

**STAR**  
**Solare Termico ad Alto Rendimento**

**Relazione attività progetto STAR**  
*Periodo: Luglio 2008 – Dicembre 2008*



**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

*F. P. Vaccari, S. Taddei, G. Brugnoli*

IBIMET - CNR  
Istituto di Biometeorologia - Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Via Caproni, 8 50144 Firenze  
Tel 055-3033711 Fax 055-308910 Web [www.ibimet.cnr.it](http://www.ibimet.cnr.it)

Indice	
Introduzione .....	3
Attività IBIMET nel progetto STAR .....	3
Analisi prodotti/dati radiazione solare disponibili .....	4
Definizioni .....	4
Insolazione .....	4
Riferimenti per il calcolo .....	5
Mappatura Italia .....	6
Dati e database di radiazione solare Europei .....	7
Mappe di radiazione derivate da immagini satellitari .....	12
Caratterizzazione del clima di Pianosa .....	14
Pianosa e le stazioni di misura .....	14
Temperatura .....	16
Vento .....	16
Umidità relativa .....	17
Precipitazioni .....	18
Alcuni dati meteorologici estremi .....	18
Procedura per il calcolo del Gust Factor .....	20
Radiazione solare .....	23
Appendice A .....	26

## Introduzione

La seguente relazione si prefigge l'obiettivo di riassumere le principali attività svolte nei primi 6 mesi del progetto STAR ed elencare brevemente i risultati maturati nelle diverse riunioni tenutesi nell'ambito del progetto.

## Attività IBIMET nel progetto STAR

Le attività del progetto STAR che vedono direttamente coinvolta IBIMET sono brevemente riassunte nella seguente lista di work package (WP) e dal relativo effort in essi previsto:

### WP.Task (%)

- 1.4 (40 %) Protocollo trasferimento ed archiviazione dati , Data handling
- 2.1 (100%) Studio sulle potenzialità di utilizzo delle tecnologie implementate (WP2) in relazione ai regimi radiativi della Toscana, Mappa radiazione Toscana, Mappa nuvolosità Toscana
- 4.1 (50%) Rapporto su scelta sito
- 4.2 (40%) DB dati acquisiti durante sperimentazione
- 5.3 (15%) Rapporto sulle misure di caratterizzazione dei collettori solari

Oltre a queste attività "ufficiali" durante le prime riunioni del progetto è stata evidenziata la necessità di avere a disposizione alcuni dati climatologici che permettessero di caratterizzare uno dei possibili siti della Toscana in cui si immagina di poter sperimentare il prototipo che verrà realizzato durante il progetto stesso. La caratterizzazione richiesta è relativa all'isola di Pianosa ed i dati forniti, descritti in uno dei capitoli che seguono, risultano necessari per meglio fissare parametri ambientali richiesti da alcuni strumenti di supporto (algoritmi, Sw) per gli studi inerenti alla progettazione del sistema stesso.

In breve le attività principali che ci ha visti coinvolti si possono riassumere in:

- Analisi prodotti/dati radiazione solare disponibili
- Studio di un possibile prodotto mappe (radiazione e nubi)
- Caratterizzazione climatologica di Pianosa

E sono più in dettaglio descritte ed analizzate nelle sezioni che seguono.

## Analisi prodotti/dati radiazione solare disponibili

In questo paragrafo viene introdotta la principale terminologia e le principali tecniche e modelli che permettono il calcolo e la misura della radiazione solare.

### Definizioni

La **radiazione solare** o irraggiamento è la potenza istantanea che il sole scarica al suolo. Si misura in kW/m<sup>2</sup> e raggiunge all'incirca la potenza di 1000 W/m<sup>2</sup> in condizioni di cielo sereno a mezzogiorno.

In prima approssimazione l'energia solare media annua disponibile per unità di superficie è data da:  
 $E = 2/3 * 0.95 * W_o * Hr = 1553 \text{ kWh/m}^2$

In cui :

- 2/3 = coefficiente di efficienza di un collettore di energia piano che riceve raggi incidenti
- 0.95 = la media annua del rapporto tra la radiazione ricevuta sul collettore piano e la radiazione diretta
- $W_o$  = Energia media annua prodotto da una area normale alla direzione dei raggi solari. Questo valore è circa 280W/m<sup>2</sup>. Ma un valore più conservativo e che viene usato è di circa 200W/m<sup>2</sup>.
- Hr = Ore in un anno ( 8600).

(vedere Solar Thermal Energy production: Guidelines and future programmes of ENEA. – 2001 )

In realtà con una valutazione un po' più accurata relativa alla nostre latitudini mostra valori variabili tra i 1200 kWh /m<sup>2</sup> (al nord) e 1700kWh/m<sup>2</sup> all'anno (come massimo al Sud).

- La radiazione dipende dalla zona
- E' normata dall' **Atlante Europeo della Radiazione Solare**

**L'insolazione** è l'energia che si può raccogliere in un giorno in una superficie piana orizzontale e si misura in kWh/m<sup>2</sup> giorno.

L'angolo di tilt è l'angolo d'inclinazione dei moduli di sfruttamento dell'energia solare rispetto al suolo. (Il valore ideale varia in funzione della latitudine: indicativamente è pari alla latitudine stessa meno 15°.

Ad esempio , per i moduli fotovoltaici si ha una perdita di energia pari al 10-12% quando i sono posizionati orizzontali e una perdita del 35% quando sono posizionati verticali. )

L'angolo di "azimut" è la deviazione angolare rispetto al sud. Deve essere contenuto entro +/- 45° per non avere perdite significative.

### Insolazione

Per valutare la produzione di energia termica si deve partire dalle caratteristiche di insolazione del sito, eventualmente corrette per tener conto di ombreggiamenti nel corso della giornata dovuti a palazzi, alberi o rilievi nelle vicinanze. Indicativamente si possono considerare i valori riportati in tabella, tratti dall'Atlante europeo della radiazione solare e riferiti ad un m<sup>2</sup> di superficie esposta a sud con un'inclinazione pari alla latitudine.

Insolazione	Nord	Centro	Sud
kWh/ m <sup>2</sup> /giorno	3,8	4,6	5,0

Con un rendimento di impianto compreso fra il 30% ed il 35%, valori mediamente accettabili, si ottiene una produzione complessiva annua compresa fra i 450 ed i 730 kWh/m<sup>2</sup>.

### Riferimenti per il calcolo

Gli ingegneri che si occupano di dimensionamento di impianti per lo sfruttamento di energia solare utilizzano i dati dell'Atlante solare (vedi sotto: Mappatura Italia) su piano orizzontale e su piano inclinato.

In pratica a questo indirizzo <http://www.solaritaly.enea.it/CalcRggmmOrizz/Calcola.php>,

### Radiazione solare globale giornaliera media mensile su superficie orizzontale

Media quinquennale 1995-1999

Input per il calcolo:

Leggere prima le brevi [istruzioni](#) per l'immissione dei dati.

C'è anche la pagina delle [definizioni](#) delle grandezze coinvolte nel calcolo

Posizione della località:

Latitudine (esempio: 42°02'36"):  Longitudine (esempio: 12°18'28"):

Modello per il calcolo della frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale:

ENEA-SOLTERM

UNI 8477

Iqbal

Unità di misura per la R.g.g.m.m.:

Effettuare il calcolo per:

inserendo le coordinate della località in cui si vogliono estrarre dati, scegliendo il modello per il calcolo della frazione di radiazione diffusa rispetto alla globale, ed il periodo di interesse, si ottiene la radiazione solare globale giornaliera media mensile (**Rggmm**), al livello del suolo, su superficie orizzontale, inclinata e normale. Questo calcolo on-line (che può riferirsi a un solo mese o a tutti i 12 mesi dell'anno) è utile per tutti coloro (progettisti, esercenti ecc.) che sono interessati agli impianti che sfruttano l'energia solare, in particolare quelli fotovoltaici.

La procedura per il calcolo dell'Rggmm, al suolo, su superficie inclinata si attiene a quanto prescritto dalla Norma UNI 8477/1 (recante istruzioni per il "Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta") e consente di valutare anche l'effetto dovuto alla presenza di ostacoli che in determinate ore del giorno possono schermare i raggi del sole.

Il calcolo dell'Rggmm al suolo su superficie normale è invece riferito ad una superficie captante che ruota continuamente in modo da mantenersi sempre perpendicolare ai raggi del sole.

I calcoli per le diverse superfici si possono effettuare da:

<http://www.solaritaly.enea.it/CalcComune/Calcola.php>

## **Mappatura Italia**

L'ENEA sta svolgendo un'attività di caratterizzazione del territorio italiano al fine di individuare i siti adatti ad ospitare le tecnologie per lo sfruttamento dell'energia solare. Con questo obiettivo l'ENEA ha messo a punto l'**Atlante italiano della radiazione solare**, consultabile all'indirizzo [www.solaritaly.enea.it](http://www.solaritaly.enea.it). In questo sito sono pubblicate le mappe di radiazione solare al suolo (globale e diretta; oraria, giornaliera, giornaliera media mensile, annua, medie pluriennali ecc.; orizzontale normale o su piani comunque orientati) prodotte con risoluzione spaziale 2.5 km x 2.5 km circa e relative alla media quinquennale 1995-1999.

Oltre a questi dati stanno lavorando alla creazione di un sistema per il calcolo della previsione di radiazione basata su previsioni meteorologiche.

Dati e mappe di radiazione per l'Italia possono essere scaricati anche dal sito dell'Archivio Climatico dell'ENEA, all'indirizzo <http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/Radiazione.htm>

In queste pagine sono riportati i risultati dell'attività svolta dall'ENEA per la stima della radiazione solare globale sul piano orizzontale in Italia mediante l'elaborazione delle immagini secondarie trasmesse dal satellite Meteosat nella banda del visibile. I valori stimati approssimano quelli misurati entro il 6-7 %.

La metodologia usata è descritta nella pubblicazione (S. Petrarca, E. Cogliani, F. Spinelli La RADIAZIONE SOLARE GLOBALE AL SUOLO IN ITALIA - anni 1998-1999 e media 1994-1999 - Edizioni ENEA, 2000 - ISBN 88-8286-055-8 ), che contiene i risultati finali dell'attività (dati e mappe), l'analisi delle misure a terra usate per la validazione del sistema ed una discussione sulla loro accuratezza.

Le tabelle, che danno i valori di radiazione su 1614 comuni italiani, sono consultabili tramite la pagina web:

<http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/TabelleRadiazione.htm>

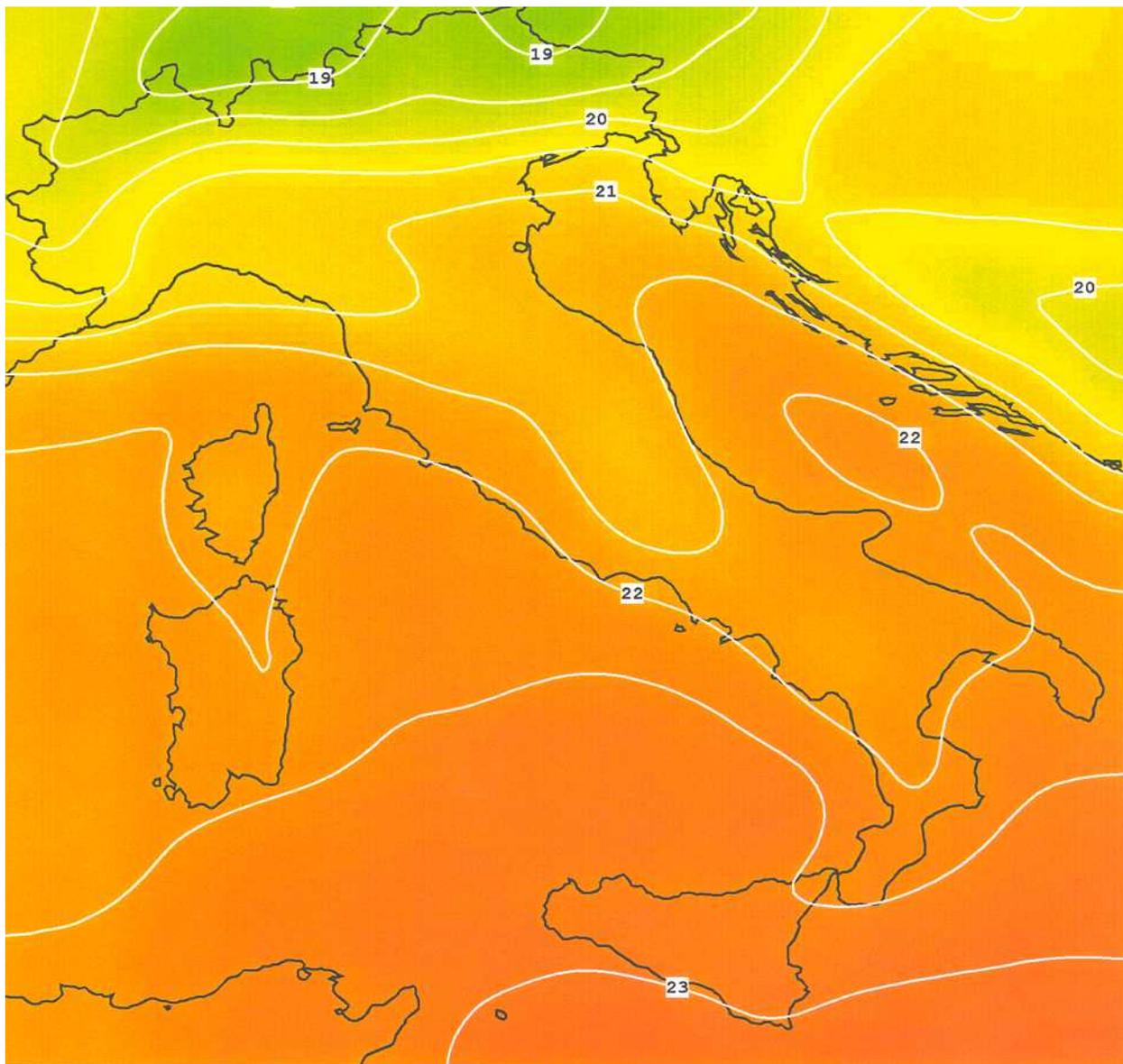
Tabelle → Valori giornalieri medi mensili ed insolazione annua per ognuno degli anni dal 1994 al 1999 ; Valori medi della radiazione giornaliera media mensile e dell'insolazione annua sull'intero periodo 1994-1999

Esempio dati Tabella per Livorno:

*reg,prov,com,sigla,comune,1994,1995,1996,1997,1998,1999,media*  
 9,49,2,LI,Campiglia Marittima,5379,5310,5214,5415,5433,5401,5359  
 9,49,6,LI,Castagneto Carducci,5345,5271,5193,5387,5421,5371,5331  
 9,49,7,LI,Cecina,5315,5241,5154,5363,5390,5346,5302  
 9,49,8,LI,Collesalveti,5230,5159,5084,5305,5329,5276,5231  
 9,49,9,LI,Livorno,5248,5183,5099,5311,5345,5298,5247  
 9,49,12,LI,Piombino,5424,5371,5260,5447,5479,5447,5405  
 9,49,14,LI,Portoferraio,5454,5407,5293,5477,5497,5481,5435  
 9,49,17,LI,Rosignano Marittimo,5285,5213,5132,5336,5375,5328,5278

Le mappe a colori, che rappresentano la radiazione sull'Italia nei dodici mesi dell'anno sono disponibili nella pagina web: <http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/MappeRadiazione.htm> . Le mappe della radiazione giornaliera media mensile per i due anni 1998, 1999 e quelle medie del periodo 1994-1999.

Le isolinee sono tracciate ad intervalli di 0,5 MJ/(m<sup>2</sup>·giorno); le etichette sono aggiunte solo alle linee di valore intero per evitare di appesantire l'immagine con scritte lunghe e numerose.



*Esempio Mappa Media '94-'99 – Mese Maggio*

### **Dati e database di radiazione solare Europei**

Da diversi anni sono attivi progetti Europei che si prefiggono lo scopo di creare archivi di dati di radiazione solare. Archivi che hanno diversi scopi tra cui:

- Creazione di serie di radiazione solare
- Archivi di riferimento per il calcolo e la stima della produzione di impianti solari

Tra questi database forniamo una breve descrizione di quelli che riteniamo più interessanti per il progetto.

### **Dati Misurati**

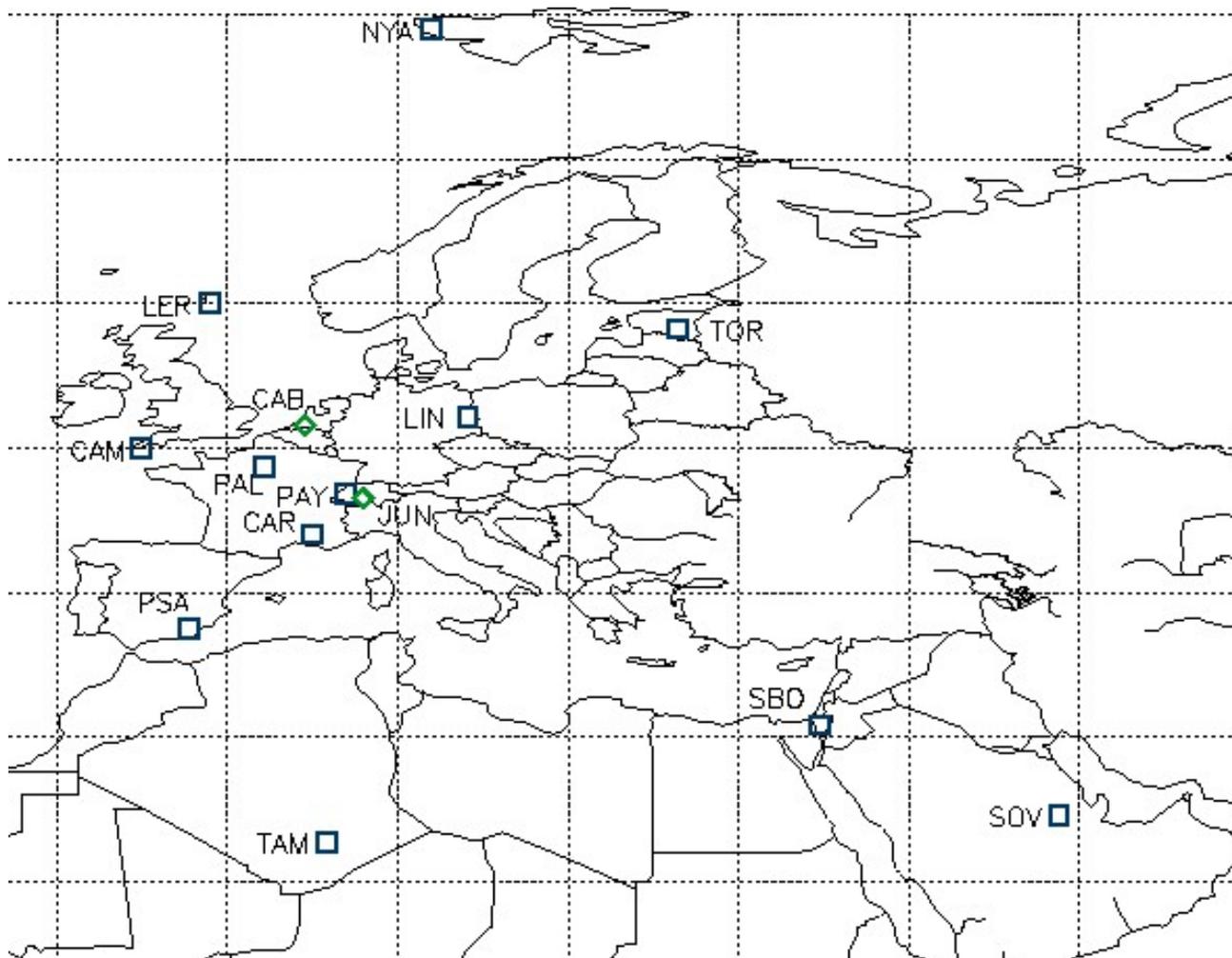
#### **La rete BSRN**

Il progetto Baseline Surface Radiation Network (BSRN) è un lavoro congiunto del World Climate Research Programme (WCRP) e del Global Energy and Water Experiment (GEWEX). La rete

BSRN è stata di recente (inizio 2004) designata come rete di riferimento a terra per il Global Climate Observing System (GCOS).

Lo scopo principale di questo progetto è quello di monitorare la radiazione solare a terra e la sua relazione con i cambiamenti climatici. I dati misurati sono anche di primaria importanza per la validazione dei modelli per la derivazione dei dati di radiazione da immagini satellitari.

La rete è costituita da un numero limitato di stazioni (attualmente sono meno di 40) distribuite in aree con climi diversi e a latitudini che vanno da 80°N a 90°S .



*Mapa delle stazioni BSRN Europee (vedere [http://bsrn.ethz.ch/wrmc/maps\\_main.html](http://bsrn.ethz.ch/wrmc/maps_main.html) per la mappa globale) .*

Queste stazioni misurano la radiazione solare ed atmosferica con strumenti di alta precisione e ad alta risoluzione temporale (da 1 a 3 minuti).

Dopo quindici anni di operatività della rete gestita presso il centro Institute for Atmospheric and Climate Research (ETH - <http://bsrn.ethz.ch>), l'archivio è stato spostato e viene attualmente gestito dal Alfred Wegener Institute (AWI) in Bremerhaven ( <http://www.bsrn.awi.de/> ).

### **La rete IDMP**

La rete International Daylight Measurement Programme (IDMP) è stata implementata nel 1991 dalla Commission Internationale de l'Eclairage (International Lighting Commission) con base a Vienna, Austria ( <http://www.cie.co.at/cie/home.html> ). La rete è costituita da 48 stazioni

specializzate nella misura ad alta frequenza ed alta qualità della radiazione solare e 15 stazioni per la misura della distribuzione della luce nella volta celeste (vedere <http://idmp.entpe.fr/> )

### **Meteonorm**

<http://www.meteonorm.com/>

METEONORM (arrivato alla versione 6.0 - 2007) include un catalogo dati e delle procedure di calcolo per applicazioni e sistemi che sfruttano l'energia solare. I dati e le procedure permettono i calcoli in ogni area del mondo.

In particolare i dati comprendono:

- I dati climatologici di circa 7700 stazioni
  1. I parametri misurati sono: medie mensili di radiazione globale, temperature, umidità, precipitazione, giorni con precipitazione, vento (direzione ed intensità) e durata dell'insolazione
  2. I dati di temperatura, umidità, precipitazione e velocità del vento coprono i seguenti periodi: 1961-90 e 1996-2005
  3. La Radiazione globale è disponibile per il periodo 1981-2000
- I dati satellitari per le aree con minor copertura da stazioni a terra

I modelli di calcolo permettono:

4. Modelli di interpolazione per il calcolo di valori medi in ogni posto del mondo
5. Calcolo della radiazione su superfici inclinate

I costi dipendono dal tipo di licenza richiesta, dal dataset, dalla serie e dall'area ( <http://www.meteonorm.com/pages/en/prices-order.php> ).

Questo atlante Europeo della radiazione solare (o database Meteonorm) è disponibile in CD Rom.

Questi prodotti basati su misure a terra, mostrano delle lacune che relativamente all'Europa si possono riassumere in :

6. Mancanza di continuità delle informazioni (a causa anche del numero limitato di stazioni di misura in Europa che sono circa 600)
7. A meno di alcuni siti (stazioni di misura) non vi sono dati orari (o sulla mezz'ora). I dati a più alta frequenza (orari o sulla mezz'ora) sono necessari per fornire informazioni sulla dinamica della luce del giorno e della radiazione solare.

Per tale motivi negli ultimi anni si fa sempre più spesso ricorso all'uso di dati radiativi derivati da immagini satellitari.

### **Radiazione solare da dati satellitari**

Come verrà descritto con maggiore dettaglio nelle prossime sezioni, diverse sono le tecniche ed i modelli che permettono di derivare mappe di radiazione solare sia da dati satellitari che da algoritmi di interpolazione di dati o da procedure che si basano su modelli teorici.

Di seguito introduciamo brevemente i progetti più interessanti che si avvalgono di queste tecniche per fornire mappe di radiazione solare.

## Helioclim

Helioclim è un insieme di database di dati di radiazione solare derivati da immagini satellitari Meteosat. I dati sono disponibili dal 1985 e sono fruibili attraverso il servizio SoDa (vedere <http://www.soda-is.com/eng/about/index.html> ).

I dati sono derivati da immagini Meteosat utilizzando il modello Heliosat. Coprono quindi l'Europa, l'Africa, il bacino del Mediterraneo, l'Oceano Atlantico e parte dell'oceano Indiano. La copertura del satellite Meteosat.

Il Modello Heliosat viene applicato sia a immagini Meteosat (Europe), che a dati GOES (USA) o GMS (Japan). Il modello deriva dal metodo descritto da Cano et al. (1986).

L'istituto Mines ParisTech ha prodotto il modello Heliosat-2 nel Novembre 2002, parzialmente supportato da finanziamenti Europei (progetto SoDa, contratto DG "INFSO" IST-1999-12245). Il Sw di tale modello è disponibile al seguente, link <http://www.helioclim.net/software/index.html>.

Mines ParisTech in modo operative riceve immagini Meteosat, applica ad esse il modello Heliosat e genera i dati del database resi poi disponibili attraverso il servizio SoDa.

La famiglia di database di dati di Radiazione Solare derivati da immagini Meteosat disponibili è la seguente:

Nome DB	Stato	Risoluzione Spaziale	Periodo	Risoluzione temporale	Parametri	Metodo	Aggiornamento
HC-1	Ver. 4L	Circa 20Km	1985 - 2005	Giornaliera	Insolazione, Radiazione globale su sup. oriz.	Heliosat-2	
HC-2	Ver. 1.01	5' of arc angle, Circa 10Km alle medie latitudini	Dal 2004	Oraria	Insolazione, Radiazione globale su sup. oriz.	Heliosat-2	Orario (Real time)
HC-3	Ver. 1.0	Circa 5Km	Dal 2004	Quarto di ora	Insolazione, Radiazione globale su sup. oriz.	Heliosat-2	Ogni 15 min (Real time)
HC-4	In fase di sviluppo	Circa 5Km	Dal 2004	Quarto di ora	Insolazione, Radiazione globale, diretta e diffusa su sup. oriz.	Heliosat-4	Ogni 2 giorni

Nota: La Copertura spaziale è: Lat:-66; +66 Lon: -66; +66 per tutti i database.

Per maggiori informazioni sui diversi metodi Heliosat consultare <http://www.helioclim.net/heliosat/index.html>.

## SoDa

Come precedentemente introdotto, il servizio SoDa (<http://www.soda-is.com>), rappresenta un unico punto di accesso ad un insieme di risorse (dati e database) relative alla radiazione solare dislocate in diversi paesi.

Un servizio può essere l'accesso ad un database (e.g., radiazione solare, o temperature) o l'utilizzo di un algoritmo che processa i dati e produce nuove informazioni. Il servizio include l'accesso a serie di dati di radiazione o insolazione, temperature, pioggia, radiazione da "onde lunghe", fattore di Linke, turbidity atmosferica, proprietà del cielo sereno, PAR (photosynthetically active radiation), distribuzione spettrale ...

La lista completa dei servizi : <http://www.soda-is.com/eng/services/index.html>

I risultati dei diversi servizi sono disponibili in vari formati (esempio: dati numeri, dati esportabili, grafici) .

L'accesso a tali dati è libero o a pagamento dipendentemente dal tipo di servizio richiesto e dalla quantità di dati richiesti.

### **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)**

Questo progetto del Joint Research Centre (JRC) fornisce un database di dati di radiazione solare derivati da dati climatologici omogenei su tutta l'Europa e disponibile attraverso l'atlante Europeo della radiazione solare, usando il modello *r.sun* (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod3.htm>) e le tecniche di interpolazione *s.vol.rst* ([http://grass.itc.it/gdp/html\\_grass5/html/s.vol.rst.html](http://grass.itc.it/gdp/html_grass5/html/s.vol.rst.html)) e *s.surf.rst* (interpolazione mediante *regularized spline with tension* - [http://grass.itc.it/gdp/html\\_grass5/html/s.surf.rst.html](http://grass.itc.it/gdp/html_grass5/html/s.surf.rst.html)).

L'algoritmo calcola le componenti dirette, diffuse e riflesse della radiazione ed insolazione globale, sia in condizioni di cielo sereno che di stato-reale del cielo, sia su superficie orizzontale che inclinata.

La radiazione totale giornaliera ( $\text{Wh/m}^2$ ) viene calcolata integrando la radiazione ( $\text{W/m}^2$ ) calcolata ad intervalli regolari del giorno. Per ognuno di questi time-step il calcolo tiene conto delle eventuali "ombrosità" del terreno dovute dell'andamento del suolo, basato sull'uso di un Digital Elevation Model (DEM).

Il database è costituito da mappe di radiazione solare globale che rappresentano la media mensile ed una media annuale calcolata sulla somma della radiazione globale giornaliera sia su superficie orizzontale che inclinata ai seguenti angoli: 15, 25 e 40 gradi. Oltre a queste mappe vengono calcolate mappe di radiazione a cielo-sereno, fattore di Linke ed il rapporto radiazione Diretta/Globale.

Una descrizione completa dei metodi di calcolo è disponibile al seguente link:  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solrespvgis.htm>

## Studio di un possibile prodotto mappe (radiazione e nubi)

Questa parte di studio è al momento in una fase preliminare e rappresenta un'analisi delle possibili soluzioni e una valutazione dei prodotti che potrebbero essere utilizzati.

La generazione di mappe tematiche può essere ottenuta mediante strumenti grafici o con sistemi più complessi basati su sistemi che permettono una georeferenziazione e cioè che danno la possibilità di legare il dato radiativo ad una locazione esatta.

Nel primo caso si avrebbero delle semplici mappe in cui si evidenziano aree o isolinee di livelli radiativi.

Nel secondo caso si ha la possibilità di interagire con il sistema ed ottenere dati relativamente ad una locazione ben precisa.

Quale che sia il sistema che rende fruibile e permetta l'accesso ai dati, c'è necessità di generare mappe o meglio un database di dati che possa visivamente essere poi rappresentato con una mappa.

Le possibili soluzioni che si possono implementare sono:

8. Base dati radiativi ottenuti da un processo di interpolazione di dati misurati a terra
9. Base dati radiativi derivati da strumentazione installata su satelliti di remote sensing

Nel primo caso il problema si trasferisce sul reperimento del maggior numero di dati provenienti da misure a terra e sulla ricerca del miglior sistema di interpolazione dei dati e quindi su problematiche di risoluzione spaziale.

Nel secondo caso le problematiche di risoluzione spaziale sono superate mentre si trasferisce il problema sulla valutazione della bontà di prodotti con ottima risoluzione spaziale (per il tipo di grandezza da misurare).

### **Mappe di radiazione derivate da immagini satellitari**

La radiazione solare misurata sulla superficie della terra può essere indicata come

$$I_G = (1 / (1 - \rho)) (I_0 - I_s - E_a)$$

$I_G$  = Radiazione solare globale o Irradiazione

$\rho$  = Albedo

$I_0$  = Irradiazione extraterrestre

$I_s$  = Radiazione misurata da satellite

$E_a$  = energia assorbita

Una immagine satellitare usata per il calcolo della radiazione non rappresenta altro che la radianza della terra (nei canali del visibile) in una area (risoluzione del satellite) e in un tempo specifico. La radianza misurata dal radiometro presente a bordo del satellite dipende dallo stato dell'atmosfera (cielo chiaro, coperto o nuvoloso) e dalla riflettività del suolo.

E' proprio in questo senso che si indica che le immagini satellitari forniscono una informazione relativa alla nuvolosità di una certa area in un certo tempo specifico.

Di conseguenza si può definire l'indice di nuvolosità che è un parametro normalizzato definito come:

$$n = (\rho - \rho_g) / (\rho_c - \rho_g)$$

$\rho$  = riflettività istantanea o albedo

$\rho_c$  = riflettività delle nuvole o albedo delle nuvole

$\rho_g$  = riflettività del suolo o albedo del suolo

L'importanza dell'indice di nuvolosità deriva dal fatto che le informazioni misurate da satellite (fondamentalmente informazioni di copertura nuvolosa) possono essere messe in relazione con l'irraggiamento solare che arriva a terra.

Molti modelli utilizzati per il calcolo della radiazione solare da immagini da satelliti si basano sulla assunzione di una relazione lineare tra trasmissività dell'atmosfera e l'indice di nuvolosità.

Diversi sono i modelli usati in letteratura per la derivazione della radiazione solare da immagini satellitari. I più usati e conosciuti sono:

Heliosat proposto inizialmente da Cano et al. (1986) - *A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data*. Modello poi evoluto in diverse versioni e molto applicato ai dati del satellite Meteosat

Il modello di Perez et al. (*A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation*) che rappresenta una evoluzione del modello heliosat, sviluppato presso l'ASRC (Atmospheric Sciences and Research Center) e applicato alle immagini del satellite GOES

Il modello BRASIL-SR è una evoluzione del modello di Moser W. e Raschke E. (*Mapping of solar radiation and of cloudiness from METEOSAT image data. Theory and ground truth comparison*. Meteorologische Rundschau 36 : 33-41) e viene applicato alle immagini GOES. Utilizza dati di temperatura a terra, dati di albedo e dati di umidità relativa e visibilità'.

Il modello DLR-SOLEMI che si concentra sul calcolo della radiazione diretta derivata dalle immagini Meteosat (Schillings C, Mannstein H and Meyer R, 2004, *Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data*. Solar Energy 76: 475-484, e, C. Schillings, R. Meyer and H. Mannstein, 2004, *Validation of a method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data and application for the Arabian Peninsula*. Solar Energy 76: 485-497). Il modello si basa sul modello a cielo chiaro di Bird (Bird RE and Hulstrom RL, 1983, *Review, evaluation and improvement of direct irradiance models*. J. Sol. Energy Eng. 103: 182-192). Mentre la radiazione a cielo nuvoloso utilizza l'indice di nuvolosità derivato dai canali IR e VIS delle immagini Meteosat.

Il modello Brisson et al. (Brisson, A., P. LeBorgne, A. Marsouin, 1999,, *Development of algorithms for Surface Solar Irradiance retrieval at O&SI SAF Low and Mid Latitudes*, O&SI SAF Report to EUMETSAT) è stato largamente usato e sviluppato da Meteofrance nell'ambito del progetto Ocean and Sea-Ice Satellite Application Facility (OSI-SAF). Questo lavoro è stato portato avanti aggiungendo come dati aggiuntivi i canali SEVIRI (onde corte: 0.6 $\mu$ m, 0.8 $\mu$ m, e 1.6 $\mu$ m) sempre dai dati Meteosat Second Generation (MSG-1 lanciato nell'Agosto 2002 e MSG-2 lanciato nel Dicembre 2005).

## **Caratterizzazione del clima di Pianosa**

L'Isola di Pianosa può essere uno dei siti in cui installare il prototipo STAR per effettuare delle misure. Al fine di meglio definire un prototipo alcuni parametri ambientali risultano necessari per fissare alcune variabili richieste da procedure di calcolo sia per la stima della produzione di energia che di elementi strutturali del prototipo stesso.

Pianosa rappresenta un ambiente unico nel suo genere. Da anni l'IBIMET segue progetti che prevedono la presenza di un certo numero di stazioni di misura dei principali parametri meteorologici.

Utilizzando queste misure vengono forniti di seguito alcuni dati fondamentali che caratterizzano il clima di Pianosa.

Teniamo a sottolineare che viene fornita una "caratterizzazione" ambientale in quanto per avere un vero e proprio studio climatologico è necessario prendere in considerazione serie di dati che coprano almeno 30 anni. Ci limitiamo invece ai dati misurati negli anni 2002-2008.

### ***Pianosa e le stazioni di misura***

L'isola di Pianosa (Long. 10°04'44"E , Lat. 42°35'07"N) è per estensione la settima isola dell'arcipelago Toscano con una superficie di 10,2 Km<sup>2</sup> ed un perimetro di costa di circa 20 Km. Il nome Pianosa ("Planasia") deriva dalla sua quasi completa morfologia piana, con qualche ondulazione. Il punto più alto sul livello del mare è di 29 m, mentre l'altezza media è di circa 18 metri.

Il clima di Pianosa differisce dal clima delle altre isole dell'arcipelago proprio a causa della sua morfologia. La terra quasi completamente piatta non offre la possibilità a masse di aria umida di avere moti convettivi forzati e quindi di condensare e dare origine a piogge. Questo da origine ad un clima più asciutto rispetto alle altre isole.

A causa di questa particolarità e della assoluta limitata presenza dell'uomo, l'Isola è divenuta, da una decina di anni, laboratorio ambientale.

L'IBIMET-CNR ha installato sull'isola alcune stazioni meteorologiche per la misura sia di parametri fondamentali dell'atmosfera che di parametri scientifici attinenti alle ricerche portate avanti nell'ambito di diversi progetti scientifici, tra cui il progetto Pianosa LAB. Progetto che ha come scopo il monitoraggio a lungo termine dello scambio dei gas serra tra l'atmosfera e la biosfera in un ecosistema Mediterraneo.

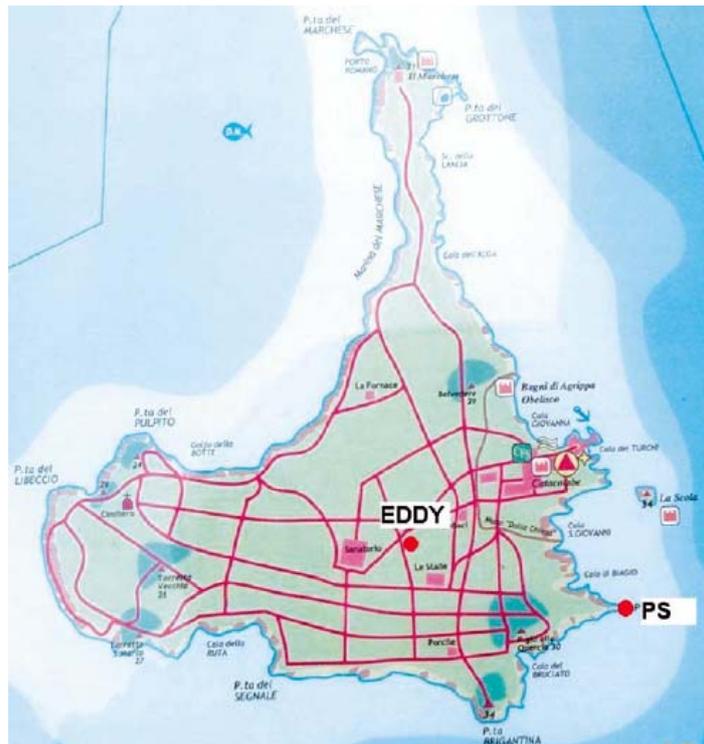


Figura 1. Posizioni in cui sono installate le due stazioni (EDDY, PS) Meteo IBIMET sull'isola di Pianosa.

Due sono le locazioni principali in cui sono state installate delle stazioni meteo. (vedi figura 1)

### Caratteristiche stazione meteo PS

Stazione meteo installata nell'isola di Pianosa, ad est del porto (Lon  $10^{\circ} 05' 59.3''$  E, Lat  $42^{\circ} 35' 13.3''$  N; quota stazione s.l.m. 29 m). Grandezze atmosferiche misurate a circa 2.5 m dal suolo: temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare globale, velocità del vento, direzione del vento, pioggia. Dati registrati: medie orarie. Periodo di acquisizione dei dati: 2002-2008.



### Caratteristiche torre Eddy-covariance

Torre alta 12 metri installata nell'isola di Pianosa in cima alla quale sono stati collocati un anemometro sonico tridimensionale (mod. USA-1, Metek) e un analizzatore di  $CO_2$  a cammino aperto (mod LI-7500, LI-COR) che attraverso la tecnica di eddy-correlation permettono la stima diretta dei flussi di calore, acqua e anidride carbonica. I dati con

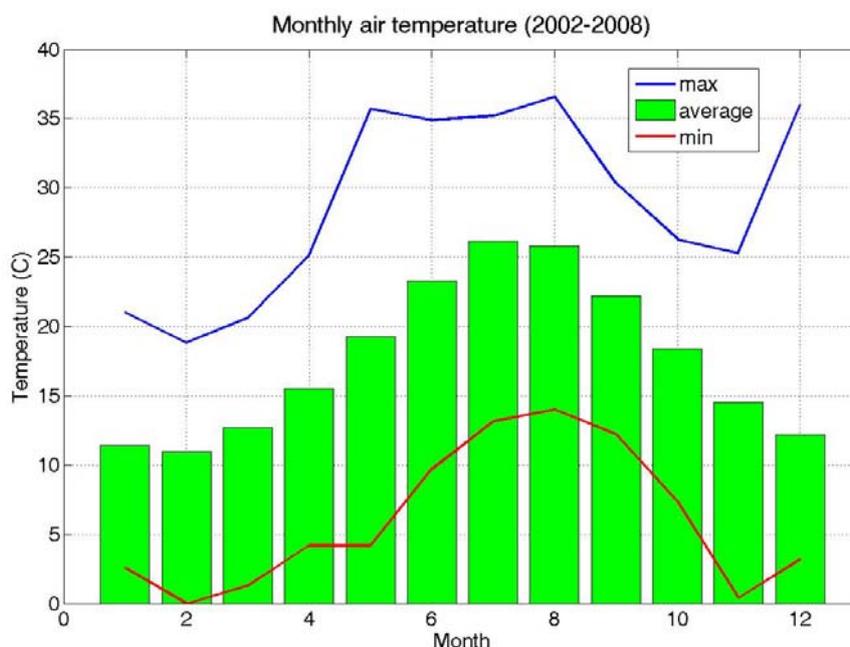


frequenza di campionamento di 20 Hz vengono acquisiti da un PC. Al fine dello studio del bilancio energetico superficiale sono stati installati anche 2 radiometri netti (Q-7, REBS) e un radiometro globale (Kipp and Zonen) a circa 12 m di altezza e nel terreno due piastre di flusso a 5 cm di profondità, varie termocoppie a diverse profondità e due TDR probe (Delta-T) per la misura dell'umidità del terreno. Questi dati vengono acquisiti direttamente attraverso un data logger (CR-7, Campbell) con medie effettuate sulla mezz'ora. Questa torre è stata attiva fino al 2006, successivamente è stata sostituita con una torre simile alta 8 metri.

Utilizzando i dati della stazione PS misurati nel periodo 2002-2008 vengono forniti di seguito i grafici ed i relativi valori medi mensili.

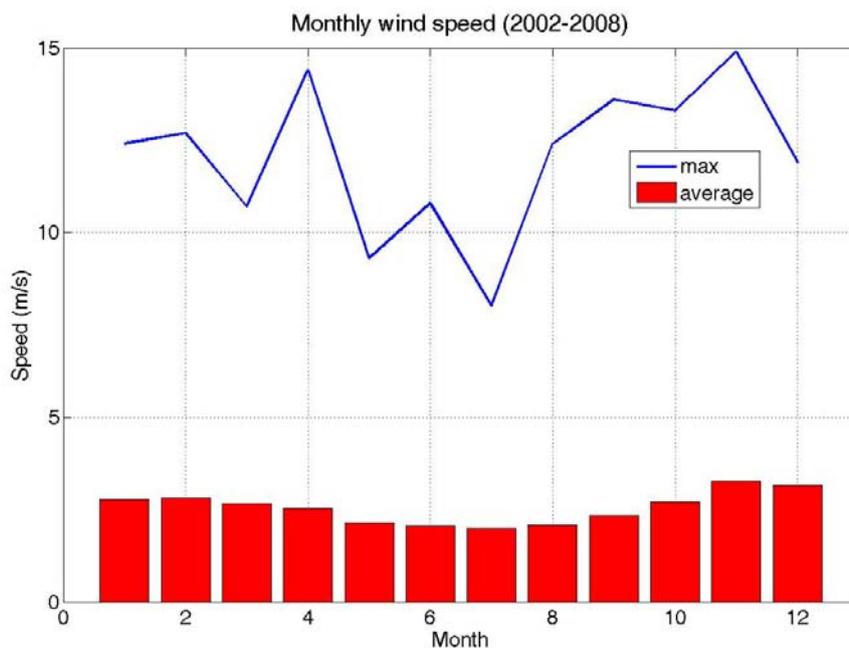
## Temperatura

Temperature medie mensili mediate sul periodo 2002-2008, temperature massime e minime mensili calcolate sul periodo 2002-2008.

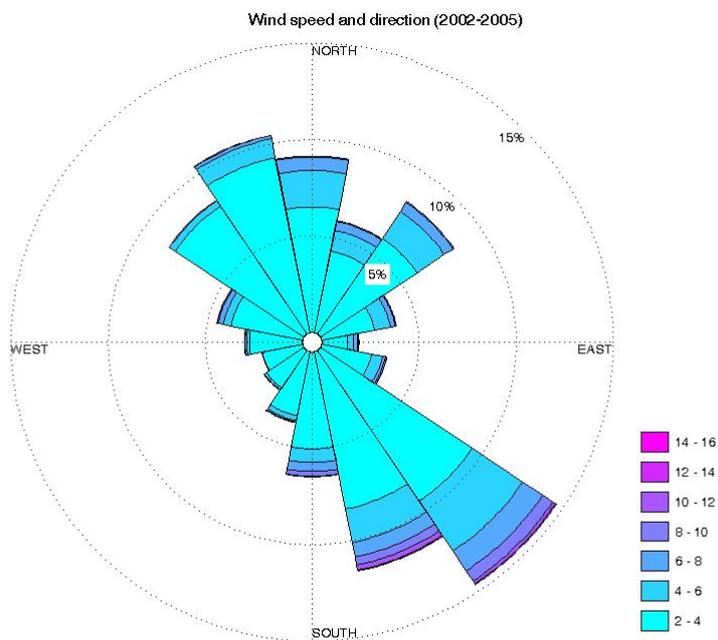


## Vento

Velocità medie mensili del vento mediate sul periodo 2002-2008 e velocità massime mensili del vento calcolate sul periodo 2002-2008.

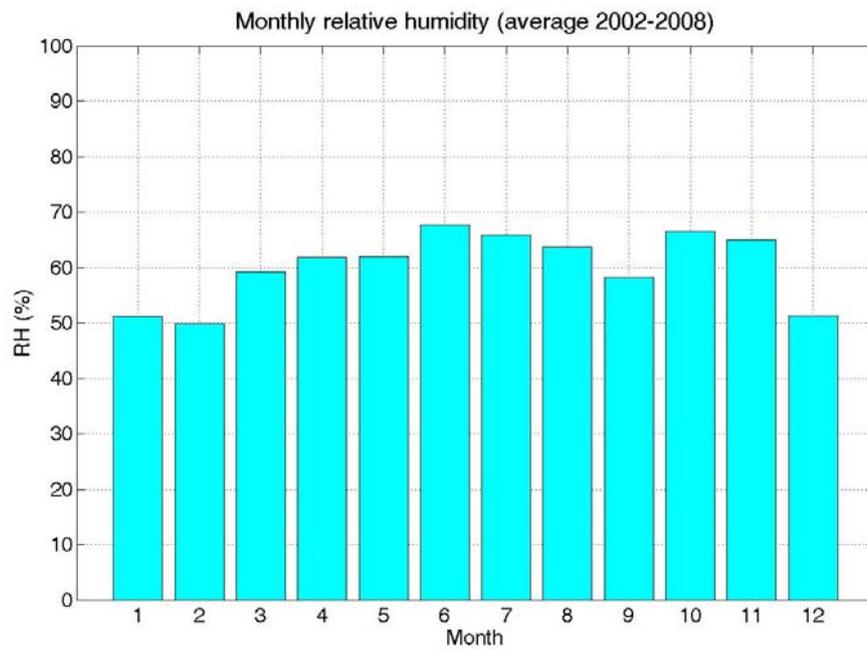


Istogramma polare della direzione e della velocità del vento calcolato sul periodo 2002-2005.



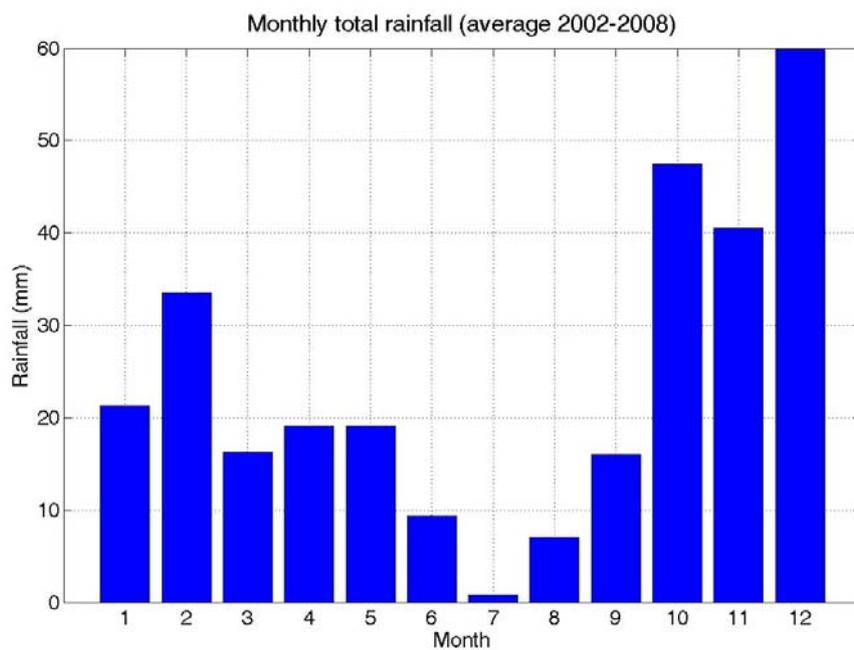
### Umidità relativa

Umidità relativa media mensile mediate sul periodo 2002-2008.



## ***Precipitazioni***

Precipitazioni mensili mediate sul periodo 2002-2008.



## ***Alcuni dati meteorologici estremi***

Analizzando i dati del periodo 2006 – 2007 si possono estrarre i seguenti dati “estremi”:

Temp. Max assoluta → 37.7 °C Luglio 2006

Temp. min assoluta → 3.4 °C Dicembre 2007

Escursione massima oraria → 6.3 °C rilevata sia il 15 Luglio che il 2 Agosto '06

Escursione massima giornaliera → 13 Agosto '06 con 12.0 °C

I dati completi di questo giorno sono:

data	media	max	min	esc. Max g
130806	22.8	27.9	15.9	12.0

### **Procedura per il calcolo del Gust Factor**

Il gust factor  $G_T(z)$  viene definito come il rapporto tra la massima raffica di vento calcolata in un intervallo di tempo  $T$  e la velocità media del vento calcolata nello stesso periodo di tempo ad una altezza dal suolo uguale a  $z$ ; si ha cioè

$$G_T(z) = \hat{U}_T(z) / \bar{U}_T(z).$$

Diversi sono gli elementi che entrano in gioco nel calcolo effettuato, quindi prima di dare la formula finale del gust factor introduciamo le diverse componenti in gioco.

#### **Riferimenti**

Engineering Sciences Data Unit (ESDU), 1983. *Strong winds in the atmospheric boundary layer, Part 2: Discrete gust speed*, Item No. 83045, London.

EN 1991-1-4, 2004. *Eurocode 1: Actions on Structures - General Actions - Part 1-4: Wind actions*.

#### **Vento: Velocità media e raffica**

Nel calcolo del fattore di carico delle strutture derivante dal vento, vengono usati diversi standard. In particolare il periodo medio usato per il calcolo sia della velocità media che della raffica non è definito in modo univoco.

Tuttavia nella maggior parte dei casi si utilizza la velocità media del vento in un periodo di 10 minuti, misurata in terreno aperto e ad una altezza di 10 metri dal suolo. Mentre per la raffica si utilizza un periodo di 3 secondi.

Bisogna considerare inoltre che nella maggior parte delle analisi e misure di dati meteorologici si considerano dati orari.

Per convertire i valori misurati nei diversi standard adottati vengono prese in considerazione diverse formule teoriche e coefficienti empirici.

Formule e coefficienti che dipendono dal modello di turbolenza che viene scelto per descrivere il vento e che possono dare risultati leggermente diversi.

#### **Profilo verticale del vento (velocità media)**

La variazione della velocità media del vento relativamente all'altezza rispetto al suolo, in prossimità della superficie e quindi nei primi 100-200 metri di altezza dal suolo, viene descritta da una legge logaritmica.

Una approssimazione, abbastanza accurata, di questa legge, è data da:

$$\bar{U}_T(z) = (u_* / k) \cdot \log(z/z_0) \quad (1)$$

- $\bar{U}_T(z)$  è la media della velocità del vento ad una altezza  $z$  calcolata in un intervallo di tempo  $T$
- $u_*$  è la friction velocity
- $k$  è la costante di von Karman (circa 0.4)
- $z_0$  è la rugosità del terreno (un valore tipico di rugosità di terreno aperto con qualche albero è 0.05)

Questa equazione può essere usata per mettere in relazione la velocità del vento a diverse altezze, nel seguente modo:

$$\bar{U}_T(z_2) = [ \log(z_2/z_0) / \log(z_1/z_0) ] \cdot \bar{U}_T(z_1) \quad (2)$$

### Profilo verticale della raffica

Modelli statistici che descrivono le turbolenze forniscono la seguente relazione tra la raffica e la velocità media del vento calcolata con lo stesso periodo di tempo T ( ad esempio considerando T=10 min o T=1h)

$$\hat{U}_T(z) = \bar{U}_T(z) + g_T \cdot \sigma = \bar{U}_T(z) \cdot [1 + g_T \cdot \sigma / \bar{U}_T(z)] \quad (3)$$

Dove:

- $\hat{U}_T(z)$  è la raffica di vento ad una altezza z calcolata in un intervallo di tempo T
- $\bar{U}_T(z)$  è la media della velocità del vento ad una altezza z calcolata in un intervallo di tempo T
- $g_T$  viene chiamato peak factor e dipende solo in piccola parte dall'altezza
- $\sigma$  è la deviazione standard della velocità del vento

La deviazione standard  $\sigma$  non dipende dalla elevazione con buona approssimazione ed è uguale a  $2.5 u^*$ . Quindi usando le equazioni (1), (2), e (3) si può scrivere:

$$\begin{aligned} \hat{U}_T(z_2) &= [ \log(z_2/z_0) / \log(z_1/z_0) ] \cdot [1 + g_T / \log(z_2/z_0)] / [1 + g_T / \log(z_1/z_0)] \cdot \hat{U}_T(z_1) = \\ &= [ (g_T + \log(z_2/z_0)) / (g_T + \log(z_1/z_0)) ] \cdot \hat{U}_T(z_1) \end{aligned} \quad (4)$$

Il peak factor  $g_T$  dipende dal modello usato e valori tipici per T = 1 h e un valore di raffica calcolato sui 3 secondi rientrano nell'intervallo 3.0 [ESDU, 1983] – 3.5 [Eurocode 1, 2004].

### Fattore di raffica

Il fattore di raffica  $G_T(z)$ , come introdotto inizialmente, viene definito come il rapporto tra la massima raffica di vento calcolata in un intervallo di tempo T e la velocità media del vento calcolata nello stesso periodo di tempo ad una altezza dal suolo uguale a z; si ha cioè

$$G_T(z) = \hat{U}_T(z) / \bar{U}_T(z)$$

Nella maggior parte dei casi si usa un fattore di raffica calcolato per T = 10 min ed una altezza z = 10 m, ottenendo quindi:

$$G_{10\min}(10m) = \hat{U}_{10\min}(10m) / \bar{U}_{10\min}(10m)$$

Nel caso si conoscano o si abbiano misure della raffica e del valore medio della velocità del vento su base oraria, è ancora possibile ottenere il fattore di raffica sui 10 minuti dividendolo per la costante 1.055, i.e.

$$G_{10\min}(10m) = G_{1h}(10m) / 1.055. \quad (5)$$

### Dati meteorologici della stazione di Pianosa usati per il calcolo del Gust Factor

Per il calcolo del Gust Factor sono stati usati i dati di due anni, 2006 e 2007, della stazione meteorologica indicata in precedenza con EDDY.

I dati misurati sono dati orari e la raffica oraria misurata sui 3 secondi.

L'anemometro è posizionato a circa 2.5 metri dal suolo.

Quindi la procedura di calcolo usata è la seguente:

1. I dati di velocità del vento sono stati "riportati" a 10 m usando la formula (2) e la formula (4)

2. Il GF è stato calcolato usando  $G_{1h}(10m)$  e poi convertito al  $G_{10min}(10m)$  mediante l'equazione (5)

#### Valori di GF calcolati

GF globale (ws > 0.2 m/s)	
<b>10 minuti</b>	<b>1 h</b>
<b>1.59</b>	<b>1.63</b>

GF globale ((ws > 5.4 m/s o > B3 ))	
<b>10 minuti</b>	<b>1 h</b>
<b>1.22</b>	<b>1.27</b>

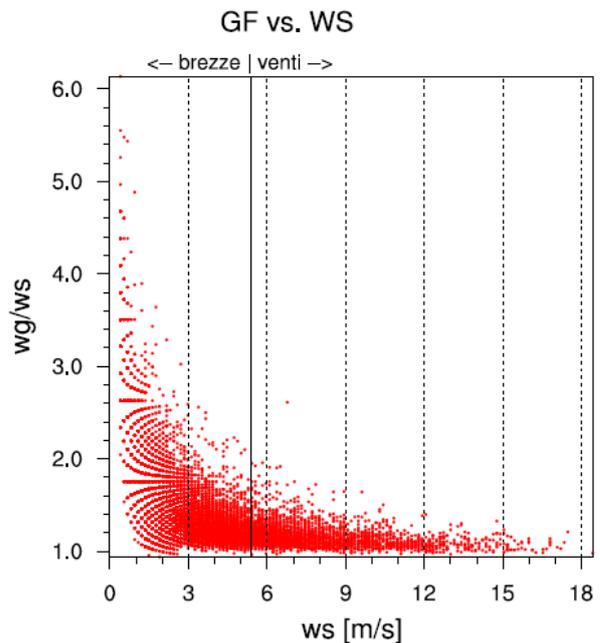
ws = wind speed ; B3 = Grado Beaufort 3 (brezza tesa o velocità > 5.4 m/s)

Vengono fornite queste due tabelle per evidenziare una ulteriore considerazione che viene fatta in letteratura nel calcolo del Gust Factor.

Se si grafica l'andamento del rapporto Raffica/velocità media del vento si ha il seguente grafico scatter plot mostrato a lato.

Questo grafico evidenzia come per venti deboli o meglio definiti brezze, si hanno dei fattori di raffica grandi. Questo è giustificabile con una maggiore influenza del fenomeno di convezione termica in assenza di vento.

Riteniamo quindi che nella definizione di strutture il GF che meglio descrive il regime di vento di Pianosa sia quello relativo al calcolo che escluda le brezze.

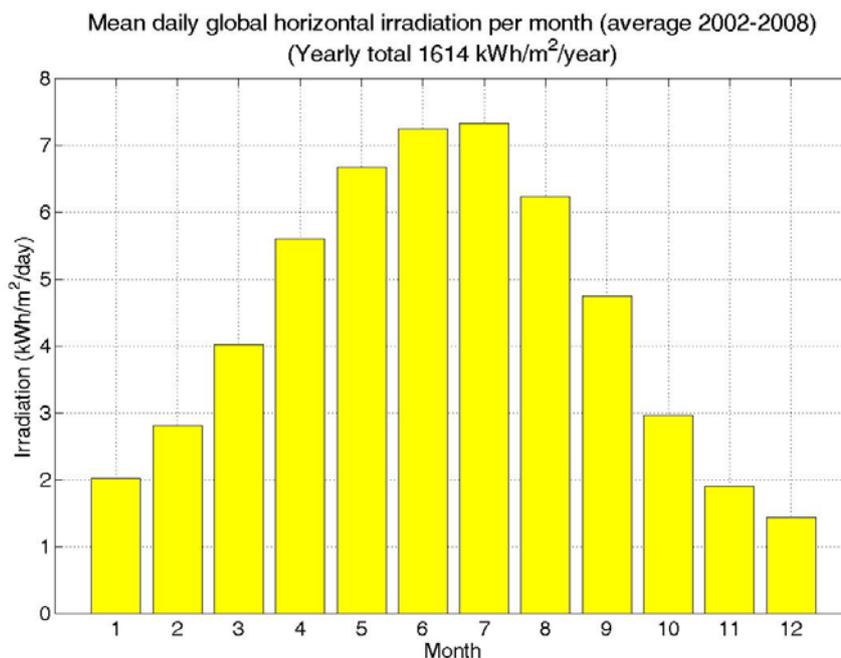


## Radiazione solare

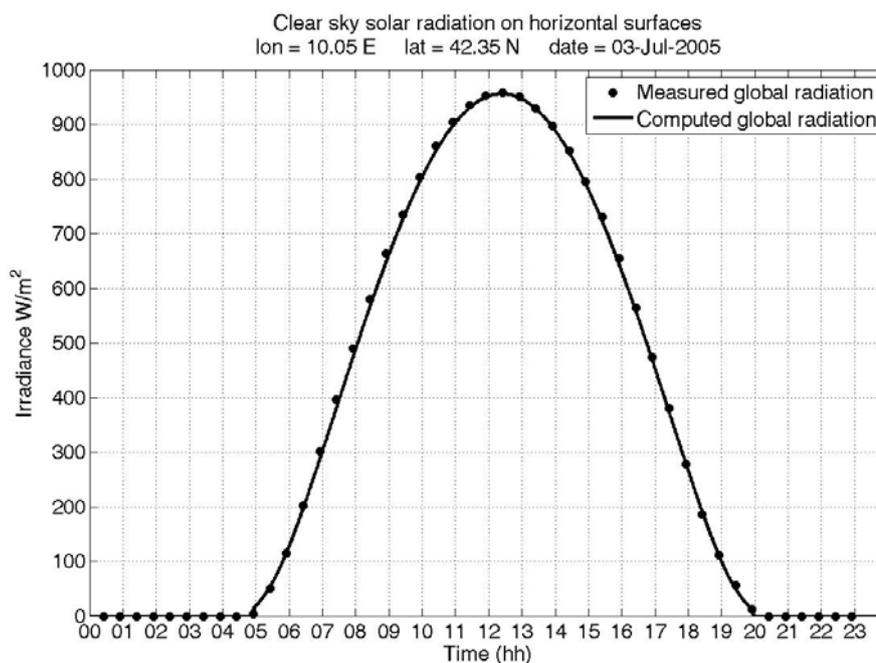
Per il calcolo della radiazione solare vengono usati i dati della stazione di misura EDDY .

### Radiazione solare globale

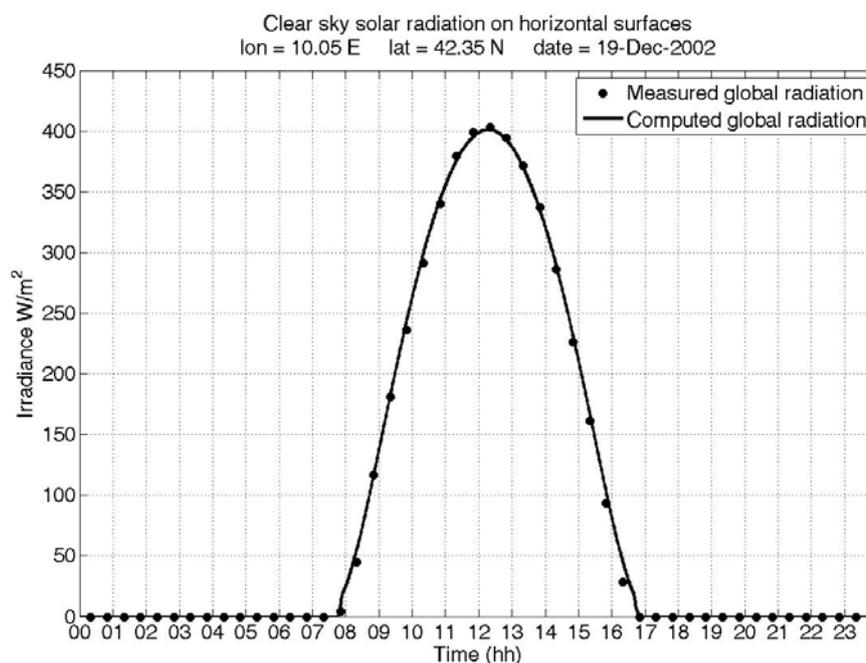
Insolazione media giornaliera ed annuale calcolata sul periodo 2002-2008.



Irraggiamento tipico di Pianosa in luglio con cielo chiaro e su piano orizzontale. I dati sperimentali sono confrontati con un modello teorico (il fattore di Linke è stato utilizzato come parametro di fit).

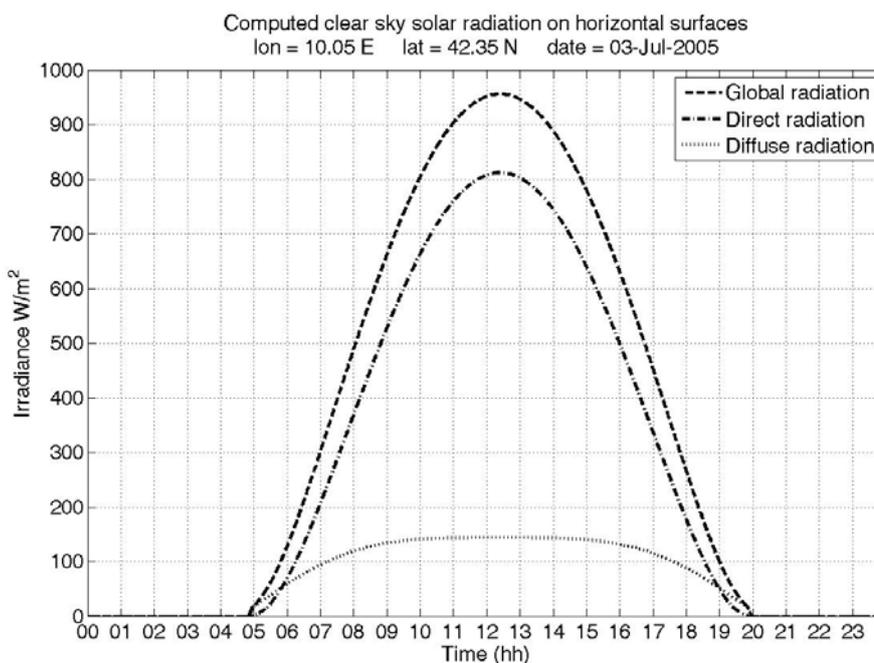


Irraggiamento tipico di Pianosa in dicembre con cielo chiaro e su piano orizzontale. I dati sperimentali sono confrontati con un modello teorico (il fattore di Linke è stato utilizzato come parametro di fit).

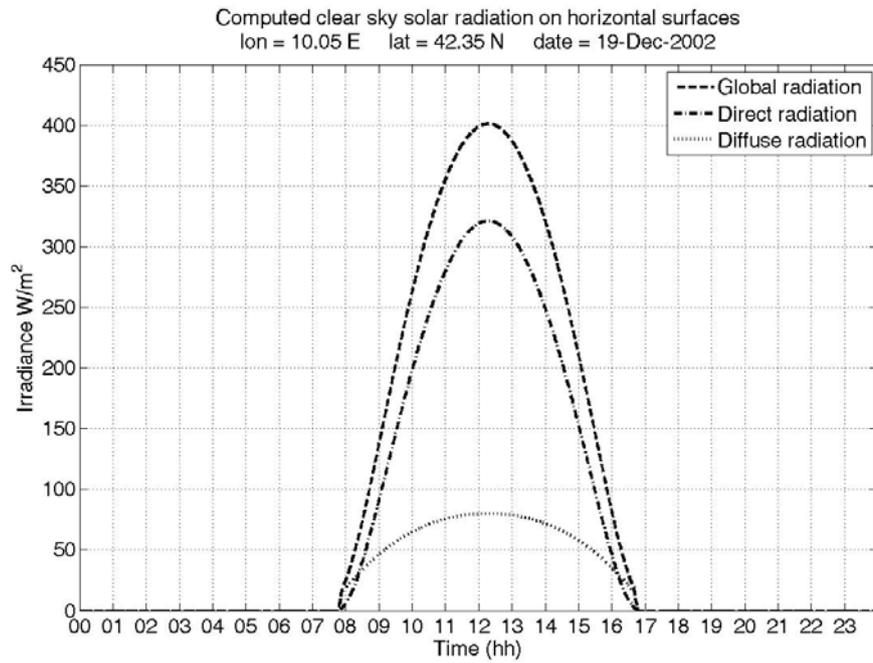


## Radiazione solare diretta

Ripartizione della radiazione globale di Pianosa in luglio nelle componenti diretta e diffusa tramite lo stesso modello utilizzato per il confronto con i dati sperimentali (ESRA model).



Ripartizione della radiazione globale di Pianosa in dicembre nelle componenti diretta e diffusa tramite lo stesso modello utilizzato per il confronto con i dati sperimentali (ESRA model).



## Appendice A

Dati numerici di Radiazione solare

Year	Month	Day	Hour	Minute	Global pyran, (W/m <sup>2</sup> )	Global model (W/m <sup>2</sup> )	Direct model (W/m <sup>2</sup> )	Diffuse model (W/m <sup>2</sup> )
2002	12	18	23	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	0	20	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	0	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	1	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	1	50	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	2	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	2	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	3	20	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	3	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	4	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	4	50	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	5	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	5	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	6	20	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	6	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	7	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	7	50	4,275	8,503	1,184	7,319
2002	12	19	8	19	45,110	54,900	25,882	29,018
2002	12	19	8	49	116,700	115,240	72,850	42,390
2002	12	19	9	20	181,100	180,898	127,412	53,486
2002	12	19	9	49	236,200	243,484	181,115	62,369
2002	12	19	10	19	291,300	298,560	229,341	69,219
2002	12	19	10	50	339,900	343,353	269,109	74,244
2002	12	19	11	19	379,200	376,042	298,407	77,635
2002	12	19	11	49	398,800	395,471	315,923	79,548
2002	12	19	12	20	402,900	401,006	320,926	80,079
2002	12	19	12	49	394,500	392,472	313,214	79,258
2002	12	19	13	19	371,800	370,139	293,100	77,039
2002	12	19	13	50	337,200	334,745	261,431	73,314
2002	12	19	14	19	285,900	287,574	219,658	67,916
2002	12	19	14	49	226,100	230,617	169,969	60,648
2002	12	19	15	20	161,000	166,919	115,614	51,305
2002	12	19	15	49	93,400	101,470	61,750	39,720
2002	12	19	16	19	28,730	44,151	18,263	25,888
2002	12	19	16	50	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	17	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	17	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	18	20	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	18	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	19	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	19	50	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	20	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	20	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	21	20	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	21	49	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	22	19	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	22	50	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	12	19	23	19	0,000	0,000	0,000	0,000

Year	Month	Day	Hour	Minute	Global pyran, (W/m2)	Global model (W/m2)	Direct model (W/m2)	Diffuse model (W/m2)
2005	7	2	23	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	2	23	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	0	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	0	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	1	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	1	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	2	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	2	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	3	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	3	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	4	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	4	55	3,364	11,072	0,744	10,328
2005	7	3	5	25	50,960	52,690	17,676	35,014
2005	7	3	5	55	113,900	116,296	60,579	55,717
2005	7	3	6	25	202,900	196,464	121,785	74,679
2005	7	3	6	55	301,900	285,821	194,441	91,380
2005	7	3	7	25	396,200	379,319	273,759	105,560
2005	7	3	7	55	490,500	473,030	355,893	117,137
2005	7	3	8	25	580,800	563,766	437,579	126,187
2005	7	3	8	55	663,400	648,917	516,005	132,912
2005	7	3	9	25	735,000	726,358	588,744	137,615
2005	7	3	9	55	804,000	794,377	653,714	140,663
2005	7	3	10	25	860,000	851,620	709,167	142,452
2005	7	3	10	55	905,000	897,042	753,673	143,369
2005	7	3	11	25	935,000	929,876	786,122	143,754
2005	7	3	11	55	952,000	949,596	805,724	143,873
2005	7	3	12	25	959,000	955,898	812,006	143,893
2005	7	3	12	55	951,000	948,687	804,818	143,869
2005	7	3	13	25	929,000	928,070	784,331	143,739
2005	7	3	13	55	897,000	894,364	751,037	143,327
2005	7	3	14	25	852,000	848,109	705,746	142,363
2005	7	3	14	55	795,000	790,091	649,591	140,500
2005	7	3	15	25	730,000	721,370	584,019	137,351
2005	7	3	15	55	654,900	643,324	510,803	132,520
2005	7	3	16	25	563,700	557,690	432,047	125,643
2005	7	3	16	55	473,700	466,625	350,204	116,421
2005	7	3	17	25	380,700	372,775	268,116	104,658
2005	7	3	17	55	278,800	279,376	189,086	90,290
2005	7	3	18	25	186,200	190,425	117,017	73,408
2005	7	3	18	55	111,800	111,087	56,801	54,286
2005	7	3	19	25	56,290	49,008	15,537	33,470
2005	7	3	19	55	12,440	5,904	0,396	5,508
2005	7	3	20	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	20	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	21	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	21	55	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	22	25	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	7	3	22	55	0,000	0,000	0,000	0,000