

La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare

Francesco Spinelli,
Euro Giovanni Cogliani,
Augusto Maccari, Mauro Milone

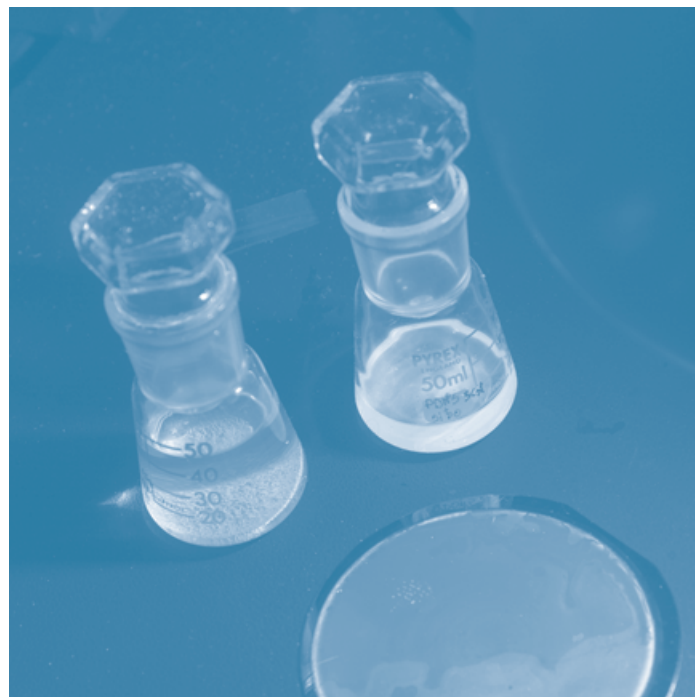
ENEA, Dipartimento Tecnologie per l'Energia,
le Fonti Rinnovabili e il Risparmio Energetico

Web e Internet, satelliti meteorologici, strumenti di misura a terra: tecnologie differenti per misurare e stimare in maniera sempre più accurata la radiazione solare che giunge al suolo.

L'ENEA ha creato un archivio dati e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare, che può rappresentare un valido aiuto per i tecnici che devono localizzare e progettare impianti di produzione di energia da fonte solare

Measurement and estimation of solar radiation

The Web and the Internet, weather satellites and ground instruments: using multiple technologies, the solar radiation that reaches the earth can be measured and estimated ever more accurately. ENEA has created a database and the website of the Italian Solar Radiation Atlas, a valid aid for engineers who need to site and design power plants that use solar energy



Prometeo scelse per gli uomini il dono più prezioso – il fuoco – e salì in cielo con una torcia per prenderlo dal Sole: i mitologi greci fanno compiere gesta titaniche ai loro eroi, ma in questo caso l'impresa poteva essere evitata. Il fuoco del Sole giunge regolarmente sulla Terra sotto forma di raggi (elettromagnetici) e l'uomo del Duemila deve applicarsi a compiti diversi ma non meno impegnativi: misurare la radiazione solare, scoprirne natura e fenomenologia, inventare tecnologie per utilizzarla.

La radiazione solare è la fonte principale del "sistema energetico" della Terra (l'altra è costituita dal calore prodotto per decadimento radioattivo all'interno del pianeta) e dunque è alla base di tutti i cicli naturali e le manifestazioni della vita, comprese le molteplici attività antropiche. La conoscenza di come la radiazione viene intercettata – assorbita o deviata – dallo strato atmosferico che avvolge la Terra, della frazione di essa che invece riesce a raggiungere direttamente il suolo e, infine, di quella che vi arriva da tutte le direzioni dopo aver subito uno o più urti con le molecole



dell'atmosfera, sono presupposti sia alla comprensione dei fenomeni naturali legati al clima e alla meteorologia, sia – più utilmente – alla localizzazione e progettazione degli impianti che sfruttano l'energia solare: infatti il ricorso a nuove forme di energie rinnovabili, fra cui quella solare, diventerà in futuro sempre più necessario se si vuol garantire all'umanità disponibilità energetiche adeguate e contemporaneamente scongiurare gli effetti dannosi per l'ambiente conseguenti all'uso su vasta scala dei combustibili fossili.

In ENEA l'attività di raccolta, archiviazione e pubblicazione dei dati di radiazione è iniziata sin dagli anni Novanta del secolo scorso. I metodi di acquisizione adottati sono due: il primo consiste nello stimare il dato radiativo a partire da immagini satellitari di copertura nuvolosa, il secondo nella installazione di centraline di misurazione (acquisizione) a terra, essenzialmente in siti individuati dall'ENEA perché suscettibili di ospitare gli impianti previsti nel suo *Programma Solare Termodinamico*. Sia le stime che le misure di radiazione sono confluite in un consistente archivio utilizzato per studi di caratterizzazione regionale del clima e per calcoli in cui i dati di radiazione sono di input (dimensionamento di impianti ecc.). Recentemente, al precedente lavoro di pubblicazione dei dati (su supporto cartaceo [5], ma anche attraverso il sito Internet dell'*Archivio Climatico ENEA-DBT* [1]) è stato aggiunto un nuovo strumento: la creazione del sito Internet *SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare* [2]. Attualmente il nuovo sito offre due servizi: il calcolo della radiazione al suolo per qualunque località, non solo sul piano orizzontale, ma anche per superfici comunque orientate (si pensi alle facciate vetrate degli edifici, ma anche agli impianti in cui la su-

perficie captante è orientata per massimizzare l'energia raccolta o si muove continuamente per 'inseguire' i raggi del Sole durante il suo percorso diurno), e la stima della quantità di radiazione "attesa" al suolo nel giorno corrente e in quelli successivi, sulla base delle previsioni meteo; mentre nella versione definitiva conterrà anche una sezione archivio (data-base sulla radiazione solare costituito da mappe e serie storiche di misure prodotte dall'ENEA). In questo articolo è data una breve rassegna dell'attività condotta sinora e vengono descritti i prodotti (archivi, programmi di calcolo) messi a disposizione della comunità scientifica e dei tecnici, gli strumenti (tecnologie, siti Internet) approntati allo scopo e infine le modalità con cui tali prodotti e strumenti possono essere fruiti e utilizzati.

La radiazione solare

Come conseguenza delle reazioni nucleari che avvengono al suo interno, il Sole irradia isotropicamente nello spazio una radiazione elettromagnetica il cui spettro in lunghezza d'onda corrisponde a quella dell'emissione di un corpo nero avente temperatura esterna pari a 5780 K (gradi Kelvin). La potenza irradiata è enorme, stimabile in poco meno di $4 \cdot 10^{26}$ W (watt); quella che attraversa una data superficie – per comodità pensiamo momentaneamente ad un pannello piano posizionato al di fuori dell'atmosfera terrestre – dipende dalla sua dimensione (area), dalla distanza dall'astro e infine dall'orientazione rispetto a quest'ultimo. Per una superficie posta alla distanza media Sole-Terra, perpendicolarmente alla direzione di propagazione dei raggi, si ha: $I_{sc} = 1366.9 \text{ W/m}^2$ (vedi nota¹).

¹ Tecnicamente la potenza radiante che incide sull'unità di superficie si chiama *irradianza* ed è esprimibile in W/m^2 . La definizione non richiede che la superficie 'investita' dall'energia trasportata dai raggi sia disposta perpendicolarmente a questi ma, ovviamente, quando ciò accade l'irradianza è massima a parità di tutte le altre condizioni. Nel testo si userà anche *irraggiamento* come sinonimo di irradianza.





La quantità I_{sc} è detta *costante solare*; per farsi un'idea della sua entità si consideri che una superficie di estensione pari a circa 60 km² (vedi nota²) riceve l'intera potenza elettrica installata in Italia, che ammonta a poco più di 80.000 MW.

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

a) nell'attraversare l'atmosfera una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (*scattering*) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapor acqueo, le nubi e gli aerosol). La *radiazione solare diretta*, ossia quella costituita dai soli raggi che attraversano lo spessore atmosferico senza essere perturbati, arriva al suolo da una

direzione che, essendo determinata dalla posizione del Sole nella volta celeste, cambia continuamente durante l'intervallo diurno;

b) la frazione della radiazione solare che invece urta le molecole dell'atmosfera, se non assorbita, è deviata in tutte le direzioni: parte si allontana verso lo spazio e parte raggiunge il suolo in un secondo momento. Quest'ultima è detta *radiazione solare diffusa* e, ovviamente, proviene da tutte le direzioni dell'emisfero celeste.

La radiazione solare *globale* che investe una superficie disposta orizzontalmente è data dalla somma delle componenti diretta e diffusa; se invece è inclinata, alle prime due si aggiunge una terza componente rappresentata dalla *radiazione solare riflessa* dal suolo. Per stimarne l'entità, occorre tener conto del fatto che dal punto di vista della riflessività i 'tipi di suolo' si comportano in maniera differente l'uno dall'altro: ad esempio, riflettono di meno le superfici d'acqua, gli asfalti stradali e i boschi

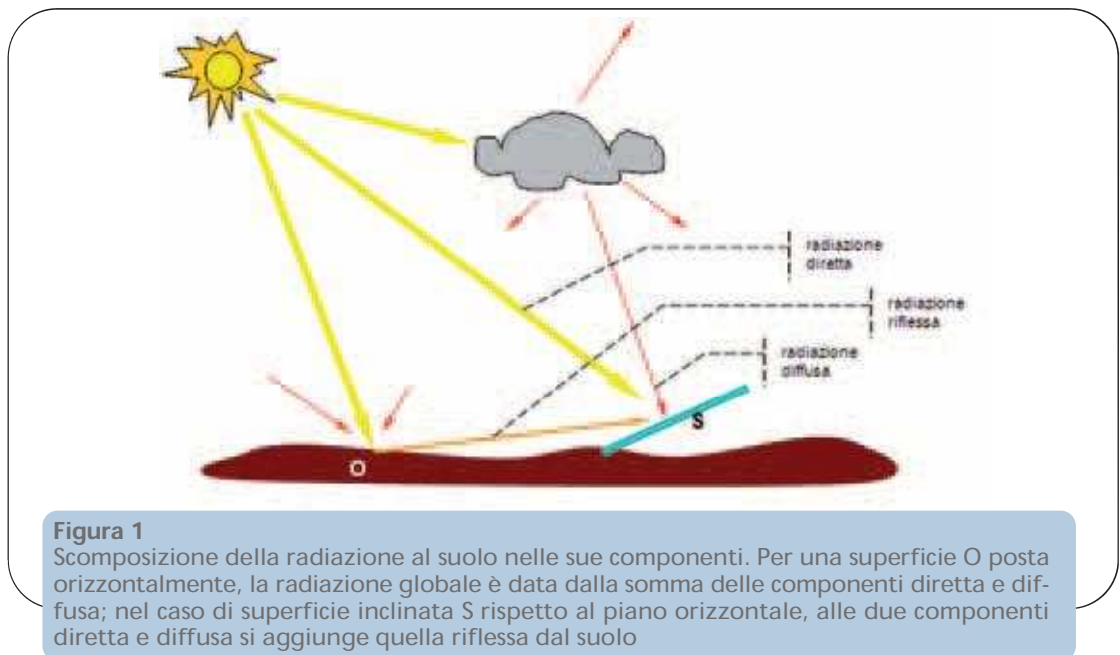


Figura 1
Scomposizione della radiazione al suolo nelle sue componenti. Per una superficie O posta orizzontalmente, la radiazione globale è data dalla somma delle componenti diretta e diffusa; nel caso di superficie inclinata S rispetto al piano orizzontale, alle due componenti diretta e diffusa si aggiunge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

² Ossia un quadrato di 7,7 km di lato, meno di un cinquemillesimo dell'intero territorio italiano.



di conifere in inverno (meno del dieci per cento della radiazione che ricevono), molto di più i manti nevosi e le superfici chiare degli edifici (più del sessanta per cento). Il contributo della radiazione riflessa è comunque molto più piccolo rispetto agli altri due. Ai fini pratici e progettuali, hanno interesse altre grandezze derivate da quelle appena descritte, in particolare le quantità di energia ricevuta in intervalli prestabiliti di tempo: radiazione *oraria*, *giornaliera*, *mensile*, *giornaliera media mensile*, *annua*, medie su più anni³. Inoltre per certe applicazioni, come gli impianti solari a concentrazione, un'altra grandezza di estremo interesse è il *profilo giornaliero* (ora per ora) della radiazione diretta. Le prestazioni di tali impianti, che utilizzano il solo irraggiamento diretto, sono infatti influenzate non solo dal valore cumulativo dell'energia incidente sul piano di raccolta, ma anche dalla distribuzione delle intensità, ed anche il dimensionamento dei sistemi di accumulo, necessario per compensare i momenti di disallineamento fra periodi di disponibilità e domanda di energia, è funzione del profilo orario di irraggiamento. Affinché le stime siano corrette, il profilo deve essere realistico e deve essere calcolato per tutti i giorni dell'anno, in modo che si tenga conto della variabilità atmosferica dovuta ai fenomeni nuvolosi che possono accentuare l'attenuazione della radiazione diretta.

La stima della radiazione solare mediante le immagini satellitari

L'Italia, come la quasi totalità delle nazioni, soffre della carenza di mappe dettagliate di radiazione solare, carenza che diventa ancora più grave se si considera in particolare la componente diretta. Per ovviare a ciò,

in ENEA la costruzione di mappe della radiazione solare è stata promossa a partire dai primi anni Novanta. L'attività è stata favorita dalla disponibilità crescente delle immagini ottenute dai satelliti meteorologici, le quali sono alla base dei modelli di stima della radiazione solare.

I metodi adottati in ENEA si fondano sul trattamento delle immagini satellitari di *copertura nuvolosa*, simili a quelle utilizzate per le previsioni meteorologiche. Tali immagini mostrano la superficie del pianeta così come è vista dal satellite al momento della loro "cattura" e corrispondono a matrici numeriche i cui elementi (pixel) contengono un intero compreso nel *range* 0–255. Più precisamente, i sensori del satellite – puntato verso il pianeta – registrano punto per punto (pixel per pixel) l'intensità del raggio solare che viene riflesso dal pianeta 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 (con quest'ultima affermazione si sta trascurando, in realtà, l'influenza dello strato atmosferico "sereno" attraversato dai raggi nei due percorsi diretto e riflesso). Nella restituzione grafica (su schermo o a stampa), in cui i valori da 0 a 255 sono resi mediante una scala di grigi, i valori più bassi, rappresentati con grigi tendenti al nero, corrispondono all'assenza di nubi, mentre i valori all'altro estremo della scala, contrassegnati da un grigio tendente al bianco, corrispondono alla presenza di nubi, tanto più spesse o numerose quanto più elevati sono i valori stessi (figura 2, immagine di sinistra). Gli algoritmi messi a punto in ENEA, basati su opportuni modelli di comportamen-

³ *Radiazione oraria* è espressione consolidata per la quantità di energia radiante (solare) che incide sull'unità di superficie in un'ora (altri preferiscono: *esposizione radiante oraria*); per definizione, è uguale all'integrale dell'irradianza sull'intervallo di un'ora. Lo stesso vale per le radiazioni giornaliera, annua ecc. Tutte queste quantità sono dimensionalmente equivalenti ad un'energia su superficie e pertanto si esprimono indifferentemente in megajoule al metro quadrato (MJ/m²) o chilowattora al metro quadrato (kWh/m²). 1 kWh/m² vale 3,6 MJ/m².

to dell'atmosfera, consentono di dedurre il dato di radiazione a partire da quello della copertura nuvolosa. Applicando tale procedura a ciascun pixel dell'immagine satellitare, si otterrà una nuova mappa di pari dimensioni (righe x colonne) che rappresenterà la grandezza calcolata (*stimata*), ossia la radiazione globale o diretta, riferita all'intervallo orario o un altro di durata differente. Per quanto riguarda i modelli per ricavare il dato di radiazione da quello di copertura nuvolosa, in ENEA ne sono disponibili due, *Heliosat* e il più recente *Solarmet*, entrambi descritti nel seguito con più dettaglio.

A partire da un congruo numero di mappe di radiazione oraria (calcolata indifferentemente con uno o l'altro dei due modelli), sarà possibile ricostruire l'intero profilo giornaliero della radiazione giunta al suolo e quindi stimare la radiazione (globale o diretta) per l'intero giorno, così pure derivare tutte le altre grandezze di interesse: la radiazione globale mensile o, dividendo per il numero di giorni, quella globale giornaliera media mensile, la radiazione annua e, con i dati disponibili per più anni, le mappe di radiazioni *anni-tipo*, *mesi-tipo* ecc., oppure i profili annuali medi (giorno x giorno) utili per caratterizzare una data località o l'intero territo-

rio rappresentato in mappa. Infine, ricorrendo alle leggi statistiche attestate in letteratura, si risale alle singole componenti della radiazione al suolo su piano orizzontale (ossia diffusa e diretta, se quest'ultima non è già fornita dall'algoritmo) e, sulla base di considerazioni geometriche, si possono riportare i valori su superfici comunque inclinate e orientate.

Affinché possano essere utilizzate per i calcoli e non solo per la visualizzazione grafica, la quale permette solo valutazioni per lo più qualitative, è essenziale che le mappe siano *georeferenziate*, ovvero si conosca il legame biunivoco fra coordinate geografiche di una generica località e posizione (riga e colonna) del pixel corrispondente in mappa⁴. È intuibile il vantaggio della disponibilità di mappe rispetto alle misurazioni a terra: per motivi pratici queste ultime possono effettuarsi in un numero necessariamente limitato di stazioni mentre le prime – se correttamente georeferenziate – permettono di estrarne i dati virtualmente per qualunque località della superficie terrestre rappresentata.

Il modello 'Heliosat'.

L'archivio storico 1994-99

Il modello di calcolo adottato, denominato *Heliosat*, è stato sviluppato in Francia

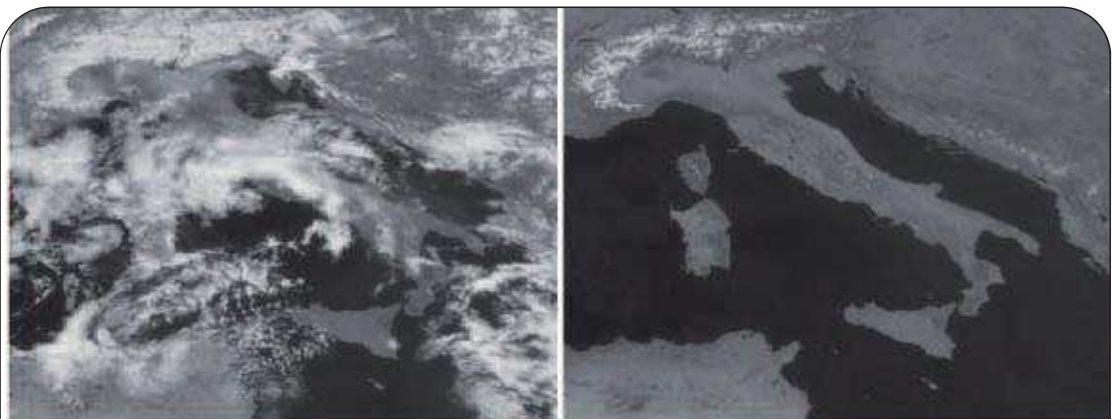


Figura 2

Immagine satellitare di copertura nuvolosa e mappa dell'albedo di riferimento (o del suolo). Le due immagini sono dello stesso periodo; 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



da Cano ed al. [3] e quindi adattato alla situazione italiana dall'ENEA [4] [5]. 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. In base a questa supposizione l'algoritmo richiede che venga calcolato 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 (*albedo di riferimento*, figura 2, immagine di destra); tale indice, correlato statisticamente con il *coefficiente di trasmissione* dei raggi solari attraverso l'atmosfera, permette di *stimare* la quantità di radiazione che giunge al suolo. Le misure a terra necessarie per calibrare i parametri della correlazione fra coefficiente di trasmissione e indice di copertura nuvolosa sono state fornite dall'Aeronautica Militare Italiana (dall'allora Servizio Meteorologico) e dal Ministero per le Politiche Agricole e Forestali, che gestisce la Rete Agrometeorologica Nazionale (RAN). La regressione ha riguardato più località, più momenti della giornata, più periodi dell'anno. Il sistema di calcolo ha utilizzato le immagini di copertura nuvolosa acquisite nello spettro visibile della radiazione elettromagnetica dal satellite *Meteosat* dell'*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT), con

sede a Darmstadt (Germania). La ricezione in tempo reale delle immagini trasmesse dall'ente europeo è stata resa possibile in ENEA attivando un apposito sistema di ricezione composto da un'antenna parabolica con convertitore di frequenza, un ricevitore VHF e un convertitore A/D. Il sistema di ricezione è stato attivato nel 1993 e dismesso a maggio del 2001. Il dettaglio spaziale delle informazioni contenute nelle immagini dipende dalla superficie rappresentata dal singolo pixel che, per le nostre latitudini, corrisponde a quadratini di circa 2,5 km di lato: in questo modo si ottiene una "mappatura" abbastanza dettagliata dell'Italia e informazioni per qualsivoglia località. Le immagini sono state ricevute con frequenza oraria e tutto il calcolo per la stima della radiazione globale oraria al suolo è stato fatto *on-line* fra due ricezioni consecutive. In questo modo è stato possibile archiviare anche l'immagine della radiazione giornaliera alla fine di ogni giorno e, per ogni mese, quella giornaliera media mensile.

L'archivio prodotto con il sistema Heliosat on-line è costituito dalle mappe [immagini] della *radiazione globale giornaliera media mensile su piano orizzontale*, dal 1994 al 1999 (72 mappe mensili). Dalle mappe georeferenziate sono stati estratti i dati mensili per 1614 località italiane selezionate in modo da includere tutti i Comuni italiani con più di 10.000 abitanti e comunque almeno uno, purché con popolazione maggiore di 5000 abitanti, in ogni porzione di territorio di 10x10 km². Sia le mappe sia le tabelle sono state pubblicate su supporto cartaceo [5] e sono anche liberamente 'scaricabili' collegandosi al sito Internet dell'*Archivio Climatico ENEA-DBT* [1].

I dati estratti dalle mappe archiviate sono

4 La georeferenziazione, ossia la legge di trasformazione delle coordinate, determina il modo in cui la superficie terrestre – che è curva e non è sviluppabile in piano – viene deformata per poterla rappresentare sulla superficie piana della carta geografica. Oltre alla *proiezione*, una legge di trasformazione definisce automaticamente anche la *scala della rappresentazione*.

stati utilizzati per studi e analisi geostatistiche, ad esempio nella caratterizzazione tipologica e regionale del clima italiano, e trovano anche applicazione nel settore civile, per la progettazione e dimensionamento degli edifici dal punto di vista termico e del risparmio energetico; inoltre le Amministrazioni Regionali e Locali si sono avvalse dei dati dell'Archivio Climatico ai fini della loro pianificazione energetica (formulazione di criteri per la ripartizione di fondi) e li hanno prescritti per il calcolo degli impianti solari e fotovoltaici ammissibili ai finanziamenti agevolati. Infine, l'archivio è utilizzato per fornire i dati di input ai calcoli on-line offerti nel sito Internet *SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare* (vedi oltre), sviluppato nell'ambito del *Progetto Solare Termodinamico* dell'ENEA.

Il modello 'Solarmet'

Tutti i modelli sviluppati per stimare la radiazione solare dalle immagini da satelliti sono riconducibili a due distinte categorie: quelli "statistici" e quelli "fisici".

Il metodo *Heliosat* descritto in precedenza rappresenta un esempio di modello statistico, in quanto la correlazione fra il coefficiente di trasmissione atmosferica e l'indice di copertura nuvolosa ricavato dalle mappe satellitari è stabilita in base a una regressione statistica con le misure di radiazione effettuate al suolo.

Negli ultimi anni invece è stato sviluppato in ENEA un modello fisico, *Solarmet* [6], che al pari di *Heliosat* utilizza come dato di partenza le mappe satellitari di copertura nuvolosa ma nel quale, a differenza di *Heliosat*, la trasmittività atmosferica, il coefficiente di riflessione e altri parametri essenziali sono determinati mediante un modello di trasferimento radiativo dell'atmosfera (il modello SBDART) sviluppato presso l'Università della California [7]. *Solarmet* fonda le proprie radici su di un modello elaborato da Marullo et al. [8] che ri-

considera un precedente modello proposto da Gautier et al. [9].

In *Solarmet* le differenti condizioni atmosferiche rientrano in due categorie: situazione di cielo sereno e moderata presenza di aerosol, oppure situazione di cielo nuvoloso e/o presenza sensibile di aerosol; nel secondo caso, gli effetti degli aerosol atmosferici e delle nubi sono considerati in maniera semplice ma efficace, assumendo la presenza, in seno all'atmosfera, di uno strato fittizio completamente riflettente.

I risultati ottenuti con il modello *Solarmet* sono stati confrontati con i valori misurati presso tre località italiane della rete attinometrica SOLTERM (Casaccia, Montalto di Castro e Specchia, vedi oltre). Il confronto è avvenuto con i dati dell'anno 2002. La differenza percentuale tra misure e dati calcolati mediante il modello, sia per la radiazione diretta che per la globale è minore del 6% su base mensile. Su base annua l'MBE% varia dal 2% al 3% sia considerando la radiazione globale che la diretta. Per quanto riguarda la radiazione globale, è stato effettuato un ulteriore confronto tra i dati ottenuti col metodo *Solarmet* e quelli misurati, relativamente a 29 stazioni dell'Aeronautica Militare Italiana e 22 stazioni della Rete Agrometeorologica Nazionale. La differenza percentuale annuale media tra i dati stimati da satellite mediante *Solarmet* e le misure è 7,6%.

Anche le mappe ottenute con *Solarmet* per tutto il territorio nazionale, utilizzando le stesse immagini satellitari, hanno una risoluzione spaziale di circa 2,5 km, e possono essere calcolate per rappresentare:

- la radiazione media oraria globale su superficie orizzontale e diretta normale;
- la radiazione media mensile giornaliera globale su superficie orizzontale e diretta normale.

Nella figura 3 è mostrata come esempio una mappa di radiazione giornaliera media mensile. Tutte le mappe sono gene-



rate mediante *Solarmet* a partire dalle immagini primarie del Meteosat.

Il metodo *Solarmet* è stato testato con le immagini 'primarie' di copertura nuvolosa che EUMETSAT invia direttamente all'ENEA (vedi oltre), nelle quali il 'ritaglio' che rappresenta l'Italia è composto da 421 righe per 541 colonne. Esso sarà adottato nell'aggiornamento e ampliamento dell'archivio ENEA delle mappe di radiazione, sia globale che diretta, con intervalli a partire da quello orario; inoltre, dall'anno 2006 in poi il calcolo sarà possibile con le mappe primarie di nuova generazione (vedi oltre).

Il nuovo archivio ENEA delle mappe della radiazione solare

L'intero data-base delle immagini di copertura nuvolosa è stato ricostruito grazie a un accordo ENEA-EUMETSAT, in virtù del quale l'ente europeo ha fornito all'ENEA tutte quelle relative agli anni passati, a partire dal 1996, e fornisce tuttora quelle che rileva giornalmente. Si tratta di immagini 'primarie', qualitativamente migliori e con una risoluzione temporale più spinta: infatti fino al 2005 si dispone di una ogni mezzora mentre a partire dal 2006 addirittura una ogni 15 minuti; nel frattempo anche la risoluzione spaziale è

aumentata e con le immagini attuali si arriva a rappresentare con un pixel un'area pari a poco più di 1 km².

È in corso l'aggiornamento dell'intero archivio delle mappe; al suo completamento, conterrà le mappe di radiazione al suolo:

- a) globale, su piano orizzontale;
- b) diffusa, su piano orizzontale;
- c) diretta sul piano *normale* ai raggi (*Direct Normal Irradiation, DNI*);

relativa agli intervalli:

- a) orari;
- b) giornalieri;
- c) mensili (o, equivalentemente, giornalieri medi mensili);
- d) annui;

inoltre:

- a) con riferimento a singole ore, giorni, mesi e anni;
- b) come medie pluriennali, che arrivino fino agli anni più recenti (2007).

Infine, con riguardo al formato di memorizzazione, saranno adottati:

- a) un formato binario per l'effettuazione dei calcoli, in quanto il più adatto sia per la velocità di esecuzione che per il minor spazio utilizzato per la memorizzazione;
- b) un formato grafico fra i più diffusi in ambito informatico, per la restituzione a schermo o su altro dispositivo di output (stampo ecc.);
- c) un formato che si presti ad essere importato agevolmente nei programmi di elaborazione e analisi dei dati 2D (matrici e tabelle).

L'archivio si avvarrà di strumenti per la 'navigazione' e la ricerca delle mappe memorizzate e disponibili, per la visualizzazione delle stesse e, infine, per l'estrazione dei dati.

La rete attinometrica ENEA

Dal 2000 l'ENEA ha intrapreso un'approfondita attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie solari a concentrazione per la captazione e l'accumulo di calore

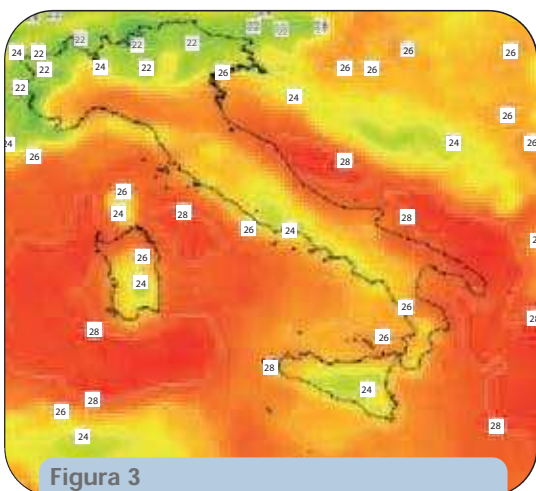


Figura 3
Mappa di radiazione giornaliera media mensile diretta normale ed isolinee. I valori sono ottenuti con il modello *Solarmet*. Mese di giugno 1996. Unità di misura: MJ/m²



ad alta temperatura finalizzate alla produzione di energia elettrica mediante cicli termodinamici e alla produzione di idrogeno attraverso la decomposizione della molecola d'acqua.

Contrariamente a quanto succede per le misure di irraggiamento globale sul piano orizzontale, molto scarsa è la disponibilità, sia in termini di numero di località che di periodi di acquisizione, di dati con intervalli almeno orari di radiazione diretta. Come già detto in precedenza, tale componente è l'unica che ha le caratteristiche di collimazione che ne consentono l'uso mediante sistemi a concentrazione. Pertanto lo studio dettagliato di impianti solari a concentrazione non può prescindere dalla conoscenza di questo parametro. Oltre ad essere fondamentali per il calcolo dell'energia che un dato impianto può produrre, gli andamenti orari permettono inoltre di identificare eventuali criticità sul sistema di controllo e regolazione e sullo stress termomeccanico al quale sono sottoposti i componenti impiegati. Infine la conoscenza dei profili di irraggiamento diretto orario permette il corretto dimensionamento del sistema di accumulo in base a considerazioni tecnico-economiche.

Per colmare questa lacuna informativa, a

partire dal 2001, l'ENEA ha installato sul territorio italiano alcune stazioni per la misura della radiazione diretta. Attualmente le stazioni funzionanti che costituiscono la *Rete attinometrica Solterm* dell'ENEA sono cinque, collocate nei siti dove era stata ipotizzata la realizzazione di impianti solari termodinamici (Specchia, Montalto di Castro e Priolo Gargallo) o all'interno di Centri ENEA (Casaccia e Trisaia), tabella 1.

Per ognuna delle grandezze acquisite viene memorizzato il valore medio e lo scarto quadratico delle letture effettuate nei 5 minuti precedenti la registrazione.

I dati acquisiti dalla rete alimentano un data-base, per mezzo del quale è possibile effettuare sintesi e statistiche (dati orari, giornalieri, medi mensili ecc.); inoltre, gli stessi dati vengono utilizzati per calibrare i parametri che intervengono nei modelli di stima della radiazione a partire dai dati satellitari.

Tutte le stazioni installate consentono la misura delle tre grandezze fondamentali ai fini della caratterizzazione attinometrica: la radiazione *globale* sul piano orizzontale, la radiazione *diffusa* sul piano orizzontale e la radiazione *diretta* sul piano normale ai raggi del sole. I tre dati sono correlati tra loro tramite una relazio-

Tabella 1 - Le stazioni della Rete attinometrica ENEA-SOLTERM

Denominazione	Prov.	Coordinate		Inizio funzionamento	Grandezze acquisite
		Latitudine (Nord)	Longitudine (Est Greenwich)		
Casaccia	RM	42°03'	12°18'	novembre-01	radiazione, temperatura, vento
Trisaia	MT	40°10'	16°39'	febbraio-02	radiazione
Montalto di Castro	VT	42°22'	11°31'	febbraio-02	radiazione, temperatura, vento, umidità
Specchia	LE	39°57'	18°16'	maggio-02	radiazione, temperatura, vento
Priolo Gargallo	SR	37°08'	15°13'	luglio-03	radiazione



ne, per cui anche in caso di errore su una delle tre grandezze, questa può essere calcolata utilizzando le misure corrette delle altre due.

L'elemento più critico per la misura della radiazione solare diretta è l'inseguitore solare (*solar tracker*- figura 4). Infatti esso è un dispositivo mobile che assolve al duplice compito di schermare, mediante una sfera metallica nera opportunamente orientata, il sensore di radiazione diffusa sul piano orizzontale e di comandare il puntamento del pirieliometro, strumento per la misura della radiazione diretta, verso il disco solare. Pertanto all'inseguitore è richiesta una notevole precisione e un'estrema affidabilità, per limitare al minimo i periodi di non allineamento, nei quali tutte le grandezze misurate sarebbero falsate. Il sistema si orienta sul disco solare durante il suo percorso, giornaliero e stagionale, sulla volta celeste, grazie al calcolo automatico della posizione del Sole a partire dall'ora, dal giorno e dalle coordinate del sito. Tale calcolo permette il puntamento corretto anche in presenza di nubi, mentre piccoli errori vengono compensati da un sistema di controreazione, basato su fotocellule, che si attiva quando la radiazione diretta è più intensa.



Figura 4
Rete attinometrica ENEA-Solterm: stazione di acquisizione di Specchia (Lecce)

La stazione è dotata di un sistema automatico di acquisizione dati che memorizza il valor medio e gli scarti quadratici medi di ogni grandezza a partire dai dati misurati nei 5 minuti precedenti. Tutti i dati sono registrati su di un modulo di memoria interno in grado di contenere i dati acquisiti per un intervallo di alcuni mesi. A intervalli regolari (per lo più settimanali) i dati vengono trasferiti e, dopo il controllo della loro congruità, memorizzati in via definitiva nel data-base per le successive elaborazioni. Il trasferimento avviene utilizzando sistemi di trasmissione dati via GSM.

I dati archiviati vengono elaborati e sintetizzati per ottenere una serie di informazioni che ne rendano più agevole l'utilizzo. Ad esempio, per studiare l'idoneità dei siti ad ospitare gli impianti solari a concentrazione, sono utili i grafici della giornata limite, dello "spettro" delle intensità e, infine, delle durate medie di periodi con valore sopra soglia: quest'ultimo (figura 5) mostra il numero atteso delle ore per cui il valore di radiazione è al di sopra di una soglia prefissata. Il funzionamento di un impianto solare termodinamico può essere scomposto in varie fasi operative in funzione della radiazione disponibile: conoscere dunque dettagliatamente le percentuali di ore con radiazione al di sopra di un certo valore è indispensabile per una corretta predizione delle prestazioni complessive.

La previsione della radiazione solare diretta

Nell'ambito del *Progetto Solare Termodinamico* dell'ENEA è stato messo a punto un sistema che consente di effettuare previsioni di radiazione solare diretta. Tale studio nasce dalla necessità della conoscenza in anticipo dell'energia solare che sarà disponibile nel breve periodo (oggi, domani e dopodomani) al fine di garanti-



re una corretta gestione degli impianti solari a concentrazione per la produzione di energia elettrica.

L'energia solare è caratterizzata da un'aleatorietà intrinseca e, oltre ad avere interruzioni dovute all'alternanza giorno-notte e a risentire del ciclo stagionale che ne fa variare la disponibilità giornaliera nel corso dell'anno, risente delle condizioni meteorologiche contingenti. Possono verificarsi situazioni nelle quali l'impianto solare è interessato dal passaggio occasionale di nubi che coprono tutto o in parte il sito in giornate altrimenti soleggiate, oppure possono verificarsi situazioni con giorni di mal tempo prolungato durante i quali l'impianto non riceve per lungo tempo energia solare.

Per ovviare a queste situazioni, la tecnologia ENEA prevede l'adozione di un sistema di accumulo termico di grandi dimensioni atto a compensare queste variazioni e assicurare la regolarità di funzionamento all'intero impianto. Per programmare la produzione di energia elettrica e la gestione dell'energia accumulata, è di fondamentale importanza la stima della produttività dell'impianto nei giorni successivi e quindi della radiazione solare prevista.

Per effettuare le previsioni il sistema si avvale di siti Internet selezionati appositamente, specializzati nella fornitura di previsioni meteorologiche. Questi devono infatti essere affidabili sia sotto il profilo della regolarità di funzionamento che sotto quello dell'attendibilità delle previsioni meteorologiche che forniscono. Attualmente il sistema sviluppato effettua quotidianamente previsioni di radiazione diretta relativamente a due località particolarmente interessanti: Casaccia (Roma) e Priolo Gargallo (Siracusa). La prima è sede dell'impianto PCS (*Prova Collettori Solari*) dell'ENEA e la seconda è il luogo prescelto per la realizzazione della prima centrale solare industriale che sarà realizzata in collaborazione tra l'ENEA e l'ENEL (progetto *Archimede*).

Lo sviluppo delle previsioni per questi due luoghi ha richiesto la selezione anche di un certo numero di località attorno ad essi, a distanza compresa nel raggio di 30km, che presentano caratteristiche meteorologiche omogenee, ciò al fine di aumentare la statistica di dati disponibili.

Le previsioni reperite in Internet sono state ripartite in tre classi, in linea con la suddivisione che viene generalmente impie-

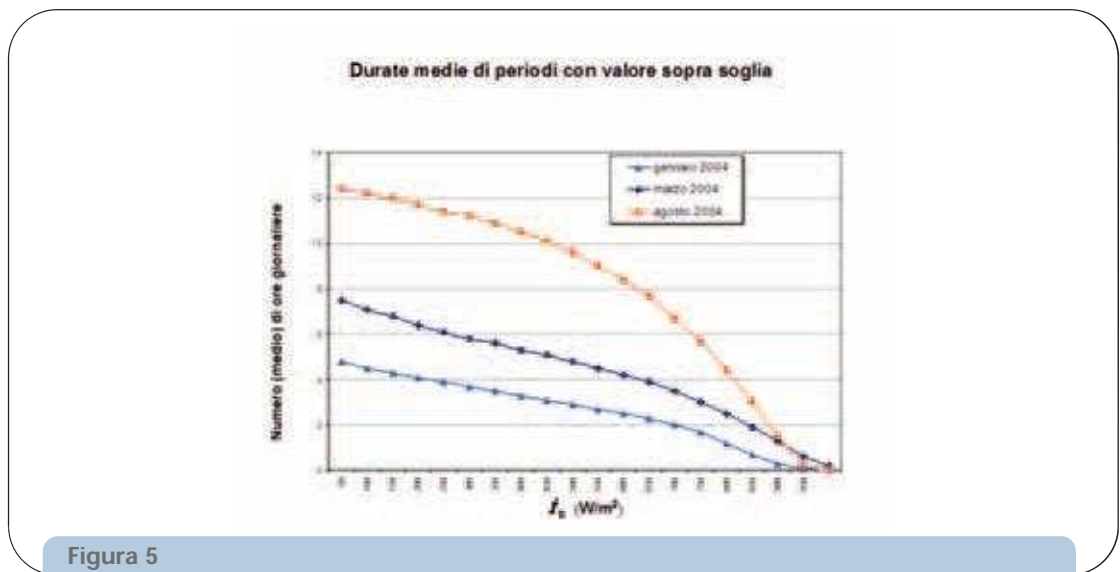


Figura 5

Durate medie di periodi con valore sopra soglia, dell'irraggiamento diretto normale. Dati della rete attinometrica ENEA-SOLTERM, stazione di Priolo Gargallo (Siracusa). Per ciascun dato rappresentato in figura, l'ordinata corrisponde alla durata (in termini di ore giornaliere) in cui l'irraggiamento diretto normale (i_b) si è mantenuto al di sopra del valore riportato in ascissa.



gata studiando la radiazione solare diretta associata alla copertura nuvolosa:

a) *cielo sereno*, quando la radiazione diretta misurata al suolo è maggiore del 60% dell'extra-atmosferica;

b) *nuvolosità media*, quando la radiazione diretta misurata al suolo è compresa tra il 30% e il 60%;

c) *nuvolosità intensa*, quando la radiazione diretta misurata al suolo è inferiore al 30%.

Per ottenere le previsioni di radiazione solare diretta, sono stati successivamente incrociati i dati di previsione di copertura nuvolosa con quelli di radiazione solare diretta misurati presso le stazioni Casaccia e Priolo Gargallo della rete attinometrica ENEA-Solterm.

Il confronto tra i dati di misure al suolo e di previsioni su scala temporale massima di tre giorni, mostra un buon accordo nel 99% dei casi.

La conoscenza in anticipo della radiazione solare disponibile sul sito di un impianto solare consente di gestire convenientemente l'impianto stesso. L'energia fornita alla rete elettrica presenta infatti remunerazioni che dipendono dal momento nel quale essa viene erogata seguendo appositi piani di tariffazione. Conoscendo anticipatamente quanta energia si potrà "raccolgere" dal Sole, il gestore dell'impianto può decidere tempi e modi di erogazione in maniera da ottimizzarne il rendimento. Ma oltre a questo beneficio, altri sono i vantaggi dell'impiego delle previsioni di radiazione solare. Si possono determinare anticipatamente i giorni di fermo dell'impianto per la sua manutenzione ordinaria o straordinaria, facendoli coincidere con periodi di condizioni meteorologiche avverse. In caso di previsione di condizioni pericolose per l'impianto, ad esempio per temporale con grandine o vento forte, le superfici captanti potranno essere disposte preventivamente in posizione di sicurezza.

Ulteriori sviluppi del metodo di previsione seguiranno due direzioni differenti: allungamento del periodo di previsione fino a raggiungere 10 giorni e aumento della risoluzione temporale, scendendo dall'intervallo attuale di 24 ore fino a differenziare tra mattina, pomeriggio e sera. L'aumento della risoluzione temporale potrà essere spinto fino all'intervallo dell'ora; alcuni siti meteorologici forniscono già oggi una tale risoluzione. Quest'ultima direzione di sviluppo andrebbe così a raccordarsi con il cosiddetto *nowcasting*. Per raggiungere questo obiettivo saranno utilizzate le immagini del Meteosat di ultima generazione con risoluzione temporale di 15 minuti. Ciò consentirà di avere previsioni in tempo reale e risolvere così l'esigenza di tenere sotto controllo formazioni nuvolose isolate improvvise e localizzate su tutto l'impianto o su parti di esso in grado di creare shock termici.

Il sito *SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare*

Nel mese di settembre 2006 è stato attivato il sito Internet *SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare* [2], all'interno del dominio ENEA (figura 6). Il sito offre la possibilità di utilizzare gratuitamente la grande quantità di dati, procedure e informazioni sviluppati in questi anni in ENEA relativi alla radiazione solare.

Al momento è operativa la sezione di calcolo della radiazione su superficie comunque orientata che viene incontro alle esigenze di tutti quegli operatori che hanno necessità di valutare l'energia solare incidente su piani inclinati.

Lo strumento di calcolo (informatico) è costituito essenzialmente dai seguenti componenti: l'archivio ENEA delle mappe di radiazione globale giornaliera media mensile su piano orizzontale, un sistema di interrogazione per estrarre i dati una volta che siano assegnati il me-





se e le coordinate geografiche della località e, infine, l'algoritmo che implementa il calcolo per riportare il dato sulla superficie di inclinazione e orientazione assegnati. Poiché le mappe abbracciano l'intera regione italiana è possibile effettuare il calcolo per qualunque località del nostro Paese.

L'algoritmo incorporato nello strumento di calcolo riprende il procedimento proposto dalla norma UNI 8477-1 [10]. Il dato di partenza è costituito dalla radiazione globale giornaliera media mensile sul piano orizzontale e viene estratto direttamente dalle mappe per i mesi e per la località indicati dall'utente: in ciò il calcolo *on-line* dell'ENEA differisce dall'altra norma UNI 10349 [11], la quale si limita a riportare solo i valori tabellati per i capoluoghi provinciali mentre, per tutte le altre località, suggerisce di interpolare linearmente i valori disponibili in funzione della latitudine.

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 una orografia particolare del terreno: colline ecc.; o per la presenza di manufatti come edifici vicini ecc.). In questo caso occorre conoscere preventivamente l'intervallo diurno – più breve – in cui i raggi solari diretti 'investono' effettivamente la superficie, perché la procedura ne tenga conto e corregga gli estremi dell'intervallo d'integrazione.

Come già detto il sito dell'*Atlante* è pienamente operativo per le sezioni del *Calcolo* e della *Previsione* della radiazione e verrà ulteriormente arricchito. Per quanto riguarda la sezione archivio, sul nuovo sito saranno pubblicate sia le misure a terra della rete attinometrica ENEA, sia le nuove e più dettagliate mappe di stima della radiazione ricavate dalle immagini satellitari, che amplieranno e aggiorneranno fino ai giorni nostri quelle già rese disponibili nel precedente sito dell'*Archivio Climatico ENEA-DBT*.



Figura 6 Home page del sito SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare. Attualmente, la sezione 'portante' del sito è costituita dagli strumenti di Calcolo della radiazione solare che giunge al suolo. Il calcolo è riferibile alla molteplicità di configurazioni delle superfici captanti degli impianti energetici che sfruttano la fonte solare, si attiene alla normativa UNI ed utilizza i dati di radiazione raccolti dall'ENEA



Bibliografia

[1] *Clisun - Archivio Climatico ENEA-DBT*, sito Internet (web: <http://clisun.casaccia.enea.it>); contiene – tra l'altro – le mappe della radiazione globale giornaliera media mensile 1994-1999 e le tabelle dei dati estraibili per 1614 località uniformemente distribuite sul territorio italiano. Tutto il materiale è liberamente 'scaricabile'.

[2] *SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare*, sito Internet (web: <http://www.solaritaly.enea.it>).

[3] D. Cano, J.M. Monget, M. Albuison, H. Guillard, N. Regas, L. Wald (1986), "A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data", *Solar Energy*, 37, 31-39, Elsevier.

[4] E. Cogliani, D. Malosti, M. Mancini e S. Petrarca (1993), "Stima della radiazione solare globale al suolo dalle immagini secondarie del satellite Meteosat", *HTE Energie alternative*, 85, 268-273.

[5] 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.

[6] E. Cogliani, P. Ricchiazzi, A. Maccari (2007), "Physical model SOLARMET for determining total and direct solar radiation by meteosat satellite images", *Solar Energy*, 81, 791-798, Elsevier.

[7] P. Ricchiazzi, S.R. Yang, C. Gautier, D. Sowle, (1998), "SBDART: a research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 2101-2114.

[8] S. Marullo, G. Dalu, A. Viola (1987), " Incident short-wave radiation at surface from Meteosat data", *Il Nuovo Cimento*, 10C, 77-90.

[9] C. Gautier, G.R. Diak, S. Masse (1980), "A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data", *J. Appl. Meteorol.*, 19, 1005-1012.

[10] Norma UNI 8477, Parte 1^a, "Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta" (1983).

[11] Norma UNI 10349, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici" (1994).

[12] E. Cogliani, "Previsione di radiazione solare diretta" (2005), Documento non pubblicato, ENEA.

[13] F. Fiorenza (2003), "Studio ed implementazione di metodi di previsione a breve termine dell'intensità di radiazione solare diretta", tesi di laurea, Università degli studi di Roma "La Sapienza"-ENEA.

[14] F. Spinelli, E. G. Cogliani, A. Maccari, M. Milone (2007), *La misura e la stima della radiazione solare*, ENEA, SOL/RS/2007/21, Roma.

Nota

I colleghi Sergio Petrarca, Aldo Bastianelli, Arcangelo Benedetti, Giuseppe Cara, Giancarlo Caselli, Mauro Giorgetti, Massimo Mancini, Michele Mastrosimone, Roldano Siviero e Franco Treppo hanno contribuito in passato o partecipano tuttora alle attività descritte nell'articolo.



francesco.spinelli@casaccia.enea.it



euro.cogliani@casaccia.enea.it



maccari@casaccia.enea.it



mauro.milone@casaccia.enea.it