini che subisce nell'attraversare lo strato di atmosfera che avvolge la Terra. Una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (*scattering*) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapore acqueo, le nubi e gli aerosol); così, alcuni raggi vengono deviati verso il basso e raggiungono il suolo sotto forma di *radiazione solare diffusa* proveniente da ogni direzione del cielo. Ma non tutti i raggi solari vengono intercettati: infatti, parte di essi attraverseranno l'atmosfera indenni e giungeranno al suolo come *radiazione solare diretta*. La direzione di provenienza di quest'ultima non sarà ora l'intera volta celeste, bensì uno stretto angolo solido di cielo in cui

si trova il Sole al momento, posizione che com'è noto cambia nel corso della giornata. La *radiazione solare globale* che investe una superficie disposta orizzontalmente è data infine dalla somma delle componenti diretta e diffusa:

$$I = I_b + I_d = I_{bn} \cos \vartheta_z + I_d \quad (1)$$

in cui:

- I è l'irradianza (potenza incidente sull'unità di superficie) solare globale sul piano orizzontale (*Global Horizontal Irradiance, GHI*);
- I_b è l'irradianza solare diretta sul piano orizzontale;
- I_{bn} è l'irradianza solare diretta sul piano normale (*Direct Normal Irradiance, DNI*);
- I_d è l'irradianza solare diffusa sul piano orizzontale;
- ϑ_z è l'angolo zenitale, ovvero l'angolo che i raggi solari incidenti formano con la normale alla superficie orizzontale.

Il risultato netto della presenza dell'atmosfera si traduce in un'attenuazione dell'irradianza che giunge dal Sole fino alla sommità dell'atmosfera. In formula:

$$I = K_T \cdot I_0 \quad (2)$$

in cui:

- I_0 è l'irradianza extra-atmosferica su piano orizzontale (EHI). Si veda l'appendice 2 per una sua espressione analitica;
- K_T è il *coefficiente di trasmissione globale* dei raggi solari attraverso l'atmosfera (*clearness index*). Nella modellistica adottata in ENEA, questo viene scritto nella forma:

$$K_T = K_{Tc} K_c = B \cos^\alpha \vartheta_z \cdot e^{-\beta \cdot Ai^2} \quad (3)$$

dove:

- $K_{Tc} = B \cos^\alpha \vartheta_z$ è il coefficiente di trasmissione (globale) in condizione di cielo sereno (*clear-sky transmittance*). Nell'espressione precedente, α è un parametro sperimentale che determina la "forma" tramite il termine $\cos^\alpha \vartheta_z$ della curva di attenuazione dell'irradianza globale nell'arco della giornata per condizioni di cielo sereno e di norma vale 0.15, mentre il parametro B ne modula il valore massimo (figura 24);

$K_c = e^{-Pi - Ai^2}$ è il fattore che tiene conto dell'attenuazione dovuta alla presenza delle nubi (*indice di cielo sereno, clear-sky index*). Nella formula, i è l'indice di copertura nuvolosa ricavato dalle immagini satellitari.

I valori dei parametri B , P e A introdotti nel modello dell'equazione (3) vengono stimati per regressione statistica con misure effettuate al suolo in località opportunamente distribuite dal punto di vista geografico. In particolare, il primo è un parametro statistico che caratterizza il cielo in assenza di nubi ("cielo sereno") e pertanto dipende soltanto dal carico di aerosol e di vapore acqueo presenti nell'atmosfera; è dunque una misura del grado di "torbidità dell'atmosfera serena" e di conseguenza varia da luogo a luogo e in funzione delle stagioni. Nell'algoritmo implementato in ENEA, esso si fa dipendere dalla posizione geografica e dal mese; il risultato è la redazione di dodici mappe mensili dalle quali estrarre i valori in corrispondenza della località e del mese pertinenti, valori da utilizzare per la stima della GHI.

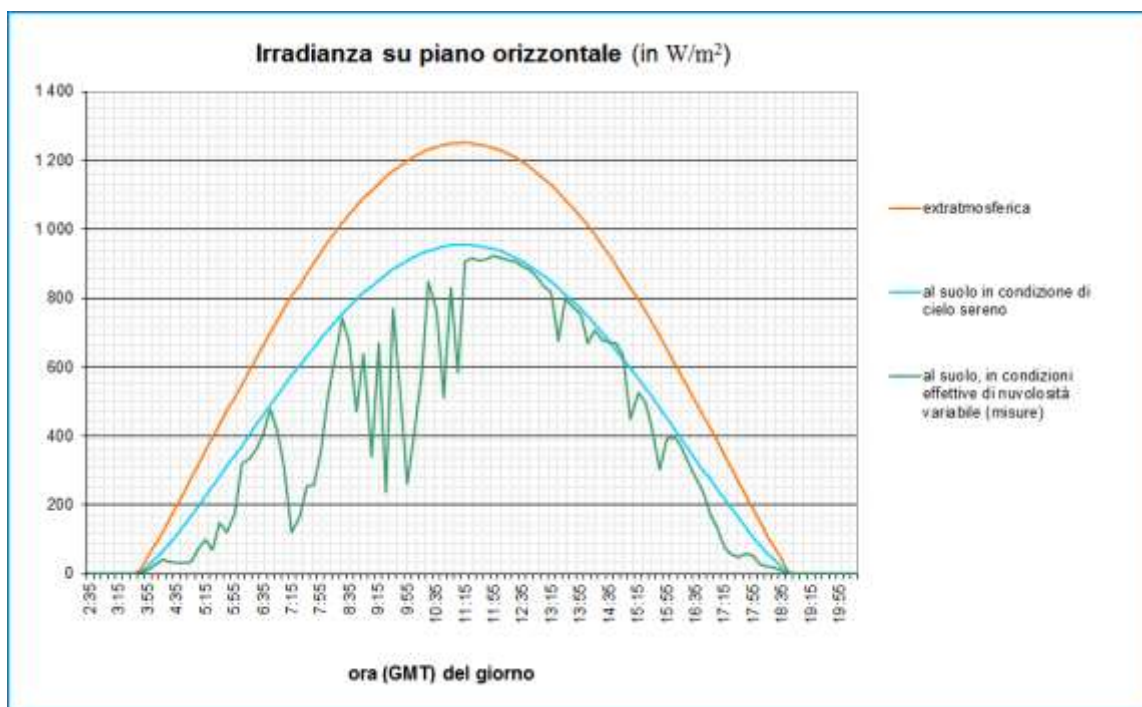


Figura 24. Irradianza globale su piano orizzontale, nell'arco della giornata.

La caratterizzazione del fenomeno radiativo al suolo viene completato con la stima delle irradianze diretta e diffusa ma, grazie alla relazione (1), è sufficiente stimare una sola delle due perché l'altra si ottiene per differenza dall'irradianza globale. Comunque, i modelli implementati in ENEA permettono la stima indipendente di entrambi; per il calcolo immediato dell'irradianza diffusa orizzontale si ricorre alla formula:

$$I_d = k \cdot I \quad (4)$$

dove il fattore k ha significato di frazione della radiazione diffusa (sul piano orizzontale) ed è calcolato mediante la correlazione di Boland & Ridley [4]:

$$k = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta \cdot K_T}} \quad (5)$$

in cui α e β sono parametri stimabili per regressione lineare da misure di globale e diffusa⁹. Note le irradianze globale e diffusa, quella diretta su piano orizzontale si ricava per differenza:

$$I_b = I - I_d = I - k \cdot I = I(1 - k) \quad (6)$$

mentre quella diretta sul piano normale (DNI) con la formula:

$$I_{bn} = \frac{I_b}{\cos \vartheta_z} \quad (7)$$

Va detto che in tutte le definizioni precedenti le irradianze si intendono riferite a un dato istante, ma è immediato estendere il loro significato a intervalli di tempo finiti, ad esempio *orari*; in questo caso, però, trattandosi ancora di potenze (incidenti) per unità di superficie, vanno interpretate come valori medi nell'intervallo e riferite all'istante centrale di questo. Per intervalli finiti – siano essi orari, giornalieri, mensili o annui – è anche possibile derivare un'altra grandezza pertinente, ossia l'energia incidente per unità di area e per l'intero intervallo temporale considerato. Questa grandezza prende il nome d'*irradiazione* (*oraria, giornaliera ecc.*) e si ottiene dall'irradianza per integrazione:

$$H = \int_{\Delta t} I dt \quad (8)$$

in cui:

I è l'irradianza coinvolta (globale, diffusa, extra-atmosferica ecc.);

H è la corrispondente *irradiazione* risultante nel tempo Δt ; essendo per definizione un'energia per unità di superficie, si misura in joule al metro quadro, J / m^2 ; in ambito tecnico, è diffuso il kilowattora al metro quadro, kWh / m^2 .

A1.3 Le mappe di radiazione dell'ENEA

Le immagini satellitari di copertura nuvolosa costituiscono il dato di partenza di tutto il sistema di stima della radiazione solare. Grazie ai modelli descritti in precedenza, i valori (pixel) registrati nelle immagini vengono dapprima trasformati in dati di un opportuno indice di copertura nuvolosa e successivamente convertiti nei dati d'irradianza. Il risultato del calcolo è rappresentato da nuove mappe d'*irradianza* (Wm^{-2}) *globale e diffusa orizzontali e diretta normale*: tali mappe sono per frequenza temporale e risoluzione spaziale, uguali alle immagini METEOSAT di partenza. A partire dall'irradianza per ogni quarto d'ora si ricavano le mappe d'*irradianza media oraria* (Wm^{-2}) e le mappe d'*irradiazione* ($kWhm^{-2}$ o in $MJ m^{-2}$) *giornaliera, giornaliera media mensile* e infine *annua* (figura 25).

⁹ In letteratura è nota, tra le altre, anche la relazione di Erbs [5], qui usata invece per controllo e validazione dei valori ottenuti.

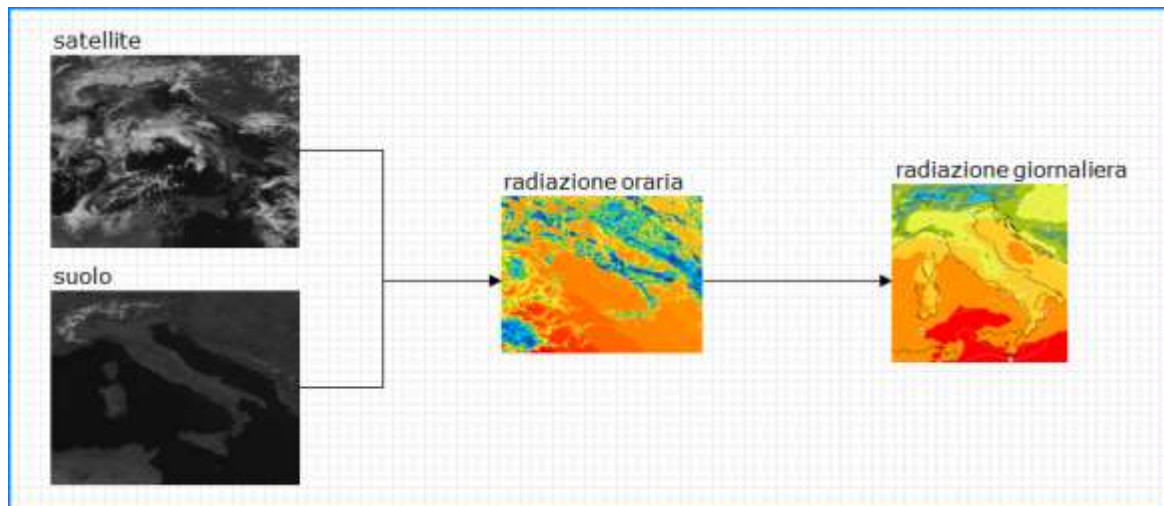


Figura 25. Schema di calcolo delle mappe di radiazione solare a partire dalle immagini di copertura nuvolosa.

Rispetto alle misure a terra usate per confronto, le stime mostrano scarti fino al 4-6% sul dato giornaliero medio mensile della radiazione globale su piano orizzontale: è un ottimo risultato se si tiene conto del metodo usato e del fatto che con questo metodo si dispone automaticamente della stima puntuale di radiazione per qualunque località italiana (e non solo per pochi siti). Scarti più grandi sono possibili per i dati giornalieri (fino al 10%) e per i dati orari (fino 20%).

Un esempio di mappa finale è riportata in figura 26. La mappa rappresenta la media pluriennale 2006-2012 dell'irradiazione globale annua su piano orizzontale in Italia. Nell'immagine, i colori della tavolozza esprimono l'intensità e sono scelti in modo che quelli *freddi* corrispondano ai valori bassi d'irradiazione, mentre quelli *caldi* ai valori alti, passando attraverso le tonalità di verde per i valori intermedi.

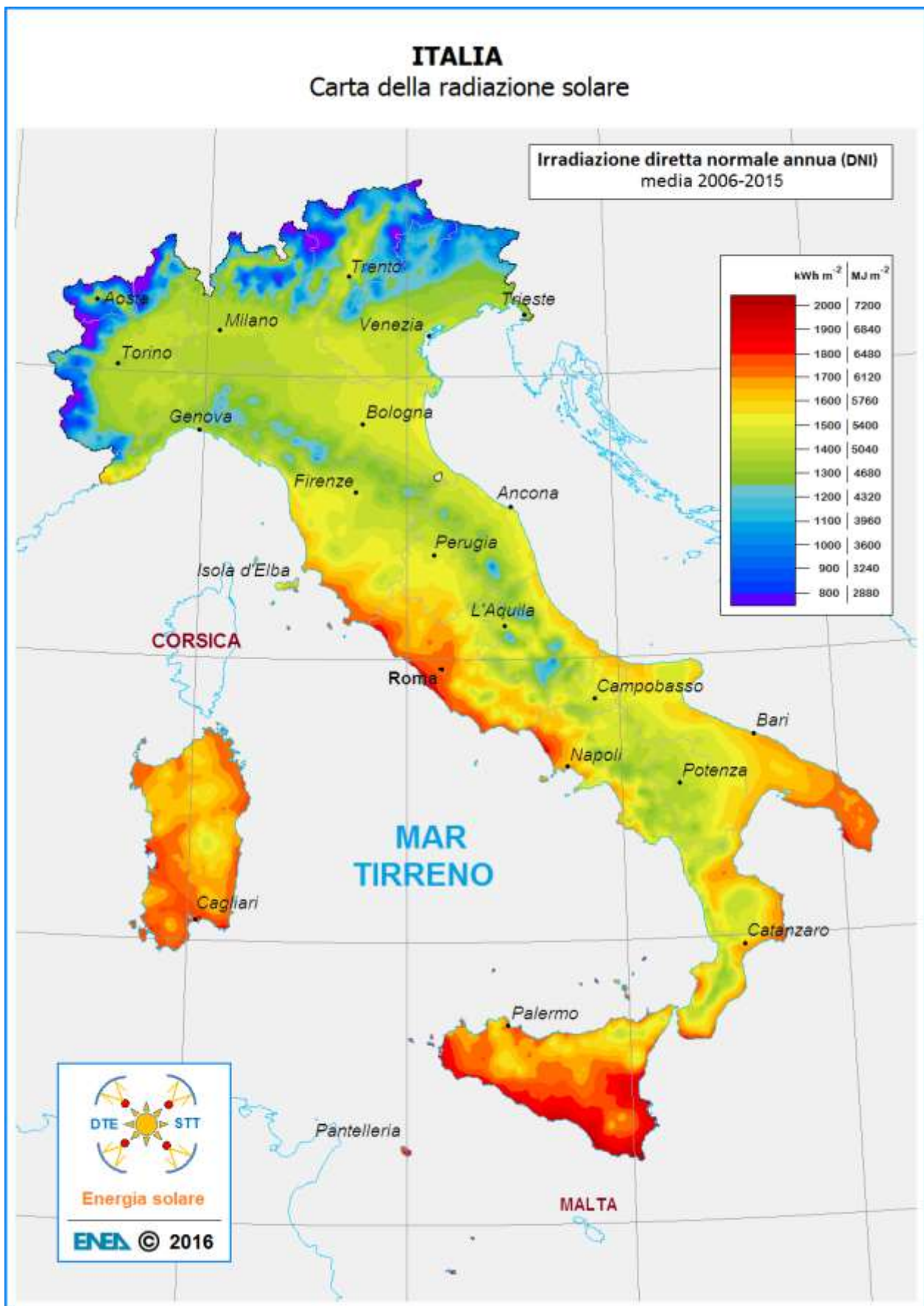


Figura 26. Mappa dell'irradiazione diretta normale (DNI) annua in Italia, media 2006-2015.

Poiché tutte le mappe sono georeferenziate, è possibile estrarre da esse i valori d'irradianza o irradiazione in corrispondenza di **qualunque località della regione italiana** – di cui siano assegnate le corrispondenti coordinate geografiche – e costruire per essa serie storiche pluriennali (figura 27).

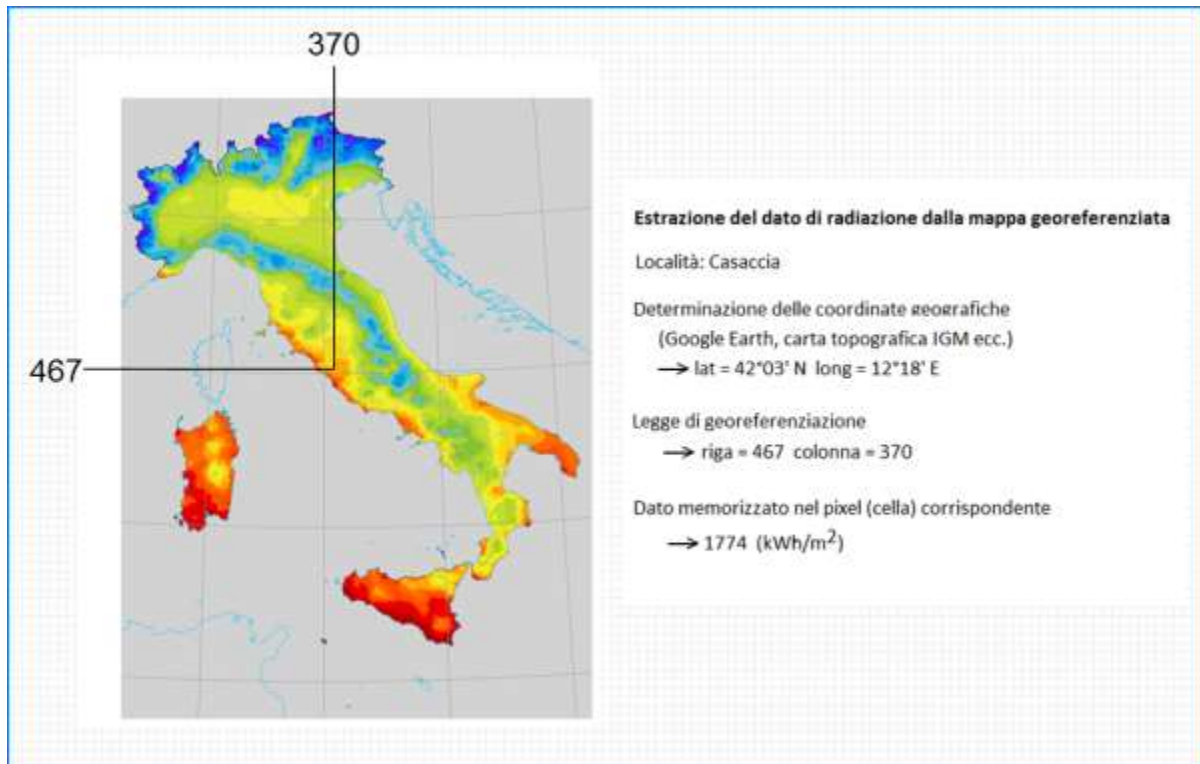


Figura 27. Estrazione dei valori di radiazione dalle mappe georeferenziate.

A1.4 Solaritaly : l'Atlante italiano della radiazione solare

I risultati della complessa mappatura della regione italiana sotto il profilo radiativo solare, sono dall'ENEA pubblicati anche in rete attraverso il sito *Solaritaly - Atlante italiano della radiazione solare* [26] (figura 28) e l'altro meno recente del *Profilo climatico dell'Italia* [27]. Il materiale pubblicato consta di mappe, tabelle di valori giornalieri medi mensili e strumenti di calcolo on-line.



Figura 28. Pagina iniziale del sito Solaritaly – Atlante italiano della radiazione solare.

Una sezione portante del sito dell'Atlante è quella deputata ai *Calcoli*. Essa consiste essenzialmente in uno strumento di calcolo on-line dell'irradiazione solare giornaliera media mensile – e dunque anche annua – per qualsivoglia località italiana e configurazione della superficie ricevente (quale può essere quella captante degli impianti energetici che sfruttano la fonte solare). I dati di partenza sono costituiti dalle mappe d'irradiazione su piano orizzontale redatte dall'ENEA e il sistema d'interrogazione prima estrae i valori in corrispondenza delle coordinate geografiche e poi li riporta sulla giacitura inclinata. Località geografica e orientazione della superficie sono scelte dall'utente.

Un'ultima possibilità offerta dalla procedura on-line riguarda l'eventuale presenza di ostacoli che per alcune ore del giorno possano schermare i raggi solari diretti sulla superficie ricevente (a causa di un'orografia particolare del terreno: colline ecc., o per la presenza di manufatti come edifici vicini ecc.). In questo caso occorre indicare l'intervallo – più corto di quello diurno – in cui i raggi solari diretti investono effettivamente la superficie, affinché la procedura ne tenga debito conto. In figura 29 è mostrato un esempio, relativo alla località di Roma, per la quale il sito dell'Atlante è stato interrogato per fornire l'irradiazione globale giornaliera media mensile in tre situazioni differenti: superficie captante orizzontale, parete verticale esposta a Sud (con coefficiente di riflessione molto alto), infine la medesima parete con presenza di ostacoli che – limitatamente ai mesi di aprile, maggio, luglio e ottobre – intercettano i raggi diretti. Si può constatare che nei mesi invernali, alle nostre latitudini, una superficie verticale esposta a Sud è investita da una quantità di radiazione solare maggiore rispetto a un'altra disposta orizzontalmente; il contrario avviene nei mesi estivi.

Con il programma è possibile studiare tutte le situazioni intermedie e ricavare indicazioni sull'orientazione ottimale delle superfici captanti degli impianti solari o degli edifici da climatizzare.

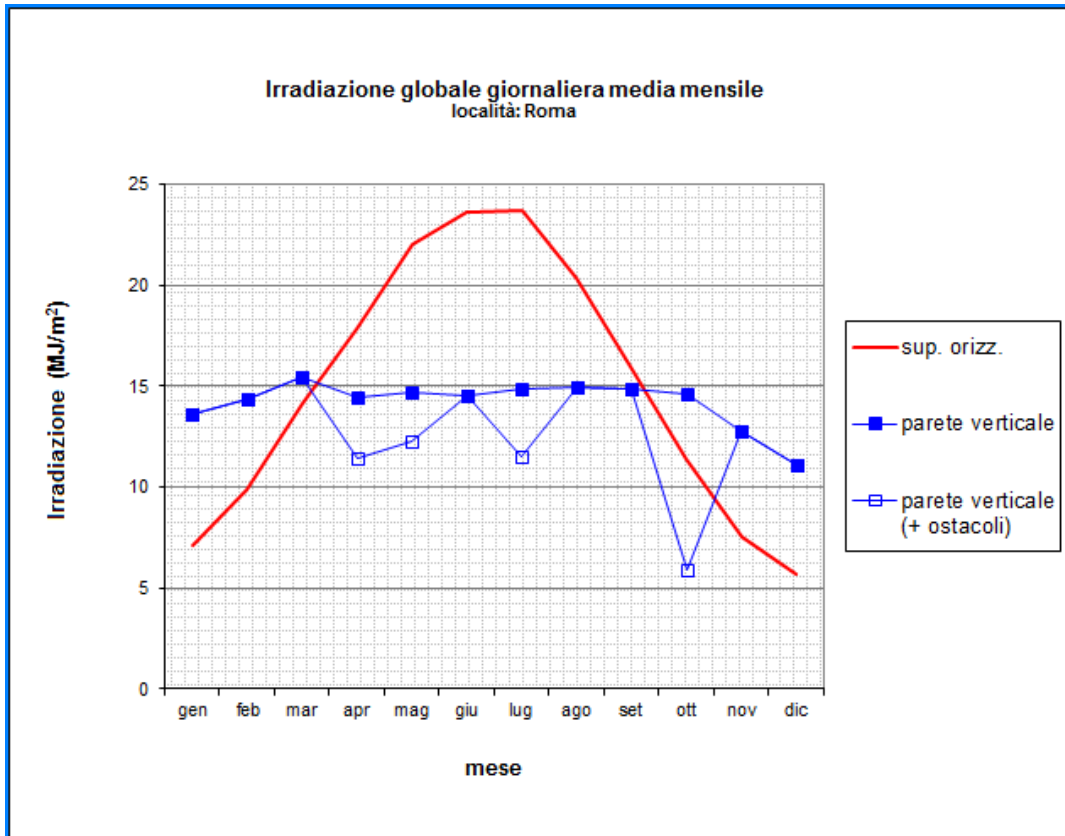


Figura 29. Sito Solaritaly, sezione Calcoli: risultati di un'interrogazione.

Appendice 2 — Irradianza extra-atmosferica sul piano orizzontale

L'irradianza extra-atmosferica su piano orizzontale (*Extraterrestrial Horizontal Irradiance*, EHI) è per definizione l'irradianza solare che incide sulla giacitura orizzontale alla sommità dell'atmosfera o, che è lo stesso, quella che si avrebbe al suolo qualora si prescindesse dall'attenuazione della radiazione solare durante il suo attraversamento dello strato atmosferico che avvolge la Terra. Dipende dalla potenza irradiante del Sole (ovviamente), dalla distanza variabile Sole-Terra e dall'angolo d'inclinazione dei raggi solari. Si calcola con la seguente espressione:

$$I_0 = I_{sc} E_0 \cos \vartheta_z \quad (9)$$

Dove:

I_{sc} è la *costante solare*, il cui valore è: $I_{sc} = 1367 \text{ W m}^{-2}$;

E_0 è il *fattore di eccentricità dell'orbita terrestre*; esprime la dipendenza dalla distanza Terra-Sole; è uguale a:

$$E_0 = (r_0/r)^2 \quad (10)$$

r_0 , r sono rispettivamente i valori medio e corrente della distanza Sole-Terra; r_0 è (ovviamente) costante e uguale a $150 \times 10^6 \text{ km}$, mentre r varia nel corso dell'anno.

Il prodotto della costante solare per il fattore di eccentricità è l'irradianza extra-atmosferica normale (*Extraterrestrial Normal Irradiance*, ENI):

$$I_{0n} = I_{sc} E_0 \quad (11)$$

(in base all'uguaglianza precedente, la costante solare è pari all'irradianza normale extra-atmosferica quando la Terra è alla distanza media, ossia $E_0 = 1$);

ϑ_z è l'angolo zenitale (già incontrato), ovvero l'angolo che i raggi solari incidenti formano con la normale alla superficie orizzontale. Tale angolo varia durante il giorno; è massimo all'alba e al tramonto ($= \pi/2$) ed è minimo a mezzogiorno solare, ossia all'istante in cui il Sole transita per il piano meridiano della località; così, $\cos \vartheta_z$ (e, di conseguenza, pure EHI) è nullo agli istanti iniziale e finale dell'arco diurno e raggiunge il valore massimo nell'istante centrale del giorno. Per definizione, l'angolo zenitale e l'angolo di elevazione (o altezza) del Sole sono complementari.

In letteratura, sono disponibili espressioni o tabelle di E_0 (in funzione del giorno dell'anno) e di $\cos \vartheta_z$ (in funzione del giorno dell'anno e del momento della giornata); a questo proposito, si veda [3]

Appendice 3 — Anno meteorologico tipico per la radiazione solare: procedura di calcolo

Si fa riferimento alla procedura ENEA. I dati di partenza sono quelli della irradianza globale al suolo su piano orizzontale (GHI) ricavati elaborando le immagini satellitari di copertura nuvolosa, ed estraendo dalle mappe – in corrispondenza delle coordinate geografiche della località di interesse – i dati orari relativi al decennio 2006÷2015. Si calcolano quindi le GHI (con frequenza di una ogni 15 minuti) in funzione degli indici di copertura nuvolosa, mentre l'irradianza diretta sul piano normale ai raggi solari (DNI), è derivata da quella. Di conseguenza, è corretto utilizzare i soli dati GHI per la scelta dei mesi da inserire nell'anno tipico e calcolare DNI per l'anno tipico, a partire dai dati GHI così precedentemente selezionati.

Qui è descritto il metodo con riferimento al mese di gennaio; l'estensione agli altri undici mesi è analogo:

- 1) Per ciascuno dei 31 giorni di gennaio e per tutti i mesi di gennaio del decennio 2006÷2015, si calcolano le irradiazioni globali giornaliere su piano orizzontale:

$$H(y, i) \quad y = 2006 \div 2010, \quad i = 1 \div 31$$

come somma di 24 dati orari GHI.

2) Si dispongono i 310 (= 31x10, essendo 10 gli anni in totale) valori giornalieri in ordine crescente. In questo modo per ciascun giorno (y, i) è stabilito il posto $K(y, i)$ che il valore $H(y, i)$ occupa nella serie pluriennale così ordinata. $K(y, i)$ assume un valore compreso fra 1 e 310:

$$1 \leq K(y, i) \leq N.$$

Poniamo ora:

$$\Phi(y, i) = \frac{K(y, i)}{N + 1} \quad (12)$$

$\Phi(y, i)$ risulta compreso fra 0 e 1:

Riportiamo su di un grafico a dispersione: in ascissa, i valori di H ; in ordinata i corrispondenti Φ . Si ottiene una curva crescente (cumulata) in cui ogni valore di Φ rappresenta la frazione dei dati che non superano il valore corrispondente H . Ad esempio, nella ipotetica cumulata rappresentata nella figura 30, il 50% (la frazione 0.5) delle irradiazioni globali giornaliere non supera il valore $18000 \frac{kJ}{m^2}$

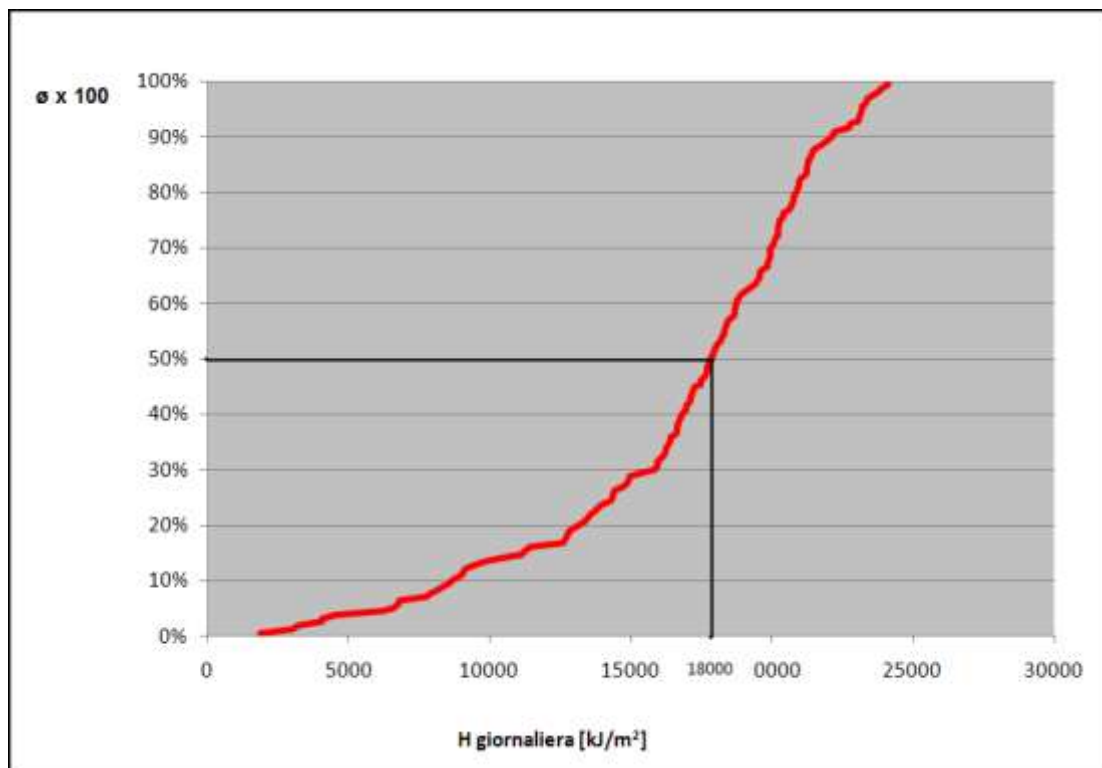


Figura 30. Cumulata dell'irradiazione globale orizzontale giornaliera. Periodo 2006÷2015

3) Si sistemano ora i 31 valori di irradiazione globale giornaliera del solo gennaio 2006:

$$H(2006, i) , \quad i = 1 \div 31$$

in ordine crescente e per ogni giorno i si calcola il rango $J_{2006}(i)$ di $H(2006, i)$ nella serie. Si calcola ora il parametro:

$$F_{2006}(i) = \frac{J_{2006}(i)}{32} \quad (13)$$

(32 = 31+1; 31 sono i giorni di gennaio). Nel nuovo grafico a dispersione (H, F) il parametro F ha lo stesso significato di frazione di non superamento di un dato valore di H .

Ripetiamo il ragionamento per tutti gli anni $y = 2006 \div 2010$ e con generalizzazione dei simboli, si avrà:

$$1 \leq J_y(i) \leq 31 \quad i = 1 \div 31, \text{ per qualunque } y$$

$$0 < F_y(i) < 1 \quad i = 1 \div 31, \text{ per qualunque } y$$

4) Consideriamo l'anno generico y ; per il giorno i di gennaio di quell'anno, l'espressione:

$$|F_y(i) - \emptyset(y, i)|$$

è lo scarto in valore assoluto fra le frequenze di non superamento che il giorno (y, i) ha nelle due serie ordinate delle irradiazioni globali giornaliere: quella di tutti i giorni di gennaio di tutti gli anni considerati assieme; e quella di tutti i giorni di gennaio dell'anno y a cui il giorno (y, i) appartiene. A questo punto poniamo:

$$FS(y) = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} |F_y(i) - \emptyset(y, i)| \quad (14)$$

$FS(y)$ è detto *parametro statistico di Finkelstein-Schafer per l'anno y*. $FS(y)$ sarà tanto più piccolo quanto più la curva di non superamento (H, F) relativa all'anno y sarà *sovrapponibile per forma e per vicinanza* alla curva di non superamento (H, \emptyset) cumulativa per tutta la serie pluriennale (figura 32). Il mese di gennaio con tutti i suoi 31x24 dati orari GHI che entrerà a far parte dell'anno tipico sarà quello dell'anno y che presenterà il più piccolo valore $FS(y)$.

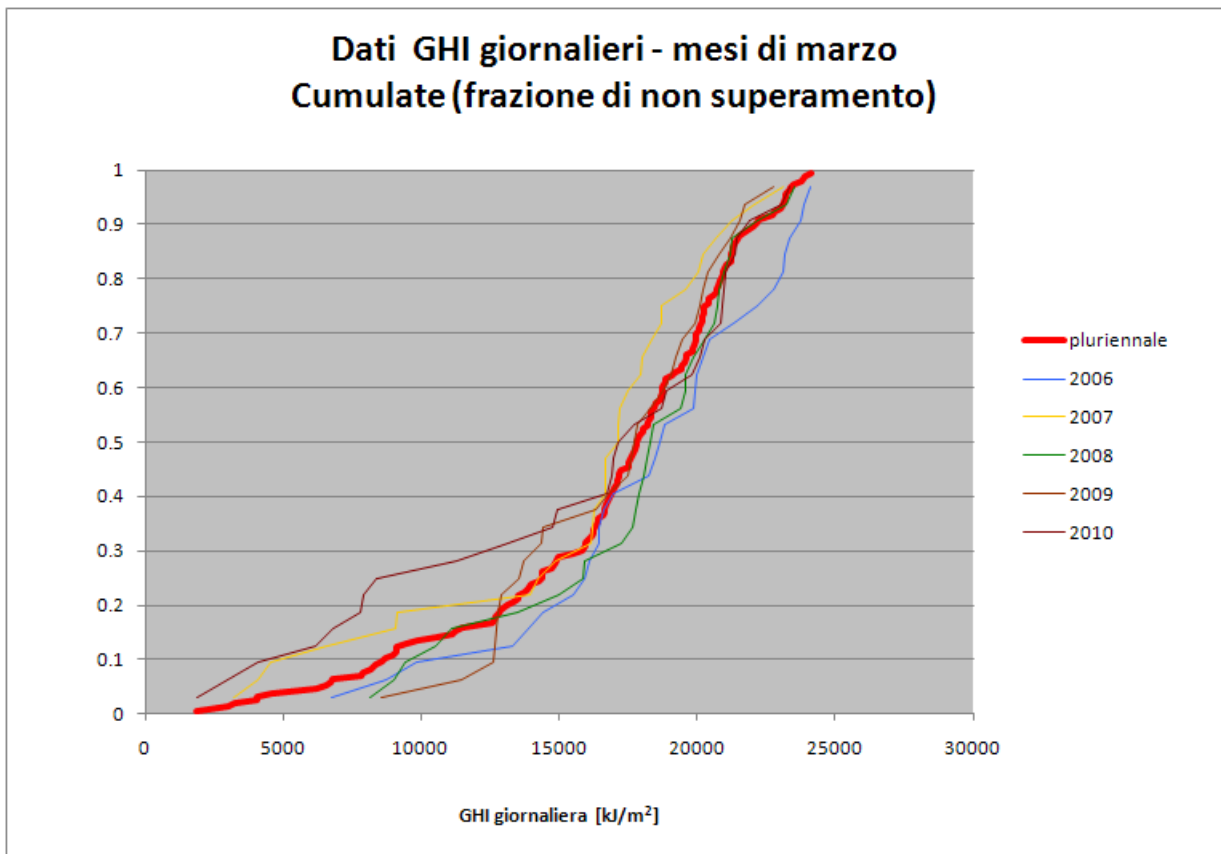


Figura 31. Cumulata dell'irradiazione globale orizzontale giornaliera: pluriennale e per singoli anni.

- 5) La procedura si completerà ripetendo tutti i passi precedenti per ciascuno degli undici mesi rimanenti (febbraio, marzo, ..., dicembre).
- 6) Per completezza, se le grandezze coinvolte nella scelta del mese fossero più di una, il parametro da minimizzare è una combinazione lineare delle statistiche di Finkelstein-Schafer di tutte le variabili meteo-climatiche:

$$WS(y) = \sum_{j=1}^G w_j FS_j(y) \quad \text{con} \quad \sum_{j=1}^G w_j = 1$$

I pesi w_j (j =temperatura, umidità e radiazione solare ecc.) sono stabiliti in base all'importanza relativa che si vuole assegnare a ciascuna grandezza rispetto alle altre.

Appendice 4 — Parametri o indici statistici

Consideriamo due serie di dati riferite a una stessa quantità fisica, ad esempio l'irradianza solare globale orizzontale: la prima serie consista di *misure*, mentre la seconda di *stime* calcolate con il ricorso a un

appropriato modello; inoltre, ogni stima sia riferita alle medesime condizioni fenomeniche della corrispondente misura (istante, situazione meteorologica ecc.). Più in generale, le considerazioni che seguono varranno per qualunque coppia di serie di dati corrispondenti, di cui la prima è presa a riferimento perché formata da valori ritenuti in qualche maniera “esatti” o “veri”, mentre della seconda, costituita da valori ricavati con un metodo alternativo e per lo più indiretto, ad esempio un modello di calcolo, si vuole determinare il grado di scostamento dalla serie dei valori veri. In ossequio a questa impostazione, i valori della prima serie sono detti genericamente *osservazioni*, mentre quelli della seconda serie *previsioni* (o anche stime) del modello dato. Se ora denotiamo rispettivamente con O_i l' i -esima osservazione (di N in totale) e con P_i la previsione corrispondente, l'*errore* della previsione i -esima sarà dato dalla differenza:

$$e_i = P_i - O_i \quad (15)$$

Nella pratica, gli errori sono inevitabili: infatti, per definizione un modello costituisce solo un'approssimazione della realtà che vuole descrivere. Di norma però, di un buon modello si desidera che gli errori siano **1)** piccoli in assoluto e **2)** comunque distribuiti in entrambi i versi, positivo e negativo, in modo che quelli di un segno compensino algebricamente quelli di segno opposto: non si abbiano previsioni sistematicamente più grandi (sovrastima) o più piccole (sottostima) delle osservazioni. Le due caratteristiche appena richiamate fanno riferimento ad aspetti concettualmente distinti degli errori di previsione, ossia alla *precisione* nel primo caso e all'*esattezza* (o *accuratezza*) nel secondo.

Non è detto che precisione ed esattezza si presentino sempre assieme, infatti previsioni esatte possono nondimeno essere imprecise. Nella figura 32 la differenza fra i due concetti è mostrata graficamente ricorrendo ai diagrammi di dispersione: in caso di previsioni esatte i punti che rappresentano le coppie (O_i, P_i) si distribuiscono in maniera sufficientemente simmetrica rispetto alla bisettrice del diagramma, e sono poi tanto più addensati su di essa quanto più le previsioni sono precise; se invece le previsioni sono inesatte, i punti si disporranno tendenzialmente al di sopra (sovrastima) ovvero al di sotto (sottostima) della bisettrice stessa.

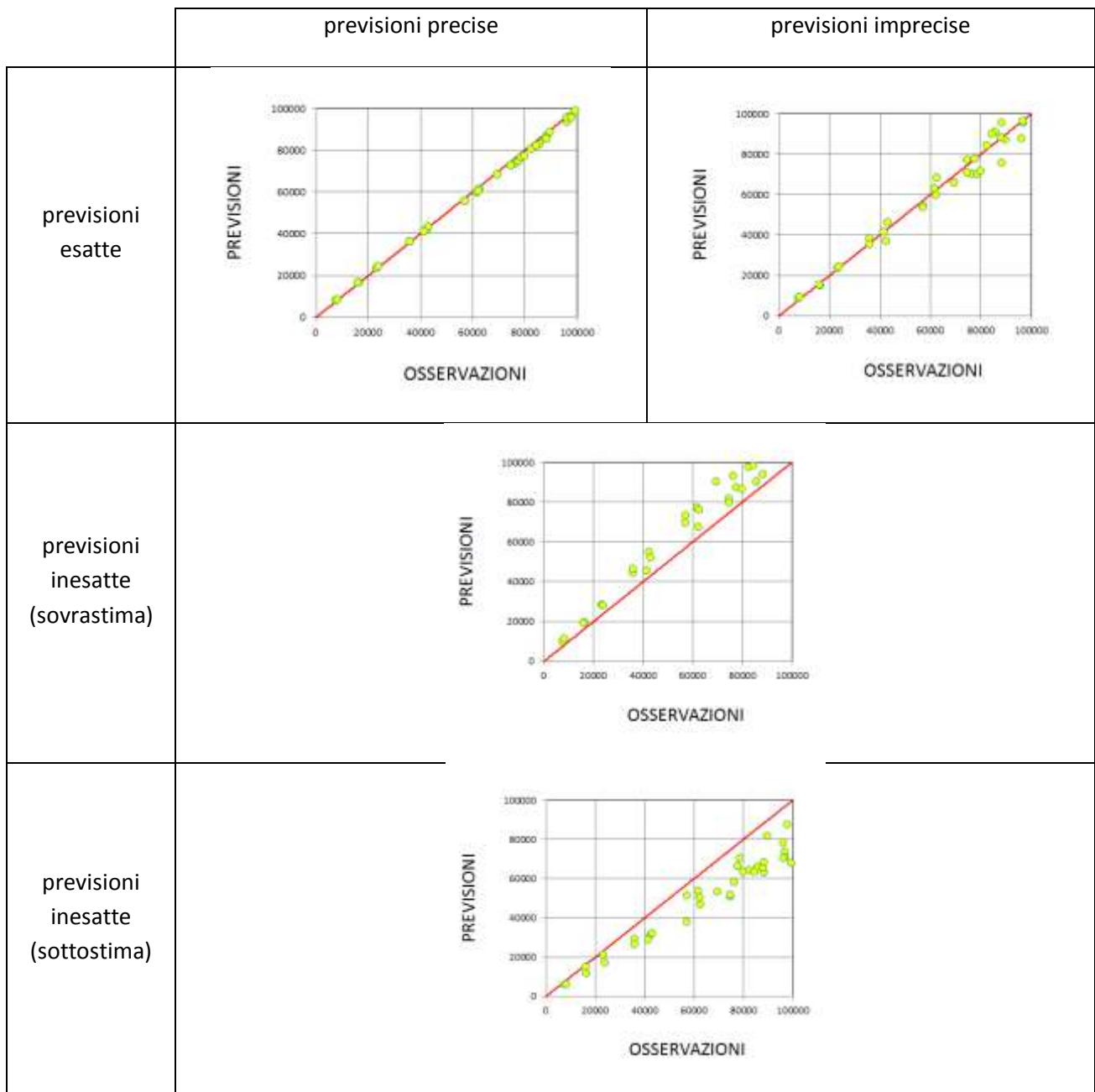


Figura 32. Previsioni vs osservazioni: esattezza (\equiv accuratezza) e precisione.

La statistica mette a disposizione numerosi parametri o *indici di accostamento* per quantificare le differenze fra osservazioni e previsioni, perché non esiste uno solo di questi parametri che catturi entrambe le proprietà di precisione ed esattezza e possa di conseguenza essere assunto a riferimento per stabilire la bontà complessiva di una serie di previsioni. Qui di seguito ne sono elencati alcuni.

Errore medio (Mean Bias Error, MBE). Si definisce come segue:

$$MBE = \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N e_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (16)$$

Errore assoluto medio (Mean Absolute Error, MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |e_i|}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \quad (17)$$

Radice dell'errore quadratico medio (Root Mean Square Error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (18)$$

Il primo è un indice atto a valutare soprattutto l'esattezza (l'accuratezza) delle previsioni, mentre i restanti due permettono di stimarne meglio la precisione (tabella 10). Tutti e tre gli indici forniscono una misura "assoluta" degli errori, nel senso che questi sono espressi nella stessa unità della grandezza studiata (nel caso dell'irradianza, il W/m^2). Però gli indici "assoluti" non sempre consentono di stabilire agevolmente se le differenze fra osservazioni e previsioni siano accettabili giacché non fanno riferimento ad alcun termine di paragone. Di norma, come confronto è utilizzata la media delle osservazioni e gli errori "assoluti" sono tradotti in frazioni percentuali di questa. Ecco allora i tre indici "relativi" corrispondenti:

Errore medio percentuale (Percent Mean Bias Error):

$$MBE\% = \frac{\bar{e}}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N e_i / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i) / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (19)$$

Errore assoluto medio percentuale (Percent Mean Absolute Error, MAE%):

$$MAE\% = \frac{MAE}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N |e_i| / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i| / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (20)$$

Radice dell'errore quadratico medio percentuale (Percent Root Mean Square Error, RMSE%):

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2 / N}}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 / N}}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (21)$$

I tre nuovi indici sono adimensionali e si esprimono in percento; nella maggioranza delle situazioni, valori pari a pochi percento sono ritenuti accettabili.

Osserviamo qui che MAE e RMSE sono casi particolari dell'indice seguente:

$$MAE_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^N |e_i|^p}{N} \right)^{1/p} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|^p}{N} \right)^{1/p} \quad (22)$$

È immediato constatare che il nuovo indice coincide con il canonico MAE per $p=1$ e con l'RMSE per $p=2$. Come si è detto, MAE, RSME e più in generale MAE_p sono parametri che servono per valutare soprattutto la precisione delle previsioni e per questo fine possono essere usati in maniera interscambiabile; differiscono solo per il "peso" relativo che attribuiscono agli errori nella composizione dell'indice stesso: infatti, con l'aumentare dell'esponente p , gli errori più grandi hanno peso maggiore rispetto a quelli più piccoli.

Per completezza si può ricordare che esistono tre ulteriori parametri che possono essere utilmente usati al posto di MBE%, MAE% e RMSE%. Essi sono rispettivamente:

Mean Percentage Error (MPE)

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (23)$$

Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|e_i|}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|P_i - O_i|}{O_i} \right) \times 100 \quad (24)$$

Root Mean Square Percentage Error (RMSPE)

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{O_i} \right)^2} \times 100 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \right)^2} \quad (25)$$

Tabella 10. Classificazione degli indici di accostamento

	<i>Indici per valutare l'esattezza (accuratezza)</i>	<i>Indici per valutare la precisione</i>
<i>Indici "assoluti" (espressi nella stessa unità di misura della grandezza studiata)</i>	MBE	MAE, RMSE, MAE_p
<i>Indici "relativi" (espressi in percento, adimensionali)</i>	MBE%, MBPE	MAE%, RMSE%, MAPE, RMSPE

Appendice 5 — Tabelle e grafici

Data la copiosità dei dati elaborati, nelle pagine seguenti sono riportati come esempio solo alcuni estratti dalle tabelle che compongono l'anno meteorologico tipico riferito alla radiazione e alle altre grandezze calcolate in questo lavoro. Tutte le tabelle — complete — sono comunque disponibili in formato di *foglio elettronico*.

Anno tipico riferito alla radiazione solare

Fonte dei dati: immagini satellitari

Località: Casaccia (RM)

Coordinate geografiche

latit. 42°03.0' Nord
longit. 12°18.0' Est da Greenwich

Anni utilizzati: 2006-2015

Significato delle grandezze orarie

GHI	irradianza (media oraria) globale su piano orizzontale
Dif.HI	irradianza (media oraria) diffusa su piano orizzontale
DNI	irradianza (media oraria) diretta normale
DI(N-S)	irradianza (media oraria) diretta su piano con asse Nord-Sud
EHI	irradianza (media oraria) extra-atmosferica su piano orizzontale
ENI	irradianza (media oraria) extra-atmosferica normale

piano con asse Nord-Sud

locuzione abbreviata per indicare il piano che ruota intorno ad un asse orizzontale e di direzione azimutale Nord-Sud, in modo che ad ogni istante dell'arco diurno la giacitura individuata dall'asse di rotazione e dalla direzione dei raggi solari sia normale al piano stesso

Da(GMT)
a(GMT)

intervallo orario a cui sono riferiti i valori medi delle grandezze. Le ore sono espresse secondo il Tempo medio di Greenwich (GMT) che, rispetto all'ora adottata in Italia (Fuso orario dell'Europa Centrale) differisce:

- di un'ora in meno in inverno (le 12:00 di GMT corrispondono alle 13:00 italiane)
- di due ore in meno nel periodo dell'ora legale (quello estivo, per cui: le 12:00 GMT corrispondono alle 14:00 italiane)

Ora(GMT)

istante CENTRALE dell' intervallo orario a cui sono riferiti i valori medi delle grandezze. L'ora è espressa secondo il Tempo medio di Greenwich (GMT).

CosTz

valore (medio orario) dell'angolo zenitale

Time

numero di secondi in cui il sole è sopra l'orizzonte. Vale:

- 3600 per gli intervalli orari diurni
- 0 per gli intervalli orari notturni
- un valore intermedio per gli intervalli orari crepuscolari in cui cade l'alba o il tramonto

Significato delle grandezze giornaliere

GHI	irradiazione (integrale giornaliero) globale su piano orizzontale
Dif.HI	irradiazione (integrale giornaliero) diffusa su piano orizzontale
DNI	irradiazione (integrale giornaliero) diretta normale
DI(N-S)	irradiazione (integrale giornaliero) diretta su piano con asse Nord-Sud
EHI	irradiazione (integrale giornaliero) extra-atmosferica su piano orizzontale
ENI	irradiazione (integrale giornaliero) extra-atmosferica normale

Significato delle grandezze giornaliere medie mensili

GHI	irradiazione (media mensile dell'integrale giornaliero) globale su piano orizzontale
Dif.HI	irradiazione (media mensile dell'integrale giornaliero) diffusa su piano orizzontale
DNI	irradiazione (media mensile dell'integrale giornaliero) diretta normale
DI(N-S)	irradiazione (media mensile dell'integrale giornaliero) diretta su piano con asse Nord-Sud

Significato delle grandezze annue

GHI	irradiazione (integrale annuo) globale su piano orizzontale
Dif.HI	irradiazione (integrale annuo) diffusa su piano orizzontale
DNI	irradiazione (integrale annuo) diretta normale
DI(N-S)	irradiazione (integrale annuo) diretta su piano con asse Nord-Sud

Irradianze orarie

Ora(Nr)	Giorno	Da(GMT)	a(GMT)	GHI [W/m ²]	Dif.HI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	Dif(N-S) [W/m ²]	EHI [W/m ²]	ENI [W/m ²]	CosTz	Time(s)
1	01-gen	00:00:00	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
2	01-gen	01:00:00	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
3	01-gen	02:00:00	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
4	01-gen	03:00:00	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
5	01-gen	04:00:00	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
6	01-gen	05:00:00	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
7	01-gen	06:00:00	07:00:00	1.5	1.5	0.4	0.3	8.2	376.8	0.022	959
8	01-gen	07:00:00	08:00:00	39.1	38.6	3.6	2.8	168.9	1414.9	0.119	3600
9	01-gen	08:00:00	09:00:00	67.6	67.0	2.8	1.9	357.1	1414.9	0.252	3600
10	01-gen	09:00:00	10:00:00	261.4	103.3	447.9	238.1	495.7	1414.9	0.350	3600
11	01-gen	10:00:00	11:00:00	369.7	108.8	640.9	285.9	575.3	1414.9	0.407	3600
12	01-gen	11:00:00	12:00:00	196.3	136.6	141.9	59.9	590.3	1414.9	0.417	3600
13	01-gen	12:00:00	13:00:00	67.8	67.6	0.4	0.2	539.8	1414.9	0.382	3600
14	01-gen	13:00:00	14:00:00	54.4	53.6	2.8	1.8	427.3	1414.9	0.302	3600
15	01-gen	14:00:00	15:00:00	63.7	62.9	4.7	3.3	260.3	1414.9	0.184	3600
16	01-gen	15:00:00	16:00:00	12.6	12.4	1.7	1.4	59.3	1023.1	0.058	2603
17	01-gen	16:00:00	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
18	01-gen	17:00:00	18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
19	01-gen	18:00:00	19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
20	01-gen	19:00:00	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
21	01-gen	20:00:00	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
22	01-gen	21:00:00	22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
23	01-gen	22:00:00	23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
24	01-gen	23:00:00	00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
25	02-gen	00:00:00	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
26	02-gen	01:00:00	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
27	02-gen	02:00:00	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
28	02-gen	03:00:00	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
29	02-gen	04:00:00	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
30	02-gen	05:00:00	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
31	02-gen	06:00:00	07:00:00	2.5	2.3	9.7	7.6	8.1	374.9	0.022	954
32	02-gen	07:00:00	08:00:00	66.3	55.8	81.8	62.6	168.9	1414.9	0.119	3600
33	02-gen	08:00:00	09:00:00	172.3	108.7	244.7	158.8	357.5	1414.9	0.253	3600
34	02-gen	09:00:00	10:00:00	287.4	110.6	484.2	250.8	496.7	1414.9	0.351	3600
35	02-gen	10:00:00	11:00:00	389.9	90.8	735.0	330.7	576.7	1414.9	0.408	3600
36	02-gen	11:00:00	12:00:00	362.7	120.1	580.8	250.1	592.2	1414.9	0.419	3600
37	02-gen	12:00:00	13:00:00	306.9	126.5	459.7	218.3	542.2	1414.9	0.383	3600
38	02-gen	13:00:00	14:00:00	225.1	115.1	354.9	210.1	430.0	1414.9	0.304	3600
39	02-gen	14:00:00	15:00:00	109.6	89.1	107.4	76.8	263.3	1414.9	0.186	3600
40	02-gen	15:00:00	16:00:00	22.2	19.4	39.9	32.3	61.6	1042.3	0.059	2652
41	02-gen	16:00:00	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
42	02-gen	17:00:00	18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0

8732	30-dic	19:00:00	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8733	30-dic	20:00:00	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8734	30-dic	21:00:00	22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8735	30-dic	22:00:00	23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8736	30-dic	23:00:00	00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8737	31-dic	00:00:00	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8738	31-dic	01:00:00	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8739	31-dic	02:00:00	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8740	31-dic	03:00:00	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8741	31-dic	04:00:00	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8742	31-dic	05:00:00	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8743	31-dic	06:00:00	07:00:00	2.8	2.5	15.6	12.5	8.3	379.6	0.022	966
8744	31-dic	07:00:00	08:00:00	73.0	55.3	137.3	104.7	169.1	1414.8	0.120	3600
8745	31-dic	08:00:00	09:00:00	205.4	90.4	428.5	272.3	356.9	1414.8	0.252	3600
8746	31-dic	09:00:00	10:00:00	284.5	117.4	493.1	271.2	495.0	1414.8	0.350	3600
8747	31-dic	10:00:00	11:00:00	347.8	122.4	548.6	239.4	574.0	1414.8	0.406	3600
8748	31-dic	11:00:00	12:00:00	404.6	101.5	727.5	309.7	588.6	1414.8	0.416	3600
8749	31-dic	12:00:00	13:00:00	355.8	88.9	701.1	341.9	537.6	1414.8	0.380	3600
8750	31-dic	13:00:00	14:00:00	203.2	120.4	260.1	149.8	424.7	1414.8	0.300	3600
8751	31-dic	14:00:00	15:00:00	117.4	84.0	179.3	128.3	257.4	1414.8	0.182	3600
8752	31-dic	15:00:00	16:00:00	22.5	18.4	62.4	50.4	57.2	1004.7	0.057	2556
8753	31-dic	16:00:00	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8754	31-dic	17:00:00	18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8755	31-dic	18:00:00	19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8756	31-dic	19:00:00	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8757	31-dic	20:00:00	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8758	31-dic	21:00:00	22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8759	31-dic	22:00:00	23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8760	31-dic	23:00:00	00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0

Irradianze orarie (valori centrati alle ore HH:00:00)

Ora(Nr)	Giorno	Ora(GMT)	GHI [W/m ²]	Dif.HI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	DI(N-S) [W/m ²]	EHI [W/m ²]	ENI [W/m ²]	CosTz	Time(s)
1	01-gen	00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
2	01-gen	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
3	01-gen	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
4	01-gen	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
5	01-gen	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
6	01-gen	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
7	01-gen	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8	01-gen	07:00:00	14.2	14.1	1.8	1.5	66.5	1084.2	0.061	2759
9	01-gen	08:00:00	66.0	65.1	4.7	3.4	268.5	1414.9	0.190	3600
10	01-gen	09:00:00	128.4	78.0	157.7	91.2	433.3	1414.9	0.306	3600
11	01-gen	10:00:00	337.7	108.3	595.3	287.5	543.3	1414.9	0.384	3600
12	01-gen	11:00:00	328.9	130.6	476.4	204.7	591.0	1414.9	0.418	3600
13	01-gen	12:00:00	97.4	96.7	1.7	0.7	573.2	1414.9	0.405	3600
14	01-gen	13:00:00	34.7	34.6	0.3	0.1	490.9	1414.9	0.347	3600
15	01-gen	14:00:00	89.0	87.7	5.4	3.5	349.9	1414.9	0.247	3600
16	01-gen	15:00:00	36.7	36.3	3.5	2.7	159.8	1414.9	0.113	3600
17	01-gen	16:00:00	1.0	1.0	0.3	0.3	5.8	315.7	0.018	803
18	01-gen	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
19	01-gen	18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
20	01-gen	19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
21	01-gen	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
22	01-gen	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
23	01-gen	22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
24	01-gen	23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
25	02-gen	00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
26	02-gen	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
27	02-gen	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
28	02-gen	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
29	02-gen	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
30	02-gen	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
31	02-gen	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
32	02-gen	07:00:00	24.0	21.0	42.5	33.8	66.3	1082.3	0.061	2754
33	02-gen	08:00:00	112.1	91.0	108.6	77.3	268.7	1414.9	0.190	3600
34	02-gen	09:00:00	205.5	123.1	279.1	169.8	434.0	1414.9	0.307	3600
35	02-gen	10:00:00	381.1	84.5	771.1	375.8	544.5	1414.9	0.385	3600
36	02-gen	11:00:00	360.4	124.8	563.7	242.4	592.7	1414.9	0.419	3600
37	02-gen	12:00:00	383.1	89.1	722.5	325.2	575.3	1414.9	0.407	3600
38	02-gen	13:00:00	249.0	145.5	300.9	164.7	493.5	1414.9	0.349	3600
39	02-gen	14:00:00	164.1	103.9	221.5	140.6	352.8	1414.9	0.249	3600
40	02-gen	15:00:00	63.6	53.7	79.9	61.4	162.9	1414.9	0.115	3600
41	02-gen	16:00:00	2.0	1.8	8.2	6.9	6.5	334.9	0.019	852
42	02-gen	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0

8732	30-dic	19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8733	30-dic	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8734	30-dic	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8735	30-dic	22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8736	30-dic	23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8737	31-dic	00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8738	31-dic	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8739	31-dic	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8740	31-dic	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8741	31-dic	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8742	31-dic	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8743	31-dic	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8744	31-dic	07:00:00	26.6	21.6	70.3	56.0	66.7	1087.0	0.061	2766
8745	31-dic	08:00:00	123.2	87.5	183.9	130.3	268.5	1414.8	0.190	3600
8746	31-dic	09:00:00	293.8	81.2	691.0	407.5	432.8	1414.8	0.306	3600
8747	31-dic	10:00:00	259.4	152.8	278.0	134.2	542.3	1414.8	0.383	3600
8748	31-dic	11:00:00	424.0	89.9	801.7	341.3	589.5	1414.8	0.417	3600
8749	31-dic	12:00:00	380.3	100.2	694.1	311.9	571.2	1414.8	0.404	3600
8750	31-dic	13:00:00	293.4	104.8	533.2	282.2	488.5	1414.8	0.345	3600
8751	31-dic	14:00:00	147.6	110.4	159.0	106.8	347.2	1414.8	0.245	3600
8752	31-dic	15:00:00	67.1	51.2	130.8	100.5	156.9	1414.8	0.111	3600
8753	31-dic	16:00:00	1.7	1.5	11.5	9.6	5.1	297.2	0.017	756
8754	31-dic	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8755	31-dic	18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8756	31-dic	19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8757	31-dic	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8758	31-dic	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8759	31-dic	22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
8760	31-dic	23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0

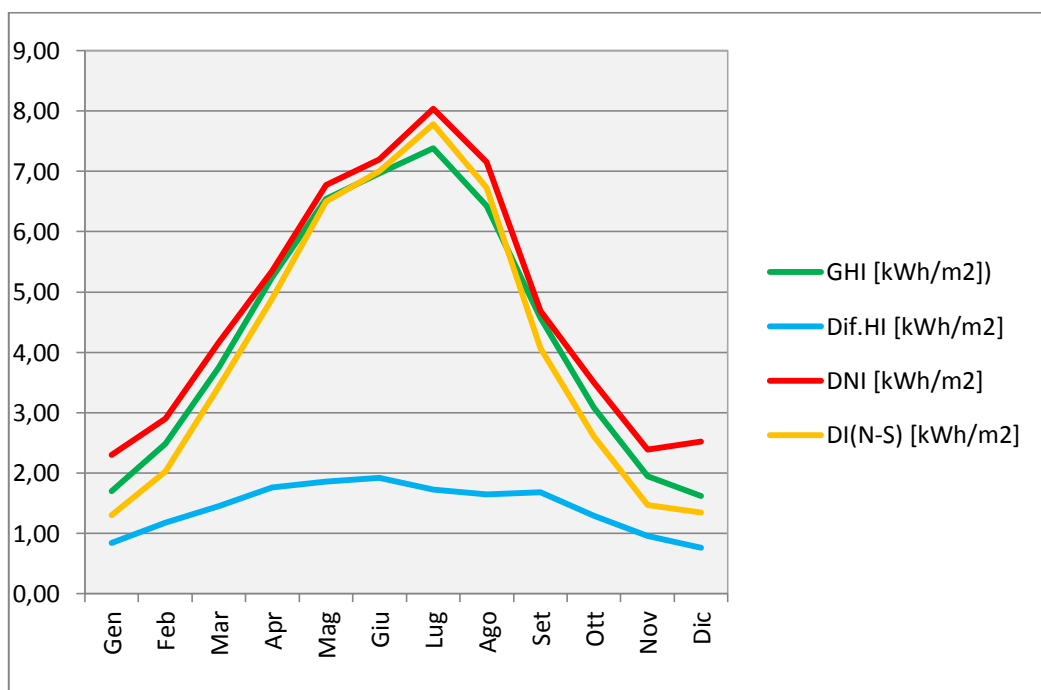
Irradiazioni giornaliere

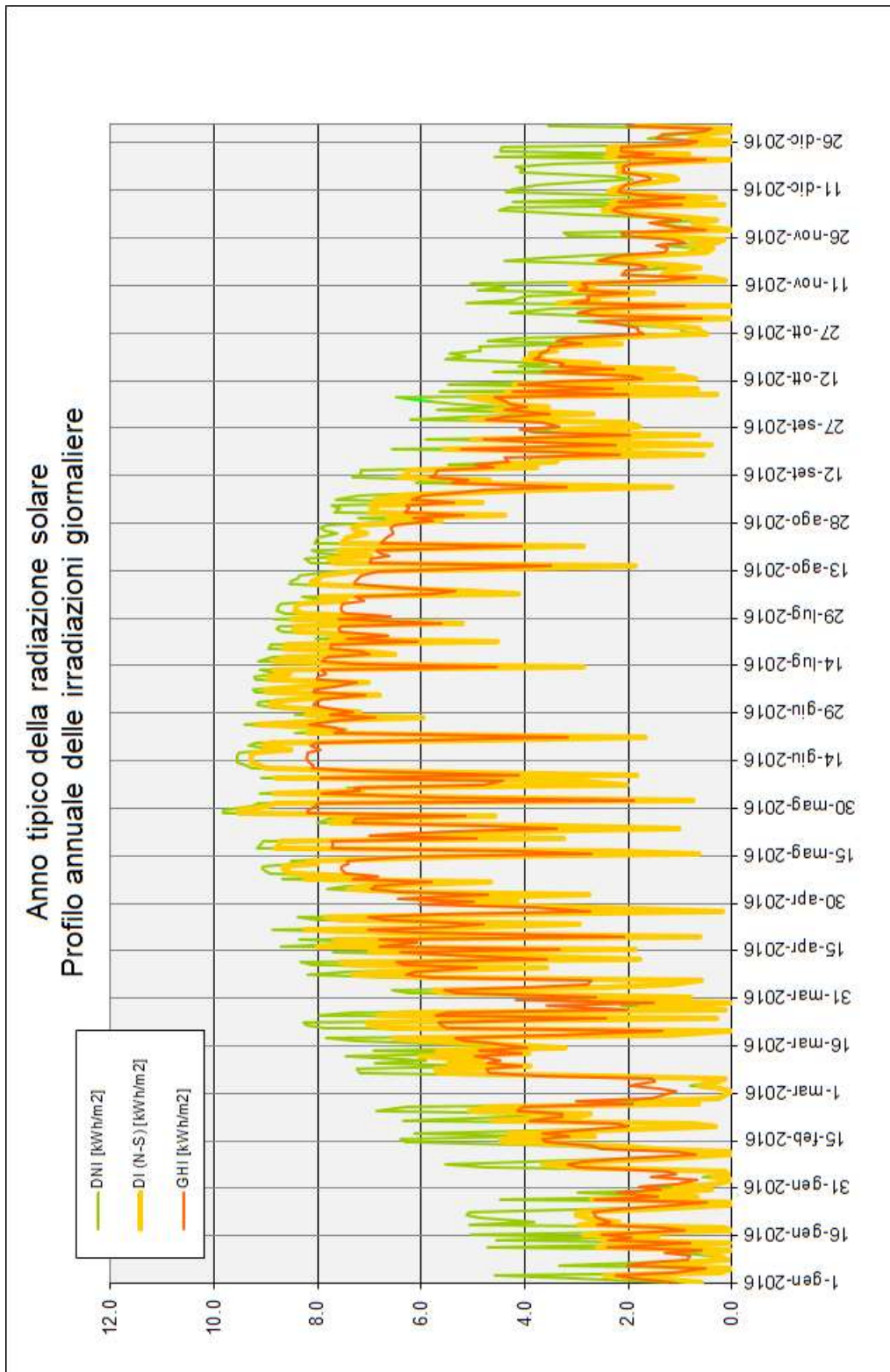
Giorno	GHI [kWh/m ²]	Dif.HI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DI (N-S) [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]	Alba(GMT)	Tramonto(GMT)
01-gen	1.13	0.65	1.25	0.60	3.48	12.72	6h 44'	15h 43'
02-gen	1.94	0.84	3.10	1.60	3.50	12.74	6h 44'	15h 44'
03-gen	2.24	0.67	4.58	2.46	3.51	12.76	6h 44'	15h 45'
04-gen	1.10	0.91	0.46	0.20	3.53	12.78	6h 44'	15h 46'
05-gen	0.50	0.50	0.01	0.00	3.55	12.80	6h 44'	15h 47'
06-gen	2.03	0.86	3.33	1.79	3.57	12.82	6h 44'	15h 48'
07-gen	1.68	1.03	1.77	0.92	3.59	12.85	6h 44'	15h 49'
08-gen	0.87	0.82	0.13	0.07	3.62	12.87	6h 44'	15h 50'
09-gen	0.82	0.66	0.49	0.28	3.64	12.90	6h 44'	15h 51'
10-gen	1.29	0.89	1.01	0.51	3.67	12.93	6h 43'	15h 52'
11-gen	0.58	0.57	0.01	0.01	3.69	12.96	6h 43'	15h 53'
12-gen	2.40	0.71	4.72	2.61	3.72	12.99	6h 43'	15h 54'
13-gen	0.81	0.78	0.09	0.05	3.75	13.02	6h 42'	15h 55'
14-gen	2.39	0.74	4.55	2.53	3.78	13.06	6h 42'	15h 56'
15-gen	1.96	1.04	2.52	1.43	3.82	13.09	6h 42'	15h 57'
16-gen	2.52	0.70	5.05	2.88	3.85	13.13	6h 41'	15h 58'
17-gen	0.91	0.89	0.04	0.02	3.89	13.16	6h 41'	16h 00'
18-gen	1.34	1.23	0.29	0.16	3.92	13.20	6h 40'	16h 01'
19-gen	2.59	0.71	5.08	2.94	3.96	13.24	6h 40'	16h 02'
20-gen	2.36	0.91	3.81	2.18	4.00	13.28	6h 39'	16h 03'
21-gen	2.59	0.76	4.87	2.83	4.04	13.32	6h 38'	16h 04'
22-gen	2.66	0.74	5.12	3.01	4.08	13.37	6h 38'	16h 06'
23-gen	2.67	0.75	5.06	2.99	4.12	13.41	6h 37'	16h 07'
24-gen	2.22	1.08	2.93	1.71	4.17	13.45	6h 36'	16h 08'
25-gen	1.10	1.06	0.10	0.05	4.21	13.50	6h 36'	16h 09'
26-gen	0.49	0.49	0.00	0.00	4.26	13.54	6h 35'	16h 11'
27-gen	2.65	0.90	4.46	2.70	4.31	13.59	6h 34'	16h 12'
28-gen	1.42	1.00	1.08	0.67	4.35	13.64	6h 33'	16h 13'
29-gen	2.21	0.96	2.97	1.75	4.40	13.69	6h 32'	16h 15'
30-gen	1.37	1.08	0.67	0.39	4.46	13.73	6h 31'	16h 16'
31-gen	1.78	1.05	1.79	1.10	4.51	13.78	6h 30'	16h 17'
01-feb	1.04	0.88	0.42	0.28	4.56	13.83	6h 29'	16h 19'
02-feb	0.68	0.68	0.00	0.00	4.61	13.88	6h 28'	16h 20'
03-feb	1.58	1.36	0.56	0.37	4.67	13.94	6h 27'	16h 21'

26-nov	2.10	0.88	3.17	1.74	3.88	13.10	6h 19'	15h 38'
27-nov	2.15	0.91	3.24	1.77	3.84	13.06	6h 20'	15h 38'
28-nov	0.51	0.50	0.01	0.00	3.81	13.03	6h 21'	15h 37'
29-nov	1.13	0.77	0.93	0.50	3.78	13.00	6h 22'	15h 37'
30-nov	1.59	0.96	1.53	0.75	3.75	12.97	6h 23'	15h 36'
01-dic	1.00	0.82	0.51	0.29	3.72	12.94	6h 24'	15h 36'
02-dic	1.48	0.91	1.58	0.88	3.69	12.91	6h 25'	15h 36'
03-dic	1.98	0.96	2.93	1.64	3.66	12.88	6h 26'	15h 35'
04-dic	2.29	0.72	4.50	2.49	3.64	12.86	6h 27'	15h 35'
05-dic	2.23	0.74	4.32	2.38	3.61	12.83	6h 28'	15h 35'
06-dic	0.98	0.88	0.28	0.16	3.59	12.81	6h 29'	15h 35'
07-dic	2.20	0.74	4.24	2.32	3.57	12.79	6h 30'	15h 35'
08-dic	0.92	0.67	0.66	0.33	3.55	12.76	6h 31'	15h 34'
09-dic	1.80	0.98	2.42	1.34	3.53	12.75	6h 32'	15h 34'
10-dic	2.19	0.71	4.37	2.37	3.51	12.73	6h 33'	15h 34'
11-dic	2.16	0.72	4.24	2.29	3.50	12.71	6h 34'	15h 34'
12-dic	2.05	0.78	3.73	2.00	3.48	12.70	6h 35'	15h 34'
13-dic	1.84	0.78	2.89	1.45	3.47	12.68	6h 35'	15h 35'
14-dic	1.57	0.92	1.92	1.04	3.46	12.67	6h 36'	15h 35'
15-dic	1.61	0.81	2.27	1.16	3.45	12.66	6h 37'	15h 35'
16-dic	2.10	0.73	4.09	2.19	3.44	12.65	6h 38'	15h 35'
17-dic	2.08	0.72	4.05	2.15	3.43	12.64	6h 38'	15h 35'
18-dic	2.10	0.71	4.17	2.22	3.42	12.64	6h 39'	15h 36'
19-dic	1.96	0.82	3.38	1.79	3.42	12.63	6h 40'	15h 36'
20-dic	0.52	0.51	0.01	0.01	3.41	12.63	6h 40'	15h 36'
21-dic	2.18	0.67	4.58	2.45	3.41	12.63	6h 41'	15h 37'
22-dic	1.52	0.98	1.59	0.84	3.41	12.63	6h 41'	15h 37'
23-dic	2.15	0.68	4.46	2.39	3.41	12.63	6h 42'	15h 38'
24-dic	2.15	0.68	4.44	2.37	3.41	12.63	6h 42'	15h 38'
25-dic	0.86	0.80	0.17	0.09	3.42	12.64	6h 42'	15h 39'
26-dic	0.68	0.66	0.05	0.03	3.42	12.65	6h 43'	15h 39'
27-dic	1.47	0.88	1.62	0.81	3.43	12.65	6h 43'	15h 40'
28-dic	1.34	0.96	1.03	0.50	3.44	12.66	6h 43'	15h 40'
29-dic	0.55	0.54	0.01	0.01	3.45	12.68	6h 44'	15h 41'
30-dic	0.41	0.41	0.00	0.00	3.46	12.69	6h 44'	15h 42'
31-dic	2.02	0.80	3.55	1.88	3.47	12.70	6h 44'	15h 43'

Irradiazioni giornaliere medie mensili e annue

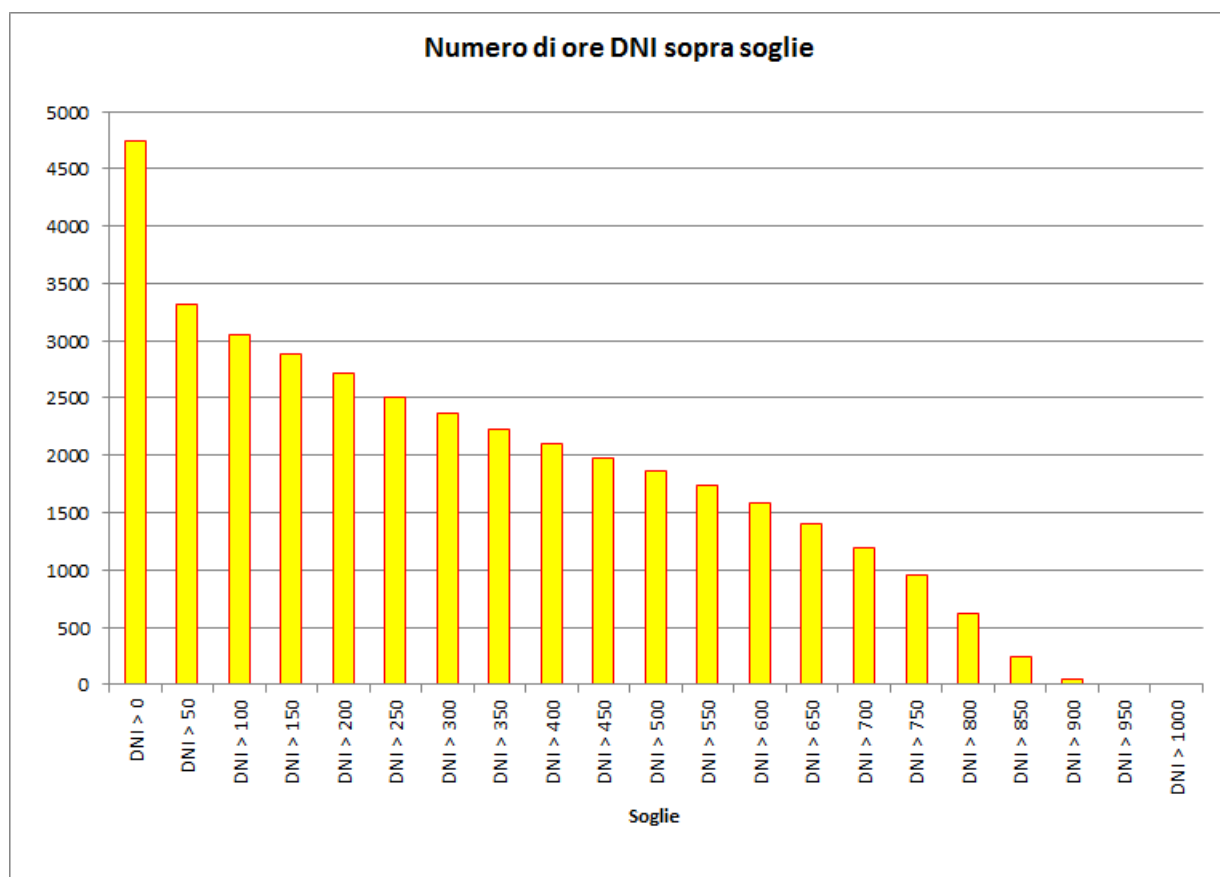
Mese	GHI [kWh/m ²]	Dif.HI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DI(N-S) [kWh/m ²]
Gen	1.70	0.84	2.30	1.30
Feb	2.49	1.18	2.90	2.03
Mar	3.75	1.45	4.17	3.43
Apr	5.24	1.76	5.35	4.89
Mag	6.54	1.86	6.77	6.50
Giu	6.97	1.92	7.20	7.00
Lug	7.38	1.73	8.04	7.78
Ago	6.43	1.65	7.15	6.73
Set	4.57	1.68	4.69	4.07
Ott	3.09	1.29	3.50	2.61
Nov	1.95	0.96	2.39	1.47
Dic	1.62	0.76	2.52	1.35
anno	1577	520	1738	1500





Grandezza: Irradianza diretta normale (DNI)
Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie

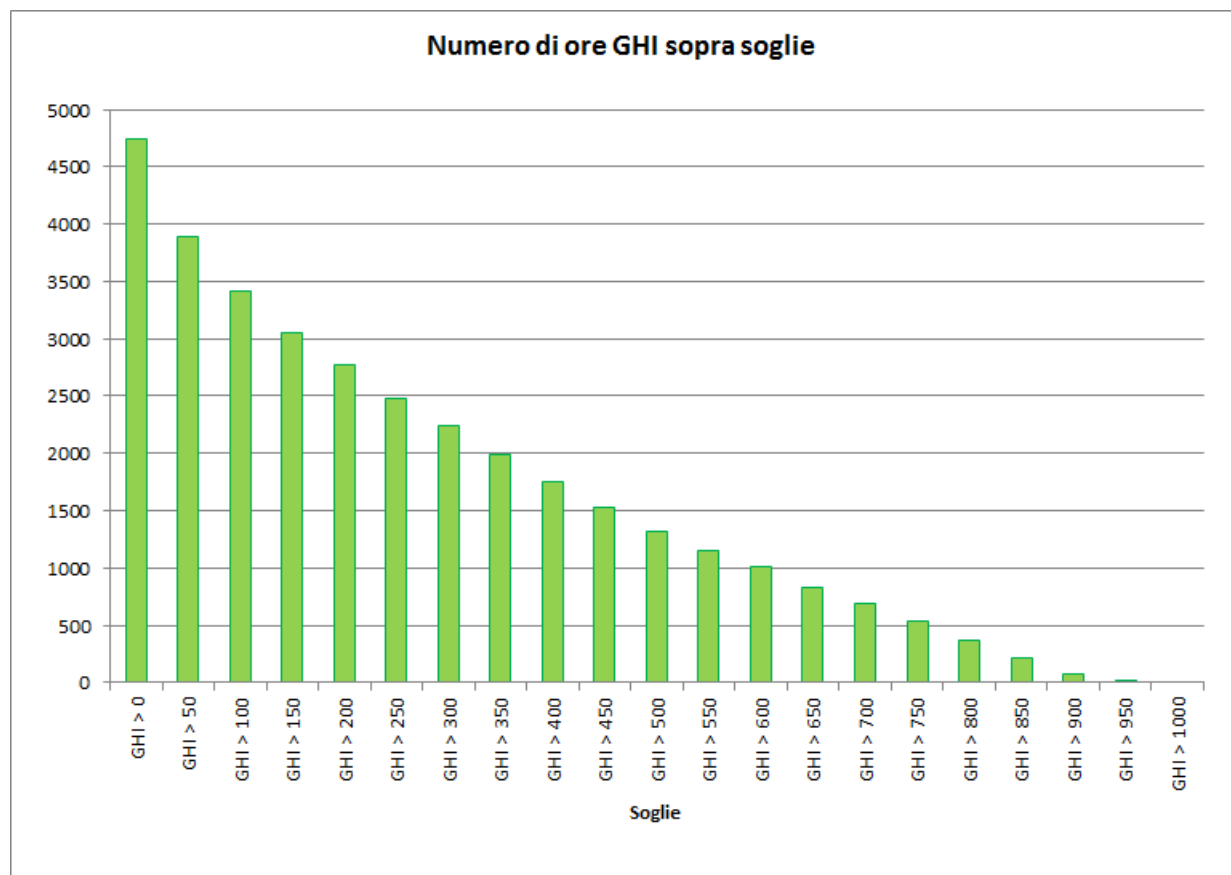
Soglie [W/m ²]	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
totale	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
DNI > 0	321	312	397	421	485	479	487	454	402	370	310	309	4747
DNI > 50	158	181	245	299	371	389	434	384	274	219	170	187	3311
DNI > 100	145	164	219	271	356	364	408	360	259	206	146	160	3058
DNI > 150	129	143	201	253	345	354	386	343	244	193	140	154	2885
DNI > 200	113	131	186	234	327	338	373	333	229	176	131	139	2710
DNI > 250	105	118	167	218	300	307	351	317	216	169	120	118	2506
DNI > 300	99	106	160	204	284	294	339	305	201	156	109	108	2365
DNI > 350	89	94	157	200	264	280	325	293	185	146	95	104	2232
DNI > 400	84	89	146	188	243	265	311	284	174	140	82	97	2103
DNI > 450	78	83	140	180	233	246	302	271	160	126	71	88	1978
DNI > 500	69	76	134	175	220	238	285	262	152	120	64	75	1870
DNI > 550	64	71	125	164	209	218	270	246	139	103	55	67	1731
DNI > 600	54	64	123	153	198	208	252	220	125	92	48	54	1591
DNI > 650	48	55	117	130	175	187	222	191	109	77	42	48	1401
DNI > 700	40	47	105	117	153	156	201	168	84	58	33	34	1196
DNI > 750	29	39	89	101	135	128	160	134	61	43	15	15	949
DNI > 800	15	25	70	80	104	94	103	84	29	11	3	0	618
DNI > 850	0	14	44	55	63	46	18	5	2	0	0	0	247
DNI > 900	0	3	18	21	6	0	0	0	0	0	0	0	48
DNI > 950	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DNI > 1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Grandezza: Irradianza globale orizzontale (GHI)

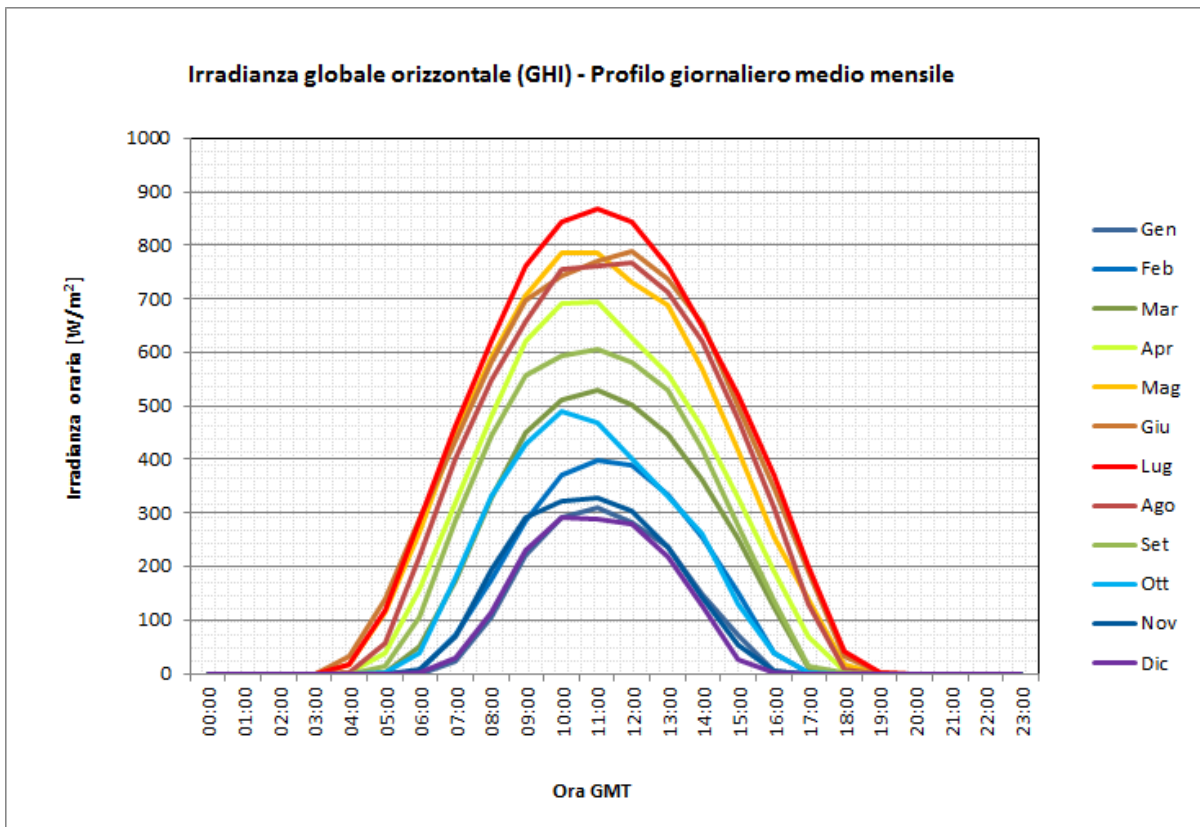
Tabella: Numero di ore GHI sopra soglia

Soglie [W/m^2]	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
totale	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
GHI > 0	323	312	397	420	484	480	486	453	403	371	310	310	4749
GHI > 50	239	244	324	354	417	413	424	391	329	292	234	228	3889
GHI > 100	170	210	284	325	371	377	400	364	302	250	187	176	3416
GHI > 150	144	171	248	293	348	345	365	344	277	224	158	139	3056
GHI > 200	112	141	214	265	322	330	350	324	254	201	133	122	2768
GHI > 250	89	119	193	244	291	299	331	309	237	179	105	84	2480
GHI > 300	69	105	169	223	276	279	314	293	212	157	81	67	2245
GHI > 350	54	82	147	199	257	259	296	273	192	135	60	37	1991
GHI > 400	29	65	134	180	235	250	279	248	175	109	38	12	1754
GHI > 450	10	54	116	172	210	224	261	231	154	83	20	0	1535
GHI > 500	0	30	99	155	198	203	233	211	129	63	4	0	1325
GHI > 550	0	19	79	132	187	192	223	183	107	33	0	0	1155
GHI > 600	0	8	66	119	165	184	200	169	82	17	0	0	1010
GHI > 650	0	0	44	104	141	156	178	143	53	4	0	0	823
GHI > 700	0	0	25	82	129	139	166	117	37	0	0	0	695
GHI > 750	0	0	10	59	110	122	133	90	15	0	0	0	539
GHI > 800	0	0	0	37	84	79	105	61	3	0	0	0	369
GHI > 850	0	0	0	10	57	67	66	19	0	0	0	0	219
GHI > 900	0	0	0	1	22	26	23	0	0	0	0	0	72
GHI > 950	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
GHI > 1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Irradianza globale orizzontale (GHI) - Profilo giornaliero medio mensile
 Unità: [W/m²]

Ora	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0.3	15.5	30.6	16.6	1.2	0	0	0	0
05:00	0	0	1.4	37.2	114.9	138.8	118.3	57.9	13.3	0.6	0	0
06:00	0	4.5	50.1	158.4	265.4	287.3	285.6	217.5	104.3	36.8	6.7	0.0
07:00	23.5	71.9	172.5	319.9	447.6	435.7	462.9	401.8	284.0	177.4	67.8	30.0
08:00	105.3	175.9	327.6	480.6	591.8	582.3	619.5	546.5	444.3	329.6	192.8	115.8
09:00	222.3	286.5	450.8	621.6	706.5	696.2	761.1	657.2	555.4	429.4	290.3	231.6
10:00	292.4	369.5	510.8	690.6	785.7	743.6	842.5	755.9	594.7	490.1	320.9	291.8
11:00	309.9	399.7	528.1	695.2	785.9	769.3	867.1	760.3	607.0	468.2	328.5	287.4
12:00	281.3	390.2	501.0	627.5	730.6	788.0	843.1	768.8	580.1	401.5	304.6	278.3
13:00	236.1	334.4	446.0	559.6	686.9	737.2	761.2	713.5	528.1	330.2	237.2	218.1
14:00	147.0	255.8	360.7	459.7	569.3	655.9	647.4	622.2	420.3	262.0	143.3	126.2
15:00	70.6	150.7	250.9	326.5	415.2	497.5	519.4	474.9	275.1	129.6	54.1	26.8
16:00	5.3	36.9	122.7	190.9	255.9	346.7	369.5	310.3	136.5	37.8	3.1	0.3
17:00	0	1.4	11.5	68.7	139.3	191.0	198.5	130.3	13.1	0.5	0	0
18:00	0	0	0	3.6	16.0	33.1	42.6	7.6	0.1	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	1.5	1.1	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

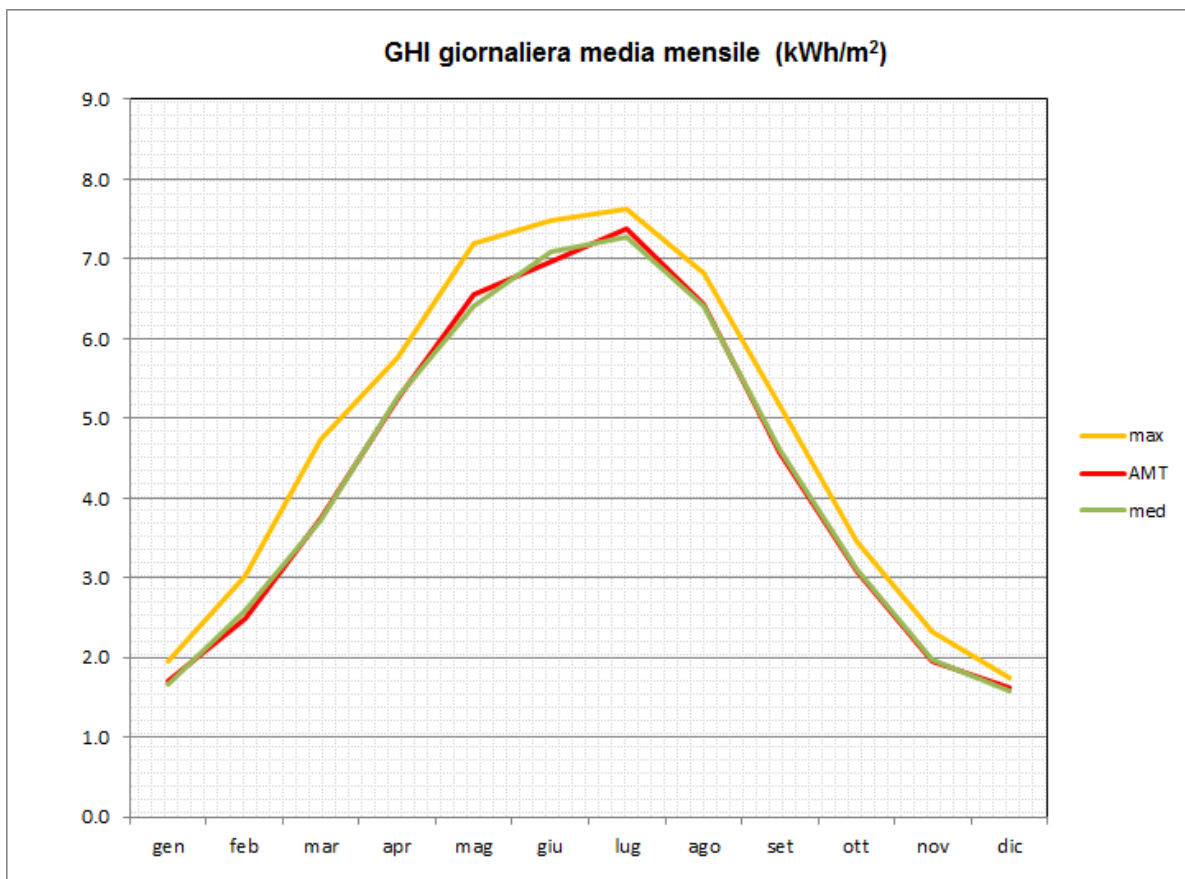


Anno	Radiazione solare globale al suolo su piano orizzontale (kWh/m ²)												annua
	giornaliera media mensile												
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
2006	1.868	2.468	3.443	5.237	6.808	6.704	7.380	6.140	4.462	3.183	2.161	1.742	1573.5
2007	1.563	2.364	3.702	5.777	6.364	7.051	7.529	6.262	4.766	3.258	2.123	1.744	1600.8
2008	1.560	2.872	3.448	5.160	5.968	6.855	7.378	6.743	4.844	3.138	1.950	1.597	1572.3
2009	1.555	2.780	3.746	4.912	7.201	6.969	7.622	6.298	4.515	3.456	1.917	1.397	1596.8
2010	1.698	2.320	3.812	5.303	5.620	7.108	7.565	6.431	4.569	2.883	1.692	1.373	1535.9
2011	1.768	3.030	3.514	5.304	6.944	7.388	7.092	6.815	5.169	3.452	2.321	1.531	1654.9
2012	1.951	2.324	4.739	5.002	6.531	7.484	7.487	6.636	4.039	3.086	1.938	1.621	1614.9
2013	1.572	2.717	3.009	5.239	5.723	7.412	6.874	6.316	4.828	2.852	1.712	1.624	1518.8
2014	1.400	2.493	4.079	5.243	6.376	6.955	6.441	6.253	4.362	3.205	1.752	1.537	1527.2
2015	1.734	2.604	3.788	5.641	6.543	6.963	7.421	6.142	4.578	2.647	2.151	1.695	1581.9

max	1.951	3.030	4.739	5.777	7.201	7.484	7.622	6.815	5.169	3.456	2.321	1.744	1654.9
AMT	1.698	2.493	3.746	5.243	6.543	6.969	7.378	6.431	4.569	3.086	1.950	1.624	1577.4
med	1.667	2.597	3.728	5.282	6.408	7.089	7.279	6.404	4.613	3.116	1.972	1.586	1577.7

LEGENDA

- massimo valore giornaliero medio mensile nei 10 anni 2006-2015
- mese per l'anno tipico scelto nell'intervallo 2006-2015

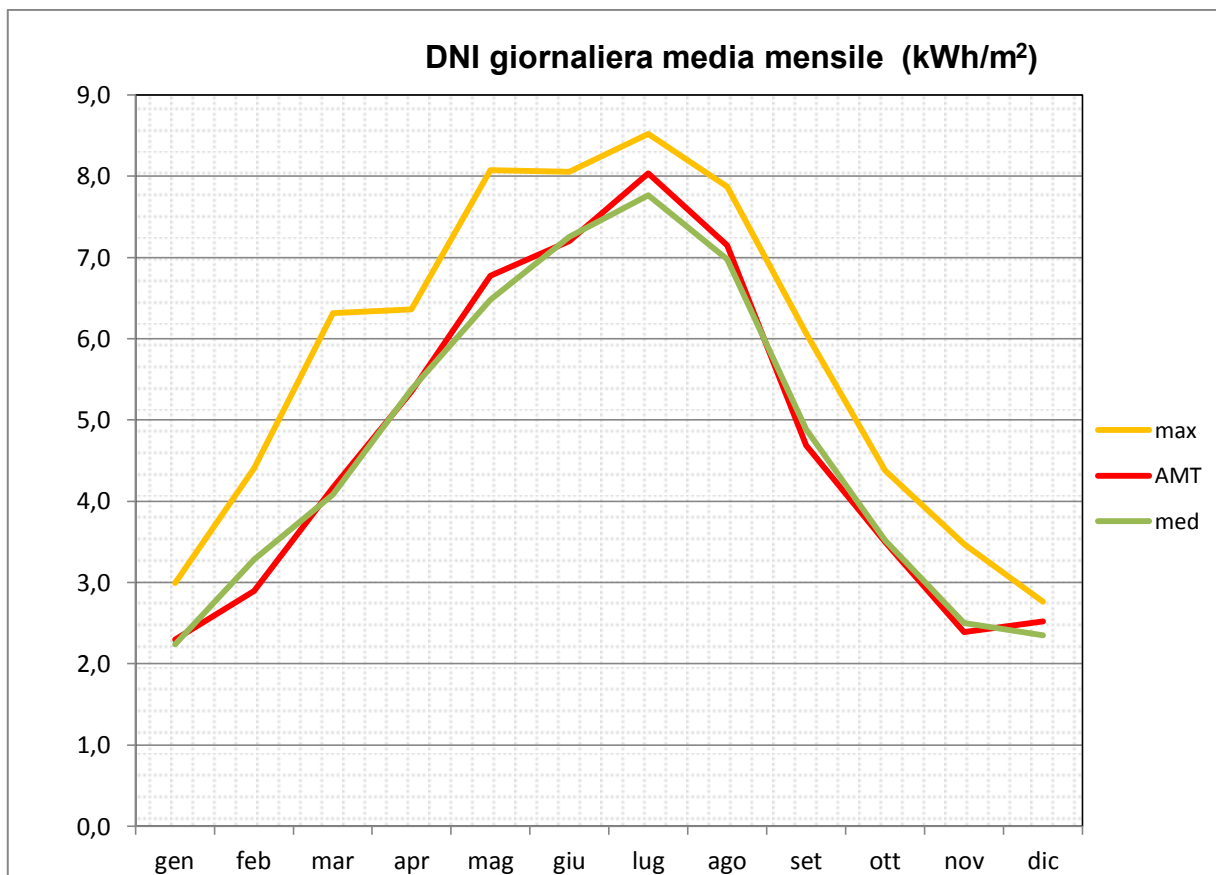


Anno	DNI - radiazione solare al suolo diretta normale (kWh/m ²)												annua
	giornaliera media mensile												
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
2006	2.868	3.056	3.498	5.341	7.104	6.396	8.044	6.336	4.428	3.619	3.054	2.766	1723.4
2007	1.978	2.664	3.737	6.362	6.464	7.071	8.363	6.714	5.186	3.981	3.022	2.646	1774.2
2008	2.018	4.117	3.471	5.149	5.359	6.843	8.035	7.696	5.484	3.548	2.393	2.649	1731.5
2009	2.006	3.765	4.167	4.215	8.077	7.199	8.521	6.514	4.668	4.381	2.469	2.110	1771.0
2010	2.301	2.559	4.098	5.432	4.913	7.329	8.362	7.147	4.686	3.036	1.856	1.814	1632.5
2011	2.387	4.407	3.741	5.670	7.673	7.865	7.457	7.873	6.063	4.294	3.472	2.394	1925.9
2012	2.995	2.344	6.318	4.878	6.944	8.056	8.272	7.597	3.892	3.496	2.470	2.469	1827.7
2013	2.157	3.786	2.702	5.299	5.198	7.925	6.650	6.804	5.420	2.879	1.726	2.518	1613.2
2014	1.333	2.898	4.721	5.352	6.276	6.996	6.051	6.593	4.221	3.511	1.799	2.002	1577.3
2015	2.328	3.240	4.407	6.061	6.773	6.886	7.890	6.507	4.806	2.459	2.755	2.164	1714.3

max	2.995	4.407	6.318	6.362	8.077	8.056	8.521	7.873	6.063	4.381	3.472	2.766	1925.9
AMT	2.301	2.898	4.167	5.352	6.773	7.199	8.035	7.147	4.686	3.496	2.393	2.518	1737.6
med	2.237	3.284	4.086	5.376	6.478	7.257	7.765	6.978	4.885	3.520	2.502	2.353	1729.1

LEGENDA

- massimo valore giornaliero medio mensile nei 10 anni 2006-2015
- mese per l'anno tipico scelto nell'intervallo 2006-2015



Altre grandezze orarie

CSN									Casaccia			
Data Ora	T °C	DewPoint °C	P hPa	Dir. Vento	V. Vento Km/h	V. Vento G Km/h	U %	Precipitazioni mm	Data Ora	T media oraria °C	Data Ora	T media oraria °C
01-01-2015 00	1.9	-6.0	1016.5	NO	25.7	40.2	56	0.0	01-01-2010 00	11.5	01-01-2015 00	-1.4
01-01-2015 01	1.9	-5.7	1016.8	ENE	20.9	35.4	57	0.0	01-01-2010 01	11.2	01-01-2015 01	-1.1
01-01-2015 02	2.0	-5.4	1017.5	NO	17.7	27.4	58	0.0	01-01-2010 02	11.2	01-01-2015 02	-1.1
01-01-2015 03	2.2	-4.8	1017.5	NNO	17.7	17.7	60	0.0	01-01-2010 03	11.4	01-01-2015 03	-0.9
01-01-2015 04	2.3	-4.7	1017.2	NNO	22.5	24.1	60	0.0	01-01-2010 04	11.1	01-01-2015 04	-0.6
01-01-2015 05	2.5	-5.4	1017.5	NO	19.3	33.8	56	0.0	01-01-2010 05	10.9	01-01-2015 05	-0.5
01-01-2015 06	2.5	-5.9	1017.8	NE	20.9	37.0	54	0.0	01-01-2010 06	9.0	01-01-2015 06	-0.3
01-01-2015 07	2.6	-6.0	1018.3	NNO	16.1	37.0	53	0.0	01-01-2010 07	8.9	01-01-2015 07	-0.3
01-01-2015 08	2.9	-5.5	1018.5	NNO	17.7	32.2	54	0.0	01-01-2010 08	9.2	01-01-2015 08	1.3
01-01-2015 09	3.3	-5.4	1019.2	NNE	22.5	32.2	55	0.0	01-01-2010 09	9.8	01-01-2015 09	3.0
01-01-2015 10	4.0	-4.5	1018.5	NNE	25.7	59.8	54	0.0	01-01-2010 10	11.4	01-01-2015 10	4.5
01-01-2015 11	5.1	-4.0	1018.2	NNO	14.5	30.6	52	0.0	01-01-2010 11	13.3	01-01-2015 11	5.4
01-01-2015 12	6.0	-3.4	1018.2	NNE	25.7	35.4	51	0.0	01-01-2010 12	10.7	01-01-2015 12	5.9
01-01-2015 13	6.6	-2.8	1018.5	NO	30.6	37.0	51	0.0	01-01-2010 13	10.5	01-01-2015 13	6.6
01-01-2015 14	7.0	-2.5	1018.2	NNE	22.5	35.4	51	0.0	01-01-2010 14	9.9	01-01-2015 14	8.0
01-01-2015 15	6.9	-2.8	1018.8	NNE	22.5	24.1	50	0.0	01-01-2010 15	9.8	01-01-2015 15	5.4
01-01-2015 16	6.4	-2.5	1020.5	NNO	19.3	29.0	53	0.0	01-01-2010 16	8.9	01-01-2015 16	4.2
01-01-2015 17	6.1	-1.5	1021.9	ENE	16.1	35.4	58	0.0	01-01-2010 17	9.2	01-01-2015 17	3.3
01-01-2015 18	6.0	-1.2	1023.2	ENE	16.1	37.0	60	0.0	01-01-2010 18	9.5	01-01-2015 18	1.9
01-01-2015 19	5.9	-0.6	1024.6	ONO	24.1	25.7	63	0.0	01-01-2010 19	9.0	01-01-2015 19	2.5
01-01-2015 20	5.6	-0.5	1025.6	NE	19.3	32.2	65	0.0	01-01-2010 20	9.2	01-01-2015 20	1.9
01-01-2015 21	5.6	0.0	1026.3	ENE	12.9	20.9	67	0.0	01-01-2010 21	9.1	01-01-2015 21	2.0
01-01-2015 22	5.6	0.4	1026.3	NNO	19.3	27.4	69	0.0	01-01-2010 22	8.3	01-01-2015 22	2.1
01-01-2015 23	5.6	0.4	1026.3	NNO	14.5	30.6	69	0.0	01-01-2010 23	8.2	01-01-2015 23	2.6
02-01-2015 00	5.5	0.5	1024.9	NO	14.5	20.9	70	0.0	02-01-2010 00	7.7	02-01-2015 00	2.7
02-01-2015 01	5.7	0.9	1025.3	NNO	14.5	22.5	71	0.0	02-01-2010 01	8.2	02-01-2015 01	2.7
02-01-2015 02	5.7	0.9	1024.9	NNE	14.5	16.1	71	0.0	02-01-2010 02	8.2	02-01-2015 02	2.6
02-01-2015 03	5.5	0.7	1024.3	NNE	16.1	19.3	71	0.0	02-01-2010 03	7.5	02-01-2015 03	2.3
02-01-2015 04	5.5	0.7	1023.6	ENE	12.9	20.9	71	0.0	02-01-2010 04	6.5	02-01-2015 04	2.3
02-01-2015 05	5.2	0.4	1024.3	NNE	6.4	11.3	71	0.0	02-01-2010 05	6.3	02-01-2015 05	1.5
02-01-2015 06	5.1	0.5	1024.6	SE	3.2	8.0	72	0.0	02-01-2010 06	6.0	02-01-2015 06	2.1
02-01-2015 07	4.4	0.0	1025.5	ENE	4.8	6.4	75	0.0	02-01-2010 07	6.2	02-01-2015 07	1.6
02-01-2015 08	4.9	0.5	1026.0	ENE	8.0	9.7	75	0.0	02-01-2010 08	8.2	02-01-2015 08	5.1
02-01-2015 09	5.6	1.0	1026.6	ENE	9.7	9.7	72	0.0	02-01-2010 09	9.1	02-01-2015 09	9.8
02-01-2015 10	6.4	1.3	1027.3	NNE	4.8	9.7	70	0.0	02-01-2010 10	13.0	02-01-2015 10	11.8
02-01-2015 11	7.3	2.2	1027.0	NNE	0.0	3.2	70	0.0	02-01-2010 11	14.3	02-01-2015 11	13.6
02-01-2015 12	8.7	2.9	1026.6	NNO	9.7	9.7	67	0.0	02-01-2010 12	16.4	02-01-2015 12	16.2
02-01-2015 13	9.5	3.5	1026.0	ONO	6.4	6.4	66	0.0	02-01-2010 13	17.1	02-01-2015 13	16.2
02-01-2015 14	10.3	3.8	1026.0	NO	0.0	6.4	64	0.1	02-01-2010 14	15.7	02-01-2015 14	14.5
02-01-2015 15	10.4	5.2	1026.0	NO	3.2	8.0	70	0.1	02-01-2010 15	13.6	02-01-2015 15	12.5
02-01-2015 16	9.6	5.0	1026.6	Ovest	0.0	0.0	75	0.1	02-01-2010 16	10.4	02-01-2015 16	8.8
02-01-2015 17	9.1	4.9	1027.0	Sud	0.0	0.0	75	0.1	02-01-2010 17	8.8	02-01-2015 17	6.0

30-12-2015 22	8.1	3.7	1018.8	ENE	11.3	12.9	74	0.0	30-12-2010 22	6.7	30-12-2015 22	2.6
30-12-2015 23	7.9	3.7	1018.8	NE	12.9	16.1	75	0.0	30-12-2010 23	6.9	30-12-2015 23	2.4
31-12-2015 00	7.6	3.5	1018.5	ENE	9.7	12.9	75	0.0	31-12-2010 00	6.9	31-12-2015 00	2.2
31-12-2015 01	7.5	3.4	1018.2	ENE	12.9	19.3	75	0.0	31-12-2010 01	7.0	31-12-2015 01	2.3
31-12-2015 02	7.2	3.3	1018.8	ENE	14.5	20.9	76	0.0	31-12-2010 02	6.9	31-12-2015 02	1.8
31-12-2015 03	7.2	3.1	1018.5	ENE	20.9	20.9	75	0.0	31-12-2010 03	7.0	31-12-2015 03	2.0
31-12-2015 04	7.2	3.1	1018.5	NNE	9.7	17.7	75	0.0	31-12-2010 04	7.1	31-12-2015 04	2.9
31-12-2015 05	7.3	3.2	1018.5	Est	12.9	19.3	75	0.0	31-12-2010 05	7.2	31-12-2015 05	3.0
31-12-2015 06	7.2	3.1	1018.8	NE	16.1	19.3	75	0.0	31-12-2010 06	7.3	31-12-2015 06	3.0
31-12-2015 07	7.1	2.8	1018.8	NE	17.7	24.1	74	0.0	31-12-2010 07	7.3	31-12-2015 07	2.8
31-12-2015 08	7.1	3.0	1018.5	NE	16.1	16.1	75	0.0	31-12-2010 08	7.3	31-12-2015 08	3.3
31-12-2015 09	7.3	3.2	1019.2	ENE	8.0	8.0	75	0.0	31-12-2010 09	8.0	31-12-2015 09	5.5
31-12-2015 10	8.0	3.6	1019.2	ENE	4.8	8.0	74	0.0	31-12-2010 10	9.4	31-12-2015 10	8.4
31-12-2015 11	8.7	4.1	1018.8	NNO	4.8	8.0	73	0.0	31-12-2010 11	11.4	31-12-2015 11	11.0
31-12-2015 12	9.7	4.9	1018.2	ESE	6.4	8.0	72	0.0	31-12-2010 12	15.6	31-12-2015 12	10.9
31-12-2015 13	10.0	5.2	1017.8	NE	4.8	4.8	72	0.0	31-12-2010 13	13.7	31-12-2015 13	12.2
31-12-2015 14	10.3	5.5	1017.5	SE	3.2	8.0	72	0.0	31-12-2010 14	14.1	31-12-2015 14	9.2
31-12-2015 15	9.9	5.1	1017.8	ESE	0.0	3.2	72	0.0	31-12-2010 15	12.2	31-12-2015 15	7.5
31-12-2015 16	9.2	4.8	1018.2	NNE	3.2	3.2	74	0.0	31-12-2010 16	10.9	31-12-2015 16	6.1
31-12-2015 17	9.0	4.6	1018.5	ESE	0.0	0.0	74	0.0	31-12-2010 17	10.0	31-12-2015 17	4.7
31-12-2015 18	8.8	4.4	1018.5	NE	0.0	4.8	74	0.0	31-12-2010 18	9.4	31-12-2015 18	3.6
31-12-2015 19	8.7	4.3	1018.5	ENE	3.2	8.0	74	0.0	31-12-2010 19	8.4	31-12-2015 19	3.0
31-12-2015 20	8.9	4.3	1018.5	SE	4.8	4.8	73	0.0	31-12-2010 20	7.2	31-12-2015 20	3.0
31-12-2015 21	8.8	4.2	1018.5	ESE	4.8	4.8	75	0.0	31-12-2010 21	6.5	31-12-2015 21	3.1
31-12-2015 22	8.9	4.1	1018.5	Est	4.8	6.4	72	0.0	31-12-2010 22	7.3	31-12-2015 22	3.4
31-12-2015 23	8.8	4.2	1018.5	ENE	3.2	4.8	73	0.0	31-12-2010 23	7.2	31-12-2015 23	4.0

NOTA: i valori su campo giallo sono quelli ricostruiti secondo il criterio descritto nel paragrafo 5.4

Riferimenti bibliografici e sitografici / References

- 1 AA.VV., *Rapporto Energia e Ambiente. Scenari e strategie*, ENEA, Roma, 2014.
ISBN: 978-88-8286-299-2
- 2 RAN — Rete Agrometeorologica Nazionale. URL:
https://www.politicheagricole.it/flex/FixedPages/Common/miepfy200_reteAgrometeorologica.php/L/IT
- 3 M. Iqbal (1983), *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Canada, Don Mills (Ontario, Canada), 1983. ISBN: 0-12-373750-8. Pagine 390.
- 4 J. Boland and B. Ridley (2008), *Models of Diffuse Solar Fraction*, in *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, cap. 8, p. 193-219.
- 5 D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie (1982), *Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation*, *Solar Energy*, vol. 28, 1982, p.13
- 6 Meteonorm Software. URL: <http://www.meteonorm.com/>
- 7 WU — Weather Underground. URL: <https://www.wunderground.com/>
- 8 I.J. Hall, R.R. Prairie, H.E. Anderson e E.C. Boes, "Generation of a typical meteorological year", *Proceedings of the 1978 Annual Meeting*, American Section of the International Solar Energy Society, Vol. 2.2, 669-671 (1988).
- 9 K.M. Knight, S.A. Klein e J.A. Duffie, "A methodology for the synthesis of hourly wheater data", *Solar Energy*, Vol. 46, No. 2, pp 109-120 (1991).
- 10 SAM — System Advisor Model. URL: <https://sam.nrel.gov/>
- 11 J.M. Finkelstein e R.E. Schafer, "Improved Goodness-of-Fit Tests", *Biometrika*, 58(3), pp. 641–645 (1971).
- 12 G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio, G. Antonacci (2010), *Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane (Emilia Romagna - Friuli Venezia Giulia – Liguria – Lombardia – Piemonte)*, Ricerca Sistema Elettrico MiSE-ENEA. RdS/2010/185.
- 13 G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio, G. Antonacci (2011), *Definizione degli anni tipo climatici delle province delle regioni italiane del centro sud*, Ricerca di Sistema Elettrico MiSE-ENEA. Report RdS/2011/9, 2011
- 14 G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio e G. Antonacci (2012), "Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva", Ricerca di Sistema Elettrico MiSE-ENEA, RdS/2012/106.
- 15 G. Riva e G. Murano (2013), "Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva", Ricerca di Sistema Elettrico MiSE-ENEA, RdS/2013/153.

- 16 *Anni tipo climatici d'Italia*. (nel sito del Comitato Termotecnico Italiano - CTI). URL: <http://www.cti2000.it/index.php?controller=news&action=show&newsid=34985>
- 17 WMO, Guide N.8, 1996 *"Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation"*.
- 18 Norma UNI EN ISO 15927-4, "Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling".
- 19 Norma 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".
- 20 Norma UNI/TR 10349-2:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto".
- 21 UNI 10349-3:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici".
- 22 Progetto itMeteoData: <http://www.itmeteodata.com/>
- 23 Dati climatici "G. De Giorgio" 1951-1970. Database preparato dall'Istituto di Fisica dell'Atmosfera (IFA) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). URL: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/weather/weather_files/italia_dati_climatici_g_de_giorgio.pdf
- 24 M. Collares-Pereira e A. Rabl (1979), "The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values", *Solar Energy*, **22**, 155-164.
- 25 Software di simulazione *EnergyPlus* per la stima del fabbisogno energetico in edilizia, URL: <https://energyplus.net/>. Database degli *Anni meteorologici tipici* a corredo del software, URL: <https://energyplus.net/weather>
- 26 *SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare*, sito ENEA per il calcolo e la previsione della radiazione solare, <http://www.solaritaly.enea.it>.
- 27 *Clisun - Archivio Climatico ENEA-DBT*, sito Internet (<http://clisun.casaccia.enea.it>); contiene – tra l'altro – le mappe della radiazione globale giornaliera media mensile 1994-1999 ed i valori stimati per 1614 località uniformemente distribuite sul territorio italiano. Tutto il materiale è liberamente 'scaricabile'.
- 28 S. Petrarca, E. Cogliani, F. Spinelli (2000), *La radiazione solare globale al suolo in Italia. Anni 1998 e 1999 e media 1994-1999*, ENEA, Roma.
- 29 F. Spinelli, E. Cogliani, A. Maccari, M. Milone (2007), *La misura 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*, Rapporto tecnico ENEA SOL/RS/2007/21, Roma. <http://www.solaritaly.enea.it/Documentazione/Archivio%20Radiazione%20e%20Solaritaly.pdf>

- 30 F. Spinelli, E. Cogliani, A. Maccari, M. Milone (2008), *La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare*, in *Energia, Ambiente e Innovazione*, bimestrale ENEA, Roma, gennaio-febbraio 2008.
- 31 EUMETSAT — European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites,
URL: <http://www.eumetsat.int>
- 32 *The Meteosat Archive 1978-2000*, EUMETSAT, Darmstadt (Germania), Febbraio 2000, EUM TD 06.