

**Analisi di dati di radiazione solare al suolo  
e messa a punto di un modello  
di trasferimento radiativo in atmosfera  
per la mappatura della radiazione solare  
sul territorio della Provincia di Trento**

---

**Relazione finale**

L. Laiti, L. Giovannini, L. Panziera, D. Zardi

Gruppo di Fisica dell'Atmosfera  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica  
Università degli Studi di Trento



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Ambientale e Meccanica

30 settembre 2014



# Indice

<b>Premessa</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introduzione</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Le misure di radiazione</b> .....	<b>5</b>
2.1. La radiazione solare .....	5
2.2. Misure di radiazione solare al suolo .....	6
2.3. Misure di radiazione solare da satellite .....	9
<b>3. Gli atlanti solari disponibili per il Trentino</b> .....	<b>13</b>
3.1. Atlante Italiano della Radiazione Solare (ENEA) .....	13
3.2. Mappe di radiazione solare globale (Aeronautica Militare Italiana) .....	14
3.3. Atlante Europeo della Radiazione Solare (Commissione delle Comunità Europee) ..	15
3.4. PVGIS (JRC) .....	16
3.5. I metodi per la produzione di atlanti solari .....	19
<b>4. L'Atlante solare del Trentino: il progetto</b> .....	<b>21</b>
4.1. Origine e motivazioni del progetto .....	21
4.2. La metodologia scelta per la realizzazione .....	22
<b>5. La rete radiometrica del Trentino</b> .....	<b>25</b>
5.1. Descrizione della rete radiometrica del Trentino .....	25
5.2. Descrizione del database di radiazione.....	30
<b>6. Il controllo di qualità dei dati di radiazione</b> .....	<b>33</b>
6.1. Controlli dei limiti fisici .....	34
6.2. Controlli della variabilità temporale .....	35
6.3. Controlli di consistenza spaziale .....	36
6.4. I codici di errore e i codici di qualità .....	36

6.5. Risultati .....	38
<b>7. La selezione e l'elaborazione del database per l'Atlante Solare del Trentino .....</b>	<b>43</b>
7.1. L'analisi di omogeneità .....	43
7.2. La stima dei dati mancanti .....	45
7.3. Il database definitivo e il calcolo delle climatologie di radiazione .....	48
<b>8. La modellazione della radiazione in condizioni di cielo sereno .....</b>	<b>53</b>
8.1. Il modulo r.sun di GRASS .....	53
8.2. I dati di input .....	54
8.3. Risultati.....	57
<b>9. La mappatura della radiazione solare .....</b>	<b>61</b>
9.1. Il calcolo dell'indice clear-sky .....	61
9.2. I metodi di interpolazione .....	64
9.3. La scelta del metodo di interpolazione .....	66
9.4. Risultati .....	68
<b>10. Il confronto con altri Atlanti Solari .....</b>	<b>77</b>
10.1. Confronto con PVGIS-3 e PVGIS-CMSAF .....	78
10.2. Confronto con HelioMont .....	81
10.3. Considerazioni generali .....	82
<b>11. Conclusioni .....</b>	<b>85</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografia web .....</b>	<b>93</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>95</b>
<b>Elenco delle tabelle .....</b>	<b>97</b>
<b>Elenco delle figure .....</b>	<b>99</b>
<b>Elenco degli allegati .....</b>	<b>103</b>

## Premessa

L'Osservatorio Trentino sul Clima ([www.climatrentino.it/chi\\_siamo/osservatorio\\_trentino\\_clima](http://www.climatrentino.it/chi_siamo/osservatorio_trentino_clima)), istituito nel 2010 dalla Provincia Autonoma di Trento (PAT), ha il compito di coordinare dal punto di vista tecnico-scientifico le realtà impegnate sul territorio Trentino in attività di ricerca e di monitoraggio del clima e in attività di divulgazione scientifica ed educazione ambientale. In particolare, il coordinamento generale dell'Osservatorio Trentino sul Clima è affidato al Dipartimento Protezione Civile della PAT, mentre il coordinamento scientifico è affidato alla Fondazione E. Mach.

L'Osservatorio ha promosso nel 2012 il progetto di realizzazione dell'Atlante Climatico del Trentino, che consiste di diversi moduli tematici: temperatura, precipitazione, radiazione solare, vento, ghiacciai, analisi delle configurazioni meteorologiche sinottiche, e altri ancora. L'Atlante Solare del Trentino, la cui realizzazione è stata affidata al Gruppo di Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento, rappresenta pertanto uno degli elementi che compongono l'Atlante Climatico. È utile sottolineare che un Atlante Solare non possiede solo una rilevanza climatologica e scientifica (legata agli studi idrologici e ecologici), quanto piuttosto risulta uno strumento utile e prezioso anche per i professionisti che si occupano di energie rinnovabili e progettazione degli edifici, nonché agli agricoltori, e ad altre figure professionali.

Nell'ambito di quanto esposto sopra, l'obiettivo della ricerca qui presentata è quello di valutare la distribuzione media climatologica della radiazione solare in Trentino sulla base dell'analisi di dati da radiometri distribuiti sul territorio e mediante l'utilizzo di modelli che tengano conto in maniera adeguata dei fattori astronomici, atmosferici e orografici, ad esempio grazie all'uso di un opportuno modello digitale del terreno. Il risultato della ricerca sarà invece la produzione di mappe di radiazione ad alta risoluzione spaziale (adatta alla peculiare complessità del territorio trentino) riferite a diversi periodi e funzionali ai diversi possibili utilizzi applicativi (energia solare, idrologia, agricoltura, etc.).

Una consistente parte del lavoro, ovvero la raccolta e il controllo di qualità dei dati radiometrici, è stata svolta in stretta collaborazione con l'Unità Sistema Informativo Geografico del Centro di Trasferimento Tecnologico della Fondazione E. Mach, inquadrata anche nell'ambito delle attività collegate al progetto PICA (Piattaforma Integrata Cartografica Agri-vitivinicola; [pica.cavit.it](http://pica.cavit.it)).



# Capitolo 1

## Introduzione

La radiazione solare rappresenta una fonte di energia fondamentale per la vita sul pianeta Terra. Essa controlla e regola i cicli di trasformazione e trasferimento di acqua, energia e carbonio che avvengono all'interno dell'ecosistema terrestre, e che condizionano la totalità delle attività umane. La conoscenza della distribuzione spaziale e temporale della radiazione solare al suolo è infatti essenziale per le discipline scientifiche che si occupano dello studio di tali processi fisici, come la climatologia, la meteorologia, l'idrologia, o l'ecologia. La disponibilità di dati di radiazione solare è fondamentale in molti altri campi, per esempio in agricoltura e selvicoltura, per la valutazione dei potenziali produttivi dei terreni, dei fenomeni di evapotraspirazione e delle necessità irrigue dei terreni, per la programmazione delle attività di raccolta dei prodotti agricoli. La potenziale utilità di dati climatologici di radiazione è quindi molto elevata in una realtà come quella del territorio del Trentino, che annovera tra le attività economiche più rilevanti la coltivazione della vite per la produzione di vini, la produzione di biomasse per il riscaldamento domestico o la produzione energetica, e la produzione di legname destinato ad uso edilizio. In particolare in questa regione anche le attività di pianificazione e sviluppo dei complessi sciistici potrebbero usufruire con profitto di questa tipologia di informazioni. La caratterizzazione della distribuzione geografica della radiazione solare al suolo risulta di grande interesse anche ai fini dell'analisi e della previsione dei livelli di inquinamento da cosiddetto "smog fotochimico", che si verifica in particolare nelle giornate di forte insolazione e condizioni meteorologiche stabili. Infatti, è proprio la radiazione solare, e precisamente la sua componente ultravioletta, a indurre le reazioni fotochimiche che trasformano ossidi di azoto e composti organici volatili in inquinanti secondari (ad esempio ozono, perossiacetilnitrato o PAN, perossibenzoilnitrato o PBN, aldeidi, ecc.) molto tossici per le persone, gli animali e le piante. La radiazione ultravioletta è inoltre ritenuta responsabile dell'insorgenza di malattie cutanee come il melanoma, un cancro della pelle. La distribuzione climatologica della radiazione solare rappresenta un dato molto importante anche per le attività di progettazione ingegneristica ed edilizia, ad esempio nella progettazione di impianti fotovoltaici di piccola e grande taglia, di impianti solari termici per il riscaldamento dell'acqua ad uso domestico o il raffrescamento degli ambienti (sistemi di "solar cooling"), o di edifici ad alta efficienza dal punto di vista energetico e ambientale, che sfruttino in maniera ottimale la luce diurna e siano in grado di assicurare un alto livello di comfort agli abitanti.

La richiesta di dati di radiazione solare dei quali siano controllate e attestate con cura la qualità, la rappresentatività e l'accuratezza è aumentata prepotentemente nel corso degli anni più recenti, a causa del crescente interesse rispetto agli usi passivi e attivi dell'energia solare, non solo nei settori

commerciale e pubblico ma anche nel settore privato (cfr. ad esempio Grigante et al., 2011). In particolare, il tipo di dati di radiazione richiesti dipende strettamente dalla specifica applicazione. Per esempio, dati di irraggiamento medio su base mensile sono necessari e sufficienti per condurre studi di fattibilità tecnico-economica per impianti fotovoltaici oppure per studi climatologici, mentre non sono sufficienti per attività di previsione a breve termine della produttività di impianti fotovoltaici o delle condizioni meteorologiche a scala locale. Le mappe climatologiche di radiazione solare incidente sulla superficie terrestre, su base media o cumulata, mensile e annuale, sono tipicamente contenute in atlanti solari o, più in generale, in atlanti climatici. Talvolta il dato climatologico di radiazione in tali atlanti è fornito anche in forma tabellare, o è disponibile in modalità di consultazione interattiva tramite interfaccia web. Gli atlanti solari attualmente disponibili sono realizzati tramite procedure molto diverse tra loro, per esempio a partire da dati di radiazione misurata al suolo oppure da satellite, e di conseguenza presentano differenti risoluzioni spaziali e differenti accuratezze, anche in dipendenza dal periodo di riferimento adottato per il calcolo delle climatologie.

In un territorio complesso come quello della Provincia Autonoma di Trento appare di grande importanza caratterizzare in maniera accurata la distribuzione spaziale e temporale della radiazione solare incidente al suolo; infatti, le rilevanti variazioni di quota, gli effetti di ombreggiamento orografico, la particolarità dei fenomeni meteorologici tipici locali causano una variabilità peculiare nella distribuzione di tale variabile climatica, che è difficilmente riprodotta in maniera corretta dagli atlanti solari correntemente a disposizione dei professionisti e dei ricercatori. I prodotti attualmente disponibili infatti possiedono generalmente una risoluzione spaziale dichiarata almeno superiore ad 1 km, e una risoluzione spaziale effettiva spesso minore di quella dichiarata. Inoltre la loro accuratezza per i territori essenzialmente montuosi, come le Alpi, non è alla pari di quella relativa alle regioni più pianeggianti e omogenee, ed è ancora oggetto di discussione (Šúri et al., 2008; Huld et al., 2012). Recentemente, alcune regioni europee che presentano un'orografia di complessità paragonabile a quella del Trentino hanno provveduto a dotarsi di atlanti solari ad alta risoluzione, principalmente per promuovere la realizzazione di impianti fotovoltaici. Ad esempio la regione Provenza-Alpi-Costa Azzurra (PACA), nella Francia meridionale, ha beneficiato della realizzazione di un Atlante solare regionale ([www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr)) con una risoluzione spaziale di 200 m, pubblicato nel 2010 e realizzato dal Centre Energétique et Procédés del MINES ParisTech su finanziamento della Direzione Regionale PACA dell'Agenzia dell'Ambiente e della Gestione dell'Energia francese (Blanc et al., 2011). Analogamente, il servizio meteo nazionale svizzero (MeteoSvizzera) e l'Accademia Europea di Bolzano (EURAC) hanno recentemente sviluppato un atlante solare per il Cantone dei Grigioni e la Provincia Autonoma di Bolzano con risoluzione spaziale di 100 m, nell'ambito del progetto PV-Alps ([pvalps.eurac.edu](http://pvalps.eurac.edu)). Il lavoro svolto per realizzare l'Atlante solare del Trentino presentato in questa relazione intende offrire un prodotto analogo a quelli citati per il territorio della Provincia Autonoma di Trento, in termini di accuratezza e risoluzione spaziale, integrando dove possibile le diverse tipologie di misure di radiazione attualmente disponibili. La rilevanza dell'Atlante non è quindi limitata solamente alla climatologia, quanto a tutti quei settori applicativi che sono stati citati nei paragrafi precedenti.



## Capitolo 2

### Le misure di radiazione solare

#### 2.1 La radiazione solare

Lo spettro della radiazione elettromagnetica emessa dal Sole che raggiunge la Terra, denominata in meteorologia “radiazione ad onde corte”, si estende dal vicino ultravioletto (lunghezza d’onda maggiore di 150 nm) al vicino infrarosso (lunghezza d’onda minore di 4000 nm; Wallace e Hobbs, 2006). Le applicazioni nel campo delle energie rinnovabili tipicamente sfruttano maggiormente lo spettro del visibile (lunghezza d’onda: 380–750 nm) e parzialmente lo spettro dell’ultravioletto (250–380 nm) e dell’infrarosso (780–1500 nm), ovvero la bande spettrali dove si concentra l’energia solare effettivamente disponibile. La radiazione solare extraterrestre, intesa come la radiazione solare che raggiunge il limite superiore dell’atmosfera terrestre, è definita come l’integrale su tutte le lunghezze d’onda dello spettro della radiazione in arrivo dal Sole. La radiazione extraterrestre media annua è essenzialmente costante nel tempo, nonostante sia soggetta a variazioni trascurabili (dell’ordine di  $\pm 1-4 \text{ W m}^{-2}$ ) legate al ciclo undecennale dell’attività solare, e al verificarsi di macchie ed eruzioni solari. Il suo valore è attualmente stimato pari a  $1366 \text{ W m}^{-2}$  (anche se una stima più recente indica un valore pari a  $1361 \text{ W m}^{-2}$ ; Kopp et al., 2005). Tale valore è conosciuto come  $I_0$ , la “costante solare”. Nel corso dell’anno l’eccentricità dell’orbita terrestre causa la variazione periodica della distanza tra Sole e Terra, che induce un’oscillazione annuale della radiazione extraterrestre effettivamente incidente al limite superiore dell’atmosfera dell’ordine di  $\pm 3\%$ .

Al contrario della radiazione extraterrestre, la radiazione solare che raggiunge la superficie della Terra è molto variabile: i moti astronomici di rivoluzione e rotazione della Terra e la declinazione dell’asse terrestre rispetto all’orbita di rivoluzione introducono una modulazione stagionale e giornaliera della radiazione potenzialmente incidente sul suolo terrestre in un dato luogo. Tale radiazione è ulteriormente ridotta e modificata dall’interazione con l’atmosfera della Terra e dagli effetti dell’orografia locale. Data la distanza della Terra dal Sole, quest’ultimo può essere considerato una sorgente di luce puntiforme, e i raggi che compongono la radiazione extraterrestre possono essere considerati come paralleli e collimati. Quando questi raggi attraversano l’atmosfera, l’interazione con le molecole dei gas atmosferici, le particelle disperse in atmosfera e le nubi risulta in multipli processi di assorbimento, riflessione e diffusione (“scattering”) multi-direzionale di parte dei fotoni che li compongono, in dipendenza dalla lunghezza d’onda della radiazione stessa. Di conseguenza la distribuzione spettrale della radiazione solare viene modificata (vedi Fig. 1), e la radiazione incidente al suolo risulta ridotta rispetto a quella extraterrestre (in media del 50% circa; vedi Fig. 2). Essa risulta essenzialmente suddivisa in due componenti: la radiazione diretta  $B$  (composta dalla radiazione extraterrestre non modificata dai fenomeni di assorbimento, riflessione e scattering, ovvero dai fotoni collimati residui, e responsabile per la formazione delle ombre) e la radiazione diffusa  $D$  (composta dai fotoni diffusi in direzione della superficie terrestre). La somma delle due componenti è detta radiazione globale ( $G$ ), in quanto usualmente riferita ad una superficie

orizzontale e quindi pari alla radiazione ricevuta da un angolo solido di volta celeste pari a  $2\pi$ . Quando viene considerata invece una superficie non orizzontale ma inclinata, è necessario conteggiare nel calcolo della radiazione globale incidente anche la componente di radiazione riflessa ( $R$ ) dal terreno circostante verso la superficie di interesse.

## 2.2 Misure di radiazione solare al suolo

Gli strumenti utilizzati per misurare le diverse componenti della radiazione solare terrestre incidente al suolo sono denominati in generale “radiometri”. In particolare la radiazione diretta ad onda corta  $B$  si misura per mezzo di pireliometri, mentre la radiazione diffusa  $D$  e globale  $G$  si misurano grazie a strumenti detti piranometri. I radiometri sono costituiti essenzialmente da un involucro esterno, il quale contiene un sensore di radiazione (la cui risposta spettrale alla radiazione incidente è conosciuta) e diversi circuiti elettrici. La tipologia di sensori di radiazione più comunemente adottata è quella a termopila. La termopila possiede una superficie assorbente (nera) che viene riscaldata dalla radiazione solare incidente. Alcune termocoppie sono poste a contatto con la superficie assorbente della termopila, mentre altre sono poste a contatto con una superficie di riferimento riflettente (bianca) oppure collegate in serie alle precedenti, per un totale di 20–40 termocoppie (tipicamente di tipo “T”, composte da giunzioni in rame e costantana).

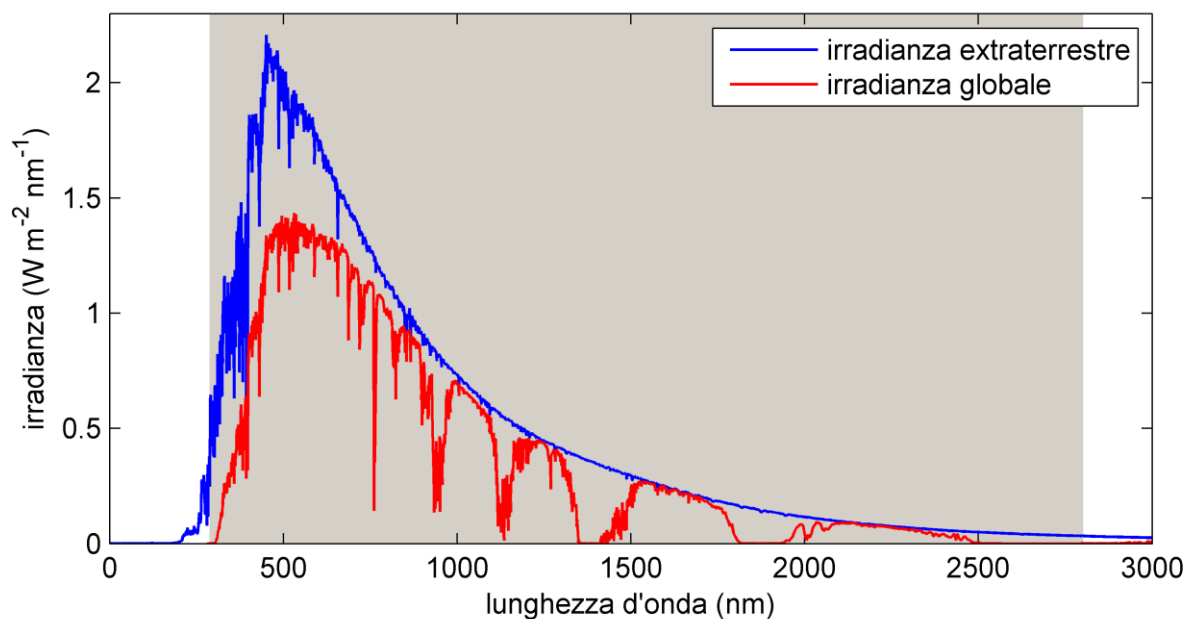


Figura 1. Confronto degli spettri di radiazione extraterrestre (in blu) e globale, ovvero della radiazione in arrivo sulle superficie terrestre (in rosso; dati tratti da: [redc.nrel.gov/solar/spectra](http://redc.nrel.gov/solar/spectra)). È possibile riconoscere il diverso effetto di estinzione per le diverse bande spettrali dovuta ai fenomeni di assorbimento, riflessione e scattering che avvengono in atmosfera. La banda grigia rappresenta invece lo spettro di radiazione al quale sono tipicamente sensibili i piranometri.

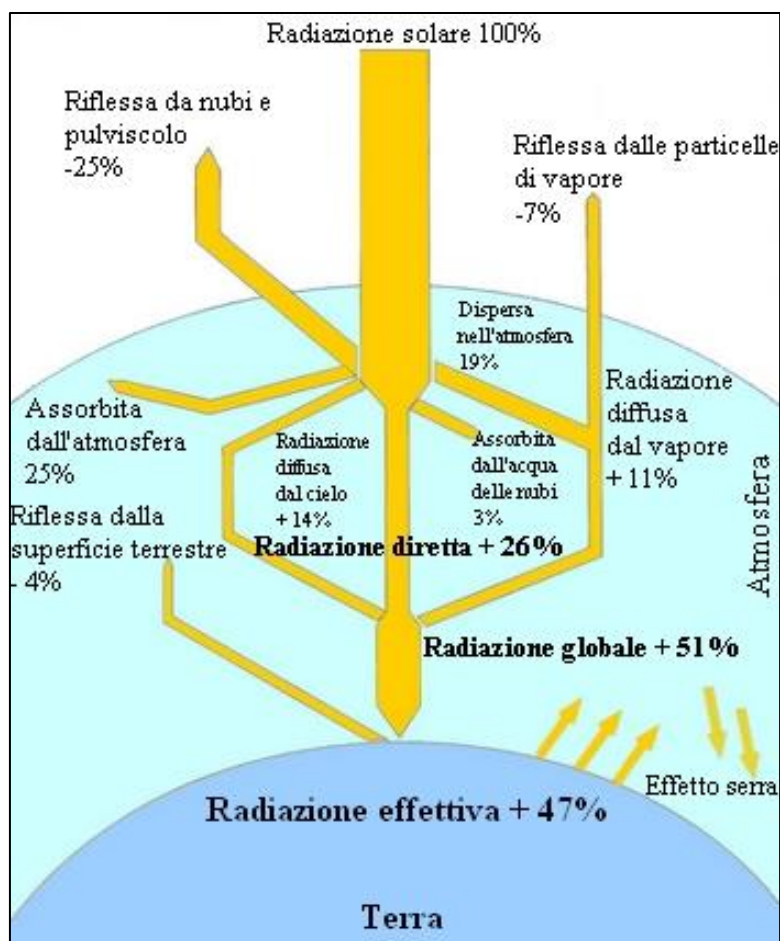


Figura 2. Rappresentazione schematica dei fenomeni di estinzione della radiazione extraterrestre attraverso l'atmosfera e delle relative percentuali per le diverse componenti e i diversi meccanismi coinvolti. Immagine riprodotta da [www.ener2g.com](http://www.ener2g.com).

La differenza di potenziale elettrico che si instaura, proporzionale alla differenza di temperatura tra le giunzioni riscaldate e le giunzioni “fredde”, costituisce il segnale effettivamente misurato dallo strumento. Una differenza di temperatura di  $5^{\circ}\text{C}$  corrisponde a circa  $1000\text{ W m}^{-2}$  di radiazione solare in ingresso. Il tempo di risposta di questi sensori è tipicamente dell'ordine delle decine di secondi. Generalmente il sensore di radiazione è protetto dall'ambiente esterno grazie a due schermi in vetro di forma emisferica (piranometri) o da un singolo schermo piano in quarzo (pireliometri). La trasmissività ottica dello schermo può limitare parzialmente lo spettro della radiazione effettivamente misurata; in particolare la cupola in vetro, comunemente adottata come schermo per i piranometri, limita la sensibilità alle lunghezze d'onda comprese tra circa 290 e 2800 nm. Tale range spettrale è comunque sufficiente a misurare adeguatamente la radiazione solare terrestre incidente al suolo (vedi Fig. 1). Mentre i piranometri presentano un angolo solido di vista pari a  $2\pi$ , i pireliometri hanno un'apertura molto minore (di soli  $5^{\circ}$ – $6^{\circ}$ ); questi ultimi sono inoltre dotati di un sistema di puntamento (detto “inseguitore solare”) che segue il percorso del Sole nel cielo durante il giorno, allo scopo di intercettare solamente i raggi solari diretti ed escludere la componente diffusa della radiazione in arrivo al suolo. I piranometri per la misura della radiazione diffusa sono invece dotati di una sfera ombreggiante (anch'essa accoppiata ad un inseguitore solare) o, più

semplicemente, di una banda ombreggiante, con il compito di escludere dalla misurazione la componente diretta della radiazione (vedi Fig. 3).

Incertezze ed errori nelle misure di radiazione da piranometri e pireliometri possono essere causati da diversi fattori. Errori possono essere dovuti al fatto che le superfici assorbenti delle termopile non sono perfettamente isotrope o in seguito agli scambi di radiazione termica (nella banda dell'infrarosso) tra i sensori e la volta celeste a causa della loro differenza di temperatura, falsando le misure. Infatti, i piranometri privi di superficie di riferimento (bianca), sono soggetti a fenomeni di off-set termico che causano dati notturni negativi e dati diurni artificialmente ridotti (magnitudo dell'errore:  $5\text{--}20\text{ W m}^{-2}$ ). Oltre a queste eventualità possono verificarsi problemi con il sistema di acquisizione e di memorizzazione dei dati, oppure dovuti al degrado del sensore stesso. Un ulteriore fattore di incertezza è il fatto che i sensori non hanno una risposta secondo legge del coseno perfetta (in inglese "cosine response effect"). La risposta del sensore è infatti più incerta per valori elevati dell'angolo di incidenza della radiazione sulla cupola protettiva (ovvero quando l'elevazione del Sole sull'orizzonte è molto bassa), principalmente a causa di effetti di riflessione interna. Inoltre, le condizioni operative degli strumenti installati in campo possono non essere ottimali, introducendo ulteriori fonti di incertezza; ad esempio lo schermo protettivo esterno può sporcarsi od essere ricoperto da ghiaccio o neve, riducendo in maniera sistematica la radiazione misurata, oppure possono essere presenti ostacoli (come edifici, alberi, etc.) che introducono un'altra tipologia di errore sistematico nelle misure.



Figura 3. In alto a sinistra: piranometro per la misura della radiazione globale. In basso a sinistra: pireliometro per la misura della radiazione diretta. A destra: piranometro con sfera ombreggiante per la misura della radiazione diffusa. Immagine riprodotta da: [www.volker-quaschnig.de](http://www.volker-quaschnig.de).

Anche la temperatura di esercizio e l'umidità all'interno delle cupole protettive (quest'ultima controllata grazie ad una cartuccia di silica gel posta all'interno della cupola più piccola) possono essere fonte di errori nelle misure. Alla luce di queste considerazioni appare molto importante effettuare (e documentare adeguatamente) periodiche manutenzioni e calibrazioni degli strumenti, nonché sopralluoghi regolari, allo scopo di monitorare le loro effettive condizioni operative.

Nonostante la misura della radiazione solare al suolo tramite piranometri e pireliometri sia una misura piuttosto delicata rispetto ad altre misure più comunemente effettuate presso le stazioni meteorologiche (ad esempio la temperatura), se effettuata correttamente essa rappresenta una misura radiometrica di ottima accuratezza (per esempio rispetto alle misure da satellite; vedi il prossimo paragrafo). Purtroppo la relativa scarsità di stazioni radiometriche spesso limita l'effettiva rappresentatività delle misure ai soli dintorni del sito di misura. Questo è particolarmente evidente in presenza di terreno complesso (in territori montuosi), dove la variabilità spaziale della radiazione incidente al suolo è molto elevata.

### *2.3 Misure di radiazione solare da satellite*

Considerata la bassa (seppur in crescita) densità di stazioni radiometriche al suolo in molti regioni del mondo, le misure di radiazione derivate da immagini satellitari sono divenute uno strumento significativo per la valutazione della radiazione terrestre su territori estesi. Infatti, misure orarie da satellite possono presentare la stessa accuratezza di valori di radiazione interpolati a partire da misure raccolte presso stazioni distanti 25 km l'una dall'altra (questo per terreni non particolarmente complessi; Zelenka et al., 1999).

Molti algoritmi per la stima della radiazione terrestre da immagini satellitari sono stati sviluppati a partire dagli anni '80. Essi possono essere classificati in due gruppi: modelli fisici e modelli puramente empirici o statistici. I secondi si basano semplicemente sulla regressione statistica tra il dato da satellite e misure locali di radiazione al suolo, ma mancano di validità generale. I primi al contrario necessitano di una notevole mole di informazioni sullo stato dell'atmosfera e sui processi di estinzione della radiazione in essa. La maggior parte dei metodi di derivazione di misure di radiazione solare sfruttano la banda spettrale del visibile di satelliti con orbita geostazionaria (ruotanti attorno all'asse terrestre con la stessa velocità della Terra stessa), i quali offrono una risoluzione temporale (cioè l'intervallo tra scansioni successive) fino a 15 minuti e una risoluzione spaziale (cioè la dimensione dei pixel che compongono le immagini satellitari) fino a circa 1 km.

Un sensore radiometrico satellitare può osservare solo la componente della radiazione extraterrestre che viene riflessa nella sua direzione (verso lo spazio) dall'atmosfera e dalla superficie della Terra. La conoscenza della radiazione extraterrestre, della radiazione assorbita e dell'albedo della superficie terrestre può essere sfruttata per il calcolo della radiazione globale incidente sul suolo terrestre.

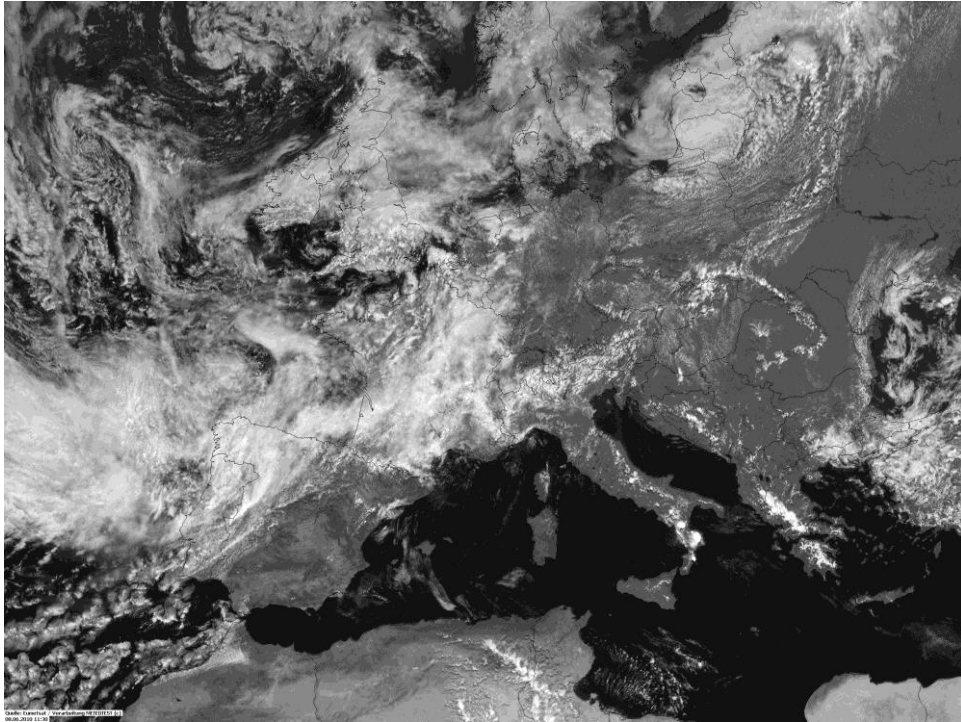


Figura 4. Esempio di immagine satellitare Meteosat Second Generation. Le aree bianche sono le superfici a maggiore riflettanza (ovvero nubi e neve), le aree nere sono superfici marine e le aree grigie sono superfici terrestri. Immagine riprodotta da: [sunba2.ba.infn.it](http://sunba2.ba.infn.it).

L'immagine satellitare misura la radianza della superficie terrestre in determinate bande spettrali (canali), la quale si modifica al variare dello stato dell'atmosfera (situazione di cielo sereno o coperto) e in base alla riflettanza della superficie terrestre (vedi un esempio riprodotto in Fig. 4). Un parametro normalizzato, il cosiddetto “*cloud index*”, è utilizzato comunemente per descrivere la nuvolosità a partire dalle misure di radianza dei radiometri satellitari:

$$n = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_c - \rho_g}$$

dove  $\rho$  è la riflettanza misurata dal satellite,  $\rho_c$  la riflettanza delle nubi (valore massimo di riflettanza, corrispondente a condizioni di cielo completamente coperto) e  $\rho_g$  la riflettanza del suolo terrestre (valore minimo di riflettanza, corrispondente a condizioni di cielo perfettamente sereno). La maggior parte degli algoritmi satellitari assume l'esistenza di una relazione lineare tra il *cloud index* e la trasmittanza atmosferica, che determina la radiazione solare incidente al suolo (Cano et al., 1986; Ineichen e Perez, 1999; Zelenka et al., 1999; Rigollier et al., 2004).

L'accuratezza delle stime di radiazione ottenute grazie ai diversi algoritmi disponibili è stata valutata da molti autori, esaminando l'accordo tra misure da satellite e misure al suolo (prese come riferimento) per diversi periodi e diverse regioni. In particolare, per misure orarie di radiazione solare globale l'accuratezza delle stime satellitari varia tra il 17% e il 25% (in termini di scarto quadratico medio). Per le stime giornaliere invece l'accuratezza è migliore, ovvero dell'ordine del 10–15%. Questo dipende dal fatto che il dato orario è fortemente modulato dalla variabilità a breve termine intrinseca della radiazione per tale risoluzione temporale, mentre il dato giornaliero lo è

meno in proporzione. Se invece si considera il dato su base annua l'accuratezza aumenta ancora e lo scarto quadratico medio si può ridurre a circa il 5% (Stöckli, 2013).

Oltre all'accuratezza, la maggiore limitazione delle misure da satellite è senza dubbio la loro risoluzione spaziale, usualmente almeno dell'ordine di alcuni chilometri, che rende particolarmente difficile riprodurre accuratamente i pattern spaziali e temporali della radiazione in presenza di terreno complesso. Inoltre, molti algoritmi di stima della radiazione da satellite non sono attualmente in grado di distinguere in maniera del tutto soddisfacente tra le aree di superficie terrestre ricoperte da neve (nebbia) e quelle coperte da nubi, ovvero si rivelano imprecisi per quanto concerne le superfici ad albedo elevata. D'altra parte, i dati satellitari permettono indubbiamente di stimare la disponibilità di radiazione per territori molto estesi e in maniera del tutto omogenea, cogliendo in maniera adeguata la variabilità spaziale e l'evoluzione temporale a scala regionale, anche in aree prive di stazioni radiometriche, come ad esempio superfici marine o aree scarsamente popolate (dove le osservazioni al suolo sono usualmente più rare).





## Capitolo 3

### Gli atlanti solari disponibili per il Trentino

In questa sezione viene inizialmente offerta una panoramica degli atlanti solari attualmente disponibili per il territorio italiano e della Provincia Autonoma di Trento (tale elenco non è da ritenersi esaustivo, in quanto esistono molti soggetti, anche privati, che offrono servizi di valutazione del potenziale solare in relazione alle sue applicazioni energetiche). Sono presentate le loro principali caratteristiche, in termini di risoluzione spaziale, periodo temporale di riferimento e tecniche di realizzazione. La loro rappresentatività è discussa in relazione alla complessità orografica caratteristica del Trentino e ai dati e ai metodi sui quali questi atlanti si basano. Infine è offerta una sintesi delle metodologie impiegate per realizzare atlanti solari, con particolare attenzione a quelle recentemente utilizzate per produrre atlanti solari ad alta risoluzione per territori ad orografia complessa, sottolineando i vantaggi e gli svantaggi offerti dall'utilizzo di dati da stazioni radiometriche al suolo o da satellite, e dalla loro integrazione.

#### *3.1 Atlante Italiano della Radiazione Solare (ENEA)*

Per il territorio trentino è attualmente disponibile tra gli altri l'Atlante Italiano della Radiazione Solare ([www.solaritaly.enea.it](http://www.solaritaly.enea.it)). L'Atlante Italiano della Radiazione Solare è stato realizzato dall'Unità Dati Bioclimatici del Dipartimento Energia dell'ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente) e pubblicato nel 2000 (Petrarca et al., 2000). Le mappe climatologiche medie mensili e annuali di radiazione globale (fornite per gli anni 1998, 1999 e per il quinquennio 1994-1999) sono state elaborate a partire dalle immagini Meteosat nella banda del visibile utilizzando l'algoritmo Heliosat sviluppato da Cano et al. (1986). Il risultato, che ha una risoluzione spaziale finale dichiarata di 7 km circa, è stato confrontato con le misure al suolo raccolte presso le stazioni dell'Ufficio Centrale per la Meteorologia dell'Aeronautica Militare Italiana e delle Rete Agrometeorologica Nazionale del Ministero per le Politiche Agricole per valutarne l'accuratezza. Per il Trentino il confronto è stato effettuato per due stazioni, Paganella (2129 m m.s.l.) e Vigalzano (539 m m.s.l.). Lo scarto assoluto medio annuo per l'intero territorio italiano è risultato dell'ordine del 6–7%, mentre lo scarto mensile per la stazione Paganella (relativo a quattro mesi del 1999) è risultato variabile tra il 5% e 27% (in media: 12%). Accanto alle mappe medie mensili (accessibili all'indirizzo [clisun.casaccia.enea.it](http://clisun.casaccia.enea.it); vedi un esempio in Fig. 5), l'Atlante offre delle tabelle di radiazione media mensile e annua per circa 1600 località italiane, tra le quali 11 località trentine: Ala, Arco, Borgo Valsugana, Cles, Levico Terme, Mezzolombardo, Mori, Pergine Valsugana, Riva

del Garda, Rovereto e Trento. È inoltre possibile scaricare tali tabelle per coordinate geografiche specificate dall'utente, anche specificando in maniera semplificata (su base mensile) la presenza di ostacoli che causano ombreggiamento, oltre alla stima della frazione di radiazione diffusa secondo tre diverse formulazioni per il calcolo della stessa. La risoluzione spaziale e l'aspetto delle mappe climatologiche mostrano chiaramente che l'informazione disponibile non riflette accuratamente la variabilità della radiazione solare a scala locale che caratterizza il territorio trentino, ma che l'informazione climatologica fornita è da ritenersi significativa solo a scala regionale.

### 3.2 Mappe di radiazione solare globale (Aeronautica Militare Italiana)

Il Reparto di Sperimentazioni di Meteorologia del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana ha realizzato nel 2012 un'analisi della climatologia della radiazione solare globale e della durata del soleggiamento per il territorio italiano, pubblicata sulla Rivista di Meteorologia Aeronautica (Vergari, 2012). Lo studio è basato sulle osservazioni raccolte presso 40 stazioni distribuite sul territorio nazionale nel periodo 1991-2010. Oltre all'analisi statistica della distribuzione dei valori medi mensili delle due variabili considerate, è stata effettuata una mappatura climatologica con il metodo di interpolazione proposto in Sandwell (1987) e utilizzando una risoluzione spaziale di circa 7–8 km (vedi esempio in Fig. 6). Nello stesso documento di presentazione dello studio è specificato che “è opportuno notare che i valori delle sfumature di colore sulla mappa debbono essere considerati rappresentativi solo per l'area circostante le stazioni. Infatti, il metodo di interpolazione utilizzato per creare un insieme di dati uniformemente distribuiti su tutto il territorio, può fornire indicazioni non veritiere sulla climatologia delle zone dove non ci sono stazioni di misura” (Vergari, 2012).

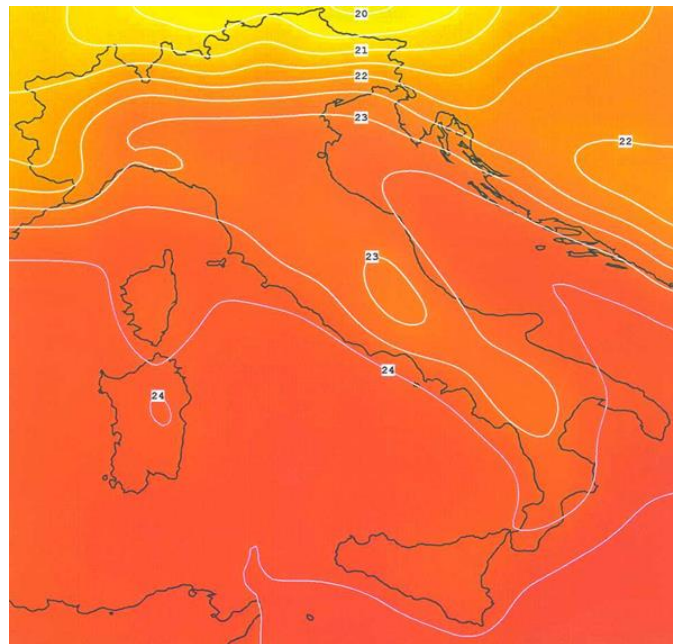


Figura 5. Atlante Italiano della Radiazione Solare: mappa della radiazione giornaliera media mensile per il mese di luglio per il quinquennio 1994-1999 (in  $\text{MJ m}^{-2}$ ). Le isolinee sono tracciate ad intervalli di  $0.5 \text{ MJ m}^{-2}$  (vedi etichette). Immagine riprodotta da: [clisun.casaccia.enea.it](http://clisun.casaccia.enea.it).

Appare evidente dall'osservazione delle mappe e della distribuzione geografica delle stazioni come per il territorio trentino non siano state utilizzate informazioni da stazioni locali, e come, anche per questo prodotto, la rappresentatività dell'informazione climatologica sia di carattere regionale e non locale, nonostante si basi su un periodo di riferimento più esteso e più significativo di quello adottato per l'Atlante Italiano della Radiazione Solare dell'ENEA.

### 3.3 *Atlante Europeo della Radiazione Solare (Commissione delle Comunità Europee)*

Il nuovo Atlante Europeo della Radiazione Solare (ESRA; Scharmer, 1994; Scharmer and Greif, 2000) rappresenta l'evoluzione del primo ESRA, che risale al 1984 (Commissione delle Comunità Europee, 1984), realizzato nell'ambito del programma JOULE II. L'Atlante è disponibile in forma di volume e di CD-ROM, contenente il database di riferimento e alcuni strumenti software per l'estrazione dei dati di radiazione forniti e la valutazione semplificata delle performance produttive di impianti solari termici e fotovoltaici ed edifici solari passivi. Il database ESRA comprende mappe di radiazione media mensile e annuale e serie temporali di radiazione e altre variabili meteorologiche (ad esempio la temperatura) per stazioni selezionate. In particolare le mappe di radiazione globale, diretta e diffusa su superficie orizzontale sono state realizzate a partire dalle misure di radiazione globale al suolo provenienti da 610 stazioni per il periodo 1981-1990.

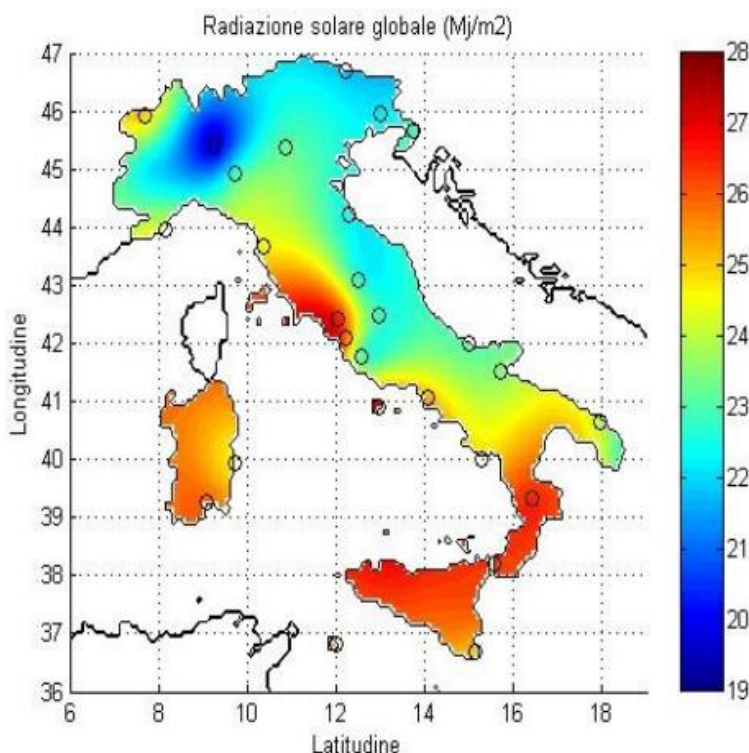


Figura 6. Mappe della radiazione giornaliera media per il mese di luglio per il periodo 1991-2010 (in MJ m<sup>-2</sup> e ore). I simboli circolari indicano la posizione delle stazioni utilizzate per la mappatura delle due variabili. Immagine riprodotta da: Vergari (2012).

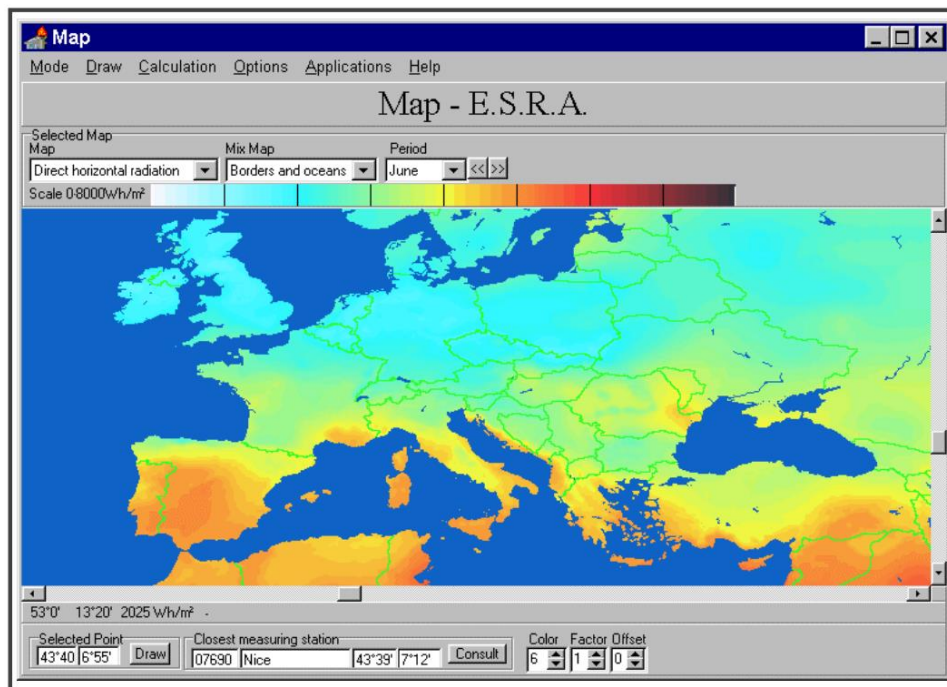


Figura 7. ESRA: esempio di mappa della radiazione diretta giornaliera media per il mese di giugno per il periodo 1981-1990 (in  $W h m^{-2}$ ). Immagine riprodotta da: Scharmer and Grief (2000).

Le mappe hanno una risoluzione spaziale di circa 10 km e sono state elaborate grazie ad un algoritmo di “co-kriging” che ha permesso di integrare i dati di radiazione al suolo con i dati di radiazione provenienti da immagini satellitari (Beyer et al., 1997) per ovviare alla mancanza o alla scarsità in alcune regioni di osservazioni da stazioni radiometriche (vedi Fig. 7). Questa risoluzione spaziale non si presta purtroppo ad una sufficientemente accurata riproduzione della distribuzione spaziale della radiazione al suolo in aree montuose come sono il Trentino e le Alpi in generale.

### 3.4 PVGIS (JRC)

Il Sistema Informativo Geografico Fotovoltaico (PVGIS), elaborato dall’Unità Energie Rinnovabili dell’Istituto per l’Energia e i Trasporti del Joint Research Centre della Commissione Europea in collaborazione con il Centre Energetique et Procedes del MINES ParisTech nell’ambito dell’azione No. 13106 SOLAREC (Photovoltaic Solar Electricity - Resource, Performance and Value), consiste in un inventario di mappe della risorsa energetica solare e del potenziale fotovoltaico per l’Europa, l’Africa e l’Asia sud-occidentale (vedi la mappa per l’Italia in Fig. 8). L’interfaccia web (disponibile all’indirizzo [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis)) consente di ottenere climatologie di radiazione globale, diretta e diffusa mensili o annuali, su superficie orizzontale o inclinata, che tengono conto degli effetti locali di ombreggiamento orografico (grazie all’integrazione del database in uno strumento GIS – Geographical Information System) per coordinate geografiche definite dall’utente.

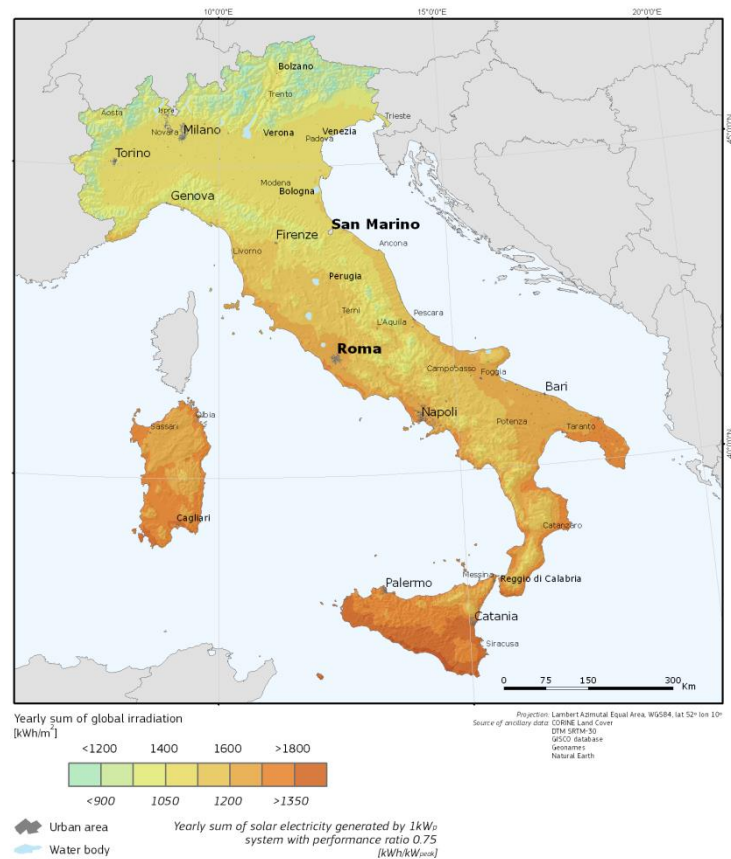


Figura 8. Database CMSAF PVGIS: mappa della radiazione globale cumulata annua su superficie orizzontale ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) e del potenziale elettrico fotovoltaico ( $\text{kWh kWp}^{-1}$ ) per un sistema con potenza nominale pari a 1 kWp e un rapporto di rendimento pari a 0.75 (moduli orizzontali), per il territorio italiano. Copyright: PVGIS © European Union, 2001-2012.

Inoltre, PVGIS è in grado di fornire una stima dell'inclinazione ottimale dei pannelli fotovoltaici e della produttività di alcune tipologie standard di moduli fotovoltaici. Per queste ragioni PVGIS è largamente utilizzato dai professionisti che operano nel settore delle energie rinnovabili. PVGIS offre due diversi database: il primo è stato elaborato a partire da dati raccolti presso 566 stazioni al suolo per il periodo 1981-1990 nell'ambito del progetto ESRA (PVGIS-3), ha una risoluzione spaziale massima di 1 km e non include le superfici marine. Il secondo (PVGIS-CMSAF), più recente, è stato prodotto a partire da misure di radiazione da satellite che coprono il periodo 1998-2011 ed ha una risoluzione massima di circa 2 km.

Come evidenziato da Huld et al. (2012), i due database possiedono non solo risoluzioni spaziali differenti, ma mostrano anche discrepanze importanti (Fig. 9), molto più rilevanti per le aree montuose come le Alpi, la Pianura Padana e i Pirenei (tra  $-27\%$  e  $+40\%$ ). In particolare, per il territorio trentino la stima della radiazione solare globale incidente al suolo è molto diversa per le due versioni: in PVGIS-3 l'irradiazione globale media annua è più bassa nelle valli principali rispetto ai rilievi e alle quote medie, mentre PVGIS-CMSAF fornisce valori relativamente più alti per i principali solchi vallivi e più bassi sui rilievi montuosi. Le differenze locali tra i due database arrivano anche a toccare valori anche pari a  $\pm 30\%$  (vedi Fig. 10). Queste differenze introducono un elevato grado di ambiguità nelle stime di radiazione offerte da PVGIS. In Huld et al. (2012) è inoltre riportato che, sulla base di un'analisi di accuratezza basata sul confronto con dati di

radiazione da stazioni al suolo, il database PVGIS-CMSAF è da considerarsi generalmente più accurato del database PVGIS-3 per quanto riguarda l'intera area di interesse (Europa e Africa), ma è anche sottolineata l'incertezza di tale affermazione relativamente alle aree costiere e caratterizzate da un'orografia complessa (come le Alpi per esempio). Le differenze tra i due database sono da imputarsi principalmente al fatto che entrambe le tipologie di misure di radiazione utilizzate presentano dei limiti: ad esempio, mentre la scarsità di stazioni radiometriche (soprattutto a quote elevate) e la caratteristica di costituire misure perfettamente puntuali implicano limiti alla rappresentatività spaziale del database PVGIS-3, i metodi basati su immagini satellitari hanno riconosciuti limiti nella distinzione tra superfici terrestri coperte da neve, nebbia o nubi.

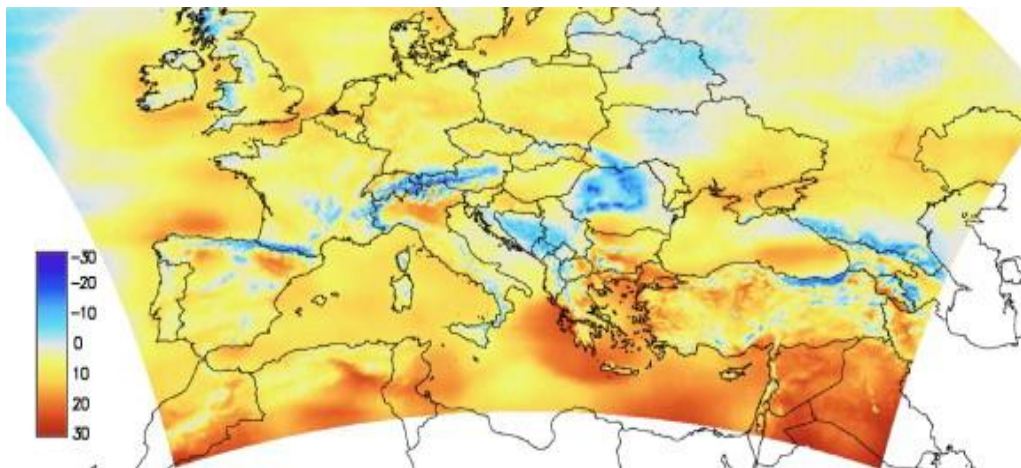


Figura 9. Differenza percentuale tra l'irradiazione media annua stimata in PVGIS-CMSAF e quella stimata in PVGIS-3 per il continente europeo. Immagine riprodotta da Huld et al. (2012).

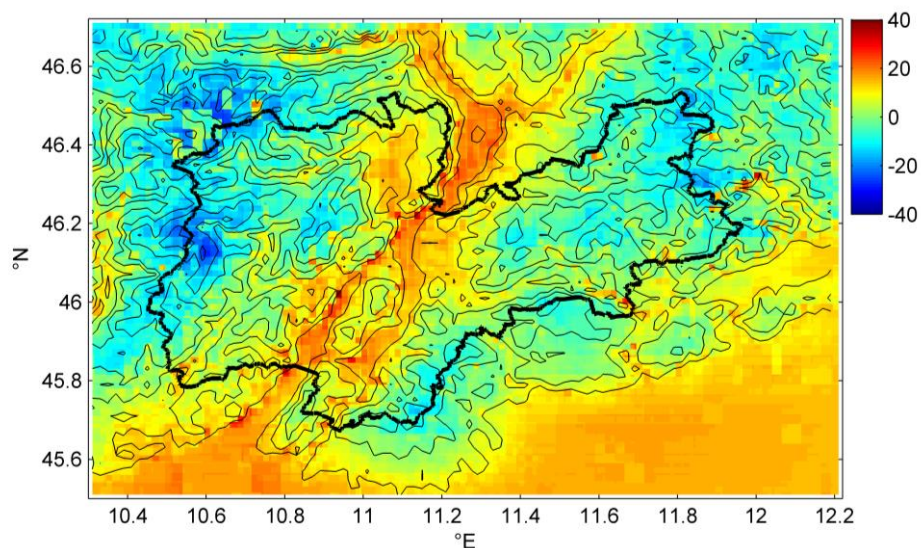


Figura 10. Differenza percentuale tra l'irradiazione media annua stimata da PVGIS-CMSAF e quella stimata da PVGIS-3 per il Trentino (confini provinciali in nero in grassetto nell'immagine). In nero (linee sottili) le curve di livello dell'orografia locale, con intervallo 200 m. Immagine elaborata a partire dai due database PVGIS (dati tratti da: [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis)).

### 3.5 I metodi per la produzione di atlanti solari

Come evidenziato dalle descrizioni riportate nei paragrafi precedenti, la varietà di metodi di realizzazione di un atlante solare (ovvero di mappe di radiazione solare) è abbastanza ampia e dipende in larga misura dai dati di partenza disponibili. In particolare gli atlanti solari si possono dividere in tre categorie: quelli realizzati a partire dai dati da stazioni radiometriche al suolo, quelli realizzati a partire da immagini satellitari e quelli che integrano le due fonti di informazione.

Come già discusso, i dati di radiazione da piranometri, nonostante presentino tipicamente un'ottima accuratezza, raramente sono sufficienti a coprire in maniera adeguata il territorio in esame, soprattutto in presenza di orografia complessa, a causa della scarsità di stazioni e della loro caratteristica di costituire osservazioni perfettamente puntuali. Pertanto la realizzazione di mappe a partire da dati al suolo richiede l'impiego di adeguate tecniche di interpolazione spaziale. Tra le più comunemente utilizzate si possono citare ad esempio i metodi geostatistici appartenenti alla famiglia del "kriging" (si veda ad esempio Zelenka et al 1992), le funzioni "spline" (Hulme et al 1995) e i metodi di media pesata basata sull'inverso della distanza tra punti. L'approccio più comunemente adottato è quello di utilizzare inizialmente un modello di radiazione solare in condizioni di cielo perfettamente sereno ("clear-sky") per la mappatura delle componenti di radiazione in tali condizioni teoriche. Lo scopo è determinare per ciascuna stazione e ciascun intervallo temporale dei coefficienti adimensionali ("clear-sky index") pari al rapporto tra le misure e i valori di radiazione teorici (massimi) modellati. A questo punto l'interpolazione è applicata alla variabile adimensionale così calcolata, consentendo di mappare la radiazione climatologica attraverso la moltiplicazione delle mappe risultanti per le mappe di radiazione massima teorica inizialmente determinate. Tra i modelli clear-sky può essere citato ad esempio il modello sviluppato nell'ambito del progetto ESRA (Scharmer and Greif, 2000). In presenza di terreno ad orografia complessa è di grande utilità l'integrazione dei modelli di radiazione clear-sky con strumenti GIS (Sistemi Informativi Geografici) e l'utilizzo di modelli digitali del terreno. I GIS permettono infatti di modellare efficientemente gli effetti di ombreggiamento orografico, di riduzione del fattore di vista del cielo e riflessione dal terreno circostante, che non sono contemplati dai modelli clear-sky semplicemente basati su relazioni astronomiche e parametrizzazioni dei fenomeni di estinzione della radiazione in atmosfera. Ad esempio, PVGIS si serve dell'integrazione del modello ESRA in GRASS GIS all'interno del modulo "*r.sun*" (Šuri and Hofierka, 2004). Si noti che l'utilizzo di metodi di interpolazione spaziale impone anche la necessità di valutare l'accuratezza del metodo scelto e del risultato ottenuto, preferibilmente attraverso il confronto con dati di radiazione indipendenti, oppure attraverso procedure di validazione incrociata.

Al contrario, gli atlanti realizzati a partire da misure di radiazione da satellite non necessitano di interpolazione spaziale delle misure, data la copertura spaziale continua tipica dell'informazione satellitare. I loro limiti principali sono invece l'accuratezza e la risoluzione spaziale. In quest'ultimo caso gli strumenti GIS possono fornire un contributo importante: infatti, attraverso analisi basate su modelli digitali del terreno, è possibile effettuare una procedura di "downscaling" (ri-campionamento a maggiore risoluzione) delle mappe di radiazione da satellite basate sull'orografia. In particolare è possibile modellare ad alta risoluzione gli effetti locali della variazione di quota, dell'ombreggiamento orografico e della riduzione del fattore di vista del cielo, determinando opportuni fattori di correzione che possono essere applicati alle mappe originali allo scopo di ottenere una risoluzione più elevata. Questa procedura è stata utilizzata per esempio per la

realizzazione dell'Atlante Solare della regione Provenza-Alpi-Costa Azzurra (PACA; Blanc et al., 2011) e nell'ambito del progetto PV-Alps ([pvalps.eurac.edu](http://pvalps.eurac.edu)), relativo al Cantone svizzero dei Grigioni e al territorio della Provincia Autonoma di Bolzano.

L'integrazione di dati da stazioni al suolo e da satellite nella realizzazione di atlanti solari può aiutare a rimuovere i limiti tipici delle due singole tipologie di informazione. Ad esempio, l'accuratezza dei dati da satellite può essere migliorata mediante una calibrazione delle mappe satellitari grazie all'utilizzo di dati indipendenti da stazioni di superficie (come è stato fatto per esempio per l'Atlante Solare PACA; Blanc et al., 2011). D'altro canto l'utilizzo della mappe di radiazione da satellite (a copertura spaziale continua) a supporto degli algoritmi di interpolazione spaziale può migliorare la rappresentatività spaziale delle mappe ottenute, specialmente per le aree non adeguatamente coperte da osservazioni di superficie come le aree montuose (vedi ad esempio la procedura di "co-kriging" effettuata per la realizzazione dell'Atlante ESRA; D'Agostino and Zelenka 1992, Beyer et al 1997). Naturalmente entrambe queste modalità di integrazione sono applicabili solo se dati di superficie e dati satellitari mostrano una buona correlazione tra loro.

Infine, un miglioramento delle stime di radiazione solare può essere conseguito tramite l'affinamento dei modelli di radiazione clear-sky, sia di quelli utilizzati per la mappatura di osservazioni al suolo sia di quelli utilizzati dagli algoritmi di analisi delle immagini satellitari. Infatti, la disponibilità di informazioni accurate e con una buona risoluzione per la torbidità atmosferica (es.: Remund et al., 2003), oppure per il contenuto di aerosol e vapore acqueo in atmosfera migliora sensibilmente l'accuratezza delle stime di radiazione solare in condizioni clear-sky, e di conseguenza le stime finali di radiazione globale, diretta e diffusa (vedi ad esempio Castelli et al., 2014).



## Capitolo 4

### L'Atlante Solare del Trentino: il progetto

#### *4.1 Origine e motivazioni del progetto*

Nel 2012 l'Osservatorio Trentino sul Clima, coordinato dal Dipartimento Protezione Civile della Provincia Autonoma di Trento, ha promosso il progetto di realizzazione dell'Atlante Climatico del Trentino. L'Atlante è composto di diversi moduli tematici, relativi alla mappatura della distribuzione climatologica di temperatura, precipitazione, radiazione solare, vento, e altre variabili. In particolare, la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino è stata affidata al Gruppo di Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento. Il controllo di qualità dei dati radiometrici è stato svolto in stretta collaborazione con l'Unità Sistema Informativo Geografico del Centro di Trasferimento Tecnologico della Fondazione E. Mach, nell'ambito delle attività collegate al progetto PICA (Piattaforma Integrata Cartografica Agri-vitivinicola; [pica.cavit.it](http://pica.cavit.it)). È importante sottolineare il fatto che la produzione di un Atlante Solare del Trentino non possiede solo una valenza climatologica e scientifica (legata agli studi idrologici e ecologici ad esempio). Esso infatti può risultare uno strumento prezioso anche per i professionisti che si occupano di energie rinnovabili e di pianificazione e progettazione di edifici sostenibili e/o energeticamente efficienti, nonché per gli agricoltori e per altre figure professionali.

La rassegna degli atlanti solari attualmente disponibili per il territorio della Provincia Autonoma di Trento (vedi Capitolo 3) ha evidenziato la mancanza di un database di radiazione solare adeguato alle applicazioni appena esposte, soprattutto per quanto concerne la risoluzione spaziale dei prodotti esistenti. Infatti, se si considera che la tipica distanza di correlazione della radiazione solare per territori montuosi simili a quello trentino è tipicamente minore di 1 km (Dubayah, 1992; Dubayah e Rich, 1995) appare evidente come nemmeno i database PVGIS risultino sufficientemente accurati. Inoltre, molti autori sottolineano il fatto che le differenze più rilevanti tra i diversi database di radiazione e atlanti solari disponibili si registrano nelle aree dove le condizioni climatiche sono più complesse, ovvero nelle aree montuose e nelle zone costiere, e dove la densità di osservazioni e di dati di input per i modelli di radiazione non è sufficiente per garantire una modellazione accurata dei fenomeni radiativi (Šúri et al., 2008; Huld et al., 2012). In tali zone gli utenti devono aspettarsi incongruità e incertezze molto rilevanti in termini percentuali tra i diversi database di radiazione disponibili. Una di queste aree è esattamente l'arco Alpino, e di conseguenza anche il territorio della Provincia di Trento (vedi Fig. 11).

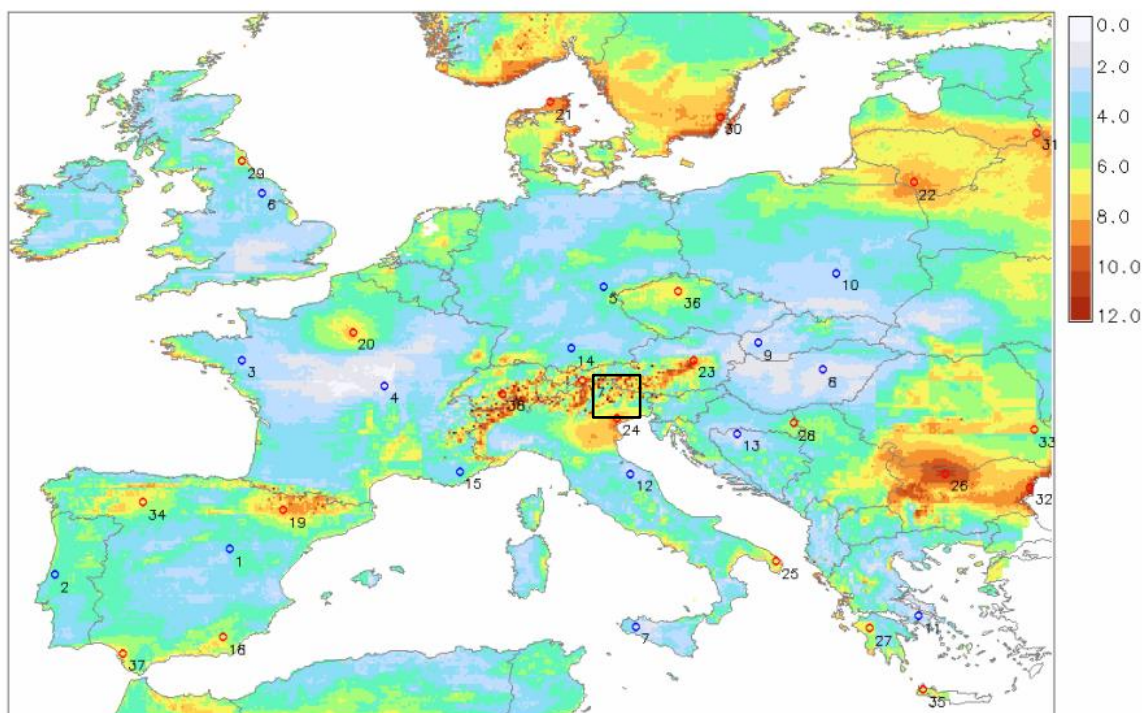


Figura 11. Deviazione standard dei valori di irradiazione globale orizzontale annuale forniti sei database diversi: l'Atlante Europeo della Radiazione Solare, PVGIS-CMSAF, Meteonorm ([meteonorm.com](http://meteonorm.com)), Satel-Light ([satel-light.com](http://satel-light.com)), HelioCliom-2 (Rigollier et al., 2004), Surface meteorology and Solar Energy della NASA ([eosweb.larc.nasa.gov/sse](http://eosweb.larc.nasa.gov/sse)). La deviazione standard, espressa in termini percentuali (%), è calcolata relativamente alla media degli stessi database. Il rettangolo nero indica la posizione della Provincia Autonoma di Trento all'interno dell'area dell'arco alpino, che è caratterizzata da una grande incertezza. Immagine riprodotta da: Šúri et al. (2008).

Vista l'importanza della conoscenza accurata della radiazione solare disponibile alla superficie terrestre la realizzazione di un Atlante Solare del Trentino ad alta risoluzione risulta di sicuro interesse per molteplici applicazioni, come discusso nei paragrafi precedenti e nel Capitolo 1.

## 4.2 La metodologia scelta per la realizzazione

La scelta della metodologia di realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino è stata effettuata principalmente sulla base della tipologia e della quantità di dati di radiazione solare disponibili per il territorio di interesse. In particolare, il Trentino dispone di una rete di stazioni radiometriche piuttosto densa (vedi Capitolo 5), perciò si è ritenuto di utilizzare come database primario le osservazioni di radiazione globale orizzontale raccolte da questa rete. Infatti, i dati di radiazione da satellite presentano in genere numerose problematiche per le aree ad orografia complessa, legati alla presenza di neve e alla difficoltà di distinguere accuratamente tra neve e nubi, e legati anche alla risoluzione spaziale (la risoluzione più elevata attualmente disponibile, circa 2 km, è infatti inadeguata alla morfologia del territorio trentino) e alla loro accuratezza. Pertanto, si è scelto di considerare eventuali dati satellitari solo in termini di database ausiliario (utilizzabile ad esempio per la stima dei dati mancanti).

La letteratura fornisce numerosi esempi di atlanti solari realizzati a partire da dati di superficie grazie a processi di interpolazione, anche per territori di complessità morfologica paragonabili a

quello di interesse. Nella realizzazione dell'Atlante Europeo della Radiazione Solare Beyer et al. (1997) hanno utilizzato un metodo di interpolazione geostatistico detto "co-kriging" che integra come informazione ausiliaria le mappe di radiazione da satellite, mentre per la costruzione del dataset PVGIS-3 (Šúri et al., 2007) è stato utilizzato un metodo di interpolazione detto "spline regolarizzate con tensione" (Neteler and Mitasova, 2002). Il database di valori di irradiazione medi mensili da 566 stazioni distribuite sull'intero continente Europeo è lo stesso per entrambi gli atlanti, e in entrambi i casi l'interpolazione non è stata applicata direttamente alle osservazioni di radiazione, bensì ai corrispondenti valori di "clearness index" ( $K_t$ ) o "clear-sky index" ( $K_c$ ), ovvero il rapporto tra la radiazione osservata e, rispettivamente, quella extraterrestre o quella attesa in condizioni di cielo perfettamente sereno, stimate grazie ad appositi modelli. In particolare, il metodo di interpolazione utilizzato per PVGIS tiene conto del fatto che  $K_c$  mostra una significativa correlazione con l'elevazione del terreno, più evidente nei mesi estivi che in quelli invernali. Altri lavori analoghi sono stati svolti da Alsamamra et al. (2009), Ruiz-Arias et al. (2011) e Antonanzas-Torres et al. (2013) per la regione spagnola dell'Andalusia (che presenta una topografia relativamente complessa), utilizzando e confrontando i metodi di interpolazione geostatistica detti "ordinary kriging", "kriging with external drift" e "residual kriging" (Goovaerts, 1997). Il "residual kriging" in particolare è stato applicato utilizzando come variabili esplicative (ovvero utilizzate per stimare il trend della variabile di interesse) la quota del terreno, il fattore di vista del cielo e la distanza dal mare. Spinoni et al. (2012) invece hanno utilizzato per la mappatura della radiazione media mensile sul territorio italiano un metodo detto "Inverse Distance Gaussian Weighting", ovvero basato sull'inverso della distanza tra stazioni e sull'assegnazione dei pesi tramite una funzione gaussiana. L'interpolazione è stata effettuata su una griglia di risoluzione 700-900 m, e solamente due delle 158 stazioni usate per questo lavoro appartengono al territorio trentino.

Alle luce delle esperienze di cui al paragrafo precedente si è deciso pertanto di utilizzare per la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino la procedura schematizzata in Fig. 12 e descritta in dettaglio di seguito.

- ✓ I dati primari di input sono rappresentati dai dati orari di radiazione globale raccolti presso le stazioni radiometriche del Trentino. Tali dati sono stati validati attentamente allo scopo di effettuare una selezione accurata delle stazioni da utilizzare, e in modo da avere serie temporali di dati sufficientemente lunghe (ovvero una base climatologica significativa) ma allo stesso tempo una rete di stazioni molto più densa di quella utilizzata negli atlanti già disponibili.
- ✓ I dati orari di partenza sono stati inizialmente aggregati in valori di irradiazione (cumulata) giornaliera. Eventuali dati giornalieri mancanti sono stati stimati grazie all'utilizzo di dati di radiazione da immagini satellitari (nello specifico appartenenti il database HelioMont; Stöckli, 2013). Sono stati poi calcolati i valori medi mensili di irradiazione giornaliera per ciascuna delle stazioni selezionate per il periodo climatologico di riferimento determinato per l'Atlante.
- ✓ Per la stima ad alta risoluzione della radiazione teorica massima al suolo è stato utilizzato un modello clear-sky di radiazione in grado di riprodurre non solo i fattori astronomici, ma anche gli effetti dell'orografia locale e la variabilità spaziale indotta dalla stessa. Nello specifico è stato utilizzato il modulo *r.sun* di GRASS GIS (Hofierka e Šúri, 2002), ovvero un modello di radiazione integrato in uno strumento GIS. I dati di input utilizzati in *r.sun*

sono un DTM (modello digitale del terreno) ad alta risoluzione, e 12 mappe medie mensili di albedo superficiale e torbidità atmosferica. Per queste ultime si è preferito utilizzare database “locali” ricavati *ad hoc* per il presente progetto, invece che fonti di informazione più ampiamente riconosciute ma non sviluppate appositamente per l’area di interesse e di risoluzione minore.

- ✓ La mappatura ad alta risoluzione dell’irradiazione giornaliera media mensile è stata effettuata separatamente per ogni mese ed è consistita nell’interpolazione dei valori climatologici mensili di  $K_c$  calcolati per le singole stazioni. Sono stati applicati alcuni metodi geostatistici appartenenti alla famiglie del “kriging”, ed è stata verificata l’esistenza di trend legati alla quota del terreno e ad altri parametri morfologici (dedotti dall’analisi del DTM) e alle coordinate geografiche. La scelta finale del metodo di interpolazione è stata effettuata sulla base di un’analisi comparativa tra più opzioni, grazie ad un’analisi di validazione incrociata.
- ✓ Il prodotto finale della mappatura è costituito da 12 mappe di irradiazione giornaliera media mensile e da una mappa di irradiazione media annua, ottenuta dalla combinazione delle mappe mensili. La risoluzione finale scelta per le mappe dell’Atlante Solare del Trentino è pari a 200 m, un valore che è sembrato adeguato alla complessa morfologia dell’area, oltre che vicino alla risoluzione scelta per molti atlanti solari di recente realizzazione (vedi l’Atlante Solare PACA e il progetto PV-Alps).

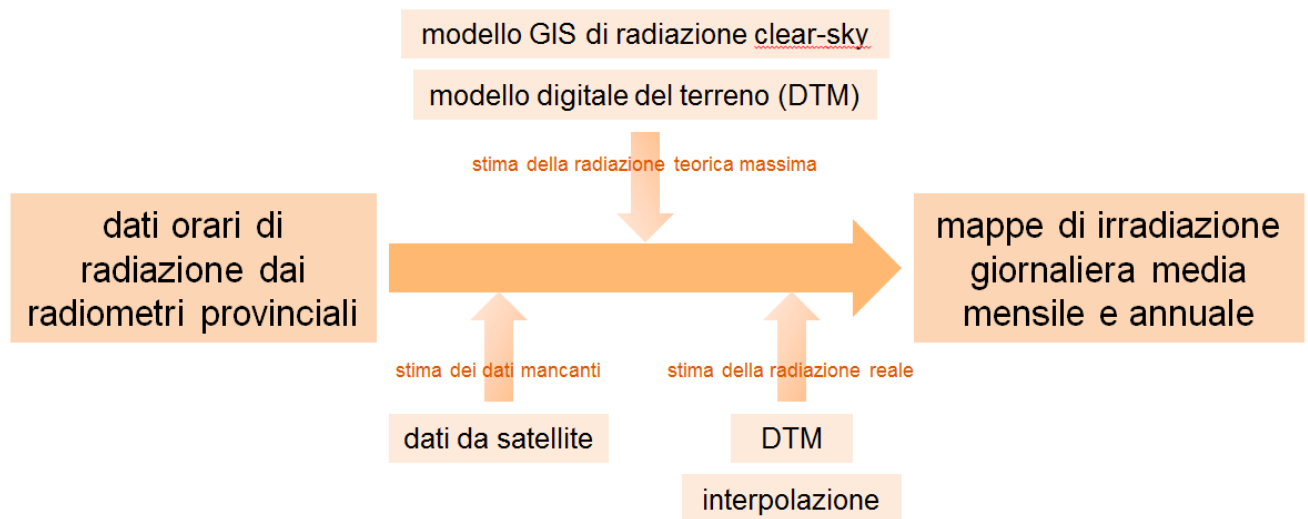


Figura 12. Rappresentazione schematica della metodologia utilizzata per la realizzazione dell’Atlante Solare del Trentino. I diversi passaggi logici e operativi sono riportati nello schema, assieme ai dati di partenza necessari per il progetto e ai risultati attesi per ogni passo intermedio.

## Capitolo 5

### La rete radiometrica del Trentino

#### *5.1 Descrizione della rete radiometrica del Trentino*

Il territorio della Provincia Autonoma di Trento è situato sul versante meridionale della catena delle Alpi orientali, e comprende parte delle Prealpi Lombarde e Venete (a sud), che si elevano immediatamente a nord della Pianura Padana, e (a nord) parte delle Alpi Retiche e delle Dolomiti. La regione del Trentino ha una superficie complessiva di 6212 km<sup>2</sup>, pressoché completamente montuosa ad esclusione delle piccole aree pianeggianti corrispondenti ai fondovalle percorsi dai maggiori corsi d'acqua, e dalla morfologia decisamente eterogenea e complessa, con quote che variano tra 65 m s.l.m. (Lago di Garda) e 3764 m s.l.m. (Monte Cevedale). Di conseguenza il clima locale risulta anch'esso molto eterogeneo, spaziando dal tipico clima Alpino che caratterizza le aree più elevate, al clima sub-continentale delle valli minori, al clima sub-mediterraneo che si incontra nell'area gardesana. Questa grande variabilità su di una regione di estensione limitata implica in teoria la necessità di un elevato numero di stazioni meteorologiche, ai fini del monitoraggio esaustivo delle condizioni meteo-climatiche in Trentino, relativamente alla radiazione solare e alle altre variabili meteorologiche.

La rete dei radiometri presenti sul territorio del Trentino, la cui distribuzione geografica è riportata in Fig. 13, è sicuramente molto fitta. Il numero di stazioni attive nel periodo 1987-2012 è pari a 130, con 104 stazioni attualmente attive (dato aggiornato al 31 dicembre 2012). Le stazioni sono gestite da tre diversi enti: l'ufficio meteorologico della Provincia Autonoma di Trento, Meteotrentino (26 stazioni), la Fondazione Edmund Mach (77 stazioni, delle quali 21 di primo livello, 47 di secondo livello e 9 ex-forestali) e l'Università di Trento (una stazione); in Fig. 13 le diverse istituzioni sono rappresentate con diversi colori (arancio, giallo e nero rispettivamente). L'elenco completo delle stazioni che sono (state) in attività sul territorio trentino è riportato in Tab. 1, assieme alle loro caratteristiche principali, quali nome della stazione, coordinate geografiche ed altimetriche, ente gestore e periodo di attività. Da notare il fatto che la posizione di installazione di alcune delle stazioni è stata spostata nel corso degli anni; pertanto queste serie temporali non si possono a priori considerare come un'unica serie temporale omogenea, quanto piuttosto come due serie diverse e sono state di conseguenza riportate nella tabella come due diverse stazioni. Le stazioni interessate da queste circostanze sono nello specifico: Ala, San Michele all'Adige, Levico, Malè, Ala (Ronchi), Tione, Torbole, Passo Brocon e Peio (vedi Tab. 1).

I radiometri, soprattutto quelli appartenenti alla rete agrometeorologica della Fondazione Mach, si concentrano principalmente nei maggiori solchi vallivi, dove le attività agricole e la densità

abitativa maggiore hanno giustificato negli anni l'installazione di nuove stazioni e l'intensificazione dell'attività osservativa. In particolare, la densità della rete nella Valle dell'Adige è davvero molto alta. Al contrario, le stazioni di Meteotrentino sono situate anche a quote decisamente più elevate oltre che scarsamente abitate. Risulta però evidente la totale assenza di siti di misura in alcune aree, ad esempio nella regione della catena montuosa del Lagorai, poco accessibile e poco popolata. Senza dubbio, la manutenzione necessaria ad assicurare il corretto funzionamento delle stazioni radiometriche (e più in generale delle stazioni meteorologiche) in zone d'alta quota è piuttosto dispendiosa e presenta difficoltà operative non indifferenti. Queste considerazioni, oltre alle finalità legate all'agricoltura menzionate sopra, contribuiscono a spiegare la non omogeneità della distribuzione spaziale delle stazioni radiometriche trentine.

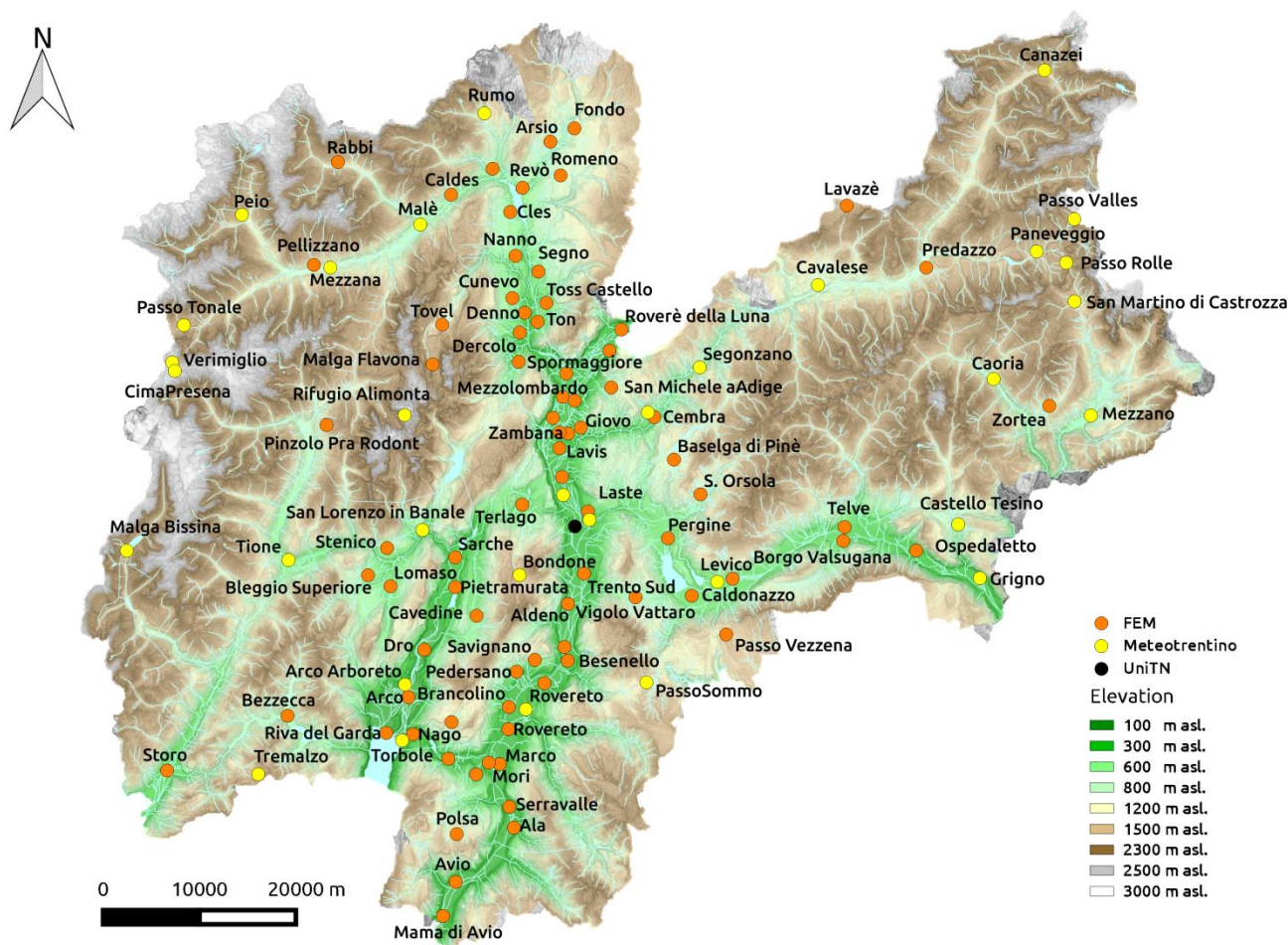


Figura 13. Mappa dell'elevazione del territorio della Provincia Autonoma di Trento (vedi legenda). Sono riportate le posizioni e i nomi di tutte le stazioni meteorologiche presso le quali sono (state) raccolte misure di radiazione nel periodo 1987-2012. In arancione le stazioni gestite dalla Fondazione Edmund Mach, in giallo le stazioni di Meteotrentino, in nero la stazione gestita dall'Università di Trento. Per gentile concessione di D. Andreis e F. Zottele.

Tabella 1. Elenco completo delle stazioni radiometriche in Trentino nel periodo 1987-2012. La tabella riporta le informazioni principali, quali ID, nome, ente gestore, coordinate geografiche e periodo di attività della singola stazione.

FEM sta per Fondazione E. Mach, UniTN si riferisce all'Università di Trento e Meteot. indica Meteotrentino. Le stazioni FEM sono inoltre suddivise in stazioni di primo livello (FEM-1), di secondo livello (FEM-2) e ex-forestali (FEM-f).

<i>Generalità della stazione</i>				<i>Coordinate geografiche</i>			<i>Periodo di attività</i>	
<i>ID</i>	<i>ID orig.</i>	<i>Nome</i>	<i>Ente</i>	<i>Lat.</i>	<i>Lon.</i>	<i>Quota</i>	<i>Inizio</i>	<i>Fine</i>
1	30	Ala	FEM-1	45.78615	11.02383	171.76	2003-11-06	2012-12-31
2	30	Ala	FEM-1	45.78331	11.01334	175.65	1987-01-01	2001-01-24
3	59	Aldeno	FEM-2	45.99386	11.10391	183.05	2012-01-26	2012-12-31
4	29	Arco	FEM-1	45.9104	10.88716	84.08	1987-01-01	2012-12-31
5	43	Arsio	FEM-2	46.42585	11.09662	799.7	2011-07-05	2012-12-31
6	51	Avio	FEM-2	45.73685	10.94433	131.28	2005-04-22	2005-04-22
7	39	Banco Casez	FEM-2	46.37104	11.06149	592.59	2011-11-11	2011-12-06
8	24	Baselga di Piné	FEM-1	46.12584	11.25129	983.25	1998-07-29	2012-12-31
9	50	Besagno	FEM-2	45.83679	10.97535	382.44	2011-07-12	2012-12-31
10	77	Besenello	FEM-2	45.94085	11.10156	180	2000-01-26	2012-12-31
11	85	Bezzecca	FEM-1	45.89566	10.72504	705.15	2001-11-07	2012-12-31
12	80	Bleggio Superiore	FEM-2	46.02521	10.8368	644.11	2012-10-30	2012-12-31
13	28	Borgo Valsugana	FEM-1	46.04519	11.47508	419.66	1987-01-01	2012-12-31
14	78	Brancolino	FEM-2	45.89895	11.02117	173.3	2012-02-23	2012-12-31
15	88	Caldes	FEM-1	46.37863	10.96086	772.51	2001-10-22	2012-12-31
16	66	Caldonazzo	FEM-2	45.99825	11.2699	466.7	2005-04-22	2012-12-31
17	83	Cavedine	FEM-1	45.985	10.98101	552.34	2001-10-19	2012-12-31
18	44	Cembra	FEM-2	46.16603	11.22639	549.83	2011-07-27	2012-12-31
19	31	Cles	FEM-1	46.36117	11.03996	655.81	1987-01-01	2012-12-31
20	46	Cognola	FEM-2	46.07964	11.13395	345.36	2006-10-30	2012-12-31
21	37	Coredo	FEM-2	46.3444	11.08585	793.93	2012-05-21	2012-05-21
22	36	Cunevo	FEM-2	46.28075	11.03987	552.08	2011-07-14	2012-12-31
23	25	Denno	FEM-1	46.26673	11.05605	323.69	1998-07-29	2012-12-31
24	34	Dercolo	FEM-2	46.24852	11.04868	416.28	2011-07-14	2012-12-31
25	54	Dro	FEM-2	45.95448	10.91004	113.49	1999-12-14	2012-12-31
26	22	Faedo (Maso Togn)	FEM-1	46.19476	11.16978	695.51	1998-07-29	2012-12-31
27	84	Fondo	FEM-1	46.4377	11.12964	917.92	2001-10-22	2012-12-31
28	76	Gardolo	FEM-2	46.11258	11.10047	197.28	2011-08-09	2012-12-31
29	94	Giovo Bosch	FEM-2	46.15818	11.12745	630.01	2011-07-18	2012-12-31
30	19	Lavazé	FEM-f	46.35823	11.49407	1806.98	2001-11-28	2012-12-31
31	97	Lavis	FEM-2	46.13939	11.09789	216.1	2011-10-31	2012-12-31
32	52	Levico	FEM-2	46.01302	11.32528	448.61	2011-09-22	2012-12-31
33	79	Livo	FEM-2	46.40199	11.0178	719.97	2011-10-13	2012-12-31
34	23	Lomaso	FEM-1	46.01447	10.8668	491.66	1998-07-29	2012-12-31
35	62	Loppio	FEM-2	45.85206	10.93855	212.9	2011-10-27	2012-12-31
36	89	Malga Flavona	FEM-1	46.22073	10.93042	2005.56	2012-07-17	2012-12-31
37	65	Mama di Avio	FEM-2	45.70529	10.92645	124.46	2004-03-24	2012-12-31
38	64	Marco	FEM-2	45.84589	11.00703	157.82	2012-02-15	2012-12-31
39	45	Mezzocorona (Novali)	FEM-2	46.20903	11.10988	216.16	2011-07-25	2012-12-31
40	72	Mezzocorona (Piovi Veci)	FEM-2	46.22924	11.1688	208.36	2001-04-09	2012-12-31

41	58	Mezzolombardo	FEM-2	46.18728	11.10443	203.34	1999-04-19	2012-12-31
42	49	Mori	FEM-2	45.84742	10.99257	188.29	2012-02-20	2012-12-31
43	55	Nago	FEM-2	45.87577	10.89224	222.91	2006-09-25	2012-05-21
44	38	Nanno	FEM-2	46.32004	11.04552	567.22	2011-07-13	2012-12-31
45	71	Nave San Rocco	FEM-2	46.1679	11.09027	200.82	2011-09-15	2012-12-31
46	60	Nomi	FEM-2	45.95372	11.09773	179.02	2006-07-02	2012-12-31
47	68	Ospedaletto	FEM-2	46.0341	11.57245	285.61	2012-02-23	2012-12-31
48	8	Paneveggio	FEM-f	46.30951	11.74752	1542.71	1987-06-02	2012-12-31
49	12	Passo Vezzena	FEM-f	45.96117	11.31444	1368.34	1997-11-26	2012-12-31
50	48	Pedersano	FEM-2	45.93182	11.03267	465.66	2005-04-22	2012-12-31
51	73	Pellizzano	FEM-2	46.3162	10.77364	985.96	1999-07-01	2012-12-31
52	67	Pergine	FEM-2	46.05256	11.24022	458.21	2005-04-22	2012-12-31
53	69	Pietramurata	FEM-2	46.01211	10.9536	242.39	2012-02-06	2012-12-31
54	11	Pinzolo Prà Rodont	FEM-f	46.16648	10.7858	1497.85	1997-12-16	2012-12-31
55	13	Polsa	FEM-f	45.78151	10.94726	1310.42	1994-01-01	2012-12-31
56	87	Predazzo	FEM-1	46.29785	11.59826	1001.18	2001-12-07	2012-12-31
57	96	Pressano	FEM-2	46.15305	11.11015	289.17	2011-09-16	2012-12-31
58	14	Rabbi	FEM-f	46.41175	10.80911	1443.69	1992-11-26	2012-12-31
59	41	Revo	FEM-2	46.38345	11.05744	618.91	2011-06-30	2012-12-31
60	15	Riva del Garda	FEM-f	45.87751	10.85645	66.24	1990-05-15	2012-12-31
61	47	Romagnano	FEM-2	46.01123	11.11547	183.93	2006-11-02	2012-05-21
62	74	Romeno	FEM-2	46.3941	11.10928	913.95	1999-05-04	2012-12-31
63	21	Ronzo Chienis	FEM-1	45.8862	10.94417	957.18	1998-07-29	2012-12-31
64	57	Roveré della Luna	FEM-2	46.24865	11.18555	208	2004-10-28	2012-12-31
65	26	Rovereto	FEM-1	45.87825	11.0197	170.45	1998-07-29	2012-12-31
66	27	San Michele all'Adige	FEM-1	46.1835	11.12022	203.17	2008-05-09	2012-12-31
67	27	San Michele all'Adige	FEM-1	46.18932	11.13442	204.23	1987-01-01	2008-05-09
68	53	S. Orsola	FEM-2	46.09272	11.28556	791.87	2006-10-18	2012-12-31
69	91	Sarche	FEM-2	46.03992	10.95444	248	2011-09-26	2012-12-29
70	18	Savignano	FEM-f	45.94233	11.05757	686.35	2001-11-27	2012-12-31
71	40	Segno	FEM-2	46.30481	11.07596	525.29	2011-07-06	2012-12-31
72	63	Serravalle	FEM-2	45.80579	11.01848	149.52	2011-09-06	2012-12-31
73	35	Spormaggiore	FEM-2	46.22104	11.04612	550.36	2011-09-12	2012-12-31
74	90	Stenico	FEM-2	46.05017	10.86326	662.2	2012-11-05	2012-12-31
75	82	Storo	FEM-1	45.84676	10.56244	385.14	2002-08-18	2012-12-31
76	81	Telve	FEM-1	46.05805	11.47749	411.91	2002-08-15	2012-12-31
77	70	Terlago	FEM-2	46.08762	11.0461	427.95	2002-08-08	2012-12-31
78	33	Ton	FEM-2	46.25803	11.073	442.62	2005-04-22	2012-12-31
79	95	Toss (Castello)	FEM-2	46.27538	11.08557	512.38	2010-06-01	2012-12-31
80	7	Tovel	FEM-f	46.25768	10.94462	1179.01	2010-05-17	2012-12-31
81	32	Trento Sud	FEM-1	46.02182	11.12642	184.54	1987-01-01	2012-12-31
82	86	Vigolo Vattaro	FEM-1	45.99832	11.19465	706.13	2002-11-06	2012-12-31
83	61	Volano	FEM-2	45.92037	11.06958	174.98	2000-01-25	2003-01-22
84	56	Zambana	FEM-2	46.15413	11.09863	200.68	2012-02-23	2012-12-31
85	75	Zortea	FEM-2	46.16501	11.75745	1034.68	2000-03-30	2012-12-31
86	-	Molino Vittoria	UniTN	46.066	11.116	192.99	2002-06-29	2012-12-31
87	T0008	Paneveggio	Meteot.	46.30952	11.74751	1542.79	2000-07-20	2012-12-31



88	T0010	Levico	Meteot.	46.01075	11.30493	502.48	2004-08-17	2005-03-24
89	T0010	Levico	Meteot.	46.01056	11.30491	501.36	2005-04-07	2012-12-31
91	T0071	Mezzana	Meteot.	46.3134	10.79583	905.18	2011-11-03	2012-12-31
93	T0074	Malé	Meteot.	46.35507	10.91613	736	2012-06-19	2012-08-01
94	T0074	Malé	Meteot.	46.3516	10.91841	723.65	2012-06-19	2012-12-31
96	T0103	Passo Rolle	Meteot.	46.29797	11.78697	2011.69	2011-11-30	2012-12-31
97	T0104	Passo Valles	Meteot.	46.33839	11.79979	2035.35	2011-11-23	2012-12-31
98	T0115	Segonzano	Meteot.	46.21127	11.28942	659.69	2011-11-03	2012-12-31
99	T0118	Cembra	Meteot.	46.17063	11.21802	651.52	2011-11-03	2012-12-31
100	T0129	Trento (Laste)	Meteot.	46.07185	11.13565	308.35	2003-01-24	2012-12-31
102	T0135	Trento (Roncafort)	Meteot.	46.09563	11.10128	192.83	2012-02-15	2012-12-31
105	T0147	Rovereto	Meteot.	45.89644	11.04379	205.97	2011-11-03	2012-12-31
106	T0153	Ala (Ronchi)	Meteot.	45.73937	11.06579	701.08	2004-06-30	2004-11-04
107	T0153	Ala (Ronchi)	Meteot.	45.73924	11.06536	692.18	2004-06-30	2007-05-11
110	T0179	Tione	Meteot.	46.02778	10.72559	577.77	2011-11-03	2012-05-17
111	T0179	Tione	Meteot.	46.04113	10.73088	535.46	2011-11-03	2012-12-31
112	T0193	Torbole	Meteot.	45.88239	10.8826	74.34	2012-07-04	2012-08-01
113	T0193	Torbole	Meteot.	45.87017	10.87754	91.75	2012-07-04	2012-12-31
114	T0322	Arco (Arboreto)	Meteot.	45.92227	10.88304	113.65	2004-05-31	2012-08-08
115	T0327	Bondone	Meteot.	46.0219	11.03988	1549.59	2004-08-18	2012-12-31
116	T0354	Tremalzo	Meteot.	45.84166	10.68414	1561.6	1988-01-07	2012-12-31
117	T0355	Passo Brocon	Meteot.	46.11673	11.65967	1607.56	1988-01-09	2011-12-15
118	T0355	Passo Brocon	Meteot.	46.11659	11.6629	1608.3	2011-12-15	2011-12-15
119	T0360	Passo Tonale	Meteot.	46.26251	10.59682	1877.84	1987-11-27	2006-02-21
120	T0364	Verimiglio	Meteot.	46.22799	10.58013	2723.26	2000-07-17	2012-02-13
121	T0365	CimaPresena	Meteot.	46.21996	10.58345	3009.66	1996-05-15	2006-07-11
122	T0366	Peio	Meteot.	46.36445	10.67821	1584.95	2011-11-03	2012-12-03
123	T0366	Peio	Meteot.	46.36445	10.67821	1584.9	2012-12-03	2012-12-31
124	T0367	Cavalese	Meteot.	46.28478	11.45171	958.23	1999-11-04	2012-12-31
125	T0369	PassoSommo	Meteot.	45.91869	11.20608	1359.96	1999-08-05	2012-12-31
126	T0372	Vioz	Meteot.	46.38383	10.63158	2979.09	2002-10-01	2006-09-24
127	T0373	Daone (Malga Bissina)	Meteot.	46.05293	10.51419	1785.62	2002-10-03	2012-12-31
128	T0375	Marmolada	Meteot.	46.4446	11.8638	2650.09	2002-09-10	2003-04-18
130	T0414	San Lorenzo in Banale	Meteot.	46.06626	10.91133	686.05	2012-02-16	2012-12-31
131	T0417	Rumo (Lanza)	Meteot.	46.45391	11.00853	1108.73	2012-03-14	2012-12-31
132	T0420	Mezzano	Meteot.	46.15461	11.81282	642.18	2011-11-17	2012-12-31
133	T0421	Caoria	Meteot.	46.19188	11.68384	805.64	2011-11-03	2012-12-31
134	T0423	Grigno	Meteot.	46.00641	11.65652	236.95	2011-11-03	2012-12-31
135	T0436	Ragoli	Meteot.	46.17397	10.89117	2574.9	2009-03-31	2012-11-27
136	T0437	Canazei	Meteot.	46.47832	11.76685	1468.66	2012-03-28	2012-12-31
137	T0450	San Martino di Castrozza	Meteot.	46.2616	11.79625	1471.18	2011-11-15	2012-12-31
138	T0469	Castello Tesino	Meteot.	46.05718	11.62991	800.03	2011-11-03	2012-12-31

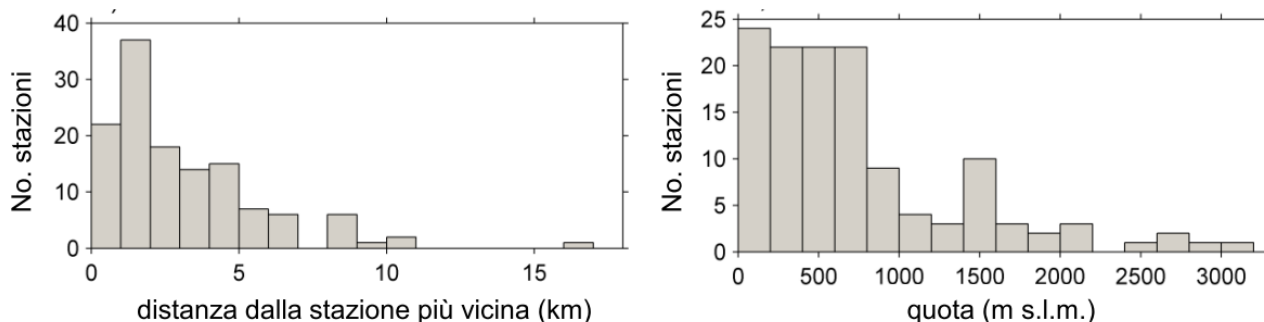


Figura 14. L'istogramma a sinistra mostra la distribuzione di frequenza della distanza tra ogni stazione radiometrica e la rispettiva stazione più vicina. L'istogramma di destra mostra invece la distribuzione altimetrica delle stazioni radiometriche trentine.

Figura 14 mostra invece la distribuzione della distanza tra ogni stazione e la stazione immediatamente più vicina e la distribuzione altimetrica generale dell'intera rete di misura. La distanza media tra stazioni prossime è molto ridotta (circa 3 km), mentre, come accennato sopra, la distribuzione altimetrica evidenzia una relativa scarsità di stazioni già alle quote superiori ai 1000 m s.l.m., che diventa sempre più grave per le quote maggiori.

## 5.2 Descrizione del database di radiazione

La copertura temporale delle misure di radiazione disponibili per il Trentino è illustrata graficamente dal diagramma di Gantt in Fig. 15. A partire dal 01-01-1987 il numero delle stazioni ha iniziato ad aumentare dapprima lentamente, per poi accelerare dal 1998 al 2007, e subire un ulteriore incremento molto significativo dal 2010. Nel frattempo alcune (poche) stazioni sono state dismesse. Il grafico di sinistra in Fig. 16 riassume le informazioni sul numero di serie di dati effettivamente disponibili anno per anno. Sono chiaramente riconoscibili i momenti di maggiore espansione e di relativa stasi della numerosità della rete radiometrica citati sopra. La distribuzione di frequenza dell'estensione temporale (lunghezza) delle serie di dati di radiazione associata a questa evoluzione è mostrata dall'istogramma a destra in Fig. 16. Risulta evidente che la base climatologica per l'elaborazione dell'Atlante Solare del Trentino non può avere un'estensione ventennale, a causa dell'esiguo numero di stazioni che assicurano questa copertura temporale, cioè solo 12, mentre la maggior parte delle serie presenta lunghezze minori di 5 anni. Per un territorio complesso come quello del Trentino, il numero di stazioni considerate dovrebbe necessariamente essere più alto, di modo che anche la loro distribuzione geografica e per classi di quota altimetrica sia quanto più possibile rappresentativa della eterogenea natura del territorio. Verosimilmente quindi il periodo di riferimento per l'Atlante potrebbe risultare dell'ordine di 10 anni circa.

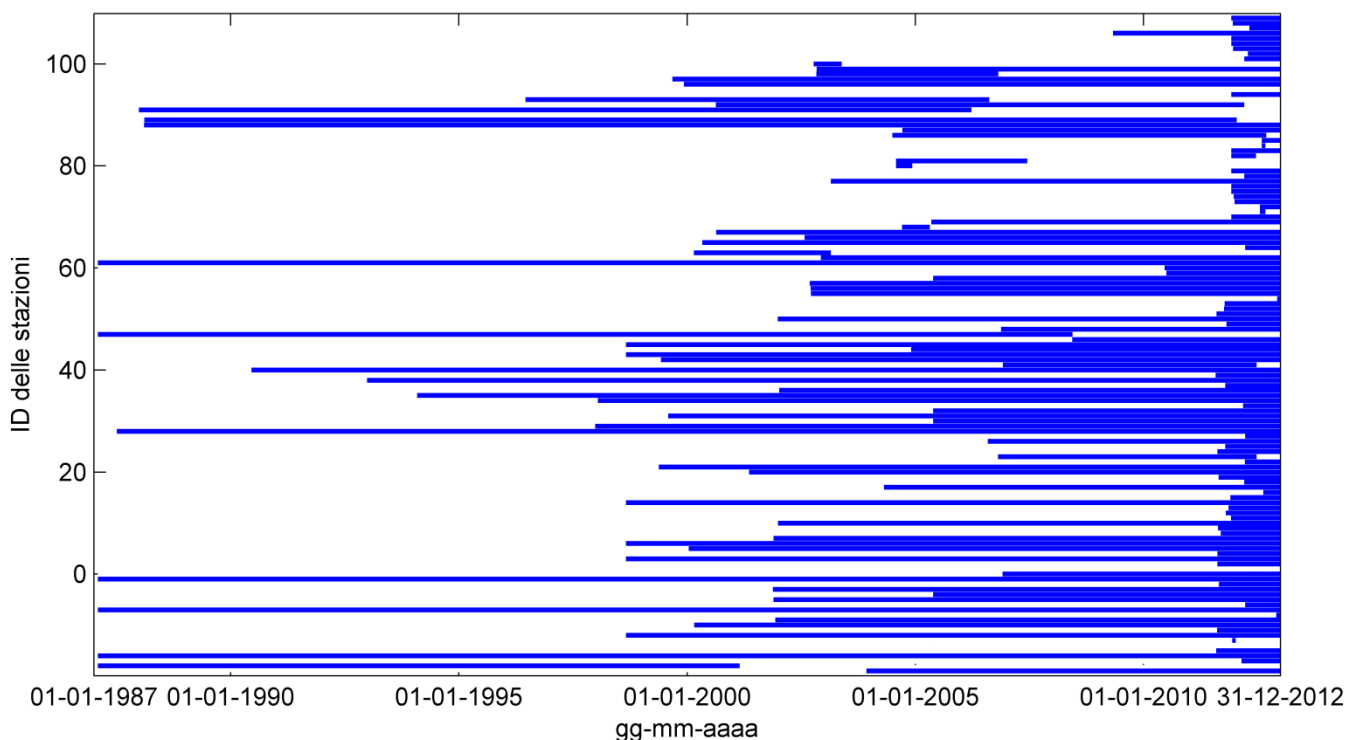


Figura 15. Da sostituire con un grafico che non presenta anche la qualità del dato ma solo la lunghezza della serie di riferimento.

I dati registrati dai radiometri che compongono la rete provinciale sono originariamente disponibili come:

- ✓ valori cumulati di irradiazione globale orizzontale ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) con risoluzione pari a 15 min (stazioni gestite da Meteotrentino),
- ✓ valori orari di irradiazione globale orizzontale ( $\text{MJ m}^{-2}$ ; stazioni gestite dalla Fondazione E. Mach),
- ✓ valori medi di irradianza globale orizzontale ( $\text{W m}^{-2}$ ) con risoluzione pari a 10 min (stazione gestita dall'Università di Trento).

Per quanto concerne la tipologia di piranometri installati presso le diverse stazioni della Fondazione Mach, piranometri a termopila Kipp & Zonen mod. CM6B (prima classe a norma ISO9060) sono installati presso le stazioni di primo livello, mentre piranometri a cella di silicio Davis e MTX (seconda classe a norma ISO9060) sono installati presso le stazioni cosiddette ex-forestali (indicativamente corrispondenti alle stazioni poste a quote superiori ai 1000 m) e le stazioni di secondo livello (vedi Tab. 1). Le stazioni di Meteotrentino invece sono equipaggiate con piranometri a cella di silicio Metex (seconda classe a norma ISO9060), mentre la stazione urbana Molino Vittoria gestita dall'Università di Trento monta anch'essa un piranometro Kipp & Zonen mod. CM6B (prima classe a norma ISO9060).

Infine, i dati con diverse risoluzioni temporali originarie (intervalli sub-orari) e diverse unità di misura sono stati omogeneamente trasformati e aggregati in maniera appropriata dove necessario come valori cumulati orari di irradiazione globale, espressi pertanto in  $\text{MJ m}^{-2}$ . La convenzione di riferimento utilizzata è quella standard, che prevede l'assegnazione ad ogni ora del valore cumulato relativo all'intervallo orario precedente (approccio di tipo "backward").

Secondo questa convenzione il dato etichettato con l'orario "01:00" corrisponde alla misura relativa all'intervallo temporale 00:01 e 01:00 LST (UTC+1). L'insieme di tutte le serie temporali di dati di radiazione così ottenute ha costituito il database di partenza per le elaborazioni e le analisi successivamente effettuate ai fini della realizzazione dell'Atlante.

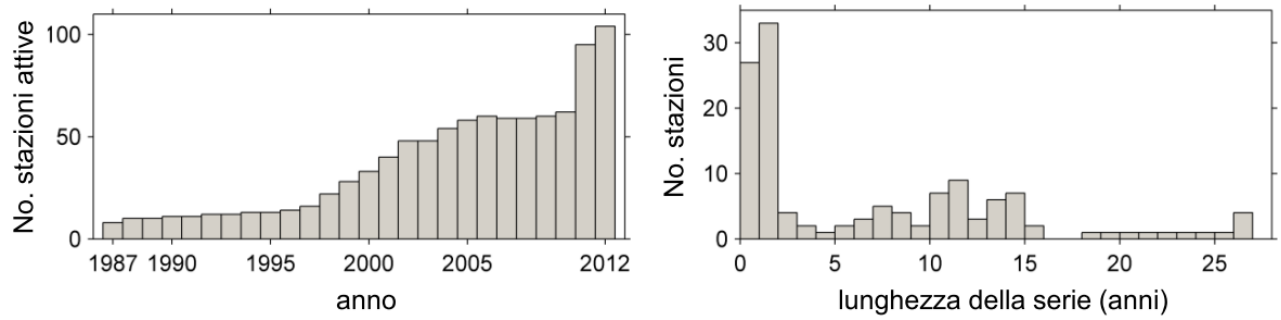


Figura 16. Il grafico a barre del pannello di sinistra mostra l'andamento nel tempo del numero di serie di dati disponibili per ogni anno tra il 1987 e il 2012. L'istogramma a destra invece mostra la distribuzione della lunghezza temporale delle serie di dati di radiazione disponibili.

## Capitolo 6

### Il controllo di qualità delle misure di radiazione

Come anticipato nel Capitolo 2, le misure di radiazione globale al suolo raccolte tramite l'utilizzo di piranometri sono prone a molteplici tipologie di errore. Tali errori possono essere dovuti al malfunzionamento dello strumento o del sistema di acquisizione, o ad un'installazione non appropriata dello strumento, oppure anche a cause esterne e alle condizioni operative. Al fine di identificare la presenza di misure errate sono stati sviluppati molteplici criteri di controllo automatico mediante i quali verificare la plausibilità e la correttezza del segnale misurato rispetto ad alcune proprietà che il segnale corretto dovrebbe teoricamente soddisfare. In generale i criteri di controllo di qualità per i dati di radiazione possono prendere in considerazione diversi aspetti:

- ✓ la fisica dei processi radiativi,
- ✓ la variabilità temporale tipica delle osservazioni (identificata da opportune grandezze statistiche),
- ✓ la correlazione spaziale tra osservazioni simultanee raccolte presso stazioni vicine.

Nei paragrafi successivi si riportano i criteri che sono stati selezionati per il controllo di qualità delle misure di radiazione della rete del Trentino, unitamente ai riferimenti bibliografici pertinenti e alle modalità di implementazione degli stessi. L'orografia complessa del territorio in esame ha reso necessario l'adattamento *ad hoc* di alcuni dei criteri di validazione tratti dalla letteratura, allo scopo di tenere adeguatamente conto degli effetti di ombreggiamento orografico e quindi degli anticipi/ritardi nell'arrivo di radiazione diretta in alcune località negli orari mattutini e pomeridiani/serali.

Si ricorda che solo Meteotrentino effettua alcuni controlli di qualità automatici sui dati delle proprie stazioni meteorologiche, mentre né la Fondazione E. Mach né l'Università di Trento svolgono questa attività in maniera routinaria. Pertanto è stato necessario sottoporre ad una procedura unificata di controllo di qualità l'intero database presentato nel Capitolo 5 in modo da assicurare un comune standard di qualità a tutte le serie da analizzare e utilizzare. Infine, si menziona il fatto che le attività a cui si fa riferimento sono state svolte in collaborazione con l'ing. Daniele Andreis e l'ing. Fabio Zottele, dell'Unità Sistema Informativo Geografico della Fondazione E. Mach coordinata da Giambattista Toller, nell'ambito del progetto P.I.C.A. ([pica.cavit.it](http://pica.cavit.it)).

## 6.1 Controlli dei limiti fisici

Per le osservazioni diurne di radiazione globale orizzontale al suolo ( $G$ ), definite come le medie orarie che comprendono almeno 15 minuti di radiazione extraterrestre non nulla, ovvero come i dati orari le cui etichette superano di almeno 15 minuti e di non più di 45 minuti rispettivamente gli orari dell'alba e del tramonto astronomici:

$$0.03 \cdot E \leq G < E$$

$$G < 1.1 \cdot G_C$$

dove  $E$  è la radiazione extraterrestre e  $G_C$  è la radiazione teoricamente incidente al suolo in condizioni di cielo perfettamente sereno e atmosfera molto limpida (vedi Journée e Bertrand, 2011).  $E$  e  $G_C$  sono entrambe calcolate con il modello di radiazione clear-sky dell'Atlante Europeo della Radiazione Solare (ESRA; Scharmer e Greif, 2000; Rigollier et al., 2000). Nei calcoli è stato utilizzato un valore costante di coefficiente di torbidità di Linke pari a 2, corrispondente a condizioni di cielo molto limpido e bassa torbidità. È stata inoltre applicata una correzione per l'equazione del tempo che tiene conto della variazione del tempo solare locale (Local Solar Time, LST) dovuta alla variazione della longitudine all'interno dello stesso fuso orario. Le stime di radiazione sono state effettuate con un intervallo temporale pari a 5 minuti; i valori così ottenuti sono stati considerati costanti per i 5 minuti successivi e integrati su un intervallo orario, allo scopo di ottenere un dato immediatamente confrontabile con le misure che compongono il database di radiazione.

Anche il calcolo degli orari di alba e tramonto astronomici è stato effettuato con il metodo proposto dal modello ESRA, mentre il calcolo degli orari di alba e tramonto "orografici" (ovvero gli orari di inizio e termine dell'irradiazione diretta in funzione dell'orografia circostante) è stato effettuato tramite il modulo *r.horizon* di GRASS GIS ([grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.horizon.html](http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.horizon.html)), sfruttando un modello digitale del terreno di risoluzione pari a 30 m ([www.viewfinderpanoramas.org](http://www.viewfinderpanoramas.org)). Per i calcoli sono stati utilizzati rispettivamente un passo per l'angolo azimutale pari a  $0.1^\circ$  e una distanza massima di calcolo pari a 200 km, utilizzando il Solar Position Algorithm (Reda and Andreas, 2003) per il calcolo della posizione del Sole. Per le osservazioni comprese tra gli orari di alba (tramonto) astronomica e orografica, quando la radiazione globale incidente è pari alla sola componente diffusa, i limiti sono stati modificati come:

$$G \leq D_{\max}$$

dove  $D_{\max}$  rappresenta il valore limite per la radiazione diffusa misurabile durante le fasi di aurora e crepuscolo, che è stato assunto pari a  $210 \text{ W m}^{-2}$  (ovvero  $0.76 \text{ MJ m}^{-2}$  su base oraria cumulata) in base a quanto riportato in WMO (2008). Per le ore notturne invece, ovvero quelle che non sono comprese nelle due categorie precedenti (per le quali  $E = 0$ ) si è invece verificato che:

$$G = 0$$

e inoltre, ammettendo una certa tolleranza, che

$$G \leq 0.25 \cdot D_{\max} .$$

## 6.2 Controlli della variabilità temporale

Il controllo denominato “step test” mira a controllare che non siano presenti salti non fisici e non accettabili tra due misure successive, allo scopo di evidenziare la presenza di picchi anomali o di valori troppo bassi. Il limite di plausibilità della differenza tra due misure successive può dipendere ovviamente dalla frequenza di campionamento del dato analizzato. Vengono ammessi a questo test solo i dati che abbiano superato i precedenti test basati sui limiti fisici di radiazione. Per misure con una frequenza di campionamento di 1 minuto Journée e Bertrand (2011) consigliano un valore di soglia di  $800 \text{ W m}^{-2}$ , mentre per misure con una frequenza di campionamento di 10 minuti è proposta la seguente espressione in termini relativi, adottata anche per la validazione del dato orario:

$$\left| \frac{G(t)}{E(t)} - \frac{G(t-1)}{E(t-1)} \right| < 0.75$$

Relativamente alla variabilità temporale delle misure di radiazione, è stato effettuato anche un controllo di persistenza temporale su base giornaliera. In particolare, valori troppi bassi di deviazione standard (ovvero limitata variabilità) delle misure potrebbero indicare il ripetersi di valori costanti anomali rilevati dallo strumento, probabilmente associati a malfunzionamenti dello stesso. Al contrario, deviazioni standard troppo alte (ovvero eccessiva variabilità) potrebbero rappresentare il sintomo del fatto che il piranometro sta lavorando ad intermittenza, alternando valori errati e valori ragionevoli. Anche questa volta, sono ammessi a questo test solo i dati che abbiano superato i precedenti controlli. Per medie e deviazioni standard giornaliere (ovvero calcolate sulla base delle 24 osservazioni orarie consecutive dalle 00:00 alle 23:00 LST di ogni giorno) Journée e Bertrand (2011) hanno proposto la seguente espressione:

$$\frac{1}{8} \mu \left( \frac{G}{E} \right) \leq \sigma \left( \frac{G}{E} \right) \leq 0.35$$

dove  $\mu$  indica la media giornaliera e  $\sigma$  indica la deviazione standard giornaliera del rapporto tra radiazione globale misurata ( $G$ ) e radiazione extraterrestre ( $E$ ). Nell’implementazione di questo criterio si è scelto di considerare come giorni validi per effettuare il controllo di qualità quei giorni nei quali sono disponibili almeno  $n$  valori orari (se il numero complessivo di ore di luce è pari a  $2n$ , avendo definito le ore di luce come l’intervallo di tempo compreso tra alba e tramonto orografici), e comunque almeno 3 valori orari.

Un ulteriore controllo legato alla variabilità temporale delle osservazioni di radiazione è il controllo delle medie, mediane, massimi e deviazioni standard su base mensile e annuale per le diverse stazioni, al fine di verificare la presenza di eventuali trend o discontinuità causati dal deterioramento degli strumenti o da fattori esterni (come lo spostamento della stazione, la crescita di un albero e l’edificazione di un edificio). Per questo tipo di controllo è essenziale avere a disposizione delle serie di dati abbastanza lunghe (almeno 5 anni), allo scopo di separare adeguatamente la variabilità temporale intrinseca del dato e le variazioni anomale. Le statistiche sono state calcolate sulla base dei soli dati che hanno superato i precedenti test. Si noti che per questo criterio non viene assegnato alcun codice di errore in questa fase, in quanto queste verifiche appartengono più propriamente ad una fase successiva di omogeneizzazione delle serie storiche (vedi Capitolo 7).

### 6.3 Controlli di consistenza spaziale

Lo scopo di questo tipo di controllo è quello di verificare l'attendibilità delle misure confrontando i dati simultanei raccolti presso le stazioni vicine. A questo fine è importante confrontare i dati di stazioni poste ad altitudini abbastanza simili e con orari di alba e tramonto non troppo differenti. Vengono ammessi a questo test solo i dati che abbiano superato i precedenti test. Per tenere adeguatamente conto dell'occorrenza di giornate nuvolose Journée e Bertrand (2011) consigliano di effettuare questo controllo su cumulate almeno giornaliere, poiché su periodi più brevi la distribuzione irregolare della nuvolosità potrebbe rendere i risultati del test non significativi. Nelle giornate serene, quando la variabilità spaziale della radiazione globale è molto minore, questo test può essere effettuato anche sui singoli dati orari. In particolare, nel controllo di qualità del database si è verificato che il valore assoluto della differenza tra il valore cumulato di irradiazione globale giornaliera per la stazione in esame e il valore stimato  $G(x_0)$  nella posizione della stazione in esame ( $x_0$ ) a partire dalle misure raccolte presso le stazioni vicine sia minore rispettivamente del 50%, 100% e 200% del valore assoluto della differenza media per le stazioni vicine, calcolata rispetto allo stesso valore stimato. L'utilizzo di diversi valori limite rispetto alle indicazioni da letteratura (50%; Journée e Bertrand, 2011) si è reso necessario a causa della variabilità spazio-temporale aggiuntiva introdotta nelle misure dalla complessa morfologia del territorio. Per effettuare tale controllo di qualità sono stati considerati solamente i giorni con almeno 15 osservazioni orarie valide (che abbiano superato tutti i controlli precedenti) su 24. L'algoritmo di interpolazione utilizzato è basato su una media pesata secondo le indicazioni di Journée e Bertrand (2011):

$$\hat{G}(x_0) = \frac{1}{\sum_i w_i} \sum_i w_i \cdot G(x_i)$$

dove i pesi  $w_i$  sono definiti in base all'inverso del quadrato della distanza tra stazioni. Allo scopo di non includere nell'interpolazione stazioni non idonee, per condizioni di insolazione o climatiche locali, sono state considerate per l'interpolazione solo le stazioni più vicine con coefficiente di correlazione lineare (riferito ai valore di irradiazione giornaliera) maggiore di 0.5.

### 6.4 I codici di errore e i codici di qualità

In relazione ai test di controllo descritti nei precedenti paragrafi sono stati assegnati dei codici di errore e dei codici di qualità a ciascuna delle osservazioni orarie che compongono il database per l'Atlante, oppure, a seconda del tipo di test, ai 24 dati orari che compongono ognuno dei giorni controllati.

Il sistema di assegnazione dei codici di errore è schematizzato nella Tab. 2, dove sono riportati anche i codici finali di qualità, ovvero:

- ✓ 0 = dato valido,
- ✓ 1 = dato sospetto,
- ✓ 2 = dato errato.

Si noti che quando un dato non passa più controlli, tutti i codici di errore vengono memorizzati e conservati in associazione al dato in questione. I file dei dati di radiazione orari forniti assieme a



questa relazione per ogni stazione radiometrica riportano i codici di errore e di qualità assegnati grazie alla procedura di controllo di qualità descritte secondo il seguente formato:

```

data , misura, codice_di_errore, codice_di_qualità
2001-10-22 10:00:00          1.61          0          0
2001-10-22 11:00:00          1.8           0          0
2001-10-22 12:00:00          2             0          0
2001-10-22 13:00:00          2             0          0
2001-10-22 14:00:00          1.8           0          0
2001-10-22 15:00:00          1.4           0          0
2001-10-22 16:00:00          0.89          0          0
2001-10-22 17:00:00          0.2           0          0
2001-10-22 18:00:00          0             7 2/1 1
. . . .

```

Tabella 2. Sistema dei codici di errore e qualità utilizzato per i dati di radiazione.

Codice d'errore	Corrisponde a	Codice di qualità	Applicato a
0	dato valido	0	dato orario
1	dato mancante	2	dato orario
2/1	limite fisico inferiore su $E$ (ore diurne): fallito	2	dato orario
2/2	limite fisico superiore su $E$ (ore diurne): fallito	2	dato orario
3	limite fisico superiore su $G_C$ (ore diurne): fallito	2	dato orario
4	step test: fallito	2	dato orario
5	controllo di persistenza: fallito	2	giorno
6	controllo di persistenza: non effettuato	1	giorno
7	limite fisico su $D_{max}$ : passato	0	dato orario
8	limite fisico su $D_{max}$ : fallito	2	dato orario
9	dato negativo	2	dato orario
-9	dato notturno non nullo	2	dato orario
0*	consistenza spaziale (50%) passato	0	giorno
1*	consistenza spaziale (50%) fallito	1	giorno
2*	consistenza spaziale (100%) fallito	1	giorno
3*	consistenza spaziale (200%) fallito	2	giorno

## 6.5 Risultati

L'applicazione della procedura di controllo di qualità sopra descritta ha in qualche caso ridotto consistentemente il numero di dati disponibili per le successive analisi, portando anche al completo rifiuto di alcune serie di dati (vedi le schede individuali delle singole stazioni radiometriche; Allegato A). Tale circostanza sta ad indicare che le difficoltà e gli elevati costi associati alla gestione e alla manutenzione di una densa rete di stazioni meteorologiche (e soprattutto radiometriche), in combinazione con le condizioni operative particolarmente difficili tipiche di molti luoghi di montagna, possono condurre potenzialmente a osservazioni di qualità inadeguata o non soddisfacente. Di seguito sono riportati alcuni esempi relativi agli errori e alle problematiche più comuni individuati grazie all'analisi dei risultati del controllo di qualità.

Innanzitutto, a titolo di esempio sono riportati in Fig. 17 le frequenze orarie dei codici di errore per la stazione di Tovel (appartenente alla rete della Fondazione E. Mach), che ha la particolarità di essere molto influenzata dagli effetti di ombreggiamento orografico. Appare decisamente evidente che la modifica dei limiti fisici per i dati compresi tra gli orari di alba e tramonto astronomici e orografici consente di recuperare molti dati che altrimenti sarebbero erroneamente contrassegnati come errati, assegnando loro un codice di qualità valido per le analisi successive (7 2/1, 7 2/2, 7 3). In particolare, talvolta si verifica che il valore limite inferiore legato al valore modellato di  $E$  si riveli troppo elevato rispetto alle misure, nelle condizioni di ombreggiamento orografico e cielo sereno (7 2/1). Oppure, anche i limiti superiori su  $E$  e  $G_C$  possono risultare soggetti a imprecisioni del modello clear-sky stesso o delle misure, specialmente evidenti e rilevanti negli orari di bassa elevazione del Sole sull'orizzonte (7 2/2, 7 3). In questi casi, un'attenta ispezione visuale dei dati è necessaria al fine di determinare se i dati devono essere scartati oppure recuperati.

Le Fig. 18, 19 e 20 illustrano esempi di alcune delle tipologie di dato errato più comunemente individuate grazie alla procedura di controllo di qualità. Nel primo caso (Fig. 18), relativo alla stazione di Ala della Fondazione E. Mach, è rappresentato un esempio di off-set termico (anche detto "zero off-set", perché diventa visibile e quantificabile quando lo strumento dovrebbe registrare radiazione nulla, cioè nelle ore notturne), dovuto alle differenze di temperatura che si instaurano tra le componenti interne del piranometro, ovvero tra l'elemento assorbente e la cupola interna, con conseguente flusso di energia e alterazione del segnale registrato. Figura 19 invece mostra un evidente caso di presenza di un ostacolo davanti al piranometro (un albero, un edificio, un palo, ...), che induce un ombreggiamento anomalo ricorrente e localizzato poco prima del picco di radiazione registrato nelle ore centrali del giorno. Infine, Fig. 20 riporta i dati di radiazione che sono registrati quando la cupola del piranometro risulta coperta da neve (tipicamente durante la stagione invernale): valori di radiazione estremamente bassi, molto prossimi allo zero sono osservati solo per poche ore al giorno e crescono lentamente con il passare dei giorni fino a che la cupola non si libera o viene liberata dalla neve. Si noti che la presenza di copertura nevosa intorno al sensore può anche contribuire a falsare le misure di radiazione a causa degli importanti fenomeni di riflessione indotti.

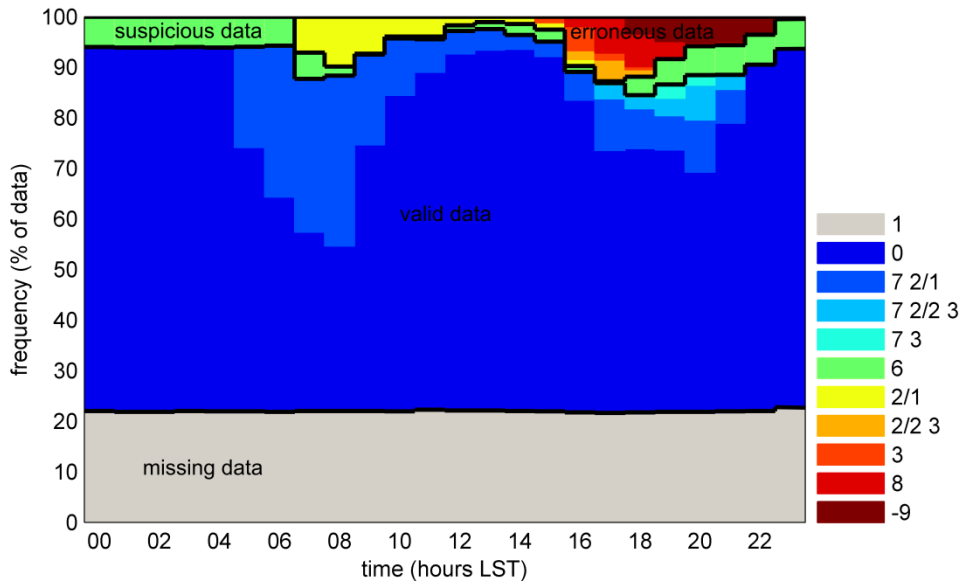


Figura 17. Frequenze orarie dei codici di errore (in colore; vedi legenda) e di qualità (vedi linee nere in grassetto; cf. Tab. 2) per la stazione radiometrica di Toval (periodo di attività: 17 maggio 2010 – 31 dicembre 2012).

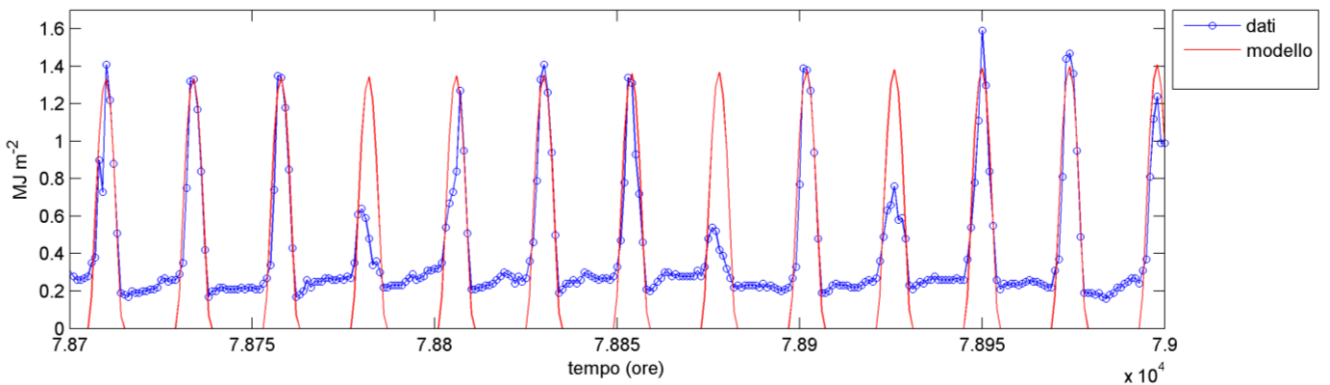


Figura 18. Esempio di confronto tra misure orarie di radiazione per la stazione di Arco (Fondazione E. Mach) e corrispondenti valori di radiazione globale in condizioni clear-sky stimati grazie al modello ESRA (Scharmer e Greif, 2000).

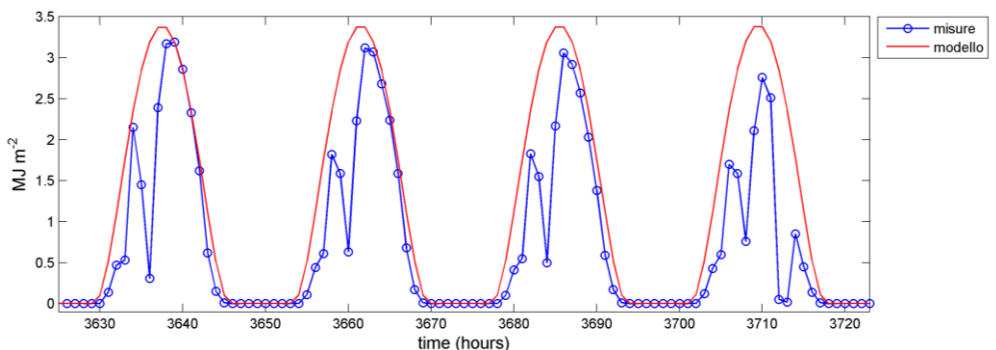


Figura 19. Esempio di confronto tra misure orarie di radiazione per la stazione di Volano (Fondazione E. Mach) e corrispondenti valori di radiazione globale in condizioni clear-sky stimati grazie al modello ESRA (Scharmer e Greif, 2000).

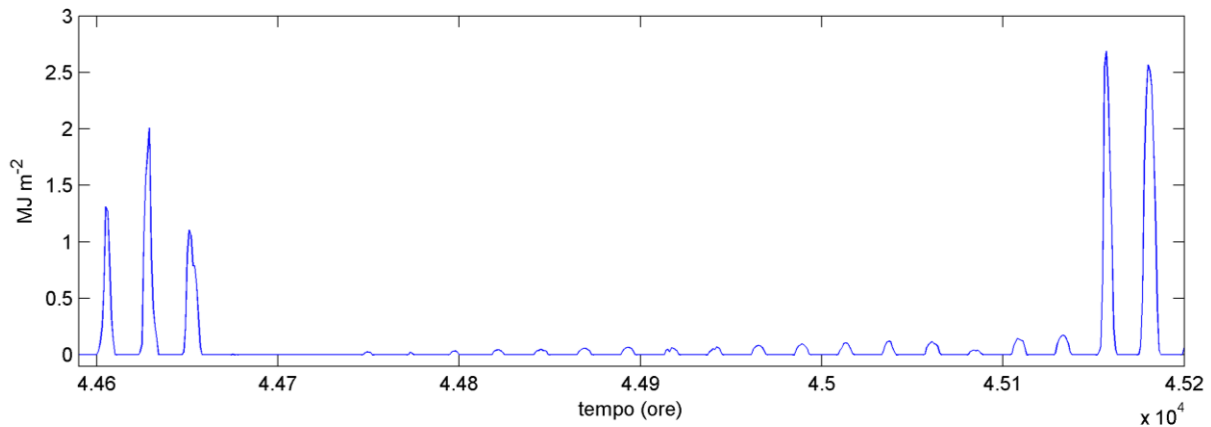


Figura 20. Esempio di misure orarie di radiazione in presenza di neve sul sensore (durante la stagione invernale) per la stazione di Monte Bondone (Meteotrentino).

Per quanto riguarda il test di consistenza spaziale invece, la complessità morfologica del territorio del Trentino può talvolta impedire l'individuazione di stazioni vicine caratterizzate da condizioni di insolazione e climatologia simili a quelle della stazione analizzata. Per esempio, nei mesi invernali la stazione di Telve (appartenente alla rete della Fondazione E. Mach) mostra un numero sorprendentemente alto di dati sospetti e invalidi, contrassegnati dai codici di errore 1\*, 2\* e 3\*. Infatti, in quei mesi le stime di irradiazione giornaliere basate sulle stazioni vicine sono sistematicamente e sensibilmente più basse dei dati registrati a Telve (vedi Fig. 21). Questo è dovuto al fatto che nell'interpolazione rientrano i dati della stazione vicina di Borgo Valsugana, che si trova a soli 1.5 km da Telve, alla stessa quota ma sul versante opposto (versante meridionale) delle stessa valle che corre da ovest ad est. A causa della sua posizione, Borgo Valsugana è affetta da rilevanti fenomeni di ombreggiamento orografico collegati ai rilievi circostanti, ovvero alle pareti meridionali della Valsugana. Questo fa sì che il test, applicato a entrambe le stazioni, restituisca risultati inaffidabili, specialmente durante i mesi invernali (vedi l'alta percentuale di dati contrassegnati dal codice 3\* in magenta, corrispondente a dato errato, in Fig. 21). Sfortunatamente, la seconda stazione più vicina a Telve caratterizzata da una serie di dati con una lunghezza comparabile a quella di Telve e/o di Borgo Valsugana si trova a più di 20 km dalle due stazioni, alla quota di 1370 m m.s.l., ovvero al livello delle creste montuose laterali. Essa è quindi caratterizzata da una distribuzione climatologica della radiazione troppo differente da quelle delle due stazioni di fondovalle per essere sfruttata nel controllo di consistenza spaziale. Inoltre, si noti che il controllo di consistenza spaziale può essere potenzialmente influenzato anche dalle inomogeneità (cioè discontinuità) presenti nelle serie temporali, che possono indurre stime errate dell'irradiazione globale giornaliera da confrontare con le misure e quindi falsare i risultati del test stesso.

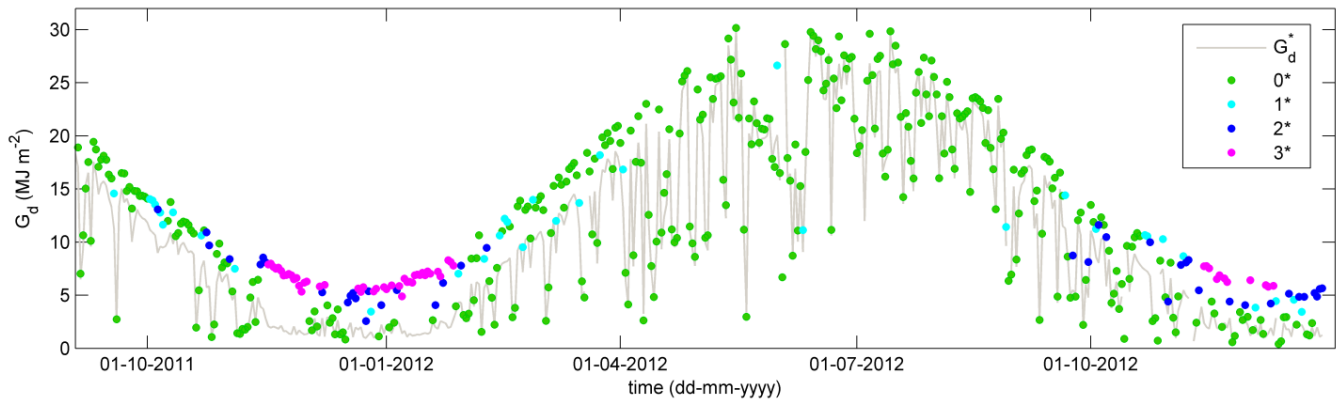


Figura 21. Risultati del test di consistenza spaziale per la stazione di Telve: il codice di errore associato alle osservazioni di irradiazione globale giornaliera  $G_d$  è rappresentato dal loro colore (vedi legenda; cf. Tab. 2), la linea grigia rappresenta invece le stime di  $G_d$  ottenute dall'interpolazione dei dati raccolti presso le stazioni vicine.

Di conseguenza, le serie di dati o le frazioni di serie di dati di qualità non buona (ovvero affette da alterazioni dovute a inomogeneità oppure ad altre cause) devono essere rimosse manualmente dalla procedura di interpolazione. D'altra parte, in maniera perfettamente speculare, è anche vero che il test di consistenza spaziale può rivelarsi un utile strumento di screening iniziale per individuare le inomogeneità presenti nelle serie di dati e non ancora riconosciute.

In conclusione, i risultati del processo di controllo della qualità del database di radiazione hanno sottolineato l'importanza di adattare i limiti e le modalità dei test tratti dalla letteratura alla natura specifica dei dati oggetto di analisi, per esempio adattandoli in modo da trattare adeguatamente gli effetti collegati all'orografia complessa. A questo scopo, i modelli di radiazione clear-sky integrati in strumenti GIS (come *r.sun*) sono estremamente utili, poiché permettono di modellare i processi citati con risoluzioni spaziali e temporali molto elevate. Relativamente ai test di consistenza spaziale, è importante tenere in considerazione il fatto che questi controlli hanno più la finalità di individuare dati sospetti che dati errati, per i quali l'analisi deve essere approfondita successivamente. Questo è particolarmente vero in aree montane come il Trentino, dove il test non è nemmeno sempre applicabile a causa delle condizioni climatiche locali e di insolazione molto più varie che in aree meno eterogenee.



## Capitolo 7

# La selezione e l'elaborazione del database per l'Atlante Solare del Trentino

La descrizione della rete radiometrica del Trentino e del relativo database di radiazione globale disponibile, contenuta nel Capitolo 5, ha evidenziato il fatto che, nonostante la relativamente alta densità di stazioni radiometriche sul territorio provinciale, l'estensione temporale delle singole serie di dati è molto variabile e solo poche stazioni presentano serie temporali di lunghezza rilevante. Inoltre, il Capitolo 6 ha portato alla luce una serie di problematiche delle stesse serie di dati (riportate nel dettaglio nelle schede delle singole stazioni; Allegato A) che sono emerse durante il processo di controllo della qualità. Le limitazioni in termini di numero e lunghezza delle serie di dati di radiazione, nonché in termini di qualità e quindi di accuratezza dei dati, impongono la necessità di un'attenta selezione delle stazioni che costituiranno la base per la produzione delle mappe climatologiche di radiazione che compongono l'Atlante Solare del Trentino. Tale selezione di stazioni deve soddisfare essenzialmente due requisiti:

- ✓ essere il più ampia possibile, in modo da assicurare una copertura spaziale adeguata al territorio in esame e
- ✓ coprire un periodo temporale di riferimento di durata adeguata allo scopo di fornire stime corrette e affidabili dei valori climatologici di radiazione.

La scrematura delle stazioni radiometriche è stata inizialmente svolta tramite un'attività di screening manuale con lo scopo di effettuare una ricognizione preventiva che tenesse presenti le due istanze sopra esposte. In seguito sono state effettuate altre analisi (presentate di seguito) che hanno permesso di selezionare il set definitivo di stazioni radiometriche per l'Atlante Solare del Trentino.

### *7.1 L'analisi di omogeneità*

La misura della radiazione al suolo tramite piranometri è notoriamente soggetta ad un certo livello di incertezza di calibrazione. Gli strumenti, che sono tipicamente calibrati in condizioni di laboratorio (ovvero ideali), quando installati in campo, trovandosi ad operare in condizioni che sono molto lontane da quelle ideali, possono sperimentare un cambiamento nella risposta e possono perdere la calibrazione, con ulteriori derive. D'altra parte, la ricalibrazione frequente degli strumenti costituirebbe una spesa non secondaria. Oltre alla mancata ricalibrazione e alla degradazione della risposta del piranometro, anche interventi di sostituzione del sensore stesso possono contribuire a creare delle inomogeneità nelle serie di dati, ovvero delle discontinuità localizzate e/o dei trend

temporali artificiali. A questo proposito si rivela fondamentale che gli enti gestori delle stazioni tengano traccia in maniera coscienziosa e continuativa degli interventi di ispezione, manutenzione, sostituzione e di eventuali anomalie riscontrate presso le stazioni. Queste informazioni si rivelano fondamentali allo scopo di individuare e trovare una spiegazione per eventuali anomalie nelle serie storiche.

Tipicamente, le inomogeneità nelle serie di dati meteorologici/climatologici si individuano e si correggono utilizzando delle serie di riferimento (della cui qualità si è sicuri, oppure costruite a partire da più serie di dati raccolti presso le stazioni vicine a quella di interesse) caratterizzate dal fatto di avere un'estensione temporale almeno pari a quella della serie da analizzare. La variabilità delle serie di dati di radiazione disponibili per il Trentino, la loro durata in genere non molto elevata e la grande varietà di condizioni di insolazione non rendono questo tipo di approccio il più appropriato da implementare. Inoltre, la numerosità dei dati mancanti non ha consentito di applicare test di omogeneità basati sulle cumulate giornaliere di radiazione. Pertanto si è deciso di ricorrere ad un'altra tipologia di test di omogeneità, basata sulle stime di un modello di radiazione di tipo clear-sky.

Il metodo scelto, presentato in Longman et al. (2013), prevede il confronto tra le osservazioni orarie di irradiazione globale al suolo in condizioni di cielo sereno e i valori modellati di questa variabile allo scopo di individuare discontinuità e/o trend temporali e correggerli. Il modello di radiazione clear-sky adottato per questa analisi è il già citato modello dell'Atlante Europeo della Radiazione Solare – ESRA (Scharmer and Greif, 2000; Rigollier et al., 2000). Seguendo Longman et al. (2013), il modello ESRA è stato utilizzato per stimare il ciclo diurno di irradiazione solare con la stessa risoluzione oraria delle misure di radiazione globale disponibili. Il rapporto tra la media dei valori orari osservati e la media dei valori orari modellati limitatamente alle sole ore di picco della radiazione solare (indicativamente tra le 10:00 e le 16:00 LST), definito come “clear day ratio” (CDR) giornaliero, costituisce la variabile utilizzata all'atto pratico per l'individuazione delle inomogeneità. Il calcolo della deviazione standard giornaliera tra i valori osservati e modellati (nuovamente, per le sole ore di picco di insolazione) è necessario per la selezione dei soli giorni di cielo sereno. Questo viene effettuato imponendo un valore limite (superiore) di deviazione standard, che è stato individuato per tentativi osservando i dati stessi e in funzione del numero di ore coinvolte nel test (variabile tra 3 e 6, in dipendenza degli effetti di ombreggiamento orografico che dipendono dalla singola stazione in questione). Inoltre, è stato implementato anche un controllo sulla forma del ciclo di radiazione diurno (curva pressoché sinusoidale), imponendo che non ci verificassero picchi o cali non compatibili con condizioni di cielo sereno e privo di nuvole.

L'analisi della serie di valori giornalieri di CDR selezionati per i soli giorni di cielo sereno permette di riconoscere agevolmente eventuali discontinuità e trend presenti nei dati di radiazione originali, individuando e suddividendo gli spezzoni di serie internamente omogenei. Per le serie di dati per le quali è stato possibile si è provveduto alla correzione dei dati e quindi alla loro omogeneizzazione (applicata a tutti i dati, non solo a quelli relativi alle condizioni di cielo sereno), per mezzo di un coefficiente di aggiustamento calcolato come rapporto tra il CDR di un periodo di riferimento (tipicamente il periodo omogeneo più recente o evidente corretto) e il CRD del periodo da omogeneizzare. In questo modo sono state corrette sia discontinuità localizzate che derivate graduali, queste ultime individuate dalla presenza di trend (pressoché) lineari nei dati.



I dettagli delle inomogeneità individuate e dell'eventuale correzione delle stesse sono riportati nelle schede delle singole stazioni radiometriche in Allegato A. Le informazioni (eventualmente disponibili) riguardo manutenzioni, sostituzioni, malfunzionamenti e ispezioni fornite dagli enti gestori della rete radiometrica sono state associate ai risultati di questo tipo di analisi, come anticipato. Le stazioni che in questa fase hanno rivelato serie di dati perfettamente omogenee sono state incluse nel gruppo delle serie di riferimento (o "fiduciarie").

## 7.2 *La stima dei dati mancanti*

Alcune delle serie di dati di radiazione hanno mostrato percentuali di dati mancanti (o errati) molto rilevanti in partenza, tali da non consentire la loro inclusione nell'insieme delle stazioni selezionate per l'Atlante Solare. Le altre serie invece, caratterizzate da percentuali di dati mancanti molto ridotte o da una bassa percentuale di dati scartati in seguito alla procedura di controllo della qualità, sono state sottoposte alla ricostruzione dei dati mancanti tramite stima. In particolare si è scelto di sfruttare la disponibilità del database di radiazione da immagini satellitari HelioMont (Stöckli, 2013; Castelli et al., 2014) per il periodo che va dal 01-01-2004 al 31-12-2012.

HelioMont è un algoritmo di stima della radiazione solare a partire da immagini satellitari acquisiti dal radiometro SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) montato sui satelliti geostazionari Meteosat Second Generation implementato da MeteoSvizzera e presentato nel dettaglio in Stöckli (2013). SEVIRI ha 12 canali nelle bande del visibile e dell'infrarosso, e una risoluzione spaziale variabile tra 1 e 3 km, che si traduce in una risoluzione finale del database pari a  $1.1 \text{ km} \times 1.7 \text{ km}$  circa ( $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ ) sulle Alpi. Le immagini vengono acquisite con un intervallo di 15 minuti, che rappresenta quindi anche la risoluzione temporale del database. La modellazione della torbidità atmosferica si basa sui dati di vapore acqueo e ozono forniti da simulazioni numeriche con un intervallo di 6 ore (ECMWF; Dee et al., 2011) e su climatologie mensili del contenuto di aerosol atmosferici (Kinne, 2009). Il calcolo del "cloud index" (vedi Capitolo 2) si basa sia sui canali del visibile che dell'infrarosso, e questo permette di migliorare sensibilmente la capacità di distinzione tra superfici coperte da neve e da nubi rispetto agli algoritmi precedenti. Inoltre, in HelioMont sono stati implementati dei metodi di correzione per gli effetti della topografia complessa, come l'ombreggiamento orografico, le riflessioni dal terreno circostante, l'elevazione locale dell'orizzonte e la riduzione del fattore di vista del cielo. Tali effetti sono modellati sulla base del modello digitale di elevazione del terreno Shuttle Radar Topography Mission ([www2.jpl.nasa.gov/srtm](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm)). L'accuratezza del database HelioMont relativamente ai valori mensili è stata calcolata come pari a  $5\text{--}10 \text{ W m}^{-2}$  (Stöckli, 2013). Un confronto con i dati di radiazione al suolo della rete del Trentino effettuato per questo studio ha evidenziato un'accuratezza del 6% (in termini di errore medio assoluto; vedi Fig. 22) per quanto riguarda le medie mensili (per il sottoinsieme delle stazioni selezionate per l'Atlante). Data la distanza media tra stazioni prossime per la rete radiometrica provinciale, dell'ordine di 4 km (vedi Capitolo 5), l'utilizzo del dato satellitare (la cui risoluzione spaziale è di meno di 2 km) è probabilmente più indicato per la stima dei dati mancanti e più rappresentativo dal punto di vista spaziale, nonostante la riproduzione approssimata degli effetti legati all'orografia.

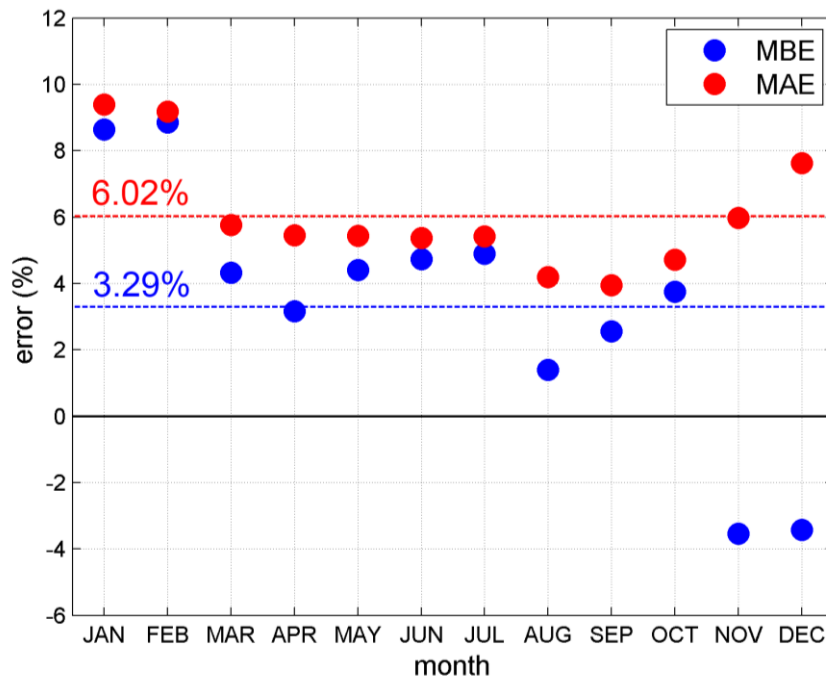


Figura 22. Grafico dei valori mensili degli errori medi (MBE) e degli errori medi assoluti (MAE) relativamente al confronto tra il database HelioMont e i dati al suolo delle stazioni radiometriche trentine (selezionate per l'Atlante). È evidente come il dato satellitare sovrastimi in media il dato al suolo (MBE = 3.29%), e come l'accuratezza complessiva del 6.02% (MAE) sia in realtà determinata da performance migliori nei mesi estivi rispetto a quelli invernali.

La ricostruzione è stata circoscritta alle sole serie di valori cumulati giornalieri di radiazione (irradiazione giornaliera), in quanto la risoluzione spaziale del dato satellitare si è però rivelata non adeguata ad effettuare una stima sufficientemente accurata dei valori di irradiazione oraria. Questo è sicuramente riconducibile alla inadeguata riproduzione degli effetti orografici a scala locale che influenzano fortemente la variabilità sub-giornaliera del dato di radiazione in presenza di terreno complesso. Per la stima dei dati mancanti sono state calcolate 12 regressioni lineari su base mensile tra i dati di irradiazione giornaliera da satellite e i dati giornalieri disponibili per ognuna delle stazioni al suolo considerate (vedi un esempio in Fig. 23). Le regressioni lineari hanno mostrato in generale coefficienti di correlazione (di Pearson) molto significativi (specialmente nei mesi estivi) e mai inferiori a 0.8. Inoltre, un'analisi di validazione incrociata ha permesso di stimare l'errore medio assoluto commesso nella ricostruzione come compreso in media tra il 3–7% (nei mesi estivi) e il 15–20% (nei mesi invernali durante i quali il range di valori di irradiazione giornaliera è più limitato e gli effetti orografici più rilevanti, causando delle regressioni meno affidabili), mentre l'errore medio "semplice" (bias) è praticamente nullo, ovvero trascurabile (vedi esempio in Fig. 24).

La ricostruzione dei dati mancanti è stata effettuata in precedenza per le stazioni "fiduciarie", ovvero per quelle stazioni con serie di dati perfettamente omogenee. Nonostante i dati HelioMont presentino una completezza molto buona, tuttavia i dati sono assenti per qualche rara giornata sull'intero periodo 2004-2012, prevalentemente durante i mesi invernali. Solitamente non più di 4-5 giorni rimangono da ricostruire dopo la regressione con i dati da satellite. In questo caso è stata applicata una regressione rispetto ai dati di irradiazione giornaliera per le stazioni più vicine (scelte tra le "fiduciarie") caratterizzate da quota ed esposizione simili. Per le pochissime eventualità nelle quali ancora è presente qualche giorno mancante residuo, come ultima risorsa si è scelto di

utilizzare i valori medi mensili (climatologici) di irradiazione giornaliera, di modo da non indurre alcuna modificazione nel calcolo finale delle medie mensili.

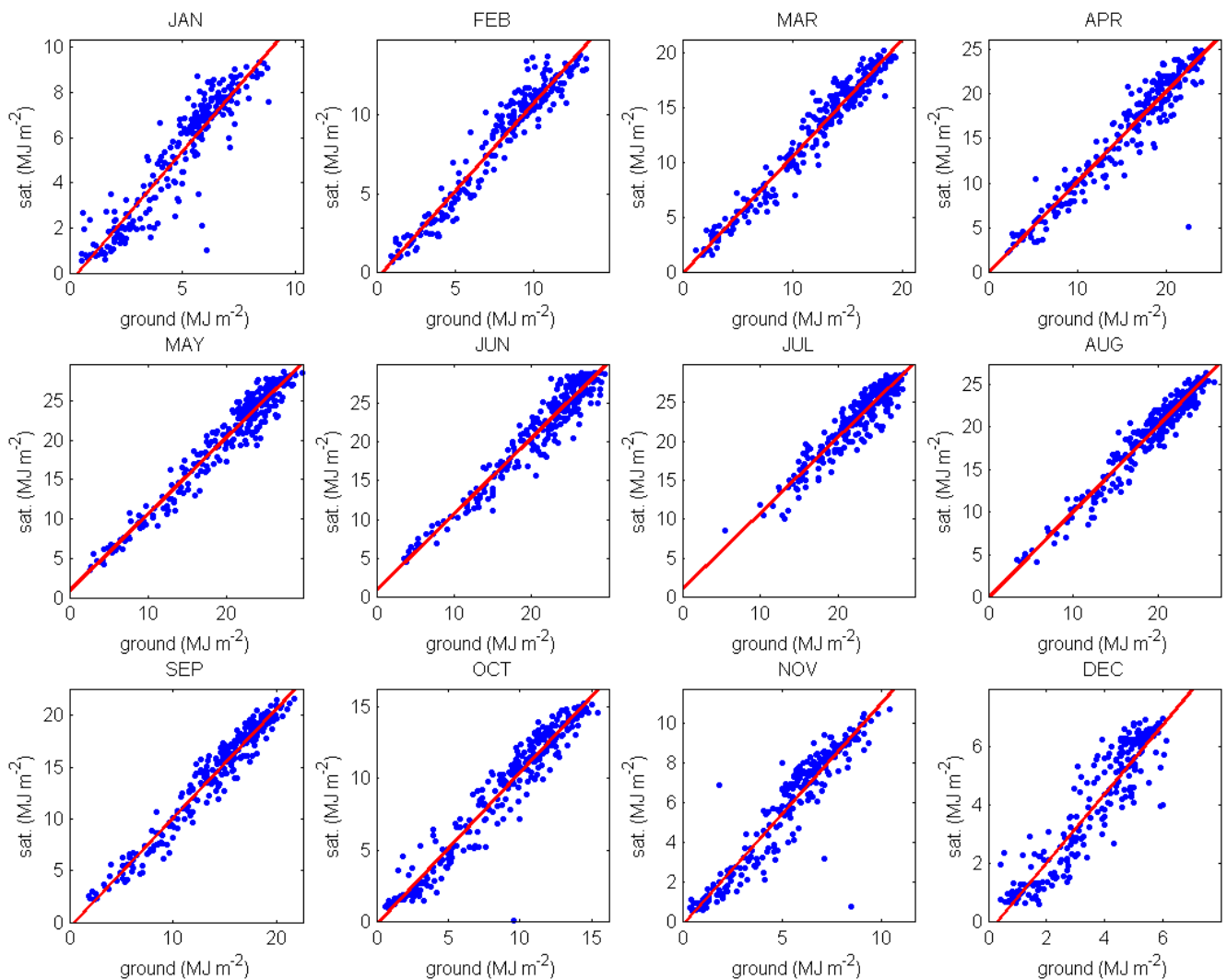


Figura 23. Esempio delle regressioni lineari mensili tra dati di irradiazione giornaliera al suolo (ground) e da satellite (sat.) utilizzate per la ricostruzione dei dati mancanti (stazione: Arco). Lo scatter-plot presenta le osservazioni al suolo e da satellite (in blu), mentre le linee rosse identificano le rette di regressione stimate per ogni mese. Si noti in particolare la miglior correlazione evidenziata dai mesi estivi.

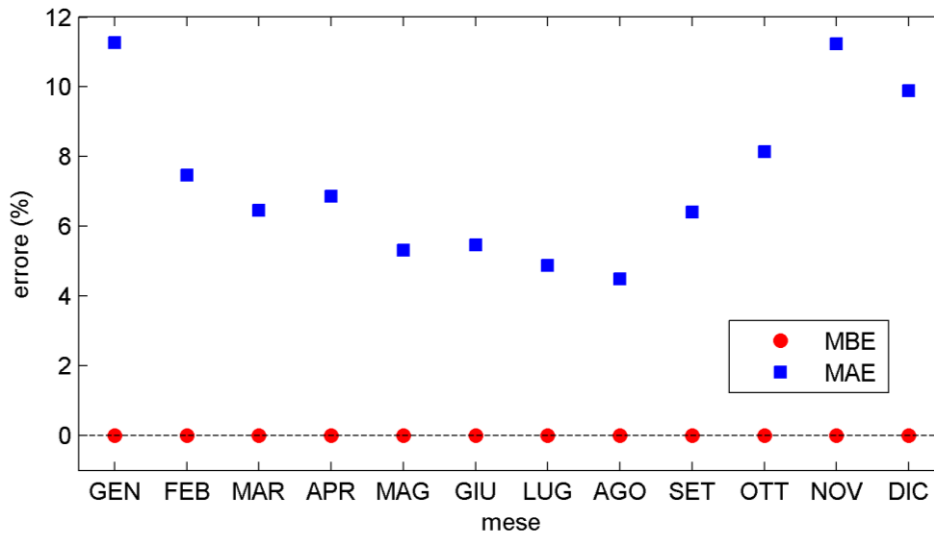


Figura 24. Ciclo annuale degli errori medi mensili di validazione incrociata relativi alla procedura di ricostruzione dei dati di irradiazione giornaliera mancanti (stazione: Arco).

### 7.3 Il database definitivo e il calcolo delle climatologie di radiazione

Le analisi descritte nei paragrafi precedenti hanno permesso di ottenere finalmente un insieme di serie di dati omogenee (o omogeneizzate se necessario) e complete che coprono lo stesso arco temporale. Nella fattispecie, la scelta finale del periodo di riferimento per l'Atlante Solare del Trentino è ricaduta sul periodo quasi decennale (9 anni) compreso tra il 2004 e il 2012. La scelta è stata effettuata anche considerando la copertura temporale del database HelioMont, allo scopo non solo di assicurare la ricostruzione dei dati mancanti per l'intero periodo, ma anche di poter disporre in seguito di un termine di confronto omogeneo per le climatologie e soprattutto le mappe elaborate.

Il numero di stazioni radiometriche che costituiscono la selezione finale è pari a 25 in totale, e cioè:

1. (1) Ala (Fondazione E. Mach)
2. (4) Arco (Fondazione E. Mach)
3. (8) Baselga di Pinè (Fondazione E. Mach)
4. (10) Besenello (Fondazione E. Mach)
5. (11) Bezzecca (Fondazione E. Mach)
6. (15) Caldes (Fondazione E. Mach)
7. (17) Cavedine (Fondazione E. Mach)
8. (19) Cles (Fondazione E. Mach)
9. (26) Faedo - Maso Togn (Fondazione E. Mach)
10. (27) Fondo (Fondazione E. Mach)
11. (30) Lavazé (Fondazione E. Mach)
12. (34) Lomaso (Fondazione E. Mach)
13. (41) Mezzolombardo (Fondazione E. Mach)
14. (48) Paneveggio (Fondazione E. Mach)
15. (49) Passo Vezzena (Fondazione E. Mach)
16. (51) Pellizzano (Fondazione E. Mach)

17. (54) Pinzolo - Prà Rodont (Fondazione E. Mach)
18. (63) Ronzo Chienis (Fondazione E. Mach)
19. (65) Rovereto (Fondazione E. Mach)
20. (75) Storo (Fondazione E. Mach)
21. (76) Telve (Fondazione E. Mach)
22. (77) Terlago (Fondazione E. Mach)
23. (81) Trento Sud (Fondazione E. Mach)
24. (86) Molino Vittoria (Università di Trento)
25. (108) Tremalzo (Meteotrentino).

La distribuzione spaziale delle stazioni elencate sopra è riportata in Fig. 25. La densità dei siti di osservazione non è omogenea per l'intero territorio trentino e rispecchia le carenze dell'intera rete radiometrica, come già discusso. Infatti almeno metà delle stazioni selezionate sono situate sul fondovalle della Valle dell'Adige, della Valle del Sarca, della Valle dei Laghi e della Val di Non. Al contrario, poche sono le stazioni che si trovano sui maggiori rilievi del Trentino e alle alte quote. In particolare, la stazione posta alla quota più elevata si trova a soli 1807 m m.s.l. (Lavazé).

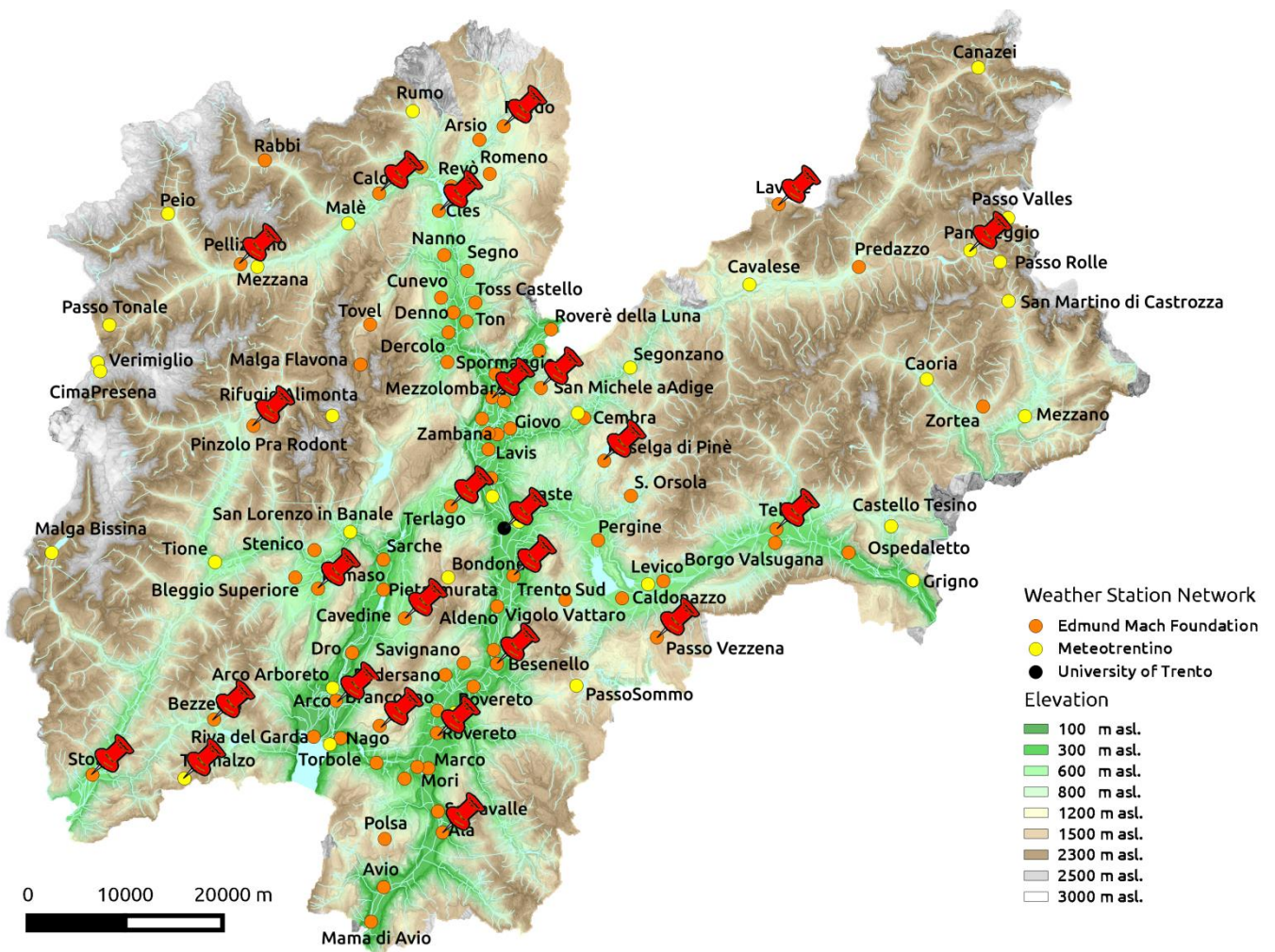


Figura 25. Mappa della rete radiometrica del Trentino. Le 25 stazioni selezionate per l'atlante solare del Trentino sono indicate dai puntatori rossi. Per gentile concessione di D. Andreis e F. Zottele.

Ne consegue che nell'elaborazione delle mappe finali di radiazione una particolare attenzione dovrà essere rivolta alla modellazione della variabilità climatica associata alle quote più elevate. La distanza media tra le stazioni selezionate è pari a 38 km, mentre la distanza media tra stazioni prossime è pari a 9 km.

Il calcolo delle climatologie più significative per il database finalmente selezionato (ma anche per tutte le stazioni non selezionate per l'Atlante) è stato effettuato tenendo debitamente conto dell'impatto di eventuali dati mancanti o errati, tramite il confronto e l'utilizzo di diversi algoritmi, secondo quanto riportato da Roesch et al. (2011). La trattazione dei dati mancanti è decisamente importante ai fini di ottenere dei risultati robusti e accurati, soprattutto quando la percentuale di dati mancanti non è trascurabile. Sono stati calcolati in particolare i seguenti parametri climatologici:

- ✓ i valori medi mensili di irradiazione giornaliera,
- ✓ i cicli medi mensili di irradiazione oraria,
- ✓ la distribuzione di frequenza (e di probabilità) mensile dei valori di irradiazione giornaliera.

I valori di irradiazione media mensile per le 25 stazioni selezionate per l'Atlante sono riportati in Tab. 3 assieme alle loro principali statistiche (valore medio complessivo, mediana, deviazione standard, indice di asimmetria della distribuzione o skewness), mentre la loro distribuzione statistica è rappresentata graficamente in Fig. 26.

Tabella 3. Valori di irradiazione giornaliera media mensile per le stazioni selezionate per l'Atlante in MJ m<sup>-2</sup> (eccetto la riga che contiene i valori di indice di asimmetria, skewness, che è un parametro adimensionale).

Stazione	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1 Ala	4.71	7.65	11.64	15.11	19.95	21.47	22.49	19.00	13.77	8.68	5.23	3.76
4 Arco	5.10	8.04	12.67	15.99	20.33	21.58	22.64	19.46	14.53	8.91	5.56	4.17
8 Baselga di Piné	4.77	7.83	12.45	15.30	19.69	20.89	22.20	18.43	14.06	8.95	5.31	3.56
10 Besenello	4.80	7.72	11.81	14.98	19.20	20.66	21.62	18.23	13.37	8.45	5.25	3.85
11 Bezzacca	4.56	7.71	12.36	15.09	19.28	20.11	21.53	18.16	13.66	8.78	5.18	3.65
15 Caldes	5.30	8.66	13.02	16.54	19.98	21.09	21.56	18.78	14.46	9.34	5.59	4.15
17 Cavedine	4.92	8.03	12.59	15.57	20.29	21.78	22.88	19.29	14.25	8.89	5.38	3.98
19 Cles	5.33	8.42	12.82	16.53	20.00	21.52	21.59	18.58	14.25	9.13	5.54	4.23
26 Faedo	4.28	7.11	11.80	15.66	19.79	21.12	21.61	18.33	14.07	8.28	4.59	3.25
27 Fondo	5.79	9.09	13.48	17.40	21.11	22.68	23.18	19.70	15.02	9.47	6.01	4.56
30 Lavazé	5.39	8.97	14.13	16.24	19.58	21.42	22.41	18.94	14.61	9.82	6.00	4.30
34 Lomaso	4.46	7.48	11.64	14.90	19.04	20.39	21.42	17.53	13.07	8.08	4.83	3.56
41 Mezzolombardo	4.82	7.72	11.93	15.52	19.83	21.01	21.67	18.25	13.77	8.40	5.06	3.87
48 Paneveggio	4.60	7.32	11.50	14.04	16.40	16.84	18.18	16.07	12.93	8.62	4.91	3.67
49 Passo Vezzena	4.92	7.76	12.03	13.97	18.38	19.78	21.07	17.85	13.50	8.86	5.28	3.85
51 Pellizzano	5.35	8.98	14.10	17.40	19.86	19.95	20.92	19.26	14.38	9.54	5.85	3.99
53 Pinzolo	5.02	7.73	11.35	13.91	17.66	18.16	18.89	16.54	12.27	8.00	5.12	3.76
63 Ronzo Chienis	5.48	8.36	12.53	15.78	20.63	22.19	23.62	19.87	14.82	9.56	5.94	4.36

65 Rovereto	4.71	7.62	11.88	15.11	18.91	20.15	21.17	18.34	13.75	8.56	5.13	3.74
75 Storo	4.86	7.62	12.18	14.96	18.98	20.08	21.22	18.56	13.56	8.59	5.07	3.74
76 Telve	5.18	8.47	12.82	16.31	19.93	20.80	22.17	19.16	14.22	8.87	5.54	4.04
77 Terlago	5.11	8.13	12.59	15.78	20.06	21.07	22.12	18.85	14.20	8.96	5.55	4.04
81 Trento Sud	5.01	8.24	12.63	15.81	20.14	21.58	22.59	18.98	14.37	8.95	5.51	3.75
86 Molino Vittoria	4.92	7.62	12.50	15.62	19.98	21.03	22.25	18.41	14.25	8.65	5.29	4.02
116 Tremalzo	5.25	8.04	12.10	13.78	17.42	18.26	19.92	16.43	13.01	8.62	5.71	4.12
media	4.99	8.01	12.42	15.49	19.46	20.62	21.64	18.44	13.93	8.84	5.38	3.92
mediana	4.92	7.83	12.45	15.57	19.83	21.01	21.62	18.56	14.07	8.86	5.31	3.87
deviazione standard	0.35	0.53	0.72	0.97	1.06	1.31	1.23	0.97	0.65	0.45	0.36	0.29
skewness	0.16	0.58	0.84	0.05	-1.28	-1.25	-1.17	-1.00	-0.65	0.30	-0.02	0.05

È possibile apprezzare il fatto che i valori minimi di irradiazione solare si registrano nel mese di dicembre, come atteso sulla base di valutazioni legate ai moti astronomici, mentre i valori di picco sono osservati nel mese di luglio invece che nel mese di giugno, come sarebbe stato lecito aspettarsi sulla base di considerazioni meramente astronomiche. Questo sta a indicare l'importanza dei fenomeni meteorologici locali, legati alla natura e alla morfologia del territorio trentino, ma non solo, i quali contribuiscono a rimodulare in maniera rilevante la distribuzione della radiazione solare al suolo. Inoltre, si noti anche il fatto che la deviazione standard (indicativa dell'ampiezza dell'intervallo di variabilità dell'irradiazione giornaliera per ogni mese) assume valori strettamente correlati all'intervallo di valori assoluti di irradiazione giornaliera stessa, più elevati in estate che in inverno. Per quanto concerne l'asimmetria delle singole distribuzioni statistiche mensili, si noti che i mesi da maggio a settembre rivelano tutti valori di skewness negativa abbastanza rilevanti, con code inferiori delle distribuzioni più "lunghe" di quelle superiori.

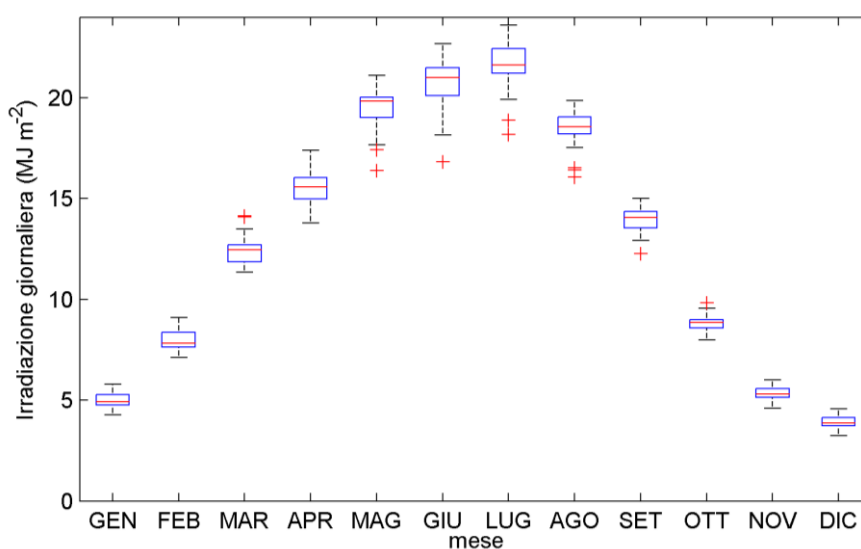


Figura 26. Ciclo annuale dei valori di irradiazione media mensile per le stazioni selezionate per la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino. Il box-plot rappresenta la distribuzione statistica per ognuno dei mesi dell'anno relativamente al gruppo di 25 stazioni scelte.





## Capitolo 8

# La modellazione della radiazione in condizioni di cielo sereno

### 8.1 Il modulo *r.sun* di GRASS

Il software GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) è un Sistema Informativo Geografico (GIS) ampiamente utilizzato per la gestione, l'elaborazione, la modellazione spaziale e la visualizzazione di dati geografici. GRASS è un progetto dell'Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), ed è un software open source e gratuito, nei termini della GNU General Public License (GPL). Il modulo "*r.sun*" di GRASS è dedicato alla modellazione della radiazione solare in condizioni "clear-sky" (ovvero di cielo sereno), tenendo conto in maniera esaustiva dei fattori astronomici e orografici, ma solo in maniera molto semplificata dei fenomeni atmosferici (ovvero limitandosi alla sola torbidità atmosferica in assenza di nubi). Esso calcola mappe raster delle componenti diretta (*B*), diffusa (*D*) e riflessa (*G*) della radiazione solare in condizioni di cielo sereno, avendo assegnato il giorno, l'ora, le coordinate geografiche e la morfologia del terreno. Sono inoltre calcolati anche alba, tramonto, declinazione solare, irradiazione extra-terrestre e lunghezza del giorno. Possono essere determinati sia l'irradianza che l'irradiazione solare, nonché l'angolo di incidenza dei raggi solari. L'effetto di ombreggiamento orografico legato all'orografia del territorio può essere opzionalmente incluso nei calcoli effettuati da *r.sun*. Il modello geometrico astronomico si basa su Krcho (1990) e Jenčo (1992). Le equazioni che descrivono la posizione relativa del Sole e della Terra e l'interazione della radiazione solare con l'atmosfera sono invece basate sul modello clear-sky sviluppato per il progetto ESRA (Scharmer and Greif, 2000; Page et al., 2001; Rigollier, 2000) e sull'algoritmo SOLPOS (NREL, 2000). Il modello *r.sun* è stato inoltre utilizzato ampiamente per la realizzazione del database PVGIS-3 (Šúri et al., 2007; vedi Capitolo 3).

Come accennato, *r.sun* può essere operato in due modalità: nel primo caso esso calcola l'irradianza solare istantanea per una certa ora e giorno dell'anno (in  $W m^{-2}$ ), nel secondo esso determina l'irradiazione giornaliera (integrata nel tempo, ovvero cumulata) per un certo giorno dell'anno (in  $W h m^{-2} d^{-1}$ ). In particolare, per la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino è stata sfruttata la seconda modalità di calcolo.

Il modulo *r.sun* necessita dei seguenti dati di input:

- *elevin*: un modello digitale dell'elevazione del terreno (mappa raster)
- *aspin*: una mappa raster dell'esposizione del terreno o della superficie di interesse

- *slopein*: una mappa raster della pendenza del terreno o della superficie di interesse
- *linkein*: una mappa raster del coefficiente di torbidità atmosferica di Linke (Kasten, 1996)
- *albedo*: una mappa raster dell'albedo superficiale
- *day*: il numero del giorno giuliano di interesse (da 1 a 365)
- *step*: l'intervallo temporale di integrazione in ore
- *dist*: parametro che controlla la precisione del calcolo degli effetti di ombreggiamento orografico (tipicamente varia da 0.5 a 1.5 celle raster).

I possibili output di *r.sun* sono invece i seguenti:

- *beam\_rad*: una mappa raster della radiazione diretta
- *diff\_rad*: una mappa raster della radiazione diffusa
- *refl\_rad*: una mappa raster della radiazione riflessa
- *glob\_rad*: una mappa raster della radiazione globale
- *insol\_time*: una mappa raster della durata del soleggiamento.

Le mappe di irradiazione solare giornaliera sono calcolate integrando l'irradianza solare calcolata tra alba e tramonto del giorno di interesse, utilizzando l'intervallo temporale di integrazione specificato dall'utente. Ovviamente una maggiore risoluzione temporale (intervallo di integrazione) e spaziale (risoluzione delle mappe) determina un incremento nei tempi di calcolo richiesti dal software. Anche l'utilizzo dell'opzione che include gli effetti di ombreggiamento orografico (flag da attivare: *-s*) contribuisce sensibilmente all'aumento dei tempi di simulazione, specialmente per bassi valori di elevazione solare.

## 8.2 I dati di input

Di seguito sono elencati tutti i dati di input utilizzati per il modulo *r.sun*:

- *elevin*: un modello digitale del terreno con risoluzione di 200 m, ottenuto ricampionando adeguatamente il modello digitale del terreno scaricato da [www.viewfinderpanoramas.org](http://www.viewfinderpanoramas.org) (vedi Fig. 27)
- *aspin*: una mappa raster dell'esposizione del terreno (risoluzione: 200 m) ottenuta dall'analisi del modello digitale del terreno tramite il modulo *r.slope.aspect* di GRASS GIS ([grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.slope.aspect.html](http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.slope.aspect.html))
- *slopein*: una mappa raster della pendenza del terreno (risoluzione: 200 m) ottenuta dall'analisi del modello digitale del terreno tramite il modulo *r.slope.aspect* di GRASS GIS, oppure un valore costante di inclinazione (pari a 0° per la stima della radiazione riferita alla superficie orizzontale)
- *linkein*: 12 mappe raster del coefficiente di torbidità atmosferica di Linke medio mensile, ottenute dall'analisi dei dati stessi di radiazione (risoluzione nominale: 200 m)
- *albedo*: 12 mappe raster dell'albedo superficiale medio mensile, ottenute dai risultati di simulazioni numeriche meteorologiche (risoluzione: 2 km)
- *day*: tutti i valori interi tra 1 e 365
- *step*: un valore di 0.1 h, ovvero 6 min
- *dist*: un valore pari a 1.0 celle raster.

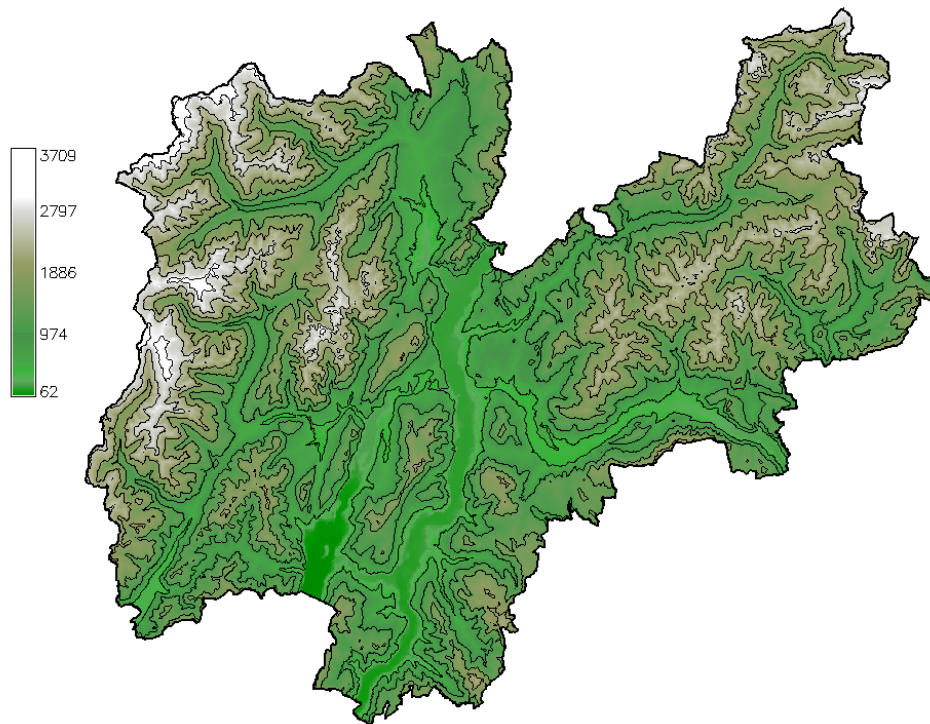


Figura 27. Rappresentazione grafica del modello digitale del terreno (DTM) utilizzato per la modellazione della radiazione in condizioni clear-sky (in m m.s.l.). Le curve di livello sono riportate con un intervallo di 500 m.

Le mappe medie mensili del coefficiente di torbidità atmosferica di Linke sono state determinate a partire dai dati stessi di radiazione raccolti dalle stazioni radiometriche. In particolare, sono stati determinati i coefficienti giornalieri e medi mensili di Linke per ognuna delle stazioni selezionate per la realizzazione dell'Atlante relativamente al periodo 2004-2012, seguendo la procedura indicata in Polo et al. (2009) e utilizzando il modello clear-sky ESRA (Scharmer e Greif, 2000). È poi stata effettuata una regressione lineare dei coefficienti medi mensili rispetto alla quota delle stazioni, in maniera indipendente per ogni mese. I risultati delle regressioni lineari (riportati in Tab. 4) sono stati poi direttamente utilizzati per mappare la distribuzione climatologica dei coefficienti di Linke medi mensili per l'intera area di interesse. Questo approccio presuppone l'ipotesi che la distribuzione della torbidità atmosferica sia unicamente determinata dalla quota del terreno sottostante, ovvero dallo spessore della colonna d'aria, piuttosto che da fattori locali di altro genere, come la presenza di centri abitati o la copertura del suolo o particolari condizioni meteorologiche (vedi ad esempio Ferrero et al., 2014). Si tratta di un'ipotesi semplificata, ma, in ogni caso, anche della migliore approssimazione possibile. Infatti, inizialmente sono stati utilizzati valori climatologici di torbidità tratti da un database che è ampiamente riconosciuto ed utilizzato per questa tipologia di modellazione (oltre che pressoché unico database climatologico di coefficienti di Linke attualmente disponibile con una copertura continua e completa), ovvero quello presentato in Remund et al. (2003). Il confronto dei valori forniti da questo database (scaricabili dal sito [www.soda-is.com](http://www.soda-is.com)) con i valori stimati a partire dalle osservazioni ha evidenziato discrepanze rilevanti, dell'ordine di più di 0.5 unità (errore medio assoluto, MAE; vedi Tab. 5).

Tabella 4. Coefficienti di correlazione lineare di Pearson per i valori di coefficiente di torbidità di Linke stimati a partire dai dati di irradiazione globale oraria al suolo e le quote delle stazioni selezionate per l'Atlante. Sono riportati anche i parametri delle regressioni lineari tra valori e quote utilizzate per la costruzione delle mappe di coefficiente di torbidità di Linke. Si noti che i valori di coefficienti angolare delle rette di regressione (ovvero i gradienti verticali, ultima riga) devono essere moltiplicati per  $10^{-4}$ .

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
coeff. corr.	-0.72	-0.58	-0.70	-0.70	-0.61	-0.56	-0.70	-0.65	-0.80	-0.80	-0.67	-0.65
intercetta	3.64	3.63	4.02	4.69	4.77	5.31	5.31	5.15	4.96	4.61	3.98	3.49
coeff. ang.	-13.4	-7.97	-7.96	-10.05	-6.22	-6.72	-8.48	-7.21	-10.25	-11.59	-11.38	-10.72

Tabella 5. Statistiche delle differenze (MBE, MAE, RMSE) tra i valori di coefficiente di torbidità di Linke estratti da Remund et al. (2003) e quelli stimati a partire dai dati di irradiazione globale oraria al suolo. L'ultima riga mostra i valori di coefficiente di correlazione lineare di Pearson tra le differenze e la quota delle stazioni utilizzate per la stima.

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	media
MBE	0.05	0.38	-0.21	-0.26	0.26	-0.10	-0.21	-0.66	-0.40	-0.51	-0.15	-0.11	-0.16
MAE	0.56	0.56	0.52	0.61	0.39	0.39	0.36	0.66	0.48	0.73	0.41	0.41	0.51
RMSE	0.65	0.74	0.57	0.65	0.47	0.47	0.46	0.73	0.57	0.82	0.50	0.50	0.61
coeff. corr.	0.83	0.60	0.64	0.62	0.61	0.64	0.72	0.54	0.71	0.75	0.62	0.56	-

Soprattutto, è stata evidenziata un'errata distribuzione altimetrica del coefficiente di Linke estratto da Remund et al. (2003) per la regione in esame, caratterizzata in generale da sottostime alle basse quote e sovrastime alle quote maggiori, con una chiara correlazione delle differenze stesse con la quota delle singole stazioni (cf. Tab. 5). Pertanto si è ritenuto più corretto ricorrere alle stime locali della torbidità atmosferica citate sopra, omogenee in termini di copertura temporale e spaziale (ma anche in termini di fonte del dato) al resto della procedura di produzione dell'Atlante. Un approccio più sofisticato sarebbe quello di effettuare un'analisi climatologica di apposite simulazioni numeriche meteorologiche e di trasporto degli aerosol atmosferici ad alta risoluzione, in grado di riprodurre correttamente la distribuzione del vapore acqueo, degli aerosol e delle polveri. Tali simulazioni richiederebbero una grande mole di lavoro e questa attività andrebbe comunque ben oltre gli scopi del presente lavoro. Pertanto l'approssimazione effettuata risulta costituire senza dubbio l'alternativa più ragionevole.

Le mappe di albedo superficiale media mensile sono state invece determinate sulla base di simulazioni meteorologiche numeriche effettuate per mezzo del modello WRF (Skamarock et al., 2008) nell'ambito della preparazione di un Atlante Eolico del Trentino (Giovannini et al., 2014). Tali simulazioni (relative all'intero anno 2012) presentano una risoluzione spaziale di 2 km sul territorio del Trentino. Il valore di albedo superficiale è determinato dall'uso del terreno (tratto dal database Corine Land Cover 2006; [www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3)) e dalla presenza o meno di neve al suolo (che è determinata dai risultati delle simulazioni del modello WRF). Le mappe medie mensili sono state ottenute mediando per ogni giorno di ogni mese dell'anno 2012 i valori di albedo superficiale stimati dal modello alle ore 12:00 UTC (vedi un esempio in Fig. 28). Le mappe risultanti sono state poi ricampionate adeguatamente alla risoluzione di 200 m.

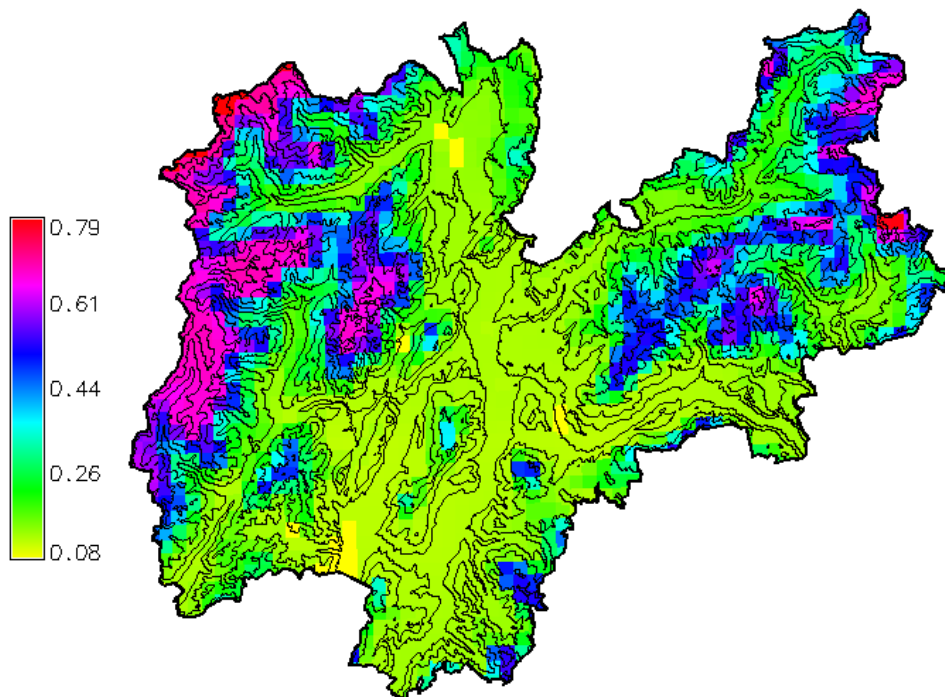


Figura 28. Esempio di mappa di albedo superficiale media mensile utilizzata per la modellazione della radiazione in condizioni clear-sky (mese: aprile). Sono chiaramente visibili le aree coperte da neve, ovvero quelle che mostrano i valori di albedo più elevati, coincidenti a grandi linee con i maggiori rilievi del territorio trentino.

Grazie ad *r.sun* sono state determinate 365 mappe giornaliere per ognuna delle diverse componenti di radiazione e per la radiazione globale. Tali mappe sono state poi aggregate in modo da ottenere 12 mappe medie mensili di irradiazione giornaliera globale, diretta e diffusa in condizioni clear-sky per l'intero territorio trentino, con una risoluzione spaziale di 200 m.

### 8.3 Risultati

Le mappe di irradiazione giornaliera (in condizioni clear-sky) media mensile ottenute grazie a *r.sun* per il territorio del Trentino sono mostrate nelle Fig. 29-30. I valori di radiazione riportati in queste mappe rappresentano il limite massimo teorico di irradiazione globale giornaliera che può essere osservata al suolo in condizioni di cielo sereno in media durante il mese di interesse.

Sono particolarmente evidenti gli effetti dovuti all'ombreggiamento orografico da parte dei rilievi, che determinano valori teorici di radiazione molto ridotti sui versanti esposti a nord e più elevati sui versanti esposti a sud (specialmente nei mesi invernali, quando l'elevazione del Sole sull'orizzonte è minore). Inoltre è possibile apprezzare parzialmente la variabilità della radiazione teorica massima con la quota. Infatti le sommità dei rilievi maggiori presentano i valori più elevati, in virtù del fatto che la colonna d'aria sovrastante è meno spessa di quella che si trova sopra i fondovalle e le quote meno elevate. Per finire, la variabilità legata alla stagionalità è un'ulteriore fattore che emerge in maniera evidente dall'osservazione delle mappe riportate. Infatti, l'intervallo di valori di irradiazione giornaliera teorica presenta un'escursione annuale piuttosto rilevante, che è essenzialmente legata alla declinazione dell'asse terrestre. Ad esempio, i valori massimi di irradiazione stimati variano approssimativamente tra  $8.4 \text{ MJ m}^{-2}$  (dicembre) e  $33.7 \text{ MJ m}^{-2}$  (giugno).

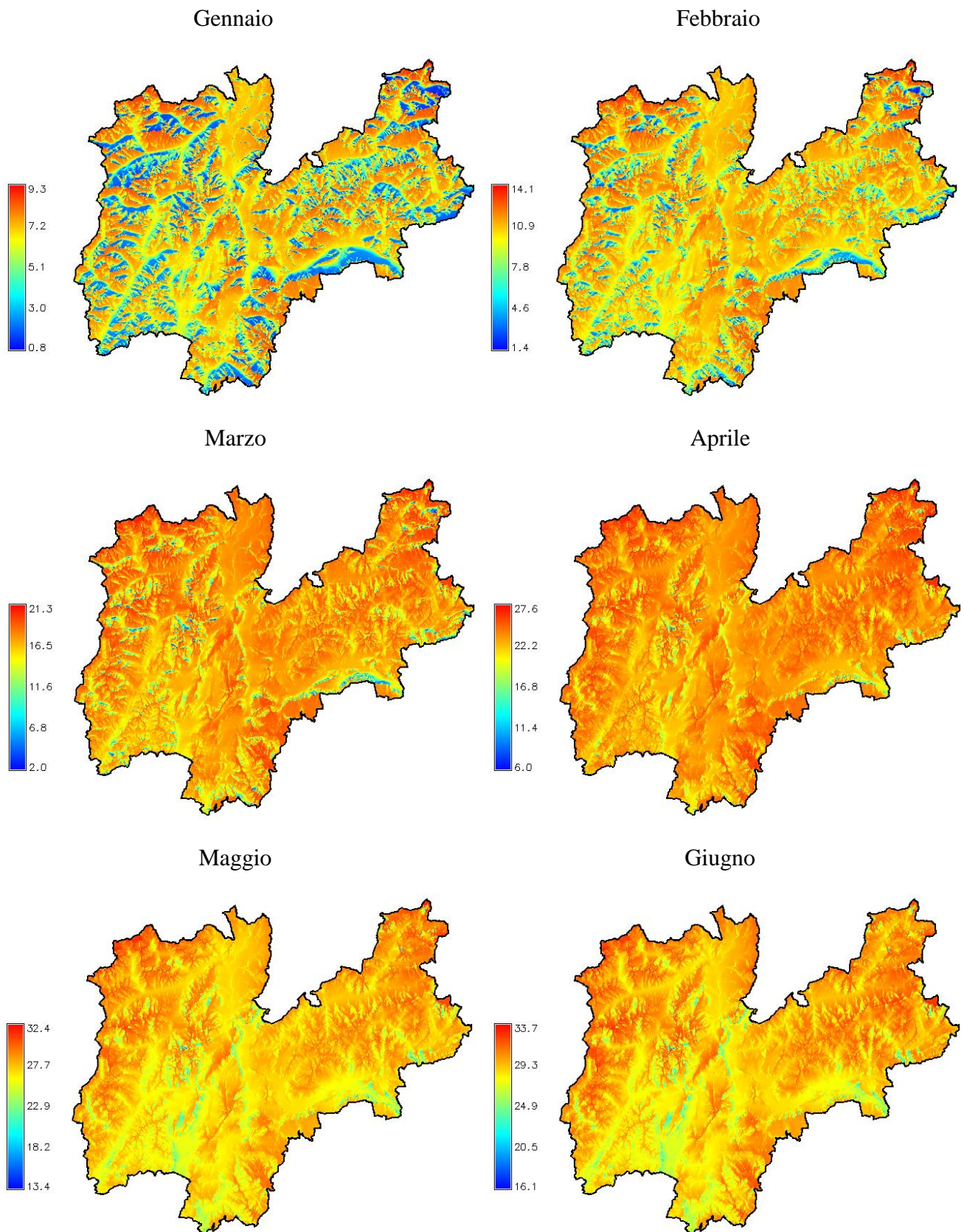


Figura 29. Mappe di irradiazione giornaliera media mensile in condizioni di cielo sereno (clear-sky) per i diversi mesi dell'anno (unità di misura: MJ m<sup>-2</sup>).

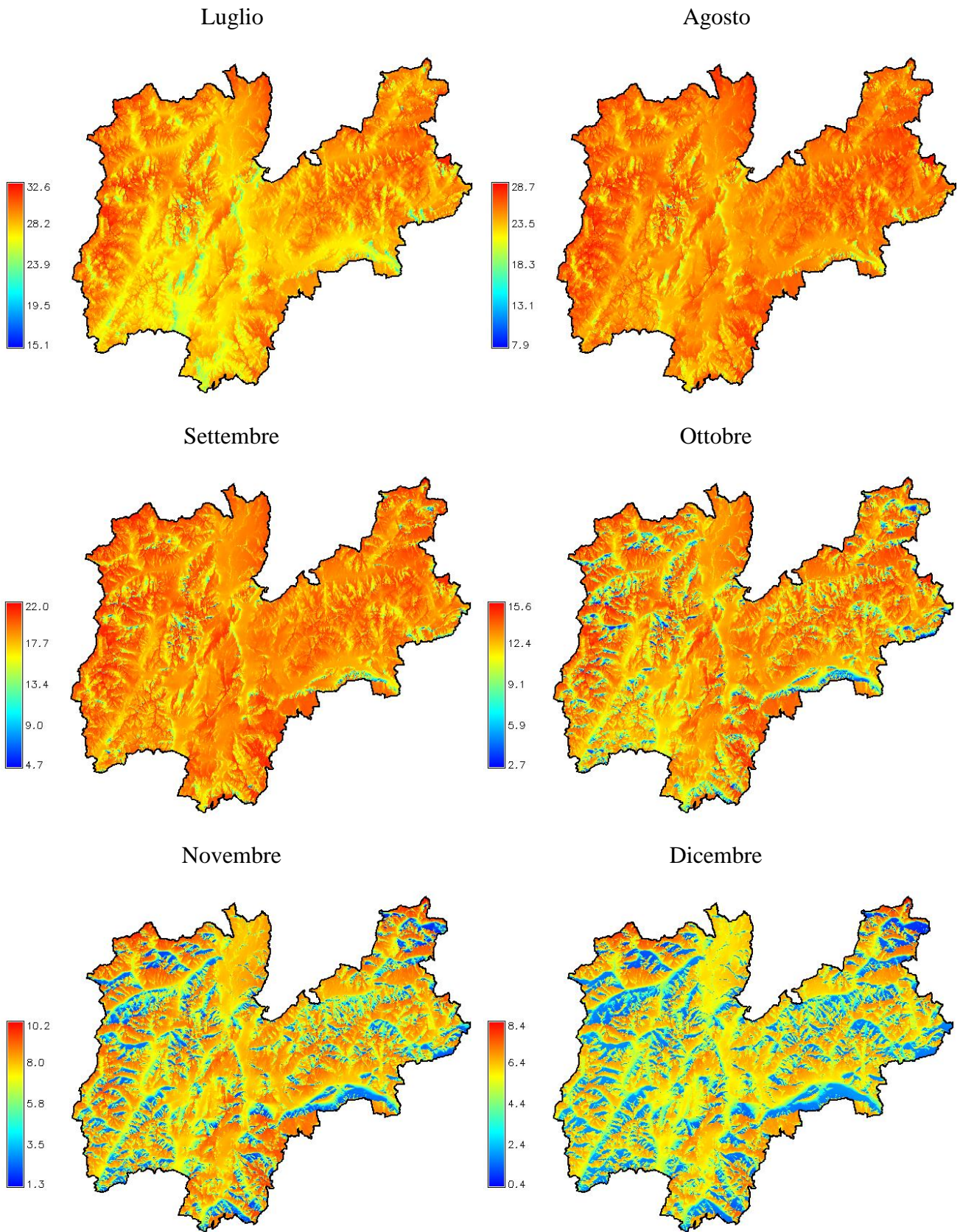


Figura 30. Vedi Fig. 29.

Le mappe presentate sono alla base della procedura di mappatura dell'Atlante Solare del Trentino, e rappresentano l'irradiazione media mensile alla superficie al netto della variabilità climatologica della copertura nuvolosa. I fattori astronomici e orografici ivi modellati rappresentano uno dei fattori di modulazione più importanti per la distribuzione spazio-temporale dell'irradiazione globale in Trentino, data la complessità morfologica del territorio analizzato. Tale variabilità non sarebbe stata riproducibile a partire dalle sole osservazioni al suolo senza l'utilizzo del software GRASS GIS, dato il ridotto numero di stazioni radiometriche disponibili in relazione al complesso territorio trentino.



## Capitolo 9

# La mappatura della radiazione solare

### 9.1 Il calcolo dell'indice clear-sky

Allo scopo di mappare la radiazione climatologica per il territorio del Trentino è necessario definire il cosiddetto indice di cielo sereno o clear-sky (“clear-sky index” in inglese) per ognuna delle stazioni analizzate e selezionate e per il periodo temporale di riferimento scelto per la mappatura. L'indice clear-sky  $K_c$  è matematicamente definito come il rapporto tra l'irradiazione globale misurata su superficie orizzontale e l'irradiazione globale stimata tramite un modello di radiazione clear-sky. Se  $K_c$  tende a 1 significa che l'atmosfera è in condizioni di cielo sereno e quindi la radiazione misurata è prossima al limite teorico calcolato dal modello, mentre se  $K_c$  tende a 0 questo indica che sono condizioni di elevata nuvolosità a predominare. Infatti,  $K_c$  è un indicatore di quanto la radiazione solare in arrivo sulla superficie terrestre venga attenuata all'interno dell'atmosfera. Tale processo è di natura prevalentemente stocastica, essendo collegato allo stato dell'atmosfera, ovvero alla sua torbidità e alla presenza di nubi, anche se alcuni fenomeni meteorologici presentano senza dubbio un certo grado di periodicità legata alle stagioni e/o all'ora del giorno. L'utilizzo di  $K_c$  come variabile per la mappatura consente di filtrare la variabilità temporale e spaziale della radiazione collegata ai fattori astronomici e orografici, isolando unicamente la componente legata allo stato dell'atmosfera.

Questo approccio è stato ampiamente utilizzato in letteratura, anche nella variante che prevede l'utilizzo del “clearness index”, ovvero del rapporto tra la radiazione misurata e la radiazione extraterrestre stimata, invece che la radiazione globale al suolo (vedi Capitolo 3). Nel caso del Trentino la complessità morfologica del territorio obbliga all'utilizzo di  $K_c$  piuttosto che del clearness index, poiché gli effetti indotti dall'orografia non possono assolutamente essere trascurati. A questo proposito, è utile tenere presente che in alcuni casi il calcolo di  $K_c$  potrebbe però risultare fuorviante agli scopi della mappatura successiva. Infatti, specialmente nei mesi invernali, quando l'elevazione solare è minore, nelle aree che risultano ombreggiate dall'orografia circostante i modelli di radiazione clear-sky come *r.sun* forniscono stime di irradiazione legate alla sola componente diffusa  $D$ , senza contributi legati alla componente diretta  $B$ . In realtà, per queste aree le stime in condizioni di cielo sereno non rappresentano il massimo teorico della radiazione misurabile, poiché in condizioni nuvolose il valore di  $D$  aumenta notevolmente rispetto alle condizioni di cielo sereno. Pertanto è possibile che, se calcolato su base oraria (o sub-oraria),  $K_c$  assuma talvolta dei valori maggiori di 1 relativamente alle situazioni descritte sopra.

Tabella 6. Valori di  $K_c$  medio mensile per le stazioni selezionate per l'Atlante e principali statistiche della variabile.

Stazione	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1 Ala	0.703	0.717	0.704	0.682	0.770	0.778	0.840	0.802	0.760	0.696	0.665	0.677
4 Arco	0.769	0.790	0.771	0.720	0.791	0.793	0.854	0.816	0.789	0.732	0.723	0.714
8 Baselga	0.639	0.684	0.688	0.641	0.710	0.708	0.774	0.734	0.726	0.656	0.627	0.570
10 Besenello	0.657	0.692	0.686	0.658	0.728	0.732	0.793	0.757	0.721	0.646	0.635	0.617
11 Bezzecca	0.745	0.752	0.735	0.666	0.736	0.724	0.793	0.745	0.724	0.702	0.710	0.717
15 Caldes	0.816	0.832	0.755	0.709	0.736	0.736	0.772	0.764	0.780	0.751	0.759	0.761
17 Cavedine	0.715	0.745	0.733	0.678	0.762	0.764	0.827	0.792	0.757	0.689	0.676	0.691
19 Cles	0.738	0.771	0.725	0.709	0.738	0.744	0.763	0.747	0.761	0.701	0.694	0.699
26 Faedo	0.776	0.795	0.746	0.685	0.730	0.731	0.771	0.753	0.794	0.752	0.714	0.708
27 Fondo	0.816	0.841	0.758	0.740	0.773	0.767	0.794	0.762	0.790	0.719	0.756	0.763
30 Lavazé	0.749	0.794	0.763	0.657	0.675	0.691	0.738	0.720	0.733	0.709	0.741	0.721
34 Lomaso	0.670	0.722	0.694	0.658	0.721	0.724	0.780	0.719	0.702	0.645	0.626	0.622
41 Mezzolom.	0.688	0.723	0.711	0.694	0.752	0.752	0.798	0.774	0.764	0.665	0.647	0.647
48 Paneveggio	0.609	0.632	0.625	0.569	0.574	0.552	0.611	0.614	0.661	0.624	0.582	0.577
49 Passo Vez.	0.645	0.662	0.651	0.571	0.653	0.659	0.721	0.686	0.677	0.635	0.601	0.610
51 Pellizzano	0.770	0.839	0.830	0.763	0.736	0.700	0.756	0.801	0.787	0.767	0.743	0.721
53 Pinzolo	0.688	0.702	0.640	0.588	0.636	0.611	0.651	0.649	0.633	0.606	0.629	0.616
63 Ronzo Ch.	0.743	0.740	0.712	0.671	0.755	0.765	0.837	0.788	0.763	0.720	0.697	0.676
65 Rovereto	0.660	0.693	0.681	0.657	0.717	0.717	0.777	0.752	0.728	0.656	0.631	0.601
75 Storo	0.768	0.760	0.741	0.668	0.736	0.737	0.785	0.767	0.745	0.701	0.700	0.693
76 Telve	0.769	0.806	0.765	0.723	0.764	0.747	0.812	0.788	0.778	0.696	0.706	0.727
77 Terlago	0.697	0.722	0.711	0.677	0.743	0.735	0.795	0.772	0.744	0.667	0.672	0.662
81 Trento Sud	0.729	0.742	0.729	0.696	0.767	0.770	0.835	0.799	0.772	0.683	0.684	0.692
86 Molino V.	0.715	0.724	0.726	0.681	0.748	0.742	0.812	0.767	0.762	0.685	0.684	0.691
116 Tremalzo	0.710	0.716	0.684	0.576	0.628	0.621	0.691	0.639	0.660	0.645	0.668	0.642
media	0.719	0.744	0.719	0.669	0.723	0.720	0.775	0.748	0.740	0.686	0.679	0.673
mediana	0.715	0.740	0.725	0.677	0.736	0.735	0.785	0.762	0.757	0.689	0.684	0.691
dev. St.	0.054	0.055	0.045	0.050	0.052	0.056	0.057	0.052	0.044	0.041	0.048	0.054
skewness	-0.10	0.13	0.03	-0.58	-1.37	-1.47	-1.27	-1.18	-0.93	0.09	-0.13	-0.27

Un eventuale processo di interpolazione che includa tali valori “anomali” di  $K_c$  fornirebbe quindi stime di radiazione eccessive (addirittura maggiori del limite teorico stimato) per le aree circostanti la stazione in oggetto, ovvero quelle aree che non sono affette da ombreggiamenti orografici comparabili, e per tutte quelle aree all'interno del raggio di influenza della singola osservazione (a seconda del metodo di interpolazione scelto e applicato). La disponibilità di osservazioni di radiazione diretta e diffusa fornirebbe la possibilità di mappare separatamente le due componenti, superando il problema descritto.

In realtà, per l'Atlante Solare del Trentino si è deciso di effettuare la mappatura diretta dei valori climatologici medi mensili di irradiazione giornaliera, perciò la problematica descritta sopra non si presenta, in quanto nessuna delle stazioni radiometriche selezionate si è rivelata in ombra per la maggior parte del giorno in nessun momento dell'anno (eventuali casi simili sono stati scartati in partenza). Nello specifico, i valori di  $K_c$  sono stati calcolati come il rapporto tra l'irradiazione globale giornaliera media mensile misurata e il valore stimato in condizioni clear-sky grazie all'aggregazione delle mappe ottenute grazie ad *r.sun* (vedi i singoli valori riportati in Tab. 6). Figura 31 mostra il ciclo annuale delle distribuzioni dei valori medi mensili di  $K_c$  per l'insieme delle stazioni selezionate per l'Atlante Solare, sotto forma di un box-plot. Il ciclo contempla i valori più elevati nei mesi di luglio, agosto e settembre, mentre valori intermedi sono registrati in gennaio, febbraio, marzo, maggio e giugno; i valori più bassi (quindi corrispondenti a condizioni di elevata nuvolosità più frequenti) sono invece registrati nei mesi tardo-autunnali (ottobre, novembre e dicembre) e in aprile. Questa distribuzione appare compatibile con la climatologia della nuvolosità e della precipitazione in Trentino, specialmente delle aree situate alle quote minori, che evidenzia picchi di nuvolosità e piovosità nelle stagioni intermedie (primavera e autunno) e minime precipitazioni in inverno (Bellin e Zardi, 2004; Di Piazza e Eccel, 2012; Panziera et al., 2014). Si noti inoltre la deviazione standard (quindi la variabilità) minore caratteristica dei mesi di marzo, settembre e ottobre, nonché la maggiore asimmetria della distribuzione mensile di  $K_c$  evidenziata dai mesi estivi (*skewness* negativa e coda inferiore più estesa di quella superiore), dove media e mediana della distribuzioni si discostano tra loro maggiormente rispetto agli altri mesi (nello specifico, la mediana è più elevata della media).

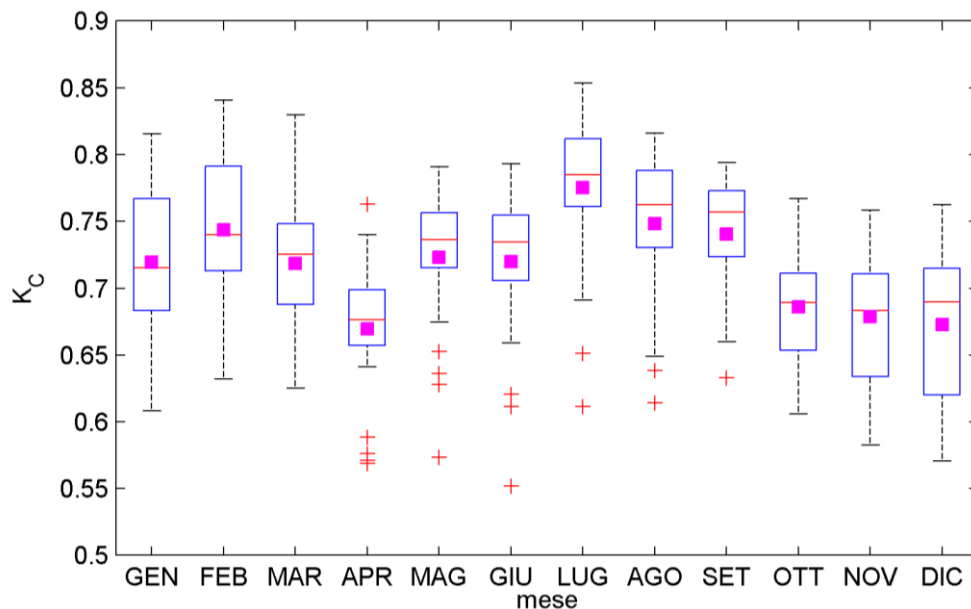


Figura 31. Box plot su base mensile dei valori di  $K_c$  per le 25 stazioni selezionate per l'Atlante. In magenta è indicata il valore medio mensile per ognuna delle distribuzioni statistiche.

## 9.2 I metodi di interpolazione

Come anticipato, allo scopo di effettuare la mappatura dell'irradiazione globale giornaliera media mensile sull'intero territorio della Provincia Autonoma di Trento è necessario interpolare i coefficienti mensili  $K_c$  calcolati per ognuna delle stazioni selezionate sull'intera area di interesse. In letteratura per applicazioni simili nel campo delle geo-scienze (climatologia, idrologia, geologia, etc.) sono stati utilizzati molti diversi metodi di interpolazione. I più comunemente adoperati sono i metodi basati sull'inverso della distanza, ma soprattutto i metodi di tipo geostatistico come il *kriging* (Goovaerts, 1997). Entrambe le tipologie di interpolazione consistono in medie pesate delle osservazioni che costituiscono il database di partenza. Mentre i metodi basati sulla distanza tra stazioni assegnano i pesi delle singole osservazioni solo in funzione della distanza (planimetrica) tra le stesse, i metodi appartenenti alla famiglia del *kriging* presuppongono l'esistenza e la conoscenza della funzione di correlazione spaziale (o covarianza) tra le osservazioni. In particolare, tale funzione viene stimata grazie al calcolo e alla modellazione del cosiddetto *semivariogramma*. Il semivariogramma empirico di un set di dati è definito come:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} |K_c(\mathbf{x}_i) - K_c(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})|^2$$

dove  $\gamma$  indica la funzione semivariogramma,  $\mathbf{x}_i$  il vettore posizione della stazione  $i$ -esima,  $\mathbf{h}$  il vettore distanza tra due stazioni,  $N(\mathbf{h})$  il numero di coppie di stazioni separate da una distanza approssimativamente pari al vettore  $\mathbf{h}$ . Un modello teorico di semivariogramma (denotato dall'accento circonflesso) deve poi essere fittato al semivariogramma empirico, in modo da poter essere utilizzato operativamente per la stima dei valori da interpolare. Esistono diversi modelli teorici, tra i quali i più comunemente utilizzati sono il modello esponenziale:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = n + (s - n) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{|\mathbf{h}|}{r}\right) \right)$$

il modello gaussiano:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = n + (s - n) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{|\mathbf{h}|^2}{r^2}\right) \right)$$

il modello sferico:

$$\begin{cases} \hat{\gamma}(\mathbf{h}) = n + (s - n) \cdot \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{|\mathbf{h}|}{r} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|\mathbf{h}|^3}{r^3} \right) & \text{se } |\mathbf{h}| < r \\ \hat{\gamma}(\mathbf{h}) = s & \text{se } |\mathbf{h}| \geq r \end{cases}$$

I parametri dei modelli teorici di semivariogramma sono rispettivamente il vettore distanza (anche detto "lag")  $\mathbf{h}$ , il valore del semivariogramma per distanze nulle (detto "nugget", spesso pari a 0)  $n$ , il valore asintotico del semivariogramma (detto "sill", circa pari alla varianza del dataset)  $s$ , la distanza massima di correlazione (detta "practical range")  $r$ .

Per ogni cella (posizione  $\mathbf{x}_g$ ) di una griglia regolare con risoluzione 200 m che copre l'intero territorio trentino i valori di  $K_c$  vengono stimati tramite i diversi metodi come segue:

$$\hat{K}_c(\mathbf{x}_g) = \sum_{i=1}^{N_i} \lambda_i \cdot K_c(\mathbf{x}_i)$$

dove i  $\lambda_i$  sono i pesi della combinazione lineare che coinvolge le osservazioni raccolte presso le  $N_i$  stazioni di posizione  $\mathbf{x}_i$ . Nel caso dell'interpolazione basata sull'inverso della distanza al quadrato (ISD – Inverse Squared Distance) i pesi della combinazione lineare sono determinati come segue:

$$\lambda_i = \frac{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_g|^{-2}}{\sum_{j=1}^{N_i} |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^{-2}}$$

Nel caso dei metodi di tipo *kriging* il calcolo dei coefficienti della combinazione lineare è più complesso. Gli algoritmi di *kriging* soddisfano il requisito del minimo errore quadratico medio sulla stima e, se applicati correttamente, restituiscono le migliori stime lineari prive di bias possibili. Inoltre una delle ipotesi di base è che la distribuzione della variabile da interpolare possa essere considerata gaussiana con una buona approssimazione. Nel caso di *ordinary kriging* (OK; Goovaerts, 1997), il sistema di equazioni la cui risoluzione fornisce i pesi della combinazione lineare  $\lambda_i$  per ogni punto di griglia  $\mathbf{x}_g$  è il seguente:

$$\begin{bmatrix} \hat{\gamma}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \hat{\gamma}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) & \dots & \hat{\gamma}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_N) & 1 \\ \hat{\gamma}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) & \hat{\gamma}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) & \dots & \hat{\gamma}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_N) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\gamma}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_1) & \hat{\gamma}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_2) & \dots & \hat{\gamma}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_N) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_g) \\ \hat{\gamma}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_g) \\ \dots \\ \hat{\gamma}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_g) \\ 1 \end{bmatrix}$$

dove  $\mu$  è un parametro di Lagrange sfruttato per imporre la condizione di stima priva di bias (ovvero somma dei pesi pari a 1). Mentre il vettore dei termini noti (termine a destra del segno di uguaglianza) ha la funzione di rappresentare la funzione di autocorrelazione della variabile di interpolare (in parziale analogia al calcolo dei pesi in funzione della sola distanza effettuato nel metodo basato sull'inverso della distanza), la matrice di sinistra svolge una funzione di “de-clustering”, ovvero permette di aggiustare i pesi in modo da tenere conto del raggruppamento e della distribuzione spaziale relativa delle osservazioni disponibili per la stima. Rispetto ad altri metodi di interpolazione, i metodi di tipo *kriging* permettono inoltre di stimare la varianza (ovvero l'errore commesso nel processo) di interpolazione, come segue:

$$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}_g) = (s-n) - \sum_{i=1}^{N_i} \lambda_i \cdot \hat{\gamma}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_g) - \mu$$

Nell'eventualità che la variabile da interpolare (nel nostro caso  $K_c$ ) presenti dei trend particolari in funzione di altre variabili (come la quota, la latitudine, la longitudine, l'esposizione o la pendenza del terreno) è possibile incorporare questa informazione aggiuntiva nei metodi di interpolazione sopra descritti. In particolare è possibile ricorrere al metodo denominato *residual kriging* (RK; Odeh et al. 1994, 1995). Questa tecnica di interpolazione consiste nella decomposizione della variabile di interesse in un termine corrispondente al trend e uno che rappresenta i residui delle osservazioni rispetto al trend stimato. A questo punto l'interpolazione (ovvero il metodo OK) viene

applicata solamente al termine residuale, mentre il termine di trend stimato viene sommato nuovamente al termine residuale interpolato solo alla fine della procedura. In questo modo sono interpolate le anomalie locali calcolate rispetto al termine deterministico dominante (il trend). Si noti che questo approccio può essere applicato anche ad altri metodi di interpolazione. Un'analisi della correlazione dei valori di  $K_c$  con potenziali variabili esplicative ha evidenziato che per la maggior parte dei mesi dell'anno esiste un trend significativo in funzione della quota delle stazioni. In particolare, il trend sembra essere di tipo lineare con la quota, anche se purtroppo non sono presenti stazioni a quote elevate che confermino tale comportamento per le quote maggiori. Si è scelto di introdurre ugualmente il *residual kriging* con trend lineare rispetto alla quota tra i metodi candidati per la mappatura. Per approfondimenti ulteriori rispetto ai metodi di interpolazione di tipo *kriging* si rimanda al testo di Goovaerts (1997).

### 9.3 La scelta del metodo di interpolazione

La scelta del miglior metodo da utilizzare per la mappatura dei coefficienti  $K_c$  è stata effettuata grazie ad un'analisi di validazione incrociata, dato che non sono disponibili database indipendenti adatti per la validazione dei risultati della mappatura. La validazione incrociata consiste nell'esclusione di una osservazione (ovvero di una stazione) per volta dalla procedura di interpolazione, permettendo così il calcolo dell'errore di interpolazione commesso presso la posizione della stazione esclusa. La ripetizione di questo procedimento di analisi per ogni diverso metodo di interpolazione ha permesso di confrontare la performance dei diversi metodi per ogni mese. I risultati della validazione incrociata sono riportati in Tab. 7, in termini di errore medio (MBE), errore assoluto medio (MAE) e scarto quadratico medio (RMSE) per  $K_c$ . Si noti che sono stati confrontati i seguenti metodi di interpolazione:

1. media pesata secondo l'inverso del quadrato della distanza (ISD),
2. ordinary kriging (OK) e
3. residual kriging (RK) con trend lineare rispetto alla quota.

È evidente dai risultati riportati in Tab. 7 che il metodo che fornisce gli errori minori è senza alcun dubbio RK, tranne che in pochissimi casi. In particolare, questo metodo restituisce sempre il MAE più basso. Pertanto la scelta del metodo di mappatura ricade su questa tecnica di interpolazione. In effetti, la correlazione lineare tra  $K_c$  e la quota delle stazioni è molto elevata per la maggior parte dei mesi (vedi Tab. 8 e Tab. 9 per i coefficienti di correlazione e i parametri dei trend lineari stimati a partire dai dati e utilizzati nell'interpolazione), il che spiega il fatto che RK fornisca stime migliori rispetto ai metodi che non tengono conto del trend verticale, ovvero ISD e OK.

Per quanto riguarda l'errore sulle stime di irradiazione giornaliera media mensile il metodo RK mostra in generale un leggero bias negativo (sottostima), che però si rivela praticamente nullo nei mesi estivi. In termini di errore percentuale RK determina un MAE medio di circa il 5% scarso e un RMSE medio di poco più del 6%, ovvero un'accuratezza relativa al processo di interpolazione che può senz'altro essere classificata come molto buona (Tab. 10). I mesi estivi presentano in generale performance migliori rispetto a quelli invernali (ma questo vale anche per gli altri metodi), e in genere sono anche quelli per i quali l'utilizzo di un approccio residuale (ovvero la stima separata di trend e residui come nel metodo RK) apporta i miglioramenti più evidenti e le riduzioni più consistenti degli errori di validazione incrociata (cfr. Tab. 7). In ogni caso, è importante notare che

ci si sta riferendo solo all'accuratezza del metodo di interpolazione, non all'accuratezza del risultato vero e proprio della procedura di stima e mappatura, e sempre in relazione unicamente allo specifico database selezionato in partenza.

Tabella 7. Risultati mensili dell'analisi di validazione incrociata (relativamente ai valori di  $K_c$ ) in termini di MBE, MAE e RMSE, per i tre metodi confrontati (ISD, OK e RK). Per ognuna delle categorie di errore sono evidenziati i mesi e i metodi che restituiscono l'errore minimo.

	ass(MBE)			MAE			RMSE		
	ISD	OK	RK	ISD	OK	RK	ISD	OK	RK
GEN	1.42E-03	2.47E-04	1.72E-04	4.77E-02	4.60E-02	4.58E-02	5.52E-02	5.57E-02	5.52E-02
FEB	2.92E-04	4.35E-05	2.16E-05	4.50E-02	4.50E-02	4.43E-02	5.43E-02	5.54E-02	5.49E-02
MAR	9.91E-04	5.55E-11	1.37E-11	3.96E-02	3.63E-02	3.50E-02	4.97E-02	4.62E-02	4.46E-02
APR	3.72E-03	2.94E-04	3.16E-04	3.66E-02	3.71E-02	2.99E-02	5.12E-02	5.07E-02	4.02E-02
MAG	8.28E-03	1.23E-03	4.74E-08	3.77E-02	3.80E-02	2.56E-02	5.24E-02	5.15E-02	3.30E-02
GIU	9.94E-03	2.36E-03	1.13E-06	3.84E-02	3.78E-02	2.73E-02	5.58E-02	5.48E-02	3.71E-02
LUG	1.08E-02	2.22E-03	1.87E-05	3.87E-02	3.81E-02	2.72E-02	5.53E-02	5.40E-02	3.67E-02
AGO	7.18E-03	5.23E-04	8.16E-07	4.07E-02	3.89E-02	2.80E-02	5.42E-02	5.22E-02	3.55E-02
SET	5.55E-03	1.02E-03	5.10E-04	3.50E-02	3.41E-02	2.97E-02	4.48E-02	4.37E-02	3.62E-02
OTT	2.36E-03	6.83E-11	1.82E-04	3.77E-02	3.48E-02	3.43E-02	4.41E-02	4.23E-02	4.18E-02
NOV	1.55E-03	2.11E-04	1.65E-04	4.24E-02	4.05E-02	4.01E-02	4.94E-02	4.91E-02	4.89E-02
DIC	1.35E-03	7.12E-11	4.00E-11	5.04E-02	4.68E-02	4.55E-02	5.64E-02	5.52E-02	5.44E-02

Tabella 8. Coefficienti di correlazione lineare di Pearson (P) e Spearman (S) tra i  $K_c$  mensili e la quota delle stazioni. Sono evidenziati i mesi nei quali la correlazione risulta particolarmente rilevante.

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
P	-0.113	-0.098	-0.257	-0.559	-0.783	-0.764	-0.781	-0.748	-0.576	-0.207	-0.078	-0.161
S	0.002	-0.020	-0.122	-0.396	-0.594	-0.667	-0.736	-0.621	-0.338	-0.092	0.008	-0.038

Tabella 9. Valori mensili di intercetta e coefficiente angolare delle regressioni lineari utilizzate nella stima del trend di  $K_c$  con la quota nell'applicazione del metodo residual kriging (RK). Si noti che i valori dei coefficienti angolari vanno moltiplicati per  $10^{-5}$ .

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
intercetta	0.728	0.751	0.735	0.709	0.780	0.780	0.838	0.803	0.776	0.698	0.684	0.685
coeff. ang.	-1.20	-1.04	-2.26	-5.46	-7.90	-8.39	-8.74	-7.63	-4.98	-1.67	-0.73	-1.69

Tabella 10. Risultati dell'analisi di validazione incrociata per il metodo RK, in termini non solo di  $K_c$  ma anche di irradiazione giornaliera media  $G_d$ .

mese	Errore su $K_c$			Errore su $G_d$ ( $\text{MJ m}^{-2}$ )			Errore su $G_d$ (%)		
	MBE	MAE	RMSE	MBE	MAE	RMSE	MBE	MAE	RMSE
GEN	-1.72E-04	4.58E-02	5.52E-02	-0.02	0.32	0.39	-0.32	6.39	7.78
FEB	2.16E-05	4.43E-02	5.49E-02	-0.02	0.48	0.60	-0.20	6.00	7.49
MAR	-1.37E-11	3.50E-02	4.46E-02	-0.01	0.61	0.78	-0.07	4.91	6.30
APR	3.16E-04	2.99E-02	4.02E-02	0.00	0.70	0.95	-0.01	4.53	6.11
MAG	-4.74E-08	2.56E-02	3.30E-02	0.00	0.70	0.91	-0.01	3.58	4.67
GIU	-1.13E-06	2.73E-02	3.71E-02	0.00	0.80	1.10	0.00	3.86	5.34
LUG	-1.87E-05	2.72E-02	3.67E-02	0.00	0.77	1.06	0.00	3.56	4.88
AGO	-8.16E-07	2.80E-02	3.55E-02	0.00	0.70	0.89	-0.02	3.78	4.84
SET	-5.10E-04	2.97E-02	3.62E-02	-0.02	0.56	0.69	-0.11	4.04	4.92
OTT	-1.82E-04	3.43E-02	4.18E-02	-0.02	0.44	0.53	-0.18	4.99	6.02
NOV	-1.65E-04	4.01E-02	4.89E-02	-0.01	0.32	0.39	-0.25	5.94	7.30
DIC	-4.00E-11	4.55E-02	5.44E-02	-0.01	0.27	0.32	-0.33	6.85	8.28
media	-5.93E-05	3.44E-02	4.32E-02	-0.01	0.56	0.72	-0.13	4.87	6.16

## 9.4 Risultati

Le Fig. 32-33 riportano le mappe medie mensili di  $K_c$  risultanti dall'interpolazione effettuata grazie al metodo RK, ovvero il metodo prescelto per la realizzazione dell'Atlante. Si nota con chiarezza una notevole variabilità di distribuzione spaziale: mentre nei mesi più freddi (gennaio, febbraio, marzo, ottobre, novembre, dicembre) la variabilità spaziale di  $K_c$  sembra determinata primariamente dalla diversa climatologia di radiazione riscontrata presso le stazioni selezionate per l'Atlante, nei mesi più caldi (aprile, maggio, giugno, luglio, agosto, settembre) la distribuzione di  $K_c$  appare invece molto più legata all'elevazione del terreno (con valori minori alle quote più alte). Questo rispecchia la forte correlazione delle osservazioni relative ai mesi estivi con la quota evidenziata nei paragrafi precedenti, e la minore correlazione evidenziata dai mesi invernali. Tale differenza ha una spiegazione meteorologica: tipicamente in estate una maggiore nuvolosità si sviluppa per convergenza delle masse d'aria umide sopra le creste dei rilievi (alle quote maggiori) in seguito allo sviluppo di correnti termiche di pendio e di valle ascendenti (Zardi e Whiteman, 2013). Diversamente, questi fenomeni non si verificano in inverno, quando la presenza di nubi e di precipitazione è invece determinata principalmente da sistemi convettivi con scale spaziali maggiori di quella locale.



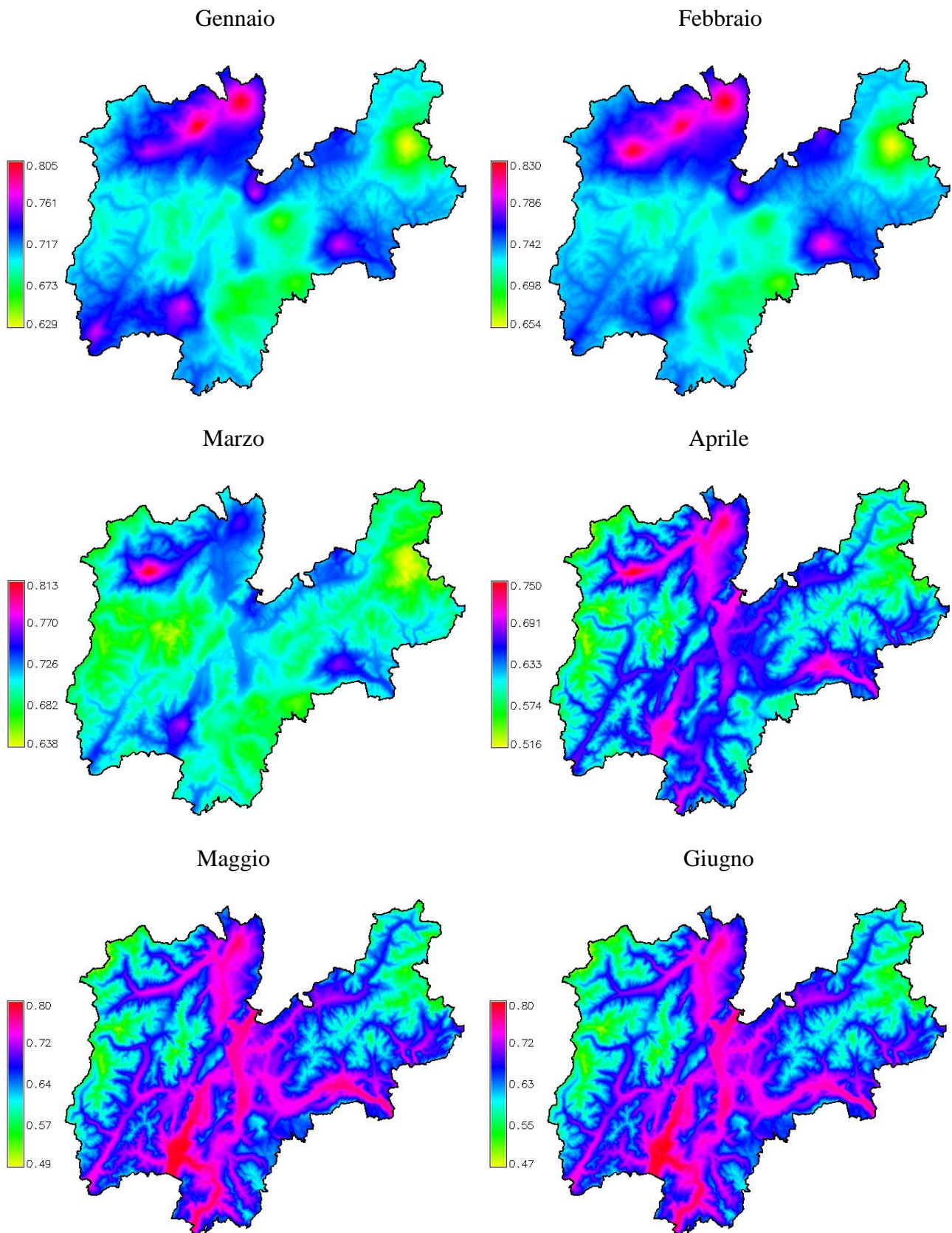


Figura 32. Mappe di  $K_c$  medio mensile per i diversi mesi dell'anno, ottenute tramite interpolazione con il metodo RK.

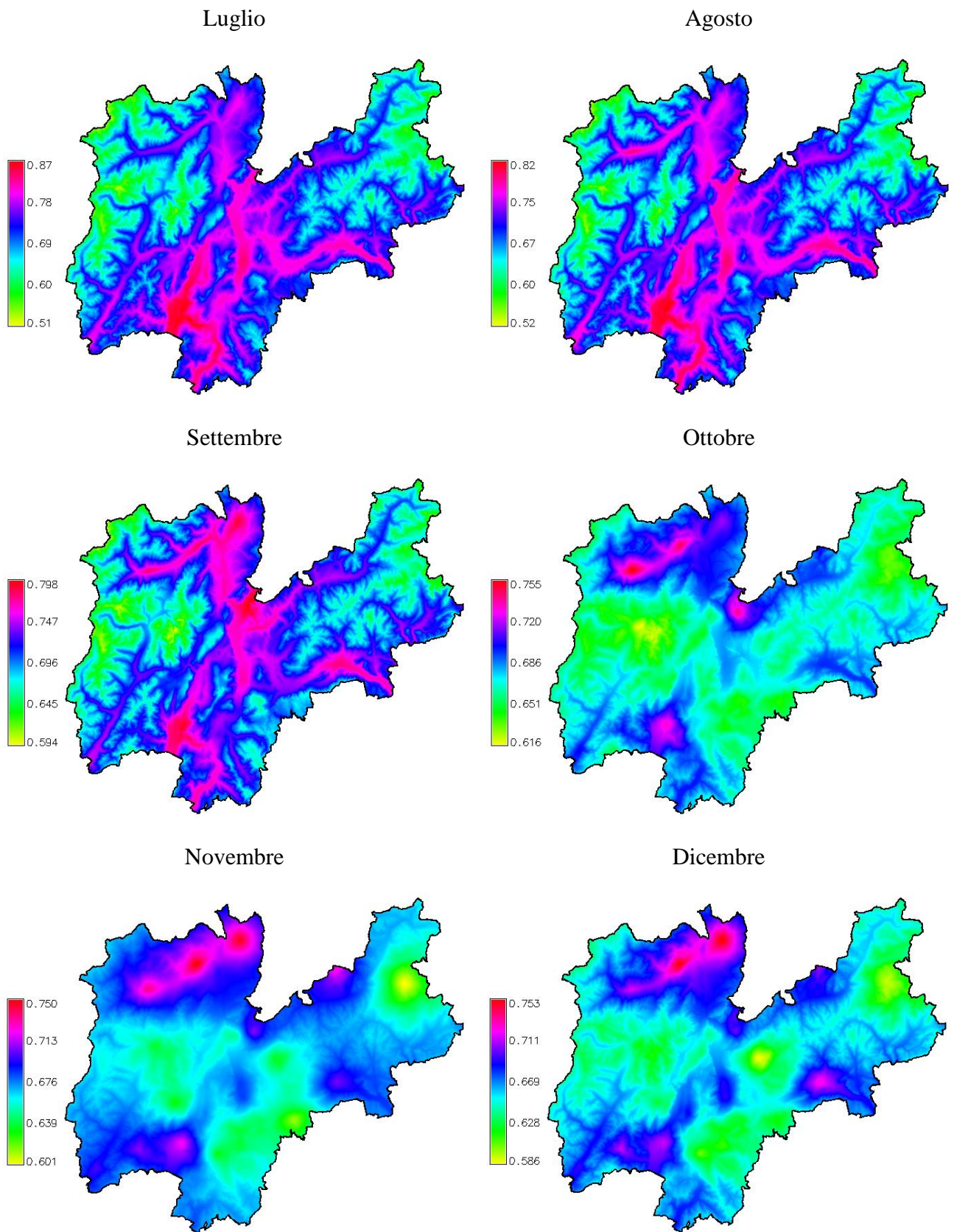


Figura 33. Vedi Fig. 32.

Le mappe finali di irradiazione giornaliera media mensile (vedi Fig. 34-36) evidenziano anch'esse una sostanziale diversità nella distribuzione spaziale della radiazione tra mesi invernali ed estivi. Mentre nei mesi invernali (più freddi) la distribuzione della radiazione dipende essenzialmente dagli effetti di ombreggiamento orografico (che sono molto rilevanti in questi mesi, a causa principalmente della bassa elevazione del Sole sull'orizzonte) e valori più elevati di radiazione sono generalmente registrati alle quote più alte, nei mesi estivi (più caldi) gli effetti di ombreggiamento orografico perdono relativamente di importanza e i valori più elevati di radiazione sono invece registrati nelle aree corrispondenti ai grandi fondovalle come quello della Valle dell'Adige, della Valle del Sarca e dei Laghi e della Val di Non. In pratica, mentre nei mesi invernali la radiazione reale è molto ben correlata alla radiazione misurata in condizioni di cielo sereno, nei mesi estivi le condizioni meteorologiche e climatologiche locali assumono un'importanza maggiore e rimodulano in maniera più rilevante la radiazione al suolo. In effetti, le distribuzioni di frequenza dei valori di irradiazione per i diversi mesi dell'anno, mostrate in Fig. 37, appaiono pronunciatamente bimodali nei mesi invernali (rappresentando l'opposizione tra versanti ben esposti all'insolazione e versanti prevalentemente in ombra) e diventano gradualmente unimodali nei mesi restanti (quando l'irradiazione è più correlata alla quota che all'esposizione). Per quanto riguarda i valori massimi e minimi di irradiazione, rispetto a quanto mostrato per la modellazione della radiazione in condizioni clear-sky, il mese con i valori di radiazione minori è lo stesso (dicembre;  $5.3 \text{ MJ m}^{-2}$ ), mentre il mese che registra i valori massimi è luglio ( $23.2 \text{ MJ m}^{-2}$ ), e non giugno come per le mappe clear-sky.

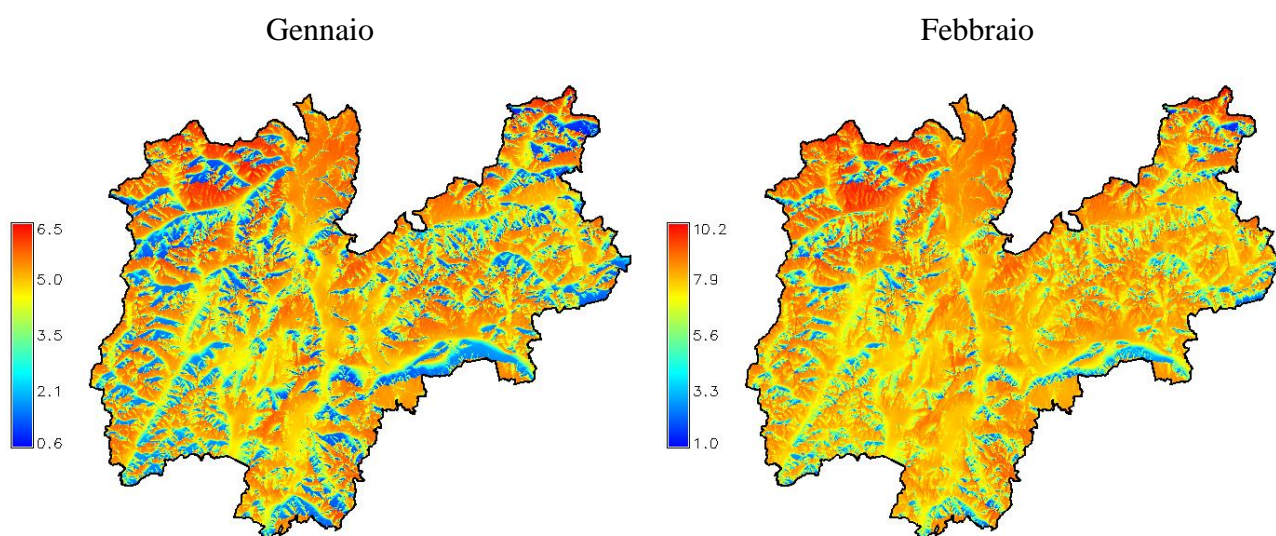


Figura 34. Mappe di irradiazione giornaliera media mensile per i diversi mesi dell'anno ( $\text{MJ m}^{-2}$ ).

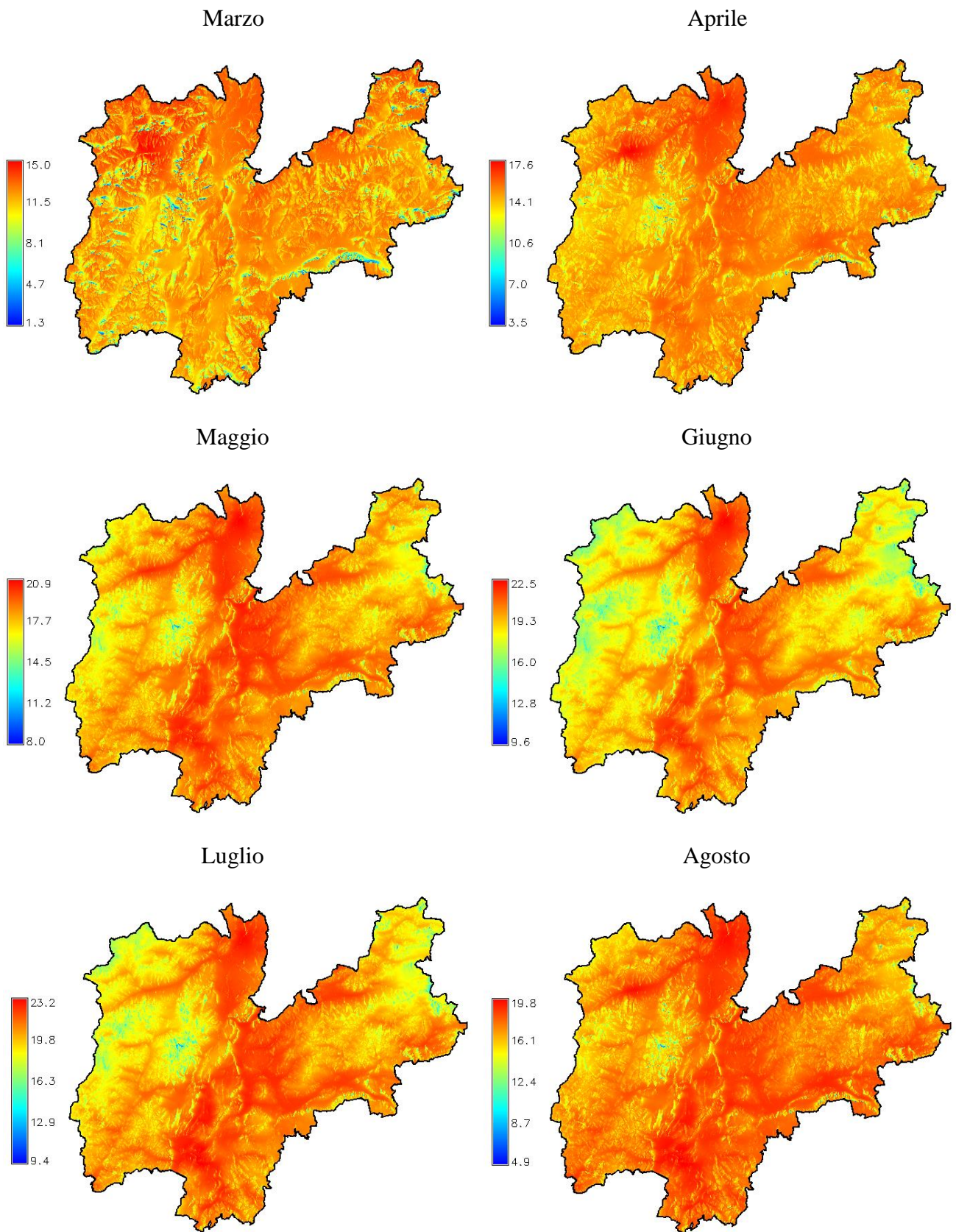


Figura 35. Vedi Fig. 34.

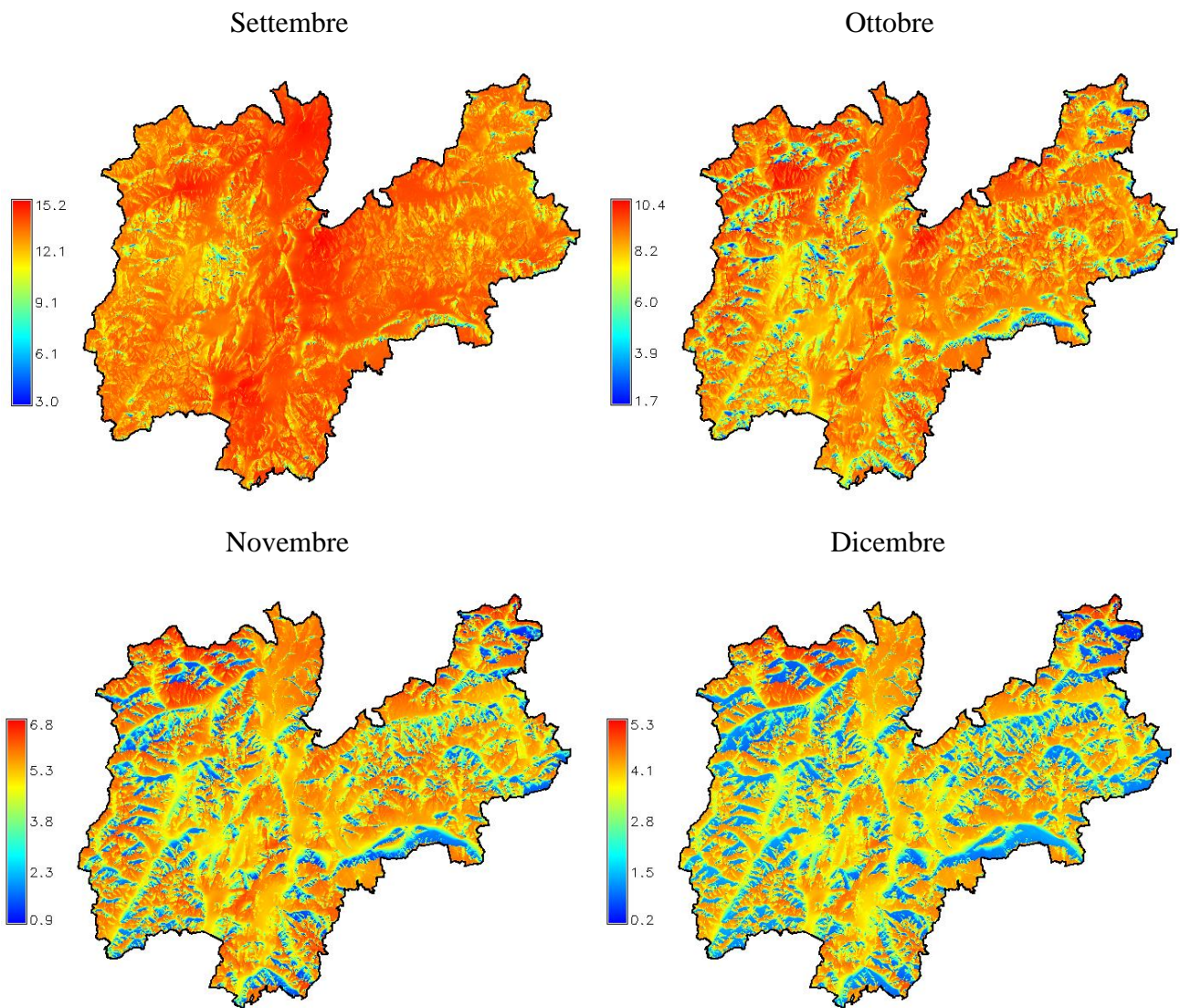


Figura 36. Vedi Fig. 34.

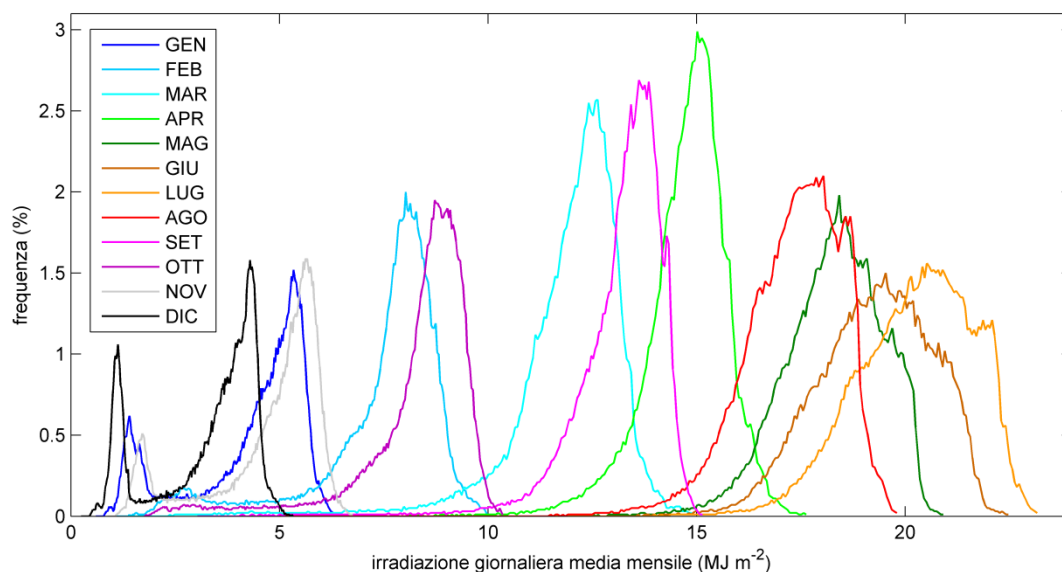


Figura 37. Grafico delle distribuzioni di frequenza (percentuale) dei valori di irradiazione giornaliera media mensile sul territorio trentino per ogni mese dell'anno.

La mappa di irradiazione media annua è rappresentata invece in Fig. 38, mentre la distribuzione di frequenza dei valori associata è riprodotta in Fig. 39. Il valore medio dell'irradiazione annua sull'intero territorio del Trentino è stimato pari a 4362 MJ m<sup>-2</sup>. La distribuzione spaziale dell'irradiazione media annua risulta dalla combinazione dei diversi pattern mostrati dai singoli mesi. In particolare, le zone con i valori più elevati di irradiazione sono i maggiori fondovalle, in analogia a quanto evidenziato dai mesi estivi, e alcuni versanti ottimamente esposti a sud. Al contrario, i valori minori sono prevalentemente individuati sui versanti esposti a nord (che mostrano i valori in assoluto più bassi nei mesi invernali) e in alcune zone situate a quote elevate.

Il confronto tra i risultati finali della mappatura dell'irradiazione solare e i valori climatologici di partenza osservati presso le singole stazioni selezionate ha rivelato che l'errore associato alle mappe in corrispondenza delle posizioni delle stazioni è del tutto trascurabile, essendo dell'ordine di meno dell'1%, con valori mediamente minori per i mesi più caldi (vedi Tab, 11).

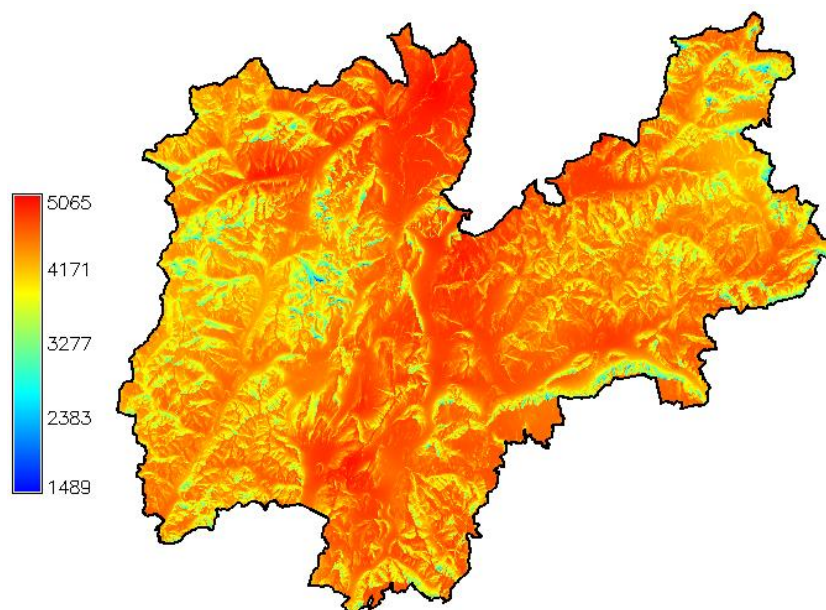


Figura 38. Mappa di irradiazione media annua ( $\text{MJ m}^{-2}$ ).

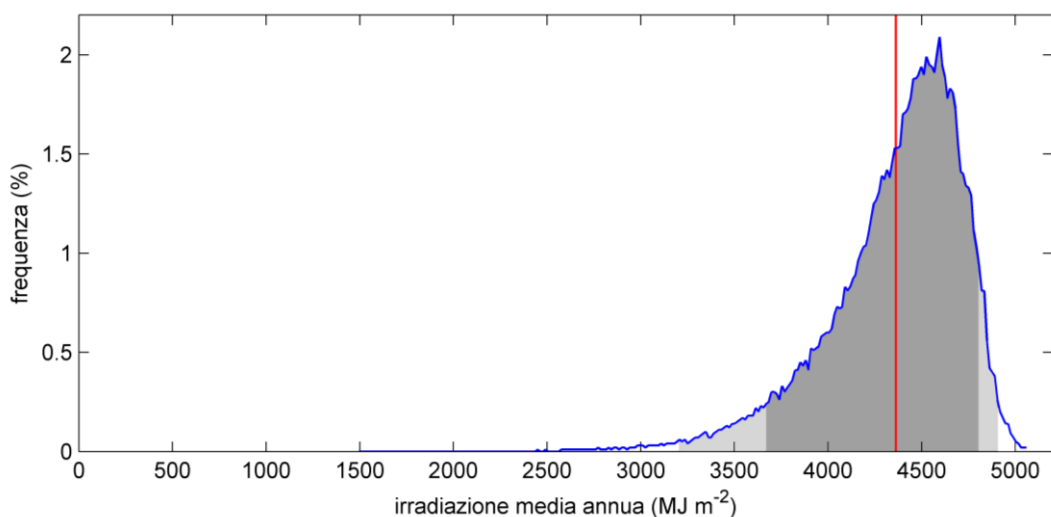


Figura 39. Grafico della distribuzione di frequenza (percentuale) dei valori di irradiazione media annua sul territorio trentino. In rosso è evidenziato il valore medio ( $4362 \text{ MJ m}^{-2}$ ). In grigio chiaro e scuro rispettivamente sono indicati gli intervalli compresi tra i percentili 1%–99% e 5%–95%.

Tabella 11. Errori medi mensili relativi al confronto tra le mappe finali di irradiazione giornaliera media mensile dell'Atlante e le climatologie corrispondenti (unità: punti percentuali, %).

	<i>GEN</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>APR</i>	<i>MAG</i>	<i>GIU</i>	<i>LUG</i>	<i>AGO</i>	<i>SET</i>	<i>OTT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>	<i>media annua</i>
<i>rMBE</i>	0.09	0.10	0.10	0.08	0.02	0.01	-0.01	0.02	0.02	0.06	0.08	0.12	0.06
<i>rMAE</i>	0.80	0.75	0.65	0.65	0.53	0.57	0.54	0.57	0.54	0.68	0.80	0.88	0.66





## Capitolo 10

### Il confronto con altri Atlanti Solari

Come anticipato nel Capitolo 1, stime accurate di radiazione solare alla superficie terrestre sono essenziali per molteplici applicazioni, soprattutto relative al campo delle energie rinnovabili e quindi degli impianti fotovoltaici e solari termici per il riscaldamento e il raffrescamento, nonché per le valutazioni inerenti l'efficienza energetica degli edifici. Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi Atlanti Solari allo scopo di rispondere alla necessità della conoscenza della risorsa energetica solare disponibile sul territorio (Capitolo 3), molti dei quali esplicitamente finalizzati alla pianificazione e alla progettazione di impianti fotovoltaici. Come già detto, uno dei più diffusi ed utilizzati attualmente (anche dai professionisti del settore) è il database PVGIS, realizzato dal Joint Research Center della Comunità Europea, del quale sono disponibili due versioni. Esse presentano discrepanze e incertezze rilevanti per l'area alpina, e di conseguenza per il territorio del Trentino, associate alle difficoltà intrinseche che caratterizzano la stima della radiazione incidente al suolo in presenza di terreno montuoso. Queste sono collegate sia all'aumento della variabilità spaziale e temporale della radiazione dovuto agli effetti della complessa orografia, che alle difficoltà comuni alla maggior parte degli algoritmi satellitari nel discriminare tra nubi e neve. A tal proposito, il database HelioMont, introdotto e brevemente descritto nel Capitolo 7, rappresenta uno dei migliori database satellitari di radiazione attualmente disponibili per l'arco alpino (vedi Stöckli, 2013). Esso infatti è ottenuto tramite un algoritmo di analisi delle immagini satellitari specificamente pensato e adattato per il territorio alpino e le sue problematiche.

Alla luce di queste considerazioni, nei paragrafi successivi le mappe finali elaborate per l'Atlante Solare del Trentino sono confrontate con le mappe di irradiazione fornite rispettivamente dai database PVGIS-3, PVGIS-CMSAF e HelioMont. Questa analisi ha lo scopo di investigare la variabilità e la validità delle mappe di irradiazione globale non solo dell'Atlante, ma anche degli altri database di radiazione. Si ricorda che i quattro database hanno caratteristiche disomogenee in quanto a risoluzione spaziale, periodo climatologico di riferimento e tipologia e origine dei dati (vedi Tab. 12), pertanto il confronto tra di non è immediato né diretto. D'altro canto, non sono disponibili ulteriori misure radiometriche al suolo (caratterizzate da una qualità o da una durata temporale sufficiente) rispetto a quelle selezionate per la realizzazione dell'Atlante stesso. Questo significa che non è possibile effettuare una validazione delle mappe dell'Atlante (e analogamente degli altri database) per mezzo di osservazioni da stazioni radiometriche indipendenti. Infine, in questa analisi è stato privilegiato il confronto tra l'Atlante Solare del Trentino e HelioMont, che hanno lo stesso periodo climatologico di riferimento.

Tabella 12. Caratteristiche tecniche principali dei diversi atlanti solari a confronto.

	PVGIS-3	PVGIS-CMSAF	HelioMont	Atlante Solare del Trentino
risoluzione spaziale	1.0–1.8 km	1.9–2.7 km	1.5–2.2 km	0.2 km
periodo di riferimento	1981–1990	1998–2011	2004–2012	2004–2012
tipologia di dato	misure da stazioni radiometriche	immagini satellitari	immagini satellitari	misure da stazioni radiometriche

### 10.1 Confronto con PVGIS-3 e PVGIS-CMSAF

Come anticipato nel Capitolo 3, mentre PVGIS-CMSAF (il nuovo database PVGIS) è stato costruito a partire dall’analisi di immagini satellitari, il vecchio PVGIS-3 è invece stato realizzato con una metodologia molto simile a quella con la quale è stato realizzato l’Atlante Solare del Trentino. Infatti, anche per PVGIS-3 è stato impiegato il modello *r.sun* di GRASS GIS, utilizzando valori climatologici del coefficiente di torbidità di Linke tratti da Remund et al. (2003), e interpolando i coefficienti clear-sky calcolati da osservazioni radiometriche con un metodo del tipo “spline regolarizzate con tensione”, con l’applicazione di un’opportuna riscalatura verticale per tenere conto degli effetti della quota del terreno (Šúri et al., 2007). Si noti che, in realtà, nessuna delle stazioni radiometriche considerate in PVGIS-3 ricade nel territorio del Trentino (la più vicina è Bolzano).

È già stato accennato il fatto che PVGIS-3 e PVGIS-CMSAF forniscono mappe di radiazione considerevolmente differenti e parzialmente in conflitto tra loro (vedi Capitolo 3). Inoltre entrambi non sono particolarmente accurati sulle Alpi e quindi sul Trentino (Huld et al., 2012). In particolare, in PVGIS-3 i valori minimi di irradiazione annua corrispondono alle fondovalle delle maggiori valli del Trentino e i valori maggiori alle aree a quote più elevate, con una chiara correlazione tra irradiazione e quota del terreno (Fig. 40, in alto a sinistra). Diversamente, in PVGIS-CMSAF è una fascia centrale del Trentino (che comprende le aree della Valle dell’Adige, Basso Sarca, Valle dei Laghi e Val di Non) a mostrare i maggiori valori di irradiazione annua, mentre alle quote più elevate sono abbastanza sistematicamente misurati i valori più ridotti, soprattutto alle estremità occidentali e orientali della regione (Fig. 40, in alto a destra).

Figura 41 mostra le mappe delle differenze relative (in termini di percentuali) tra i valori di irradiazione media annua fornita dall’Atlante Solare del Trentino (la cui mappa di irradiazione media annua è riprodotta in Fig. 40 in basso a destra) e i due database PVGIS. Il confronto tra l’Atlante Solare e PVGIS-3 evidenzia una sistematica alternanza di differenze positive (fino al +29%) e negative (fino al -70%), rispettivamente collocate nelle aree corrispondenti ai maggiori fondovalle della regione (Valle dell’Adige, Basso Sarca, Valle dei Laghi, Valsugana, Val di Non e Val di Sole; con una sovrastima pari a circa il +6% in media) e sui rilievi più elevati in prossimità dei confini regionali occidentali e orientali (con una sottostima pari a circa il -10% in media). Nel complesso, l’Atlante Solare fornisce stime di irradiazione mediamente più basse di quelle offerte da PVGIS-3, con un errore (semplice) relativo attorno al -5% e un errore assoluto relativo del 9% circa (vedi Tab. 13).

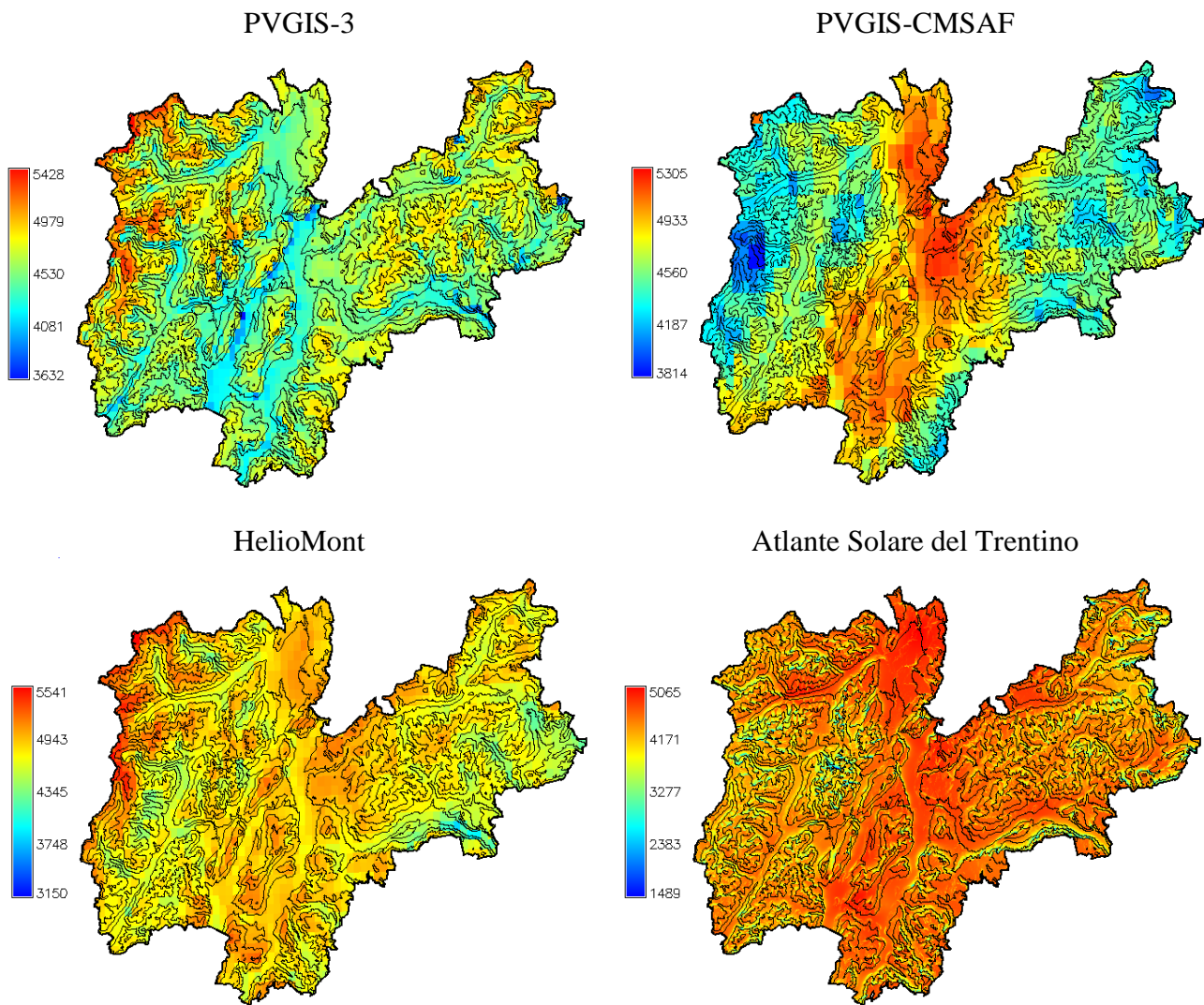


Figura 40. Mappe di irradiazione media annua tratte dai due database PVGIS, da HelioMont e dall'Atlante Solare del Trentino. Si noti il diverso intervallo e la diversa disposizione geografica dei valori di irradiazione.

PVGIS-CMSAF mostra un errore (semplice) relativo leggermente più rilevante (-7% circa) e un errore assoluto relativo leggermente meno consistente, ovvero intorno all'8%. In questo secondo caso le differenze positive (in media pari al +3%) e negative (mediamente pari al -9%) tra le mappe di irradiazione annuale sono invece disposte in maniera molto più casuale e spazialmente incoerente rispetto a prima (vedi Fig. 43). Sono però rintracciabili alcune situazioni nelle quali si distinguono chiaramente anomalie negative sui versanti esposti a nord e corrispondenti anomalie positive (o negative ma di minore entità) sui corrispondenti versanti esposti a sud (cfr. ad esempio la zona della Valsugana). Questa circostanza rispecchia il fatto che la risoluzione spaziale del dato satellitare è tale che un singolo pixel (dell'immagine satellitare) può comprendere condizioni di insolazione molto diverse tra loro. Di conseguenza il valore medio di irradiazione misurato per quel pixel risulta sensibilmente diverso dai valori locali realmente osservabili. Nelle aree pianeggianti (dove PVGIS-CMSAF è più accurato di PVGIS-3; cfr. Huld et al., 2012), ovvero i maggiori fondovalle della regione, la differenza tra l'Atlante e PVGIS-CMSAF è dell'ordine del -5% circa.

Tra le possibili ragioni per le discrepanze osservate sono da menzionare:

- ✓ il diverso periodo climatologico di riferimento per i tre database,
- ✓ la diversa risoluzione spaziale e quindi la diversa trattazione degli effetti orografici (nonostante il comune approccio utilizzato per la mappatura in PVGIS-3 e Atlante Solare),
- ✓ il diverso set di stazioni radiometriche utilizzate per la mappatura (nessuna delle quali appartenente al territorio della Provincia di Trento; per PVGIS-3)
- ✓ le problematiche di sottostima della radiazione solare legate alla difficoltà di distinzione tra nubi e neve al suolo nelle immagini satellitari (per PVGIS-CMSAF).

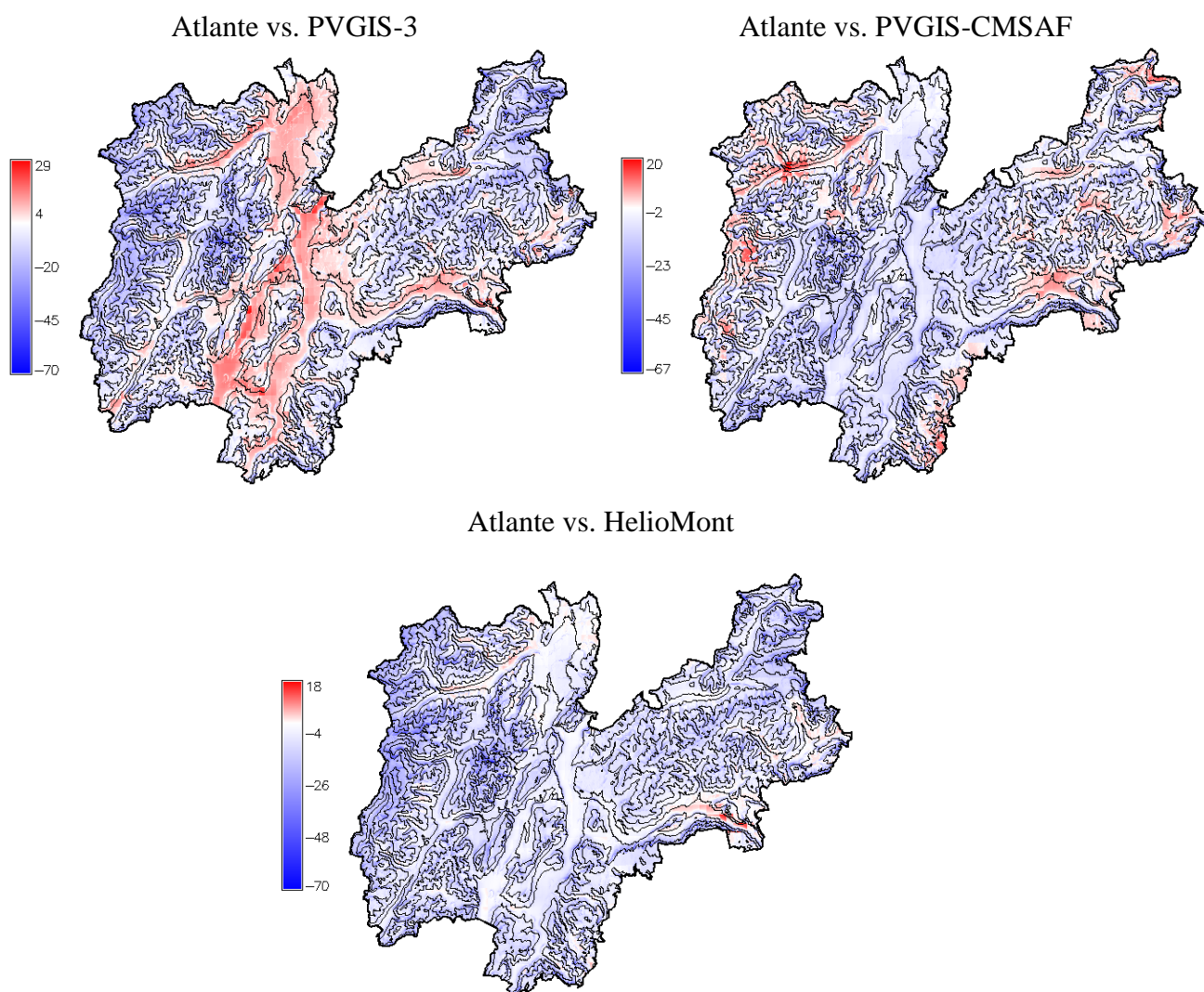


Figura 41. Mappe della differenza relativa (in unità percentuali, %) tra l'irradiazione media annua dell'Atlante Solare del Trentino e i database PVGIS e HelioMont.

Tabella 13. Statistiche delle differenze tra le mappe di irradiazione media annua dell'Atlante Solare del Trentino e dei tre database posti a confronto (MBE = "Mean Bias Error", MAE = "Mean Absolute Error", r = errore relativo).

	PVGIS-3	PVGIS-CMSAF	HelioMont
MBE (MJ m <sup>-2</sup> )	-266.44	-317.04	-460.07
rMBE (%)	-5.43	-6.62	-9.46
MAE (MJ m <sup>-2</sup> )	411.65	366.13	467.14
rMAE (%)	8.77	7.76	9.62

## 10.2 Confronto con HelioMont

L'algoritmo HelioMont (Stöckli, 2013), come già accennato nel Capitolo 7, tiene conto della maggior parte degli effetti sulla variabilità della radiazione solare che sono associati con la presenza di orografia complessa e di neve al suolo. Esso rappresenta pertanto un database ideale per la stima della radiazione solare da immagini satellitari per il territorio del Trentino. Infatti, l'accuratezza delle stime fornite da HelioMont per i valori di irradiazione giornaliera media mensile è stata valutata pari al +3% in termini di errore (semplice) relativo e al 6% in termini di errore assoluto relativo (rispetto ai dati al suolo alla base dell'Atlante Solare del Trentino).

HelioMont fornisce valori elevati di irradiazione media annua sia nella stessa area centrale osservata in PVGIS-CMSAF che (soprattutto) sui rilievi più elevati posti nei pressi del confine regionale occidentale; i valori più ridotti sono invece osservati in alcune delle valli minori e sui rilievi della parte più orientale del Trentino (Fig. 40 in basso a sinistra). In particolare, rispetto a PVGIS-3, HelioMont mostra valori leggermente più elevati in media (+4%), specialmente per le zone di fondovalle (fino a +27%). Al contrario, i valori di HelioMont sono più elevati di quelli di PVGIS-CMSAF specialmente nelle aree a quote maggiori caratterizzate dalla presenza di neve per molti mesi all'anno (fino a +28% all'estremità occidentale della regione), mentre nelle aree pianeggianti i due database vanno molto d'accordo (con una sovrastima del +3% circa da parte di PVGIS-CMSAF). In media comunque anche PVGIS-CMSAF (come PVGIS-3) restituisce valori più bassi di HelioMont, con un errore relativo del -3%.

Passando al confronto tra la mappa di irradiazione media annua dell'Atlante Solare del Trentino (Fig. 40, in basso a destra) e quella tratta da HelioMont, si può notare che l'Atlante fornisce su quasi tutto il territorio regionale valori più bassi del dato satellitare (coerentemente con il fatto che le osservazioni al suolo della rete trentina mostrano un leggero bias negativo sistematico rispetto ad HelioMont), con un errore (semplice) medio relativo pari a -9% e un errore assoluto medio relativo pari a circa il 10% (vedi Fig. 41 e Tab. 13). I due database mostrano un buon grado di concordanza per quanto concerne le aree pianeggianti dei maggiori fondovalle, con uno scarto pari a circa il -2%, mentre le aree a quote elevate e soprattutto i versanti esposti a nord mostrano le discrepanze (sottostime) più rilevanti. Le poche aree dove l'Atlante fornisce sovrastime rispetto a HelioMont corrispondono in genere ai versanti meglio esposti a sud, caratterizzati da condizioni di insolazione privilegiate rispetto ai versanti opposti (cfr. Fig. 41).

Tabella 14. Valori di errore (semplice) relativo (in percentuale) riferito al confronto tra le mappe di irradiazione giornaliera media mensile dell'Atlante Solare e di HelioMont.

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
rMBE (%)	-25.94	-19.53	-11.58	-8.83	-8.93	-7.42	-7.08	-3.09	-5.41	-9.91	-10.78	-18.66

In Tab. 14 sono riportati i valori di scarto medio relativo tra l'Atlante e HelioMont per le mappe di irradiazione giornaliera media mensile. Si può notare come il confronto relativo ai mesi più caldi (da giugno a settembre) dia risultati migliori e differenze meno rilevanti (seppur sempre negative), mentre i mesi più freddi corrispondono alle discrepanze più evidenti (gennaio, febbraio, dicembre). L'analisi delle mappe delle differenze su base mensile per i mesi più propriamente invernali rivela che le differenze negative più importanti corrispondono sempre ai versanti esposti a nord, ovvero alla modellazione ad alta risoluzione della radiazione in condizioni clear-sky.

Tra le possibili ragioni per le discrepanze osservate, oltre alla già citata sovrastima da parte di HelioMont rispetto ai dati delle stazioni selezionate per l'Atlante, sono da menzionare:

- ✓ la diversa risoluzione spaziale, molto maggiore per l'Atlante Solare del Trentino (200 m vs. 2 km), e quindi la modellazione più accurata degli effetti orografici di piccola scala (grazie all'uso di uno strumento GIS) rispetto al database satellitare;
- ✓ il fatto che le stazioni radiometriche non assicurano una copertura geografica omogenea in termini di condizioni di insolazione e altimetria del terreno;
- ✓ il fatto che la stima del trend verticale dei coefficienti clear-sky medi mensili per la mappatura si basa su osservazioni raccolte a quote non superiori a circa 1800 m m.s.l. (vedi Capitolo 9), e può perciò dare luogo a potenziali errori sistematici per le aree d'alta quota;
- ✓ le problematiche di sottostima della radiazione solare per le aree molto ombreggiate dall'orografia circostante, specialmente durante i mesi invernali (vedi Capitolo 8).

### 10.3 Considerazioni generali

Il confronto tra i tre database di radiazione PVGIS-3, PVGIS-CMSAF, HelioMont e i risultati dell'Atlante Solare del Trentino ha evidenziato il fatto che quest'ultimo fornisce stime di irradiazione solare globale al suolo minori in media di tutti gli altri atlanti considerati. Questo è ben evidenziato dalle distribuzioni di frequenza dei valori di irradiazione media annua mostrate in Fig. 42. In effetti, tutte le distribuzioni sono piuttosto differenti tra loro e mostrano diverse forme e range di valori. In particolare la distribuzione di frequenza dell'Atlante Solare ha una forma più regolare delle altre, probabilmente in virtù della sua risoluzione maggiore e quindi del fatto che i valori di irradiazione sono più "continui" che per gli altri database.

Dalle analisi di accuratezza del database HelioMont rispetto alle osservazioni al suolo raccolte presso le stazioni radiometriche trentine è noto che esso sovrastima in media del +3% l'irradiazione giornaliera media mensile (dato riferito alle stazioni selezionate per l'Atlante, quindi per quote minori di 1800 m m.s.l. circa, e prevalentemente rappresentativo delle aree di fondovalle).

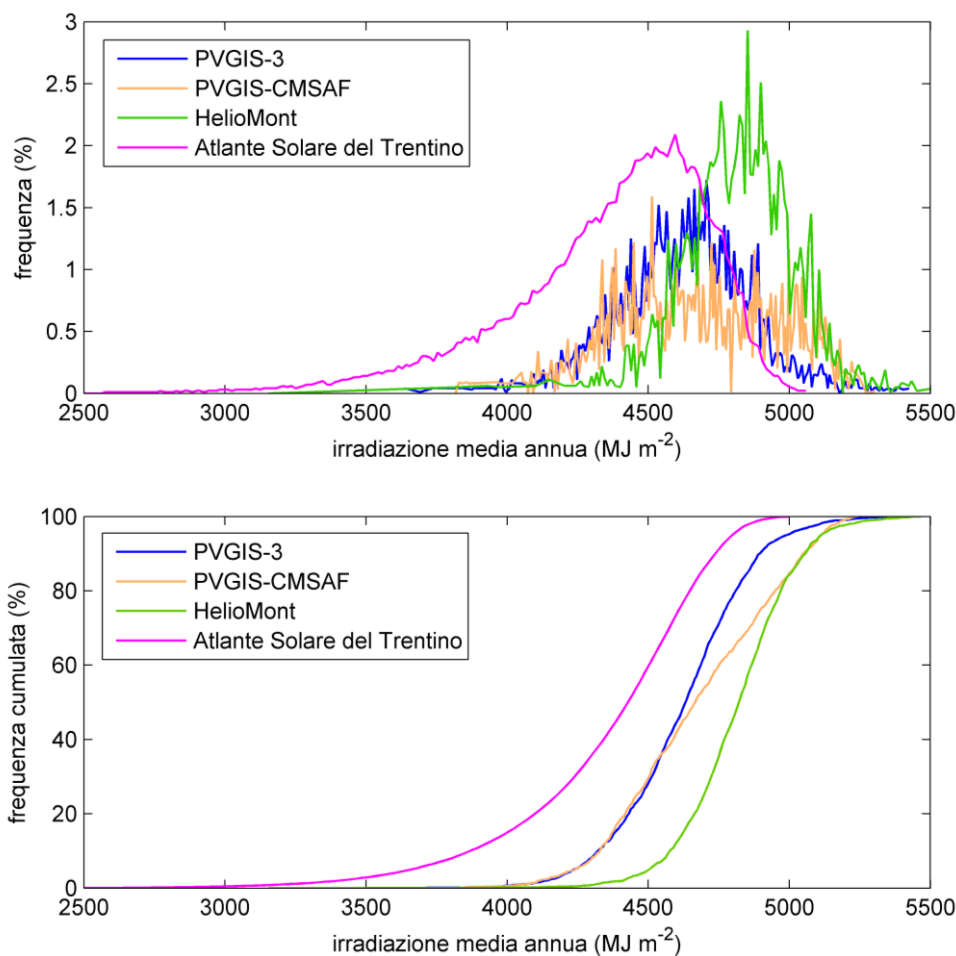
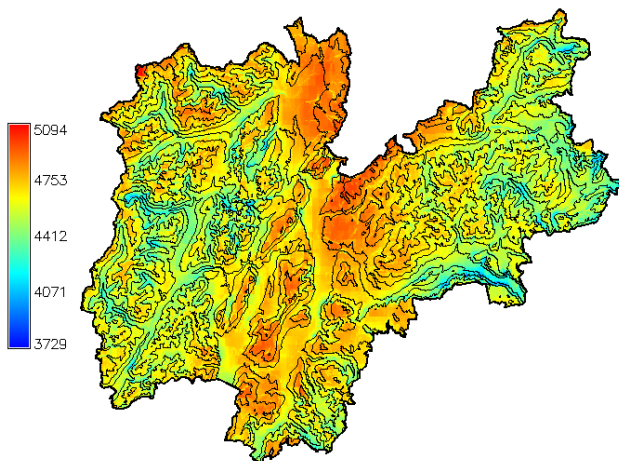


Figura 42. Grafici delle distribuzioni di frequenza semplice e cumulata dei valori di irradiazione media annua per i quattro database confrontati.

Questo deve essere considerato nel momento in cui si confrontano le distribuzioni di frequenza per HelioMont e l'Atlante, assieme a tutte le altre potenziali ragioni per le discrepanze osservate che sono state citate nei paragrafi precedenti.

Figura 43 riporta le mappe della media e del coefficiente di variazione (ovvero il rapporto tra la deviazione standard e la media) relative all'irradiazione media annua per i quattro database sopra confrontati. Come ipotizzabile a partire dalle discussioni precedenti, le zone con minore coefficiente di variazione (minore del 5%), e quindi con la minore incertezza nella stima dell'irradiazione solare disponibile, sono le aree di fondovalle (anche delle valli minori), mentre le aree affette dalla maggiore incertezza sono quelle dei rilievi più alti e le aree di versante esposte a nord (tra 10 e 20%; queste ultime presumibilmente a causa della risoluzione spaziale più alta dell'Atlante e della modellazione GIS ad alta risoluzione).

media ( $\text{MJ m}^{-2}$ )



coefficiente di variazione (%)



Figura 43. Mappe della media e del coefficiente di variazione (espresso in punti percentuali) calcolati rispetto ai valori di irradiazione media annua forniti dai quattro database confrontati.



# Capitolo 11

## Conclusioni

In questo documento è presentata nel dettaglio la procedura seguita per la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino ad alta risoluzione. A seguito della descrizione della rete radiometrica attiva sul territorio della Provincia Autonoma di Trento e del database di osservazioni di radiazione che ne deriva (Capitolo 5), sono stati descritti i controlli di qualità (Capitolo 6), le analisi preliminari e la selezione effettuati sul database stesso (Capitolo 7). La modalità di mappatura dei dati di radiazione adottata consiste nella modellazione ad alta risoluzione dell'irradiazione globale orizzontale incidente al suolo in condizioni di cielo sereno tramite un applicativo GIS (Capitolo 8) e nella successiva interpolazione geostatistica dei parametri climatologici (indici "clear-sky") derivati dalle osservazioni (Capitolo 9). I dati utilizzati per l'elaborazione delle mappe finali di irradiazione globale giornaliera media mensile sono stati raccolti presso 25 stazioni radiometriche appartenenti principalmente alla rete della Fondazione Edmund Mach, ma anche alla rete osservativa di Meteotrentino e all'Università di Trento. Il periodo climatologico di riferimento adottato per l'Atlante è rappresentato dai 9 anni che intercorrono tra il 2004 e il 2012 (compresi). Oltre ai dati di radiazione al suolo, sono stati utilizzati dati di radiazione da satellite (dal database HelioMont, Stöckli, 2013; cfr. Capitolo 7), dati di torbidità atmosferica stimati grazie all'analisi dei dati di radiazione al suolo, dati di albedo superficiali ricavati da simulazioni numeriche meteorologiche ad alta risoluzione (2 km), oltre ad un modello digitale del terreno ad alta risoluzione (30 m, ricampionato a 200 m; vedi Capitolo 8). Inoltre sono stati testati metodi diversi di mappatura prima di scegliere sulla base di un'analisi di validazione incrociata quello definitivamente adottato, ovvero il metodo detto "residual kriging" (vedi anche Laiti et al., 2013)

Grazie a questo studio sono state prodotte 12 mappe di irradiazione globale orizzontale media mensile e una mappa di irradiazione media annua ad alta risoluzione (200 m; Capitolo 10), sulla base di dati il più possibile rappresentativi della climatologia locale specifica del territorio in esame. Questo fatto, assieme all'alta risoluzione dell'Atlante Solare del Trentino, rappresenta uno dei punti di forza di questo lavoro. Infatti, nonostante l'esistenza di vari database climatologici di radiazione, un atlante solare del Trentino ad alta risoluzione, adeguato per valutazioni scientifiche e scopi applicativi nel campo delle energie rinnovabili (ma non solo), non era ancora disponibile. Le mappe finali di irradiazione media mensile hanno mostrato una buona correlazione con la quota del terreno, più evidente nei mesi caldi, e una dipendenza piuttosto rilevante dagli effetti dell'orografia complessa del territorio sulla variabilità spaziale della radiazione (soprattutto nei mesi più freddi). In particolare, la dipendenza dell'irradiazione dalla quota appare variare tra mesi caldi e mesi freddi in funzione della climatologia della nuvolosità: mentre nei primi la maggiore nuvolosità indotta sui

rilievi dalla convergenza delle correnti termiche caratteristiche riduce l'irradiazione alle quote più elevate (vedi Zardi e Whiteman, 2013), nei secondi a quote maggiori corrispondono valori di irradiazione giornaliera più elevati (a meno di fenomeni di ombreggiamento orografico). Su base annua i valori di irradiazione maggiori sono stati stimati per le aree corrispondenti ai maggiori fondovalle della regione, ovvero la Valle dell'Adige, il Basso Sarca, la Valle dei Laghi e la Val di Non. I valori più bassi appaiono invece associati ai rilievi maggiori e ai versanti prevalentemente esposti a nord, come quelli delle valli con orientamento est-ovest (e quindi sottoposti a fenomeni di ombreggiamento orografico molto importanti).

Per quanto concerne l'accuratezza delle mappe dell'Atlante Solare del Trentino, la differenza tra i valori stimati e i valori climatologici presso la posizione della stazioni radiometriche selezionate è del tutto trascurabile (minore dell'1%), mentre l'errore associato all'algoritmo di mappatura scelto, stimato attraverso una procedura di validazione incrociata, è pari al 5% (vedi Capitolo 9). Le mappe dell'Atlante sono state inoltre confrontate con due tra i database di radiazione più comunemente utilizzati per applicazioni fotovoltaiche (PVGIS-3 e PVGIS-CMSAF; Huld et al., 2012) e con il già citato database satellitare HelioMont (Stöckli, 2013; vedi Capitolo 10). Tale analisi ha rilevato che l'Atlante fornisce valori mediamente più bassi di quelli di tutti gli altri database (rispettivamente -5%, -7% e -9% circa). Sono inoltre presenti discrepanze specifiche, legate soprattutto alla risoluzione spaziale e al periodo climatologico di riferimento differenti per i quattro database, alla modellazione ad alta risoluzione degli effetti orografici grazie ad un software GIS per l'Atlante, alla distribuzione geografica non omogenea delle stazioni radiometriche selezionate e al fatto che tali stazioni non coprono la fascia altimetrica sopra i 1800 m m.s.l., oltre che a errori sistematici e problematiche specifiche delle misure (ad esempio, per il Trentino HelioMont risulta sovrastimare l'irradiazione globale media mensile al suolo del 3% circa). In generale (a parte PVGIS-3) i database confrontati mostrano un buon grado di concordanza relativamente alle zone più pianeggianti (ovvero i fondovalle) e discrepanze anche significative alle quote maggiori, un aspetto confermato anche dall'analisi della deviazione standard tra i quattro atlanti. Inoltre, il confronto tra l'Atlante e HelioMont (che hanno lo stesso periodo climatologico di riferimento) ha rivelato una corrispondenza sensibilmente migliore tra i due nei mesi caldi rispetto ai mesi freddi. Da queste considerazioni è lecito concludere che l'Atlante Solare del Trentino fornisce le stime di irradiazione verosimilmente più accurate per quanto concerne le aree pianeggianti, soprattutto nei mesi estivi, poiché in tali situazioni esso rispetta pedissequamente le osservazioni al suolo della rete radiometrica locale. Diversamente, esiste ancora un certo grado di incertezza e ci sono ancora potenziali margini di miglioramento per quanto concerne le aree corrispondenti ai rilievi a quote maggiori e la modellazione della radiazione nei mesi invernali.

A questo proposito, possono essere ipotizzati alcuni potenziali sviluppi futuri di questo lavoro. In particolare, potrebbero essere testati ulteriori algoritmi di interpolazione dei coefficienti clear-sky, basati sull'integrazione del database satellitare HelioMont o dei dati provenienti da stazioni radiometriche con serie di dati più corte del periodo di riferimento, sotto forma di variabili ausiliarie nella procedura di mappatura (attraverso tecniche geostatistiche come il "co-kriging" e il "kriging con drift esterno"; cfr. Šúri et al., 2007; Journée e Bertrand, 2010). Questo potrebbe portare al miglioramento delle stime di irradiazione per le aree caratterizzate da una bassa densità di stazioni radiometriche, specialmente nelle fasce ad altimetria più elevata. Inoltre, potrebbe essere effettuata una mappatura separata delle componenti diretta e diffusa della radiazione, sfruttando un adeguato

modello di decomposizione della radiazione globale, individuato tenendo conto della peculiare complessità orografica del territorio. Questo approccio potrebbe risolvere le problematiche di eventuale sottostima dell'irradiazione per le aree interessate da rilevanti fenomeni di ombreggiamento orografico. Per quanto riguarda il database di radiazione di partenza, è auspicabile che esso venga esteso e aggiornato in futuro, visto che la lunghezza delle serie temporali di dati di radiazione aumenterà negli anni a venire, per ottenere una base climatologica sempre più solida e rappresentativa. A questo scopo si potrebbe rivelare utile implementare le procedure di controllo di qualità dei dati dei piranometri (Capitolo 6) in modalità automatica e continua, ovvero in tempo (quasi) reale, assicurando in maniera costante la qualità del dato e una tempestiva individuazione e risoluzione di eventuali problematiche dei sensori. Inoltre, in quest'ottica potrebbe essere ragionevole anche compiere delle politiche di ottimizzazione ed eventualmente potenziamento della rete radiometrica del Trentino, magari anche installando strumenti in grado di misurare le diverse componenti della radiazione.

Infine, anche indipendentemente da quanto proposto sopra, possono essere sviluppati ulteriori prodotti con finalità specifiche dedicate ai diversi ambiti applicativi. Per esempio, nel caso delle applicazioni rivolte alle energie rinnovabili, potrebbe riscuotere interesse la realizzazione di mappe di irradiazione globale oraria (non più giornaliera) media mensile, e di mappe di irradiazione riferite a superfici con diversa inclinazione e orientamento (non più orizzontali, e quindi rappresentative di diverse condizioni di installazione di pannelli fotovoltaici), nonché la costruzione di Anni Tipici Meteorologici (anche detti "Test Reference Years"), i quali sono ampiamente utilizzati per simulazione dinamica dei sistemi di produzione di energia solare e delle performance energetiche degli edifici. Inoltre potrebbero essere svolti studi relativi alla caratterizzazione della variabilità spaziale e temporale tipica della radiazione solare sul territorio trentino, che troverebbero applicazioni nel campo del supporto alla previsione della radiazione solare. Tutte queste ipotesi di lavoro esulano dagli scopi del presente progetto ed appaiono quindi idealmente riservate a un'eventuale prosecuzione dell'attività di ricerca e sviluppo.



## Bibliografia

- Alsamamra H., Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vázquez D., Tovar-Pescador J., 2009: A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1343–1357.
- Antonanzas-Torres F., Cañizares F., Perpiñán O., 2013: Comparative assessment of global irradiation from a satellite estimate model (CMSAF) and on-ground measurements (SIAR): A Spanish case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 248–261.
- Badescu V., 2008. *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface. Recent Advances*. Springer, 517 pp.
- Bellin A., Zardi D. (a cura di), 2004: *Analisi climatologica di serie storiche delle precipitazioni e temperature in Trentino*. Quaderni di idronomia montana, n. 23. Provincia Autonoma di Trento, 256 pp.
- Beyer H.G., Czeplak G., Terzenbach U., Wald L., 1997: Assessment of the method used to construct clearness index maps for the new European Solar Radiation Atlas (ESRA). *Solar Energy*, 61, 389–397.
- Blanc P., Espinar B., Gschwin B., Ménard L., Thomas C., Wald L., 2011: High Spatial Resolution Solar Atlas In Provence-Alpes-Côte d'Azur. In: *Proceeding of the ISES Solar World Congress*, 28 August-2 September 2011.
- Cano D., Monget J.M., Aubuisson M., Guillard H., Regas N., Wald L., 1986: A method for the determination of global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31–39.
- Castelli M., Stöckli R., Zardi D., Tetzlaff A., Wagner J.E., Belluardo G., Zebisch M., Petitta M., 2014: The HelioMont method for assessing solar irradiance over complex terrain: validation and improvements. *Remote Sensing of Environment*, 152, 603–613.
- Commissione delle Comunità Europee, *Atlante Europeo della Radiazione Solare*, 1984: Volume I, seconda edizione. F. Kasten, H.J. Golchert, R. Dogniaux, M. Lemoine, Ed., W. Palz, Verlag TÜV Rheinland, Cologne.
- D'Agostino V., Zelenka A., 1992: Estimating solar global irradiance by integration of satellite and network data: the cokriging approach. *Sci. de la Terre, Sér. Inf.*, 31, 461–465.
- Dee D., Uppala S., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S. et al., 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553–597.
- Di Piazza A., Eccel E., 2012: *Analisi di serie giornaliere di temperatura e precipitazione in Trentino nel periodo 1958-2010*. Provincia Autonoma di Trento e Fondazione Edmund Mach (Editori), 88 pp.
- Dubayah R., 1992: Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data. *Water Resources Research*, 28, 469–84.
- Dubayah R., Rich P.M., 1995: Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 405–419.

- Ferrero L., Castelli M., Ferrini B.S., Moscatelli M., Perrone M.G., Sangiorgi G., D'Angelo L., Rovelli G., Moroni B., Scardazza F., Močnik G., Bolzacchini E., Petitta M., Cappelletti D., 2014: Impact of black carbon aerosol over Italian basin valleys: high-resolution measurements along vertical profiles, radiative forcing and heating rate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 9641–9664.
- Giovannini, L., Antonacci, G., Zardi, D., Laiti, L., Panziera, L., 2014: Sensitivity of simulated wind speed to spatial resolution over complex terrain. *Energy Procedia* (accettato per la pubblicazione).
- Goovaerts P., 1997: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Applied Geostatistics Series. Oxford University Press, New York, 483 pp.
- Grigante M., Mottes F., Zardi D., De Franceschi M., 2011: Experimental solar radiation measurements and their effectiveness in setting up a real-sky irradiance model. *Renewable Energy*, 36, 1–8.
- Hofierka J., Šúri M., 2002: The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceeding of the Open source GIS GRASS users conference*, 11-13 settembre 2002, Trento, Italia.
- Huld T., Müller R., Gambardella A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, 1803–1815.
- Hulme M., Conway d., Jones P.D., Jiang T., Barrow E.M., Turney C., 1995: Construction of a 1961-1990 European climatology for climate change modelling and impact applications. *International Journal of Climatology*, 15, 1333–1363.
- Ineichen P., Perez R., 1999: Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data. *Theor. Appl. Climatol.*, 64, 119–130.
- Iqbal M., 1983: *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press Canada, Ontario, Canada, 390 pp.
- Jenco M., 1992: Distribution of direct solar radiation on georelief and its modelling by means of complex digital model of terrain (in Slovak). *Geograficky casopis*, 44, 342–355.
- Journée M., Bertrand C., 2010: Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2692–2704.
- Journée M., Bertrand C., 2011: Quality control of solar radiation data within the RMIB sola measurements network. *Solar Energy*, 85, 72–86.
- Kasten F., 1996: The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy*, 56, 239–244.
- Kinne S., 2009: *Clouds in the perturbed climate system*. Chapter climatologies of cloud related aerosols. Part 1: Particle number and size. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Kopp G., Lawrence G., Rottman G., 2005: The total irradiance monitor (TIM): science results. *Solar Physics* 230: 129–139.
- Krcho J., 1990: *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu* (Morphometric analysis and digital models of georelief). VEDA, Bratislava.
- Laiti L., Zardi D., de Franceschi M., Rampanelli G., 2013: Residual Kriging analysis of airborne measurements: application to the mapping of atmospheric boundary-layer thermal structures in a mountain valley. *Atmos. Sci. Letters.*, 14, 79–85.
- Longman R.J., Giambelluca T.W., Nullet M.A., 2013: Use of a clear-day solar radiation model to homogenize solar radiation measurements in Hawaii. *Solar Energy*, 91, 102–110.
- Neteler M., Mitasova H., 2002: *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, 464 pp.

- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2000. Solar position and intensity program SOLPOS 2.0. NREL, Golden, CO.
- Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J., 1994: Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, 63, 197–214.
- Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J., 1995: Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotropic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, 67, 215–226.
- Page J., Albuissou M., Wald L., 2001: The European solar radiation atlas: a valuable digital tool. *Solar Energy*, 71, 81–83.
- Panziera L., Giovannini L., Laiti L., Zardi D., 2014: Analisi climatologica delle situazioni meteorologiche tipiche a scala sinottica e dei loro effetti sul territorio della Provincia di Trento. Relazione finale per la Provincia Autonoma di Trento.
- Petrarca S., Cogliani E., Spinelli F. (Editori), 2000: *La Radiazione Solare Globale al Suolo in Italia*. Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Roma, Italia, 200 pp.
- Polo J., Zarzalejo L.F., Martín L., Navarro A.A., Marchante R., 2009: Estimation of daily Linke turbidity factor by using global irradiance measurements at solar noon. *Solar Energy*, 83, 1177–1185.
- Reda, I., and Andreas, A., 2003: Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. NREL Report No. TP-560-34302, revised January 2008, 55 pp.
- Remund J., Wald L., Lefevre M., Ranchin T., Page J., 2003: Worldwide Linke turbidity information. Proceeding of ISES Solar World Congress 2003, 16–19 June, Göteborg, Svezia.
- Rigollier C., Bauer O., Wald L., 2000: On the clear sky model of the ESRA - European Solar radiation Atlas - with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68, 33–48.
- Rigollier C., Lefevre M., Wald L., 2004: The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77, 159–169.
- Roesch A., Wild M., Ohmura A., Dutton E., Long C., Zhang T., 2011: Assessment of BSRN radiation records for the computation of monthly means. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 339–354.
- Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vázquez D., Santos-Alamillos F.J., Lara-Fanego V., Tovar-Pescador J., 2011: A topographic geostatistical approach for mapping monthly mean values of daily global solar radiation: A case study in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1812–1822.
- Sandwell D.T., 1987: Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 14, 139–142.
- Scharmer K., 1994: Towards a new atlas of solar radiation in Europe. *International Journal of Solar Energy*, 15, 81–87.
- Scharmer K., Greif J., 2000: *The European solar radiation atlas. Vol. 1: Fundamentals and maps*. Les Presses de l'École des Mines, Paris, 98 pp.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G., 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note TN-475+STR, 125.
- Spinoni J., Brunetti M., Maugeri M., Simolo C., 2012: 1961–1990 monthly high-resolution solar radiation climatologies for Italy. *Adv. Sci. Res.*, 8, 19–25.
- Stöckli R., 2013: *The HelioMont Surface Solar Radiation Processing*. Scientific Report N. 93, Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss, 119 pp.

- Šúri M., Hofierka J., 2004: A new GIS-based solar radiation model and its application for photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*, 8, 175–190.
- Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D., Ossenbrink H.A., 2007: Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81, 1295–1305.
- Šúri M., Remund J., Cebecauer T., Dumortier D., Wald L., Huld T., Blanc P., 2008: First steps in the cross-comparison of solar resource spatial products in Europe. *Proceeding of the EUROSUN 2008, 1<sup>st</sup> International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings*, 7-10 ottobre 2008, Lisbona, Portogallo.
- Vergari S., 2012: La radiazione solare globale in Italia dal 1991 al 2010 e la durata del soleggiamento in Italia dal 1991 al 2010, *Rivista di Meteorologia Aeronautica, Aeronautica Militare Italiana*.
- Wallace J.M., Hobbs P.V., 2006: *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, seconda edizione, 504 pp.
- World Meteorological Organization (WMO), 2008: *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. N. 8 (7<sup>th</sup> ed.), World Meteorological Organization.
- Younes S., Claywell R., Muneer T., 2005: Quality control of solar radiation data: present status and proposed new approaches. *Energy*, 30, 1533–1549.
- Zardi D., Whiteman C.D., 2013: Diurnal mountain wind systems. In: *Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenge*, Chow F.K., de Wekker S.F.J., Snyder B. editori, Springer Atmospheric Sciences, Springer, Berlin, 35–119.
- Zelenka A., Czeplak G., D'Agostino V., Josefsson W., Maxwell E., Perez R., 1992: *Techniques for Supplementing Solar Radiation Network Data*, Rept. no. IEA-SHCP-9D-1 per l'Agenzia Internazionale dell'Energia, Meteosvizzera.
- Zelenka A., Perez R., Seals R., Renné d., 1999: Effective accuracy of satellite-derived irradiance. *Theor. Appl. Climatol.*, 62, 199–207.



# Bibliografia web

[clisun.casaccia.enea.it](http://clisun.casaccia.enea.it)

[eosweb.larc.nasa.gov/sse](http://eosweb.larc.nasa.gov/sse)

[grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.horizon.html](http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.horizon.html)

[grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.slope.aspect.html](http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.slope.aspect.html)

[grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.sun.html](http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.sun.html)

[meteonorm.com](http://meteonorm.com)

[pica.cavit.it](http://pica.cavit.it)

[pvalps.eurac.edu](http://pvalps.eurac.edu)

[re.jrc.ec.europa.eu/pvgis](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis)

[rredc.nrel.gov/solar/spectra](http://rredc.nrel.gov/solar/spectra)

[satel-light.com](http://satel-light.com)

[www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr)

[www.climatrentino.it](http://www.climatrentino.it)

[www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3)

[www.meteoam.it/sites/all/files/documents/radiazione-solare-in-italia.pdf](http://www.meteoam.it/sites/all/files/documents/radiazione-solare-in-italia.pdf)

[www.soda-is.com](http://www.soda-is.com)

[www.solaritaly.enea.it](http://www.solaritaly.enea.it)

[www.viewfinderpanoramas.org](http://www.viewfinderpanoramas.org)

[www2.jpl.nasa.gov/srtm](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm)



# Ringraziamenti

Gli autori ringraziano:

- ✓ la Provincia Autonoma di Trento e l'Osservatorio del Clima Trentino, per aver finanziato la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino nell'ambito del progetto Atlante del Clima Trentino;
- ✓ Meteotrentino e la Fondazione Edmund Mach, per aver fornito i dati di radiazione raccolti presso le stazioni radiometriche trentine;
- ✓ l'ing. Daniele Andreis, l'ing. Fabio Zottele e il dott. Giambattista Toller dell'Unità Sistema Informativo Geografico del Centro di Trasferimento Tecnologico della Fondazione Edmund Mach, per la preziosa collaborazione nelle attività di controllo di qualità e validazione dei dati di radiazione;
- ✓ MeteoSvizzera, per aver fornito i dati di radiazione da satellite HelioMont;
- ✓ Reto Stöckli, per la disponibilità a fornire informazioni e delucidazioni relative all'algoritmo e al database satellitare HelioMont;
- ✓ Il dott. Marcello Petitta, la dott.essa Mariapina Castelli, la dott.essa Anke Teztlaff e il dott. Jochen Wagner di EURAC;
- ✓ il dott. Alfonso Vitti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento;
- ✓ il prof. Maurizio Grigante del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento;
- ✓ l'architetto Giacomo Carlino dell'Agenzia Provinciale per le Risorse Idriche e l'Energia.



## Elenco delle tabelle

- Tabella 1.** Elenco completo delle stazioni radiometriche in Trentino nel periodo 1987-2012. La tabella riporta le informazioni principali, quali ID, nome, ente gestore, coordinate geografiche e periodo di attività della singola stazione. FEM sta per Fondazione E. Mach, UniTN si riferisce all'Università di Trento e Meteot. indica Meteotrentino. Le stazioni FEM sono inoltre suddivise in stazioni di primo livello (FEM-1), di secondo livello (FEM-2) e ex-forestali (FEM-f). .....27
- Tabella 2.** Sistema dei codici di errore e qualità utilizzato per i dati di radiazione. ....37
- Tabella 3.** Valori di irradiazione giornaliera media mensile per le stazioni selezionate per l'Atlante in MJ m<sup>-2</sup> (eccetto la riga che contiene i valori di indice di asimmetria, skewness, che è un parametro adimensionale). .....50
- Tabella 4.** Coefficienti di correlazione lineare di Pearson per i valori di coefficiente di torbidità di Linke stimati a partire dai dati di irradiazione globale oraria al suolo e le quote delle stazioni selezionate per l'Atlante. Sono riportati anche i parametri delle regressioni lineari tra valori e quote utilizzate per la costruzione delle mappe di coefficiente di torbidità di Linke. Si noti che i valori di coefficienti angolare delle rette di regressione (ovvero i gradienti verticali, ultima riga) devono essere moltiplicati per 10<sup>-4</sup>. .....56
- Tabella 5.** Statistiche delle differenze (MBE, MAE, RMSE) tra i valori di coefficiente di torbidità di Linke estratti da Remund et al. (2003) e quelli stimati a partire dai dati di irradiazione globale oraria al suolo. L'ultima riga mostra i valori di coefficiente di correlazione lineare di Pearson tra le differenze e la quota delle stazioni utilizzate per la stima. ....56
- Tabella 6.** Valori di  $K_c$  medio mensile per le stazioni selezionate per l'Atlante e principali statistiche della variabile. ....62
- Tabella 7.** Risultati mensili dell'analisi di validazione incrociata (relativamente ai valori di  $K_c$ ) in termini di MBE, MAE e RMSE, per i tre metodi confrontati (ISD, OK e RK). Per ognuna delle categorie di errore sono evidenziati i mesi e i metodi che restituiscono l'errore minimo. ....67
- Tabella 8.** Coefficienti di correlazione lineare di Pearson (P) e Spearman (S) tra i  $K_c$  mensili e la quota delle stazioni. Sono evidenziati i mesi nei quali la correlazione risulta particolarmente rilevante. ....67
- Tabella 9.** Valori mensili di intercetta e coefficiente angolare delle regressioni lineari utilizzate nella stima del trend di  $K_c$  con la quota nell'applicazione del metodo residual kriging (RK). Si noti che i valori dei coefficienti angolari vanno moltiplicati per 10<sup>-5</sup>. ....67

<b>Tabella 10.</b> Risultati dell'analisi di validazione incrociata per il metodo RK, in termini non solo di $K_c$ ma anche di irradiazione giornaliera media $G_d$ . .....	68
<b>Tabella 11.</b> Errori medi mensili relativi al confronto tra le mappe finali di irradiazione giornaliera media mensile dell'Atlante e le climatologie corrispondenti (unità: punti percentuali, %). .....	75
<b>Tabella 12.</b> Caratteristiche tecniche principali dei diversi atlanti solari a confronto. ....	78
<b>Tabella 13.</b> Statistiche delle differenze tra le mappe di irradiazione media annua dell'Atlante Solare del Trentino e dei tre database posti a confronto (MBE = "Mean Bias Error", MAE = "Mean Absolute Error", r = errore relativo). .....	81
<b>Tabella 14.</b> Valori di errore (semplice) relativo (in percentuale) riferito al confronto tra le mappe di irradiazione giornaliera media mensile dell'Atlante Solare e di HelioMont. ....	82

## Elenco delle figure

- Figura 1.** Confronto degli spettri di radiazione extraterrestre (in blu) e globale, ovvero della radiazione in arrivo sulle superficie terrestre (in rosso; dati tratti da: [redc.nrel.gov/solar/spectra](http://redc.nrel.gov/solar/spectra)). È possibile riconoscere il diverso effetto di estinzione per le diverse bande spettrali dovuta ai fenomeni di assorbimento, riflessione e scattering che avvengono in atmosfera. La banda grigia rappresenta invece lo spettro di radiazione al quale sono tipicamente sensibili i piranometri. ....6
- Figura 2.** Rappresentazione schematica dei fenomeni di estinzione della radiazione extraterrestre attraverso l'atmosfera e delle relative percentuali per le diverse componenti e i diversi meccanismi coinvolti. Immagine riprodotta da [www.ener2g.com](http://www.ener2g.com). ....7
- Figura 3.** In alto a sinistra: piranometro per la misura della radiazione globale. In basso a sinistra: pireliometro per la misura della radiazione diretta. A destra: piranometro con sfera ombreggiante per la misura della radiazione diffusa. Immagine riprodotta da: [www.volker-quaschning.de](http://www.volker-quaschning.de). ....8
- Figura 4.** Esempio di immagine satellitare Meteosat Second Generation. Le aree bianche sono le superfici a maggiore riflettanza (ovvero nubi e neve), le aree nere sono superfici marine e le aree grigie sono superfici terrestri. Immagine riprodotta da: [sunba2.ba.infn.it](http://sunba2.ba.infn.it). .... 10
- Figura 5.** Atlante Italiano della Radiazione Solare: mappa della radiazione giornaliera media mensile per il mese di luglio per il quinquennio 1994-1999 (in  $\text{MJ m}^{-2}$ ). Le isolinee sono tracciate ad intervalli di  $0.5 \text{ MJ m}^{-2}$  (vedi etichette). Immagine riprodotta da: [clisun.casaccia.enea.it](http://clisun.casaccia.enea.it). .... 14
- Figura 6.** Mappe della radiazione giornaliera media per il mese di luglio per il periodo 1991-2010 (in  $\text{MJ m}^{-2}$  e ore). I simboli circolari indicano la posizione delle stazioni utilizzate per la mappatura delle due variabili. Immagine riprodotta da: Vergari (2012). .... 15
- Figura 7.** ESRA: esempio di mappa della radiazione diretta giornaliera media per il mese di giugno per il periodo 1981-1990 (in  $\text{W h m}^{-2}$ ). Immagine riprodotta da: Scharmer and Grief (2000). .... 16
- Figura 8.** Database CMSAF PVGIS: mappa della radiazione globale cumulata annua su superficie orizzontale ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) e del potenziale elettrico fotovoltaico ( $\text{kWh kWp}^{-1}$ ) per un sistema con potenza nominale pari a 1  $\text{kWp}$  e un rapporto di rendimento pari a 0.75 (moduli orizzontali), per il territorio italiano. Copyright: PVGIS © European Union, 2001-2012. .... 17
- Figura 9.** Differenza percentuale tra l'irradiazione media annua stimata in PVGIS-CMSAF e quella stimata in PVGIS-3 per il continente europeo. Immagine riprodotta da Huld et al. (2012). .... 18
- Figura 10.** Differenza percentuale tra l'irradiazione media annua stimata da PVGIS-CMSAF e quella stimata da PVGIS-3 per il Trentino (confini provinciali in nero in grassetto nell'immagine).

In nero (linee sottili) le curve di livello dell'orografia locale, con intervallo 200 m. Immagine elaborata a partire dai due database PVGIS (dati tratti da: <a href="http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis">re.jrc.ec.europa.eu/pvgis</a> ). .....	18
<b>Figura 11.</b> Deviazione standard dei valori di irradiazione globale orizzontale annuale forniti sei database diversi: l'Atlante Europeo della Radiazione Solare, PVGIS-CMSAF, Meteonorm ( <a href="http://meteonorm.com">meteonorm.com</a> ), Satel-Light ( <a href="http://satel-light.com">satel-light.com</a> ), HelioCliom-2 (Rigollier et al., 2004), Surface meteorology and Solar Energy della NASA ( <a href="http://eosweb.larc.nasa.gov/sse">eosweb.larc.nasa.gov/sse</a> ). La deviazione standard, espressa in termini percentuali (%), è calcolata relativamente alla media degli stessi database. Il rettangolo nero indica la posizione della Provincia Autonoma di Trento all'interno dell'area dell'arco alpino, che è caratterizzata da una grande incertezza. Immagine riprodotta da: Šúri et al. (2008). .....	22
<b>Figura 12.</b> Rappresentazione schematica della metodologia utilizzata per la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino. I diversi passaggi logici e operativi sono riportati nello schema, assieme ai dati di partenza necessari per il progetto e ai risultati attesi per ogni passo intermedio. .	24
<b>Figura 13.</b> Mappa dell'elevazione del territorio della Provincia Autonoma di Trento (vedi legenda). Sono riportate le posizioni e i nomi di tutte le stazioni meteorologiche presso le quali sono (state) raccolte misure di radiazione nel periodo 1987-2012. In arancione le stazioni gestite dalla Fondazione Edmund Mach, in giallo le stazioni di Meteotrentino, in nero la stazione gestita dall'Università di Trento. Per gentile concessione di D. Andreis e F. Zottele. ....	26
<b>Figura 14.</b> L'istogramma a sinistra mostra la distribuzione di frequenza della distanza tra ogni stazione radiometrica e la rispettiva stazione più vicina. L'istogramma di destra mostra invece la distribuzione altimetrica delle stazioni radiometriche trentine. ....	30
<b>Figura 15.</b> Da sostituire con un grafico che non presenta anche la qualità del dato ma solo la lunghezza della serie di riferimento. ....	31
<b>Figura 16.</b> Il grafico a barre del pannello di sinistra mostra l'andamento nel tempo del numero di serie di dati disponibili per ogni anno tra il 1987 e il 2012. L'istogramma a destra invece mostra la distribuzione della lunghezza temporale delle serie di dati di radiazione disponibili. ....	32
<b>Figura 17.</b> Frequenze orarie dei codici di errore (in colore; vedi legenda) e di qualità (vedi linee nere in grassetto; cf. Tab. 2) per la stazione radiometrica di Tovel (periodo di attività: 17 maggio 2010 – 31 dicembre 2012). ....	39
<b>Figura 18.</b> Esempio di confronto tra misure orarie di radiazione per la stazione di Arco (Fondazione E. Mach) e corrispondenti valori di radiazione globale in condizioni clear-sky stimati grazie al modello ESRA (Scharmer e Greif, 2000). ....	39
<b>Figura 19.</b> Esempio di confronto tra misure orarie di radiazione per la stazione di Volano (Fondazione E. Mach) e corrispondenti valori di radiazione globale in condizioni clear-sky stimati grazie al modello ESRA (Scharmer e Greif, 2000). ....	39
<b>Figura 20.</b> Esempio di misure orarie di radiazione in presenza di neve sul sensore (durante la stagione invernale) per la stazione di Monte Bondone (Meteotrentino). ....	40
<b>Figura 21.</b> Risultati del test di consistenza spaziale per la stazione di Telve: il codice di errore associato alle osservazioni di irradiazione globale giornaliera $G_d$ è rappresentato dal loro colore	



(vedi legenda; cf. Tab. 2), la linea grigia rappresenta invece le stime di $G_d$ ottenute dall'interpolazione dei dati raccolti presso le stazioni vicine. ....	41
<b>Figura 22.</b> Grafico dei valori mensili degli errori medi (MBE) e degli errori medi assoluti (MAE) relativamente al confronto tra il database HelioMont e i dati al suolo delle stazioni radiometriche trentine (selezionate per l'Atlante). È evidente come il dato satellitare sovrastimi in media il dato al suolo (MBE = 3.29%), e come l'accuratezza complessiva del 6.02% (MAE) sia in realtà determinata da performance migliori nei mesi estivi rispetto a quelli invernali.....	46
<b>Figura 23.</b> Esempio delle regressioni lineari mensili tra dati di irradiazione giornaliera al suolo (ground) e da satellite (sat.) utilizzate per la ricostruzione dei dati mancanti (stazione: Arco). Lo scatter-plot presenta le osservazioni al suolo e da satellite (in blu), mentre le linee rosse identificano le rette di regressione stimate per ogni mese. Si noti in particolare la miglior correlazione evidenziata dai mesi estivi. ....	47
<b>Figura 24.</b> Ciclo annuale degli errori medi mensili di validazione incrociata relativi alla procedura di ricostruzione dei dati di irradiazione giornaliera mancanti (stazione: Arco).....	48
<b>Figura 25.</b> Mappa della rete radiometrica del Trentino. Le 25 stazioni selezionate per l'atlante solare del Trentino sono indicate dai puntatori rossi. Per gentile concessione di D. Andreis e F. Zottele. ....	49
<b>Figura 26.</b> Ciclo annuale dei valori di irradiazione media mensile per le stazioni selezionate per la realizzazione dell'Atlante Solare del Trentino. Il box-plot rappresenta la distribuzione statistica per ognuno dei mesi dell'anno relativamente al gruppo di 25 stazioni scelte. ....	51
<b>Figura 27.</b> Rappresentazione grafica del modello digitale del terreno (DTM) utilizzato per la modellazione della radiazione in condizioni clear-sky (in m m.s.l.). Le curve di livello sono riportate con un intervallo di 500 m.....	55
<b>Figura 28.</b> Esempio di mappa di albedo superficiale media mensile utilizzata per la modellazione della radiazione in condizioni clear-sky (mese: aprile). Sono chiaramente visibili le aree coperte da neve, ovvero quelle che mostrano i valori di albedo più elevati, coincidenti a grandi linee con i maggiori rilievi del territorio trentino. ....	57
<b>Figura 29.</b> Mappe di irradiazione giornaliera media mensile in condizioni di cielo sereno (clear-sky) per i diversi mesi dell'anno (unità di misura: MJ m <sup>-2</sup> )......	58
<b>Figura 30.</b> Vedi Fig. 29. ....	59
<b>Figura 31.</b> Box plot su base mensile dei valori di $K_c$ per le 25 stazioni selezionate per l'Atlante. In magenta è indicata il valore medio mensile per ognuna delle distribuzioni statistiche. ....	63
<b>Figura 32.</b> Mappe di $K_c$ medio mensile per i diversi mesi dell'anno, ottenute tramite interpolazione con il metodo RK. ....	69
<b>Figura 33.</b> Vedi Fig. 32. ....	70
<b>Figura 34.</b> Mappe di irradiazione giornaliera media mensile per i diversi mesi dell'anno (MJ m <sup>-2</sup> ). ....	71
<b>Figura 35.</b> Vedi Fig. 34. ....	72
<b>Figura 36.</b> Vedi Fig. 34. ....	73

<b>Figura 37.</b> Grafico delle distribuzioni di frequenza (percentuale) dei valori di irradiazione giornaliera media mensile sul territorio trentino per ogni mese dell'anno. ....	74
<b>Figura 38.</b> Mappa di irradiazione media annua ( $\text{MJ m}^{-2}$ ). ....	75
<b>Figura 39.</b> Grafico della distribuzione di frequenza (percentuale) dei valori di irradiazione media annua sul territorio trentino. In rosso è evidenziato il valore medio ( $4362 \text{ MJ m}^{-2}$ ). In grigio chiaro e scuro rispettivamente sono indicati gli intervalli compresi tra i percentili 1%– 99% e 5%–95%. ....	75
<b>Figura 40.</b> Mappe di irradiazione media annua tratte dai due database PVGIS, da HelioMont e dall'Atlante Solare del Trentino. Si noti il diverso intervallo e la diversa disposizione geografica dei valori di irradiazione. ....	79
<b>Figura 41.</b> Mappe della differenza relativa (in unità percentuali, %) tra l'irradiazione media annua dell'Atlante Solare del Trentino e i database PVGIS e HelioMont. ....	80
<b>Figura 42.</b> Grafici delle distribuzioni di frequenza semplice e cumulata dei valori di irradiazione media annua per i quattro database confrontati. ....	83
<b>Figura 43.</b> Mappe della media e del coefficiente di variazione (espresso in punti percentuali) calcolati rispetto ai valori di irradiazione media annua forniti dai quattro database confrontati. ....	84

# Elenco degli allegati

## **Allegato A**

Schede anagrafiche delle singole stazioni radiometriche, contenenti la sintesi dei risultati del controllo di qualità dei dati e alcune note sulla qualità delle singole serie di dati.

## **Allegato B**

Database di radiazione, consistente in:

1. la lista delle stazioni radiometriche e dei loro dati anagrafici, la mappa delle stazioni radiometriche, un file “dati\_orari\_ID\_nomestazione.csv” per ogni stazione radiometrica che riporta i dati orari di irradiazione globale e i codici di errore e di qualità associati ad ogni dato
2. un file “astro\_ID.csv” per ogni stazione radiometrica, che riporta gli orari di alba e tramonto astronomici e orografici per ogni giorno dell’anno
3. un set di grafici per la visualizzazione dei risultati del controllo di qualità per ogni stazione radiometrica
4. la relazione preliminare relativa al controllo di qualità dei dati (28 Agosto 2013)
5. per ogni stazione radiometrica i file e le immagini che illustrano le elaborazioni relative alla frequenza, qualità e omogeneità dei dati, e le elaborazioni climatologiche
6. per ogni stazione radiometrica selezionata per l’Atlante Solare un file “nomestazione.txt” che riporta i dati di irradiazione giornaliera omogeneizzati e ricostruiti per il periodo 2004-2012.

## **Allegato C**

Mappe e file ASCII finali di irradiazione globale giornaliera media mensile e di irradiazione annua media per il Trentino.

## **Allegato D**

Report scientifico relativo all’algoritmo e al database HelioMont:

Stöckli R., 2013: The HelioMont Surface Solar Radiation Processing. Scientific Report N. 93, Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss, 119 pp.

## **Allegato E**

Poster presentato alla EGU General Assembly 2014:

Laiti L., Andreis D., Zottele F., Giovannini L., Panziera L., Toller G., Zardi D., 2014: *A solar radiation atlas for the Trentino region in the Alps: preliminary results*. EGU General Assembly 2014, 27 Aprile – 02 Maggio 2014, Vienna, Austria.

**Allegato F**

Articolo pubblicato sulla rivista Energy Procedia:

Laiti L., Andreis D., Zottele F., Giovannini L., Panziera L., Toller G., Zardi D., 2014: *A solar atlas for the Trentino region in the Alps: quality control of surface radiation data*. Energy Procedia (accettato per la pubblicazione nell'edizione speciale: EGU General Assembly 2014, EGU Division Energy, Resources & the Environment, ERE).

**Allegato G**

Poster presentato alla 16<sup>th</sup> Conference on Mountain Meteorology:

Laiti L., Giovannini L., Panziera L., Zardi D., 2014: *Solar radiation measurements in the Alps: a comparison of different datasets*. 16<sup>th</sup> Conference on Mountain Meteorology, 18-22 Agosto 2014, San Diego, CA.