
CAPITOLO I - GRANDEZZE DI RIFERIMENTO

INTRODUZIONE.....	5
1.1 – POSIZIONE DEL SOLE NELLA VOLTA CELESTE.....	9
1.1.1- LA LATITUDINE L.....	10
1.1.2 - LA DECLINAZIONE SOLARE δ	10
1.1.3 - ANGOLO ORARIO H	11
1.1.4 - ORA CONVENZIONALE E ORA SOLARE VERA.....	11
1.1.5– ALTEZZA SOLARE, ANGOLO ZENITALE E AZIMUT SOLARE.....	13
1.2 - GRANDEZZE FONDAMENTALI DELL'ILLUMINOTECNICA.....	14
1.3 - ILLUMINAMENTO NATURALE	19
1.4 – PRINCIPI DI INGEGNERIA SOLARE.....	20
1.4.1 - LE COSTANTI SOLARI.....	20
1.4.2 - L'IRRAGGIAMENTO E L'ILLUMINAMENTO GLOBALE DIRETTO E DIFFUSO.	23
1.4.3 – SIMBOLOGIA CIE E STANDARD IDMP.....	25
1.4.4 - RADIAZIONE ISTANTANEA INCIDENTE SU UNA SUPERFICIE INCLINATA	27
1.4.5 – LA MASSA D'ARIA RELATIVA.....	30
1.4.6– DISTANZA PUNTO- SOLE NELLA VOLTA CELESTE	31
1.4.7– CONVENZIONI SUGLI ANGOLI AZIMUTALI	32
1.4.8– INDICI DI SERENITÀ, TORBIDITÀ E BRILLANZA DEL CIELO	33

CAPITOLO II - LA STRUMENTAZIONE DI MISURA

2.1 – LEGGE DEL COSENO	39
2.2 - FOTOMETRI PER LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE ESTERNO	41
2.2.1 - FOTOMETRO GLOBALE SUL PIANO ORIZZONTALE E SUI PIANI VERTICALI	42

2.2.2 - FOTOMETRO PER LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO DIRETTO.....	42
2.2.3 - INSEGUITORE SOLARE.....	43
2.2.4 - FOTOMETRO PER LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO DIFFUSO ORIZZONTALE.....	44
2.2.5 - FOTOMETRO PER LA MISURA DELLA LUMINANZA ZENITALE.....	46
2.2.6 – SKY SCANNER PER LA MISURA DELLA LUMINANZA E DELL'IRRADIANZA DIFFUSA DEL CIELO SECONDO LA DISTRIBUZIONE DI TREGENZA.....	46
2.3 - STRUMENTAZIONE E SISTEMA PER L'ACQUISIZIONE DEI DATI DELLA RADIAZIONE SOLARE E DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE.....	50
2.3.1 - GENERALITÀ.....	50
2.3.2 – MODULI DI CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE.....	51
2.3.2 – SCHEDA DI ACQUISIZIONE DATI (DAQ).....	52
2.3.2 – SOFTWARE.....	53
2.4 – CIE DATA QUALITY CONTROL.....	57
2.5 – DEFINIZIONE DEGLI ERRORI TRA I DATI CALCOLATI E MISURATI.....	62

CAPITOLO III - CALCOLI DI ILLUMINAMENTO CON IL METODO DELLE EFFICACIE LUMINOSE

3.1 – IL CALOLO DELLA RADIAZIONE SOLARE DIRETTA E DIFFUSA.....	64
3.1.1 – LE CORRELAZIONI DELLA LETTERATURA.....	65
3.1.2 – NUOVE CORRELAZIONI DI RADIAZIONE SOLARE.....	69
3.2 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA LUMINOSA.....	77
3.3 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA GLOBALE E DIFFUSA SUL PIANO ORIZZONTALE PER TUTTI I TIPI DI CIELO E CONFRONTI CON I MODELLI DELLA LETTERATURA.....	78
3.3.1 – GRAFICI DI EFFICACIE LUMINOSE GLOBALI E DIFFUSE SPERIMENTALI.....	81
3.3.2 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA GLOBALE.....	88
3.3.3 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSA.....	91

3.5 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA DIRETTA PER TUTTI I TIPI DI CIELO, CIELO SERENO A CIELO INTERMEDIO E CONFRONTI CON I MODELLI DELLA LETTERATURA	96
3.5.1 – GRAFICI DI EFFICACIA LUMINOSA DIRETTA SPERIMENTALI	96
3.5.2 – MODELLI DI CALCOLO PER L’EFFICACIA LUMINOSA DIRETTA.	102
3.5.3 – MODELLI DI CALCOLO PER L’EFFICACIA LUMINOSA DIRETTA IN CONDIZIONI DI CIELO INTERMEDIO E CIELO SERENO.	110
3.6 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA DIFFUSA SU SUPERFICI VERTICALI.....	118
3.6.1 – DATI DI ILLUMINAMENTO ED EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSI SU SUPERFICI VERTICALI.....	119
3.6.2 – MODELLI DI CALCOLO PER L’EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSA.	121

CAPITOLO IV - CALCOLI DI ILLUMINAMENTO DIFFUSO CON IL METODO DELLE LUMINANZE

4.1 – DISTRIBUZIONI DI LUMINANZA ED IRRADIANZA.	134
4.2 - METODO DI CALCOLO DELL’ILLUMINAMENTO E DELL’IRRADIANZA DELLA SUPERFICIE ORIZZONTALE E DELLE SUPERFICI VERTICALI CON I DATI DELLO SKY SCANNER.	140
4.3 – COMPOSIZIONE DEI DATABASE DI CALCOLO.....	145
4.3.1 - ACQUISIZIONE DATI SPERIMENTALI.....	145
4.3.2 – PULIZIA DEI DATABASE.....	146
4.3.3 – CALCOLO PARAMETRI INTERMEDI E ILLUMINAMENTI DIFFUSI.	147
4.3.3 – MERGE DEI DATI.....	148
4.4 – I DATI SPERIMENTALI DI DISTRIBUZIONE DI LUMINANZA.....	149
4.5 – ANALISI QUALITATIVA DELLE MISURE OTTENUTE PER INTEGRAZIONE..	151
4.6 – CORRELAZIONI DI CALCOLO $E_{VD}=F(E_{VD,SKY})$	152
4.6.1 – CORRELAZIONI DI CALCOLO SEMPLIFICATE SKY1.	152
4.6.2– CORRELAZIONE DI CALCOLO A DUE PARAMETRI SKY2.....	157

4.6.3– INFLUENZA DEL FATTORE DI INCLINAZIONE RB.....	161
CONCLUSIONI.....	168
POSSIBILI SVILUPPI DELLA RICERCA	171
BIBLIOGRAFIA.....	173
RINGRAZIAMENTI	177
APPENDICE A1 – Declinazione solare ed Equation Time	177
APPENDICE A2 – Modello di Perez per il calcolo degli Illuminamenti	178
APPENDICE A3 – Settaggi schede di acquisizione.....	181
APPENDICE A4 – Definizione punti di icrocio database di calcolo	186
APPENDICE A5 – Grafici illuminamenti	187

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si assiste ad un crescente interesse nei confronti di soluzioni ingegneristiche, nell'ambito dell'energetica degli edifici, che siano, allo stesso tempo, confortevoli e rispettose dell'ambiente. L'illuminazione naturale costituisce una risorsa importante per la progettazione e la realizzazione di edifici energeticamente sostenibili e qualitativamente confortevoli: può essere considerata un risorsa per ridurre i consumi energetici, alleviare le problematiche legate al clima e l'ambiente ed incrementare la qualità del comfort visivo negli ambienti confinati.

La conoscenza quantitativa della luce naturale all'interno degli ambienti confinati è molto utile ai fini del calcolo del risparmio energetico conseguibile negli edifici. Il dato di partenza per questo tipo di calcoli è la luce naturale incidente sulle superfici trasparenti esterne.

Tale dato può essere misurato attraverso l'impiego di idonea strumentazione oppure calcolato sulla base della conoscenza di dati storici di parametri meteo climatici di quella data località o di una località affine.

Presso il Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria, sono in corso attività di ricerca nel campo dell'irraggiamento solare e della luce naturale da circa venti anni.

Nel corso degli anni sono stati analizzati e confrontati tra di loro i principali metodi di calcolo dell'illuminamento solare su superfici variamente inclinate e poste all'esterno. L'analisi dei risultati ha mostrato notevoli differenze di predizione dei valori dell'illuminamento forniti dai principali metodi di calcolo quali il modello CIE, il modello del CSTB, i modelli della IESNA, e le più recenti correlazioni di Perez, talvolta anche dell'ordine del 200-250 %.

Il presente lavoro di tesi tratta lo studio teorico-sperimentale per il calcolo dei dati di illuminazione naturale incidente sulle superfici variamente inclinate ed orientate; il lavoro integra le diverse correlazioni per il calcolo dell'illuminamento naturale globale e diffuso su superficie orizzontale, esistenti nella letteratura, estendendo i risultati alle superfici verticali.

Gli studi condotti sono stati supportati da decine di migliaia di dati sperimentali meteorologici, istantanei e medi orari, rilevati presso la Stazione di Prova ad Orientamento Variabile gestita dalla Sezione di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi della Calabria e forniti da altre stazioni di misura di località estere.

Il primo capitolo, di carattere generale, riguarda principalmente la descrizione delle grandezze di interesse nell'ambito della misura della luce naturale e della sua predizione; molti

dati utili alla determinazione dell'illuminamento naturale sono misurati direttamente dagli strumenti di misura, altri necessitano della determinazione di alcune grandezze "intermedie" secondo le indicazioni della letteratura o secondo metodologie di calcolo utilizzate ad hoc nello sviluppo del presente lavoro. Dopo una descrizione dei parametri di maggiore utilizzo nei calcoli legati alla radiazione solare, l'attenzione è stata focalizzata sulla definizione delle costanti solari di irraggiamento ed illuminamento, sul calcolo della radiazione solare su superficie comunque inclinata ed orientata, sul calcolo ed influenza della distanza punto-sole nella volta celeste e sugli indici di serenità torbidità e brillantezza del cielo, di grande utilità nella verifica delle correlazioni di calcolo. Della radiazione solare in genere si sono occupati ricercatori di tutto il mondo negli ultimi 30-40 anni, la simbologia e le convenzioni sono state per anni le più disparate; in questo capitolo si è cercato di fare un po' di ordine e sono state fornite delle indicazioni sull'utilizzo delle diverse convenzioni riguardanti gli angoli azimutali al fine di rendere confrontabili le misure delle stazioni meteorologiche di diverse parti del globo. E' riportato un breve cenno alle caratteristiche delle stazioni di misura afferenti al programma IDMP lanciato nel 1997 con l'intento di uniformare gli standard delle misurazioni nell'ambito della luce naturale. La stazione di misura presente ad Arcavacata di Rende può essere considerata, una Research Class Station e vengono effettuate anche altre misure legate alla radiazione solare non contemplate nelle precedenti classificazioni tra le quali, di grande rilevanza scientifica, l'illuminamento e l'irraggiamento solare diretto e diffuso.

Nel secondo capitolo è riportata la descrizione della strumentazione utilizzata e delle modalità di acquisizione ed elaborazione dei dati secondo gli standard CIE. Sono descritti i principali strumenti installati presso la nostra stazione di misura ed il sistema di acquisizione dati della radiazione solare: Il sistema di acquisizione originariamente pensato e realizzato per acquisire oltre alla radiazione solare una serie di altri valori quali temperature delle pareti, flussi di calore, condizioni termo igrometriche dell'ambiente confinato, ha subito nel 2005 un upgrade ed adeguato agli standard IDMP sia in termini di grandezze acquisite che di modalità di acquisizione. Nel secondo capitolo è riportata anche la procedura per effettuare la pulizia dei dati acquisiti attraverso le specifiche del "Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement" – TECHNICAL REPORT" o più semplicemente riconosciuto come CIE Data Quality Control al fine di limitare l'utilizzo di dati spuri affetti da errori nella misura, effetto del coseno dei sensori, malfunzionamenti accidentali.

Nel terzo capitolo vengono proposte diverse correlazioni per il calcolo dell'illuminamento naturale globale, diretto e diffuso su superfici variamente inclinate ed orientate; sono proposti i confronti con le principali correlazioni esistenti in letteratura e saranno evidenziati i risultati ottenuti con l'impiego di database di dati sperimentali di località estere. Viene effettuata la trattazione sistematica del calcolo dei valori di illuminamento esterno (globale, diffuso e diretto) attraverso il metodo delle efficacie luminose. Il principio utilizzato per la determinazione della luce naturale è la proporzionalità esistente tra il valore di irraggiamento solare ed il corrispondente valore di illuminamento su una qualunque superficie: a livello extratmosferico il rapporto tra l'illuminamento e l'irraggiamento è costante essendo costanti l'irraggiamento e l'illuminamento ed è pari a $97,17 \text{ lm/W}$, al suolo si discosta abbastanza da tale valore a causa dei fenomeni di scattering, riflessione, soleggiamento, nuvolosità, assorbimento dell'atmosfera ecc.

Poiché l'efficacia luminosa della radiazione globale dipende principalmente dall'assorbimento atmosferico, ed in particolare dall'assorbimento della radiazione infrarossa questa, aumenta all'aumentare della distanza percorsa dai raggi luminosi in atmosfera.

Qualora si riesca a conoscere, o predire con delle opportune correlazioni, i valori di efficacia luminosa sarebbe agevole convertire i dati di irraggiamento in illuminamento su superfici variamente inclinate ed orientate. L'attenzione di diversi ricercatori si è focalizzata, per anni, sulla predizione dell'illuminamento utilizzando quale dato di partenza l'irraggiamento solare.

L'irraggiamento solare, infatti, è ormai disponibile in diverse stazioni meteorologiche sparse per il globo e, nel caso in cui non dovesse essere noto è calcolabile, con errori accettabili, con diverse correlazioni esistenti in letteratura.

La predizione dei valori di illuminamento esterno a partire dall'irraggiamento solare è una metodologia necessaria quando non si hanno a disposizione nel sito di interesse una rete di strumenti che siano in grado di effettuare delle misure dirette.

Nel corso degli ultimi anni sono state validate molte correlazioni esistenti in letteratura e ne sono state proposte di nuove; gli studi riportati nel capitolo sono stati oggetto di diverse pubblicazioni su rivista internazionale quali Energy, Energy and Building, Energy conversion and Management, Renewable Energy, ecc. ed in questa sede riassunti, in particolare sono state studiate le:

- Correlazioni di efficacia globale e diffusa sul piano orizzontale;
- Correlazioni di efficacia della radiazione diretta o;
- Correlazioni di efficacia diffusa su pareti verticali.

Gli studi sono stati condotti in diverse condizioni di cielo ed in particolare sono stati studiati tutti i cieli, cieli sereni, cieli intermedi e cieli coperti.

Nel quarto capitolo, invece, viene proposta una metodologia per il calcolo dei valori illuminamento che parte dalla distribuzione della luminanza della volta celeste anziché dalla misura diretta; è evidenziata la procedura per la costruzione dei database di calcolo e delle metodologie di calcolo.

A tale scopo è stato impiegato uno *sky scanner* acquistato nell'ambito del progetto PRIN 2005 dal titolo "*Parametri climatici, strumenti di valutazione e tecnologie per l'ambiente luminoso naturale ed artificiale ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico*" – Coordinatore Nazionale Prof.ssa Chiara Aghemo, con il quale è possibile effettuare, con frequenza di 10 min., la scansione dei valori di luminanza ed irradianza del cielo secondo il modello proposto da Tregenza.

I dati di luminanza ed irradianza integrati su tutta la volta celeste forniscono l'illuminamento diffuso su una qualunque superficie; il dato di integrazione, dagli studi effettuati, risulta sensibilmente differente rispetto al dato misurato direttamente dagli strumenti di misura (luxmetri). Il valore calcolato per integrazione necessita quindi di una "correzione", da effettuarsi con un parametro correttivo (una costante) per ricondurlo ai valori ricavati per misura diretta. Tale correzione può essere, successivamente, estesa alle distribuzioni di luminanza ed irradianza per poter effettuare le integrazioni di porzioni di volta celeste e calcolare l'illuminamento, o l'irraggiamento, incidente su più superfici a partire dalla medesima distribuzione. Questi studi sono, altresì, da considerarsi propedeutici ad altre linee di ricerca che fanno uso delle distribuzioni di luminanza, della luce naturale, per predire i valori di illuminamento interno degli ambienti confinati.

Tutti gli studi condotti sono stati possibili grazie alla dotazione strumentale presente presso il Dipartimento di Meccanica dell'Unical che, per numero di grandezze contemporaneamente acquisite, la qualità di strumenti di misura e la concomitante presenza dello *sky scanner*, rappresenta una esperienza unica nel panorama Nazionale.

CAPITOLO I

GRANDEZZE DI RIFERIMENTO

1.1 – POSIZIONE DEL SOLE NELLA VOLTA CELESTE.

Nella stesura dei calcoli illuminotecnici è di fondamentale importanza la conoscenza della posizione del sole nella volta celeste con riferimento alla località in esame (Fig. 1.2); nel presente paragrafo sono introdotti i principali parametri utilizzati nei calcoli.

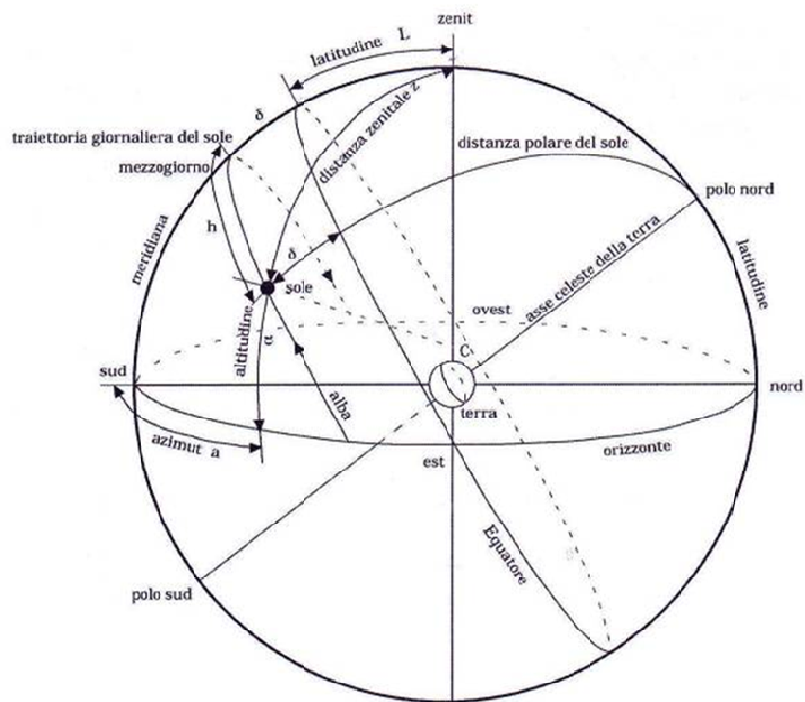


Fig. 1.1 – Posizione del sole nella volta celeste.

1.1.1- LA LATITUDINE L

Un punto della superficie terrestre è individuabile mediante due coordinate angolari : la latitudine e la longitudine.

La latitudine (L) è l'angolo che la retta passante per il centro della Terra e la località considerata forma con il piano dell'equatore. Si distingue in latitudine Nord (positiva) nell'emisfero settentrionale e Sud (negativa) nell'emisfero meridionale.

La longitudine è la misura in gradi dell'arco di parallelo compreso tra il meridiano d'origine, che è quello passante per i poli e per Greenwich, e il meridiano del punto considerato.

1.1.2 - LA DECLINAZIONE SOLARE δ

E' l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari a mezzogiorno, sul meridiano considerato, e il piano equatoriale. La declinazione solare è positiva quando il Sole è al di sopra del piano equatoriale e negativa quando il Sole è al di sotto di esso.

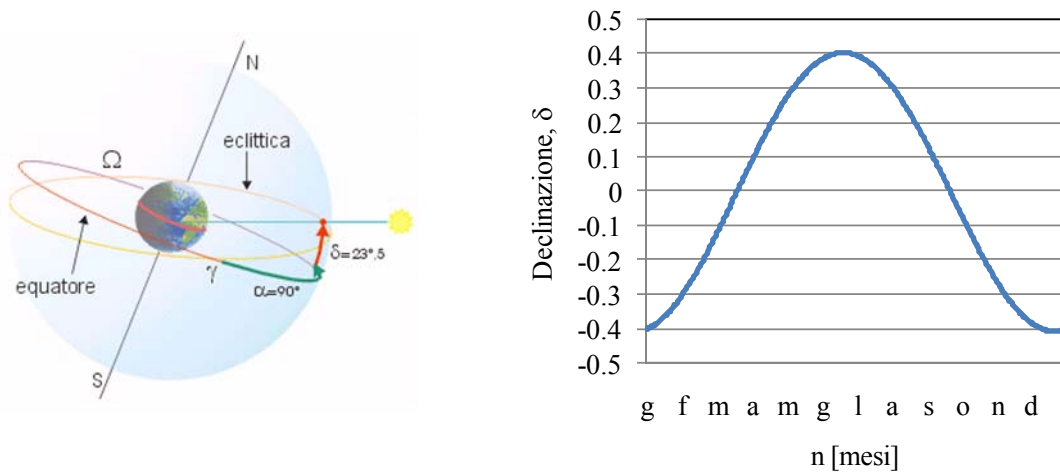


Fig. 1.2 – Rappresentazione grafica e andamento annuo della declinazione solare.

La declinazione solare può essere valutata per mezzo della seguente formula:

$$\begin{cases} \delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \vartheta_0 + 0.070257 \sin \vartheta_0 - 0.006758 \cos 2\vartheta_0 + 0.000908 \sin 2\vartheta_0 \\ \vartheta_0(\text{rad}) = \frac{2\pi n(t)}{365} \end{cases} \quad (1.1)$$

ϑ_0 espresso in radianti è il numero progressivo del giorno dell'anno partendo da 0, il 1 Gennaio, a 364, il 31 Dicembre, per un anno normale o a 365 per un anno bisestile.

1.1.3 - ANGOLO ORARIO H

E' la distanza angolare tra il Sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste; nullo a mezzogiorno, positivo nelle ore antimeridiane e negativo nelle ore pomeridiane, può essere valutato con la seguente relazione:

$$h = (12 - \text{ora})15 \quad (1.2)$$

1.1.4 - ORA CONVENZIONALE E ORA SOLARE VERA

La durata del giorno è definita dal passaggio del sole sulla verticale di un meridiano dato, corrispondente a un giro della terra su se stessa, aumentata dall'arco descritto attorno al sole durante la giornata. Nonostante ciò, la differenza tra i due passaggi non è strettamente costante nel corso dell'anno, per le due ragioni seguenti:

- L'orbita della terra è ellittica, e l'arco percorso differisce secondo la legge delle aree di Kepler. Questa contribuzione segue un comportamento sinusoidale di ampiezza ± 7.8 minuti;
- L'obliquità dell'asse di rotazione induce una seconda correzione, avente un andamento di una senoide con un periodo di 6 mesi e un'ampiezza di ± 10 minuti.

Questo fa sì che durante il corso dell'anno, il tempo indicato da una meridiana differisce dal tempo indicato da un orologio di un valore che va da +16 minuti e 33 secondi (tra il 31 ottobre ed il 1° novembre) e -14 minuti e 6 secondi (tra l'11 e il 12 febbraio).

Questo scostamento è chiamato equazione del tempo ed è la conseguenza della combinazione dell'inclinazione e dell'eccentricità dell'orbita terrestre. La rappresentazione visiva

di questa equazione è l'analemma, ovvero una particolare curva geometrica a forma di otto che descrive la posizione del sole nei diversi giorni dell'anno, alla stessa ora e nella stessa località

La composizione di queste due correzioni, chiamata equazione del tempo ET, è indicata nella Figura 1.4. L'equazione del tempo varia lentamente di anno in anno, sotto l'effetto della precessione degli equinozi (rotazione del grande asse dell'ellisse di circa 20 minuti per anno, e cioè un giro ogni 26.000 anni) ed è tabulata nelle tavole di navigazione. Può essere calcolata in forma estesa tramite:

$$ET = 0.0172 + 0.4281 \cos \vartheta_0 - 7.3515 \sin \vartheta_0 - 3.3495 \cos 2\vartheta_0 - 9.3619 \sin 2\vartheta_0 \quad (1.3)$$

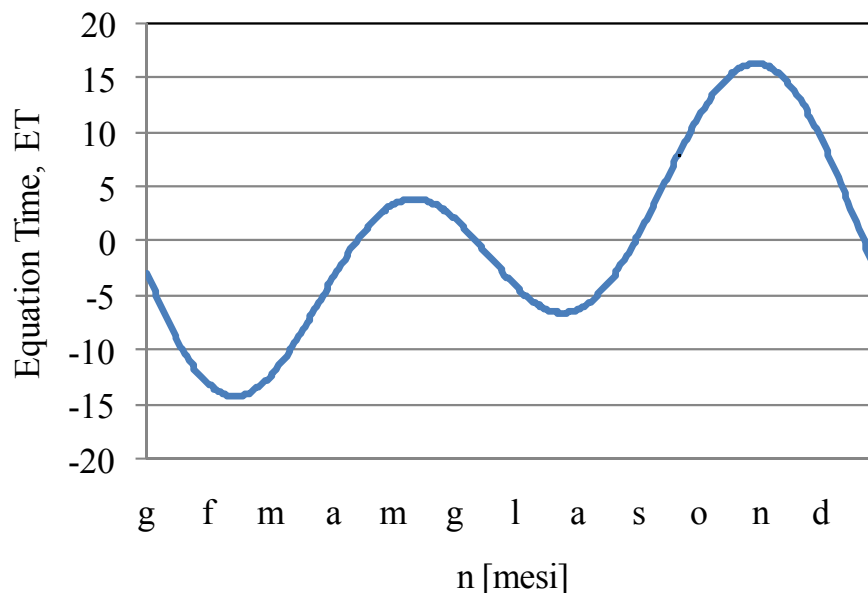


Fig. 1.3 – Equation Time nei vari mesi dell'anno.

L'ora convenzionale in un luogo dato dipende ancora dalla sua longitudine. Il riferimento del tempo terrestre è dato dal tempo solare medio a Greenwich (GMT).

Per convenzione, la superficie della terra è suddivisa in fusi orari, corrispondenti a delle differenze di un ora rispetto al GMT. L'Europa corrisponde al fuso orario N° 1 in inverno, e l'ora estiva al fuso orario N°2. Per stabilire la relazione definitiva tra L'ora solare vera OSV e l'ora convenzionale OC, si deve ancora introdurre la posizione (longitudine) del luogo nel fuso orario:

$$OSV = OC + 4' (long\ merid.\ Locale - long.\ merid.\ Di\ rif.) + ET \quad (1.4)$$

Dove la latitudine, la longitudine ed ET sono espressi in radianti.

Nel caso in esame, riferendoci alla posizione della Stazione di Prova, ad orientamento variabile individuata dalle seguenti coordinate Lat=39.21° e long=16.13° utilizzando quale meridiano di riferimento il meridiano dell'Etna 15 gradi a est da Greenwich.

1.1.5– ALTEZZA SOLARE, ANGOLO ZENITALE E AZIMUT SOLARE

Per individuare ad un certo istante dell'anno la posizione del sole nel cielo in una determinata località è necessario definire alcuni angoli caratteristici.

- **L'altezza solare α :** è l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari e il piano orizzontale;

$$\alpha = \arcsin[(\sin L \sin L\delta) + (\cos \delta \cos L \cos h)] \quad (1.5)$$

- **L'angolo zenitale z :** è l'angolo formato tra i raggi solari e la direzione dello zenit è quindi complementare ad α ;
- **L'azimut solare a o angolo azimutale a :** è l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud; è positivo se cade verso est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativo se la proiezione cade verso ovest (dopo mezzogiorno), ed è individuato dalle seguenti relazioni:

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha} \quad (1.6)$$

Quest'ultima equazione è valida se:

$$\sin \alpha \geq \frac{\sin \delta}{\sin L} \quad \text{per } L \geq 0 \quad (1.7)$$

$$\sin \alpha < \frac{\sin \delta}{\sin L} \quad \text{per } L < 0 \quad (1.8)$$

Se queste condizioni non sono verificate, il valore di a dovrà essere corretto tramite la relazione:

$$a = \text{segno}(a)(180 - |a|) \quad (1.9)$$

Nel caso in cui la latitudine della località considerata dovesse essere al di fuori del range di valori prima scritto ($\pm 66,5^\circ$), la formula di calcolo dell'angolo orario non può più essere utilizzata. In particolare:

se $|L+\delta| > 90^\circ$ il sole non tramonta mai;

se $|L-\delta| > 90^\circ$ il sole non sorge mai.

L'angolo orario, indicato nell'eq. 1.2, relativo all'alba h_a o al tramonto h_t può essere calcolato per mezzo dell'equazione (1.5); infatti annullando il $\sin a$ si ottiene:

$$h_a = -h_t = \arccos\left(-\frac{\tan L}{\tan \delta}\right) \quad (1.10)$$

1.2 - GRANDEZZE FONDAMENTALI DELL'ILLUMINOTECNICA.

La luce è energia, pesata diversamente rispetta alla lunghezza d'onda secondo la curva di sensibilità spettrale.

Di tutto lo spettro della radiazione solare la porzione dei fotoni con lunghezza d'onda compresa tra i 380 e i 780 nanometri sono visibili, nel senso che vengono "captati" dai nostri occhi. Questa parte dello spettro, in altre parole, può essere chiamarla "Luce visibile" ed è una piccolissima porzione dell'intero spettro delle radiazioni elettromagnetiche esistenti in natura. Tutti i fotoni con frequenza immediatamente inferiore (lunghezza d'onda inferiore ai 380 nm), fanno parte della "porzione" ultravioletta, mentre quelli dell'infrarosso partono da lunghezze d'onda oltre i 700.

Senza entrare nel dettaglio nell'anatomia, fisiologia, neurologia del sistema visivo umano, ci soffermeremo solo sulla presenza all'interno della retina dei coni e dei bastoncelli e alla loro sensibilità alle varie lunghezze d'onda. I coni sono costituiti da tre classi ben distinte di cellule sensoriali ognuna delle quali è sensibile ad uno dei tre colori: rosso (R, "red"), verde (G, "green") e blu (B, "blue"). I tre tipi di coni hanno una diversa risposta allo stimolo luminoso di cui la luce emessa è bianca, cioè ha la stessa intensità a tutte le lunghezze d'onda.

Questi tre colori sono detti colori primari per la caratteristica di essere individuati "puri" dagli elementi fotosensibili dell'occhio. La risposta di ogni tipo di cono è proporzionale all'intensità della luce che lo colpisce solo entro certi limiti: c'è un limite inferiore, al di sotto del quale il cono non è più sensibile (soglia di sensibilità) che non è la stessa per i tre tipi (il blu ha la soglia più bassa) e c'è un limite superiore (soglia di saturazione), al di sopra della quale la risposta è sempre la stessa.

L'occhio umano è in grado di percepire solo tre attributi della luce: la tinta (Hue), la saturazione (Saturation) e la brillantezza (Brightness).

Il colore è la risultante di questi tre attributi. Una luce percepita come avente un certo colore (es. giallo) può effettivamente corrispondere a una unica sorgente o a una sovrapposizione con opportune intensità di emissioni a diverse lunghezze d'onda (fenomeno del metamerismo). Sovrapponendo tre colori primari di opportune intensità: rosso (Red), verde (Green) e blu (Blue), (RGB) è possibile riprodurre qualunque sensazione di colore percepita dall'occhio (fenomeno del metamerismo).

I bastoncelli, di forma più allungata rispetto ai coni, sono molto numerosi (più di 100 milioni di cellule per occhio), sono presenti uniformemente in tutta la retina, sono sensibili solo alle differenze di intensità luminosa e sono responsabili della visione quando c'è pochissima luce. In altre parole sono responsabili della visione "notturna" o **scotopica**) e non permettono di distinguere i colori.

Nel grafico qui in basso, a sinistra (linea azzurra), è riportata la curva di sensibilità dei bastoncelli, con un picco attorno ai 507 nanometri.

I coni sono meno numerosi dei bastoncelli (meno di un ordine di grandezza), la loro presenza è concentrata nella fovea (è la zona centrale della retina in corrispondenza dell'asse ottico), vengono attivati da un flusso luminoso decisamente più sostanzioso rispetto ai bastoncelli e per questo motivo sono responsabili della visione diurna **fotopica**.

Considerando l'insieme delle tre classi di coni, i nostri occhi sono sensibili a frequenze dello spettro luminoso secondo la curva disegnata qui in alto a destra (linea verde), con picco centrato a circa 555 nm.

Come già anticipato, la curva di sensibilità generale dei nostri occhi varia in relazione al livello di illuminamento. In particolare, la curva di sensibilità della visione scotopica si riferisce a livelli di illuminamento compresi tra 1 lux e 0,00001 lux.

La visione fotopica è attiva per livelli di illuminamento compresi tra 0,01 lux e più di 100.000 lux. Per livelli d'illuminamento compresi tra 0,01 lux e 1 lux, sono attive entrambe le classi di cellule sensoriali e la curva di sensibilità, detta mesopica, è più o meno a metà strada tra quella fotopica e quella scotopica.

In Fig. 1.5 sono riportate le due curve di sensibilità dell'occhio umano per visione notturna e diurna.

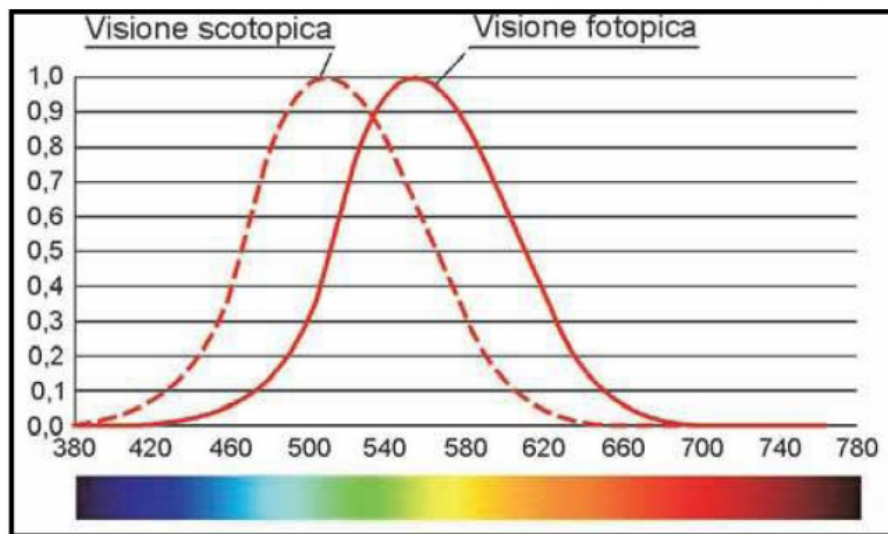


Fig. 1.4 – Curve di sensibilità scotopica e fotopica dell'occhio umano.

L'illuminotecnica è la disciplina tecnico/scientifica che si occupa dell'illuminazione di spazi ed ambienti, sia interni che esterni, sfruttando sia la luce solare, che la luce artificiale.

Illuminotecnica significa, come indica il termine stesso, "tecnica della illuminazione".

Le grandezze fondamentali di questa disciplina sono:

- Flusso luminoso;
- Intensità luminosa;
- Illuminamento;
- Luminanza.

Flusso luminoso (f)

Il flusso luminoso indica la quantità di energia luminosa emessa nell'unità di tempo (1 secondo) da una sorgente; rappresenta quindi una potenza luminosa emessa.

L'unità di misura del flusso luminoso è il lumen [$lm=cd\cdot sr$].

Intensità luminosa (I)

L'intensità luminosa indica il flusso luminoso emessa da una sorgente all'interno dell'angolo solido unitario (steradiante) in una direzione data [cd].

Una sorgente luminosa puntiforme emette radiazioni della stessa intensità in tutte le direzioni, quindi il suo flusso luminoso si propaga uniformemente come generato dal centro di una sfera.

L'unità di misura dell'intensità luminosa è definita come l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica alla frequenza di $540\cdot 10^{12} Hz$ ($\lambda = 555 \text{ nm}$) e la cui intensità radiante in quella direzione è di $1/683 \text{ W/sr}$.

L'angolo solido ω è una regione conica di spazio ed è definito dal rapporto tra l'area della superficie A racchiusa sulla sfera ed il quadrato del raggio r^2 della stessa si misura in steradiani [sr] secondo l'equazione:

$$\omega = \frac{A}{r^2} \quad (1.11)$$

Illuminamento (E) misurato il lux [$lx=lm/m^2$]

È il rapporto tra il flusso luminoso ricevuto da una superficie e l'area della superficie stessa.

In altre parole indica la quantità di luce che colpisce un'unità di superficie.

L'illuminamento varia con l'inverso del quadrato della distanza dalla sorgente luminosa.

Luminanza (L)

È il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una superficie in una data direzione e l'area apparente di tale superficie.

L'area apparente è la proiezione della superficie su un piano normale alla direzione considerata.

In pratica indica la sensazione di luminosità che si riceve da una sorgente luminosa primaria o secondaria.

Si definisce sorgente primaria un corpo che emette direttamente radiazioni; si definisce sorgente secondaria un corpo riflette le radiazioni emesse da una sorgente primaria. La luminanza è misurata in cd/m^2 .

La luminanza è legata alla visione e tiene conto della direzione di osservazione considerata.

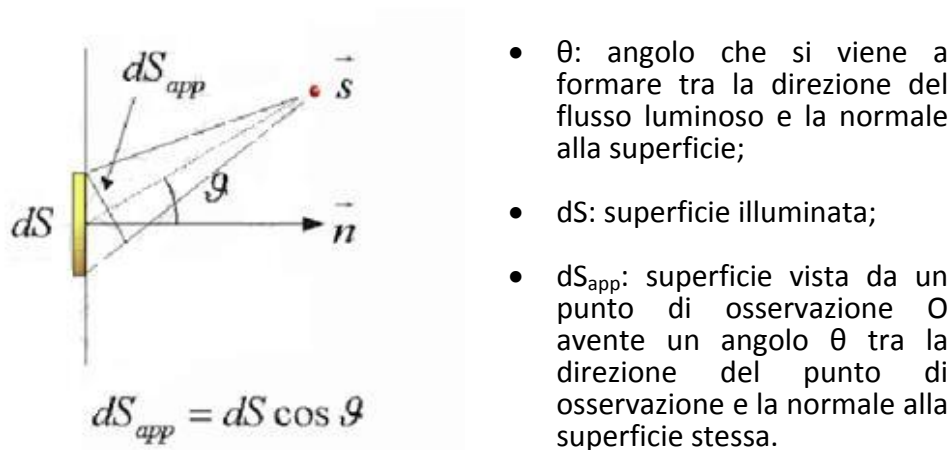


Fig 1.5 – Rappresentazione della Luminanza

È importante sottolineare la differenza tra illuminamento e luminanza: la prima infatti indica la quantità di luce emessa da una sorgente che colpisce la superficie considerata, mentre la seconda indica la sensazione di luminosità che riceviamo da questa superficie.

Si hanno inoltre le seguenti definizioni:

Il “**Flusso Radiante**”(G) o “flusso energetico” è la potenza della radiazione (cioè l’energia radiante per unità di tempo) e si misura in watt (W).

È una grandezza associata alla posizione e alla direzione.

Da questa grandezza fondamentale si derivano altre grandezze che caratterizzano la distribuzione spaziale e temporale dell’energia radiante.

L'irraggiamento “*irradianza*” è la potenza di una radiazione ricevuta (quindi non emessa) da una superficie di rivelazione unitaria e si misura in watt per metro quadrato.

L'irradianza che cade su una superficie varia con il coseno dell'angolo di incidenza.

La “*radianza*” è la potenza di una radiazione emessa o riflessa (quindi non ricevuta) da un'area in una data direzione e si misura in watt per metro quadrato per steradiante.

1.3 - ILLUMINAMENTO NATURALE

L'energia luminosa percepita dall'occhio umano è la frazione dell'energia solare globale compresa nell'intervallo di lunghezza d'onda $\lambda=0.38$ mm (limite dell'ultravioletto), 0.78 mm (limite dell'infrarosso), con una sensibilità massima alla lunghezza d'onda di 0.555 mm.

Il flusso luminoso (ovvero la quantità di luce nell'unità di tempo) è la grandezza fotometrica che misura l'intensità della sensazione luminosa dell'occhio umano legandola alla potenza dello stimolo.

Si definisce illuminamento E il flusso luminoso incidente su una superficie unitaria, la cui unità di misura è il lux ($1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$).

Un flusso di energia solare $G(\lambda)d\lambda$ (W/m^2) incidente su una superficie unitaria produce un flusso di energia luminosa $W_{lum}(\lambda) d\lambda$ pari a:

$$W_{lum}(\lambda)d\lambda = 683 \cdot V(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot d\lambda [\text{lux}] \quad (1.11)$$

essendo $V(\lambda)$ un coefficiente di visibilità, che può essere approssimato dalla seguente relazione:

$$V(\lambda) = e^{-278.5(\lambda-0.555)^2} \quad (1.12)$$

il cui andamento è mostrato nella Fig. 1.5 (curva fotopica).

Viene definita **Efficacia Luminosa (K)** della radiazione il rapporto tra l'energia luminosa e l'energia solare incidenti su una superficie:

$$K = \frac{W_{lum}}{G} = 683 \frac{\int_{0.38}^{0.78} V(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} G(\lambda)d\lambda} \quad (1.13)$$

L'equazione precedente può essere scritta per la radiazione globale, diretta e diffusa.

L'efficacia luminosa consente il passaggio dalla radiazione solare all'illuminamento che essa produce.

Tale relazione sarà oggetto di studi molto approfonditi nell'ambito del presente lavoro di tesi, in quanto la misura o la predizione della radiazione solare (globale, diretta o diffusa) sono più agevoli rispetto ai valori dell'illuminamento.

1.4 – PRINCIPI DI INGEGNERIA SOLARE

Nel presente paragrafo introdurremo alcune grandezze fondamentali alla comprensione delle correlazioni di calcolo che saranno sviluppate nell'arco di tutta la tesi.

Molte grandezze fisiche riguardanti l'irraggiamento saranno utilizzate nei calcoli di illuminamento: la radiazione solare e la radiazione luminosa naturale hanno la stessa natura e possono essere trattate, dal punto di vista fisico, allo stesso modo.

1.4.1 - LE COSTANTI SOLARI.

Alla sua distanza media dalla Terra, il Sole sottende un angolo di $32'$, ossia di circa $\frac{1}{2}$ grado: questo fa sì che l'intensità della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera terrestre sia circa costante.

Si definisce Costante Solare I_{es} il flusso medio di energia solare che incide nell'unità di tempo su una superficie unitaria posta al di fuori dell'atmosfera terrestre, ad una distanza dal Sole pari alla distanza media Terra-Sole, ed orientata perpendicolarmente ai raggi solari.

E' un valore medio poiché è ottenuto integrando l'irraggiamento extratmosferico spettrale in tutto l'intervallo di lunghezze d'onda tra 0 e $5 \mu\text{m}$.

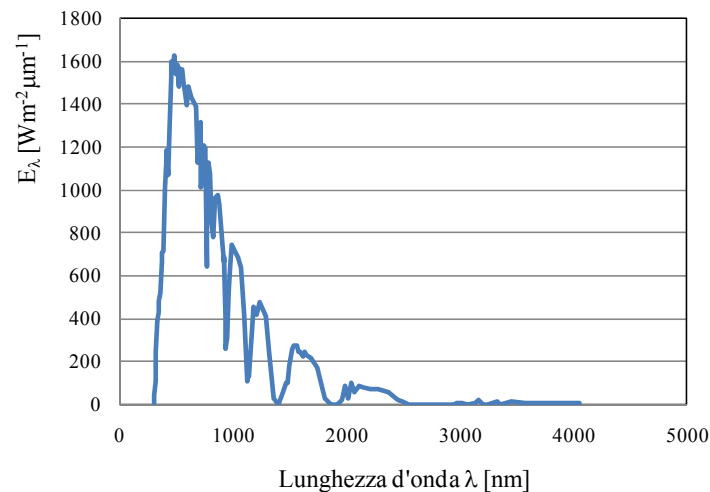


Fig. 1.6 – Irraggiamento solare spettrale extratmosferico.

Trattasi di un valore costante perché indipendente dal luogo sulla Terra e dalle condizioni meteorologiche.

Il suo valore medio più recente, misurato per mezzo di satelliti artificiali, risulta pari a 1367 W/m^2 .

Trascurando gli effetti sull'energia emessa dal Sole dovuti all'attività periodica delle macchie solari, a causa della variazione della distanza Terra-Sole, dovuta all'eccentricità dell'orbita della Terra attorno al Sole, l'irraggiamento extraterrestre varia durante l'anno del $\pm 3\%$ rispetto al valore di I_{cs} indicato come costante.

L'andamento dell'irraggiamento extraterrestre (Fig. 1.1) può essere approssimato dalla relazione:

$$I_0(t) = I_{cs} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi n(t)}{365}\right) \right] \quad (1.17)$$

Dove $n(t)$ è il numero progressivo del giorno dell'anno

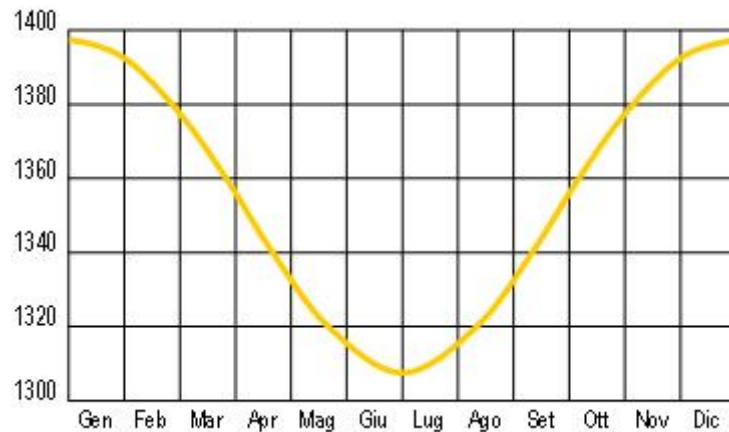


Fig. 1.7 – Irraggiamento extraterrestre $I_0(t)$ nel corso dell'anno.

Esiste un Costante Solare Luminosa ricavata nello spettro ottico (o range del visibile) dell'irraggiamento spettrale extratmosferico definita come:

$$LSC = K_m \int_{\lambda=380}^{780} E_{\lambda} V(\lambda) d\lambda = 133.8 \quad (klux) \quad 1.14$$

Dove E_{λ} è la radiazione solare extratmosferica in corrispondenza della lunghezza d'onda λ e $V(\lambda)$ la curva di visibilità definita nella 1.2 e:

$$K_m = 683 \text{ lm/W} \quad 1.15$$

la massima efficacia luminosa corrispondente al picco della curva del fototipo in corrispondenza di $\lambda=555 \text{ nm}$.

Anche la Costante Solare Luminosa è soggetta ad una certa variabilità dovuta all'eccentricità dell'orbita terrestre e per ottenere valori più precisi andrebbe corretta come la Costante della Radiazione Solare nell'eq. 1.17.

Con tutte le differenze anzi esposte tra radiazione solare e radiazione luminosa è stata osservato un legame diretto tra illuminamento naturale ed irraggiamento solare; tali considerazioni portano alla definizione di una efficacia luminosa extratmosferica:

$$K_M = 97.17 \text{ lm/W} \quad (1.16)$$

I valori misurati al suolo si discostano da questo valore e dipendono da una serie di altri fattori, quali latitudine, indici di serenità, fattore di torbidità atmosferica e sono oggetto di studio del 3° capitolo

1.4.2 - L'IRRAGGIAMENTO E L'ILLUMINAMENTO GLOBALE DIRETTO E DIFFUSO.

La radiazione solare, sia essa illuminamento o irraggiamento, incidente su di una qualunque superficie è scomponibile in tre diversi contributi la cui somma fornisce il valore di radiazione solare globale:

- Radiazione Solare Diretta;
- Radiazione Solare Diffusa;
- Radiazione Solare riflessa.

Mentre la radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben definito angolo di incidenza, quella diffusa incide su tale superficie con vari angoli. Occorre ricordare che quando la radiazione diretta non può colpire una superficie a causa della presenza di un ostacolo, l'area ombreggiata non si trova completamente oscurata grazie al contributo della radiazione diffusa. Una superficie inclinata, può ricevere, inoltre, la radiazione riflessa dal terreno o da specchi d'acqua o da altre superfici orizzontali.

Le proporzioni di radiazione riflessa, diffusa e diretta ricevuta da una superficie dipendono:

- dalle condizioni meteorologiche (in una giornata nuvolosa la radiazione è pressoché totalmente diffusa; in una giornata serena con clima secco, viceversa, predomina la componente diretta, che può arrivare fino al 90% della radiazione totale);
- dall'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale (una superficie orizzontale riceve la massima radiazione diffusa e la minima riflessa; la componente riflessa aumenta al crescere dell'inclinazione);
- dalla presenza di superfici riflettenti (il contributo maggiore alla riflessione è dato dalle superfici chiare; così la radiazione riflessa aumenta in inverno, per effetto della presenza di neve, e diminuisce in estate, per effetto di assorbimento di colori scuri quali quello dell'erba o del terreno).

L'intensità della radiazione solare incidente su una superficie al suolo è influenzata dall'angolo di inclinazione della radiazione stessa: più piccolo è l'angolo che i raggi del sole formano con una superficie orizzontale e maggiore è lo spessore di atmosfera che essi devono attraversare, e

conseguentemente minore è la radiazione che raggiunge la superficie. La posizione ottimale, in pratica, si ha quando la superficie è orientata a sud con angolo di inclinazione pari alla latitudine del sito: l'orientamento a sud massimizza la radiazione solare captata ricevuta nella giornata e l'inclinazione pari alla latitudine rende minime, durante l'anno, le variazioni di energia solare captate dovute alla oscillazione di $\pm 23.5^\circ$ della direzione dei raggi solari rispetto alla perpendicolare alla superficie di raccolta.

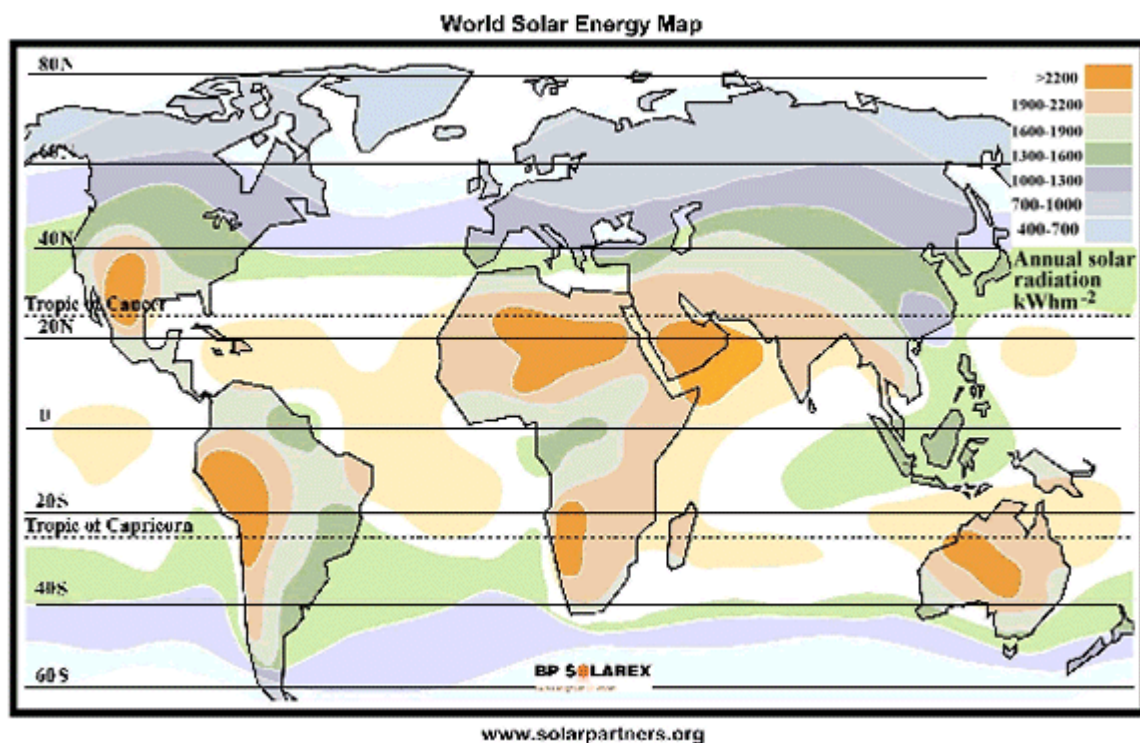


Fig. 1.9 – Soleggiamento annuale kWh/m².

Al variare della località, inoltre, varia il rapporto fra la radiazione solare diffusa e quella totale e, poiché all'aumentare dell'inclinazione della superficie di captazione diminuisce la componente diffusa e aumenta la componente riflessa, l'inclinazione che consente di massimizzare l'energia raccolta da località a località.

Per località italiane, tuttavia, deviazioni di una decina di gradi rispetto all'inclinazione ottimale causano variazioni di energia raccolta dell'ordine di pochi punti percentuali.

1.4.3 – SIMBOLOGIA CIE E STANDARD IDMP.

L'acquisizione dati è il più adeguato e accurato approccio per la messa a punto di database della luce naturale ai quali fare riferimento nella progettazione; tuttavia non esistono misure accurate riguardanti la luce naturale in molte parti del mondo.

Nel 1991 venne dato inizio ufficiale all'”International Daylight Measurement Programme” o IDMP in occasione della Conferenza quadriennale del CIE a Melbourne dove vennero fornite le linee guida per l'effettuazione di misure nel campo della luce naturale.

Vennero così forniti degli standard per gli strumenti di misura, per il controllo di qualità dei dati acquisiti, per la loro archiviazione e diffusione.

A tutt'oggi benché il programma non abbia più avuto aggiornamenti in termini dal 1997 è rimasta la simbologia adottata all'epoca e sono rimasti validi gli standard di misura che consentono ai ricercatori di tutto il mondo di scambiarsi dati nel campo della luce naturale. Secondo le indicazioni dell'IDMP esistono due tipi di stazioni di misura:

a) General Class Station

Dove vengono effettuate le misure di radiazione solare cosiddette “di base” e includono le misure di:

- Illuminamento ed Irraggiamento globale e diffuso orizzontale;
- Illuminamento globale verticale sulle quattro direzioni cardinali esposte a nord, est, sud e ovest;
- Ora dell'alba.

b) Research Class Station

- Tutte le misure della “General Class Station”;
- Distribuzioni di luminanza della volta celeste;
- Presenza complessiva di nuvole;
- Temperatura di bulbo umido
- Temperatura dell'aria esterna
- Irraggiamento globale verticale sulle quattro direzioni cardinali esposte a nord, est, sud e ovest;

La stazione di misura presente ad Arcavacata di Rende può essere considerata, a parte la misura dell'indice di nuvolosità, una Research Class Station e vengono effettuate anche altre misure legate alla radiazione solare non contemplate nelle precedenti classificazioni tra le quali, di grande rilevanza scientifica, l'illuminamento e l'irraggiamento solare diretto e diffuso.

Le grandezze di seguito riportate sono misurate attraverso una rete di strumenti di misura che verrà descritta nel capitolo successivo; alcune di esse possono anche essere dedotte attraverso la conoscenza delle altre grandezze in elenco a seguito di calcoli che saranno ampiamente descritti nello sviluppo del presente lavoro.

Successivamente si trovano i valori misurati nei database di acquisizione

- E_{vg} [lux]: illuminamento globale sul piano orizzontale;
- E_{vd} [lux]: illuminamento diffuso sul piano orizzontale;
- E_{vs} [lux]: illuminamento solare diretto normale;
- E_{vgn} [lux]: illuminamento verticale globale a nord;
- E_{vge} [lux]: illuminamento verticale globale a est;
- E_{vgs} [lux]: illuminamento verticale globale a sud;
- E_{vgw} [lux]: illuminamento verticale globale a ovest;
- E_{eg} [W/m^2]: irradianza globale sull'orizzontale;
- E_{ed} [W/m^2]: irradianza diffusa sull'orizzontale;
- E_{es} [W/m^2]: irradianza diretta normale;
- E_{egn} [W/m^2]: irradianza verticale globale a nord;
- E_{ege} [W/m^2]: irradianza verticale globale a est;
- E_{egs} [W/m^2]: irradianza verticale globale a sud;
- E_{egw} [W/m^2]: irradianza verticale globale a ovest;
- R_h : umidità relativa;
- D_{bt} : temperatura di bulbo umido;
- **Pir superiore, Pir inferiore:** Misura dell'albedo.

Spesso tali dati sono confrontati con i valori di illuminamento ed irraggiamento extraterrestri su di un piano ortogonale alla direzione dei raggi solari, tali grandezze individuate dalle eqq. 1.14 e 1.17 sono indicate, nella simbologia IDMP, con E_v ed E_e .

In fig. 1.7 è riportata una vista della Stazione di misura operativa presso l'Università della Calabria.



Station: Arcavacata di Rende (CS) - Italy
Lat: 39° 21' 51" N - **Long.:** 16° 13' 27" E - **Alt:** 228 m
TIME: Solar Clock Time (GMT+1)
TYPE: 1 minute - 1 hour Measurements
SOURCE: Mechanical Engineering Department - University of Calabria

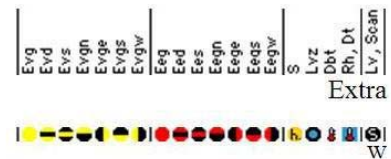


Fig. 1.7 – Ubicazione Stazione di Prova di Arcavacata.

1.4.4 - RADIAZIONE ISTANTANEA INCIDENTE SU UNA SUPERFICIE INCLINATA

A causa dei fenomeni di riflessione e di assorbimento prodotti sulla radiazione solare da parte dei costituenti dell'atmosfera, l'energia solare che raggiunge la superficie terrestre è notevolmente più piccola di quella incidente su una superficie posta all'esterno dell'atmosfera.

La parte di radiazione che raggiunge la Terra nella direzione dei raggi solari senza subire assorbimenti e riflessioni è denominata radiazione diretta, mentre la parte che raggiunge la Terra da tutte le direzioni (a causa del cosiddetto fenomeno dello scattering, ovvero della riflessione diffusa in tutte le direzioni dovuta all'urto con le molecole dell'aria, del vapor d'acqua e del pulviscolo atmosferico) viene chiamata radiazione diffusa.

La somma della radiazione diretta e di quella diffusa prende il nome di radiazione globale.

Considerazioni del tutto analoghe valgono per gli illuminamenti.

L'orientazione di una superficie è individuata utilizzando l'angolo di inclinazione β rispetto al piano orizzontale e l'angolo azimutale α_w della superficie stessa, ovvero l'angolo fra la

proiezione sul piano orizzontale della normale alla superficie e la direzione sud (Fig 1.5). L'angolo tra i raggi solari e la normale alla superficie viene detto angolo di incidenza i .

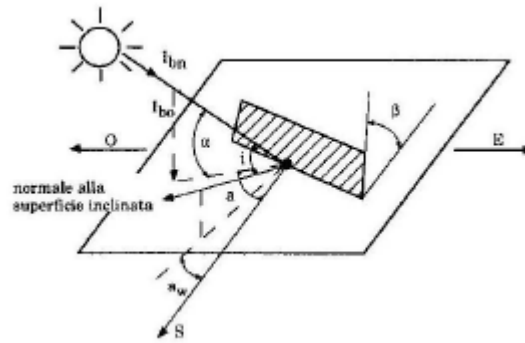


Fig. 1.8 – Orientazione di una superficie rispetto alla posizione del sole.

Se I_{bn} è una radiazione diretta normale alla superficie, la radiazione diretta (sia essa irraggiamento o illuminamento) incidente sulla superficie stessa (la indichiamo con G senza fare distinzione tra E_e ed E_v secondo la simbologia IDMP) sarà pari a:

$$G_b = I_{bn} \cos i \quad (1.20)$$

L'espressione generale di $\cos i$ è la seguente:

$$\cos i = \cos (a - a_w) \cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \quad (1.21)$$

oppure, in funzione degli angoli fondamentali L , h e δ :

$$\cos i = \sin \delta (\sin L \cos \beta - \cos L \sin \beta \cos a_w) + \cos \delta \cos h (\cos L \cos \beta + \sin L \sin \beta \cos a_w + \cos \delta \sin \beta \sin a_w \sinh) \quad (1.22)$$

La superficie vede il sole quando l'angolo di incidenza è minore di 90° e contemporaneamente l'altezza solare è maggiore di 0° .

Perciò il sole sorge e tramonta su una superficie in corrispondenza dell'angolo orario minimo tra il valore assoluto calcolato annullando il $\sin a$ ed il valore assoluto ottenuto annullando il $\cos i$.

L'eq. 1.22 presenta dei casi di particolare interesse:

- **Superficie orizzontale ($\beta=0$)** risulta:

$$\cos i = \sin \delta \cdot \sin L + \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos h = \sin \alpha \quad (1.23)$$

- **Superfici verticale esposte a sud ($\beta = 90$ e $a_w = 0$)** risulta:

$$\cos i = -\sin \delta \cdot \cos L + \cos \delta \cdot \sin L \cdot \cos h \quad (1.24)$$

Se si indica con I_{b0} la radiazione diretta istantanea incidente sul piano orizzontale, si può scrivere la relazione:

$$I_{bn} = \frac{I_{b0}}{\sin \alpha} \quad (1.25)$$

Quindi sostituendo nell'eq. 1.20 si ottiene

$$G_b = I_{b0} \frac{\cos i}{\sin \alpha} = R_b I_{b0} \quad (1.26)$$

dove R_b è il fattore di inclinazione della radiazione diretta.

Con le espressioni sopra riportate è possibile calcolare la radiazione solare in termini sia di irraggiamento che di illuminamento su di una superficie comunque orientata ed inclinata.

In particolare, nel presente lavoro di tesi, le relazioni sono state applicate per il calcolo dell'irraggiamento ed illuminamento sulle superfici orizzontali e verticali orientate secondo i quattro punti cardinali:

$$\begin{aligned} \cos i(n) &= \cos \alpha \cdot \cos (a - 180) \\ \cos i(e) &= \cos \alpha \cdot \cos (a - 90) \\ \cos i(s) &= \cos \alpha \cdot \cos (a) \\ \cos i(w) &= \cos \alpha \cdot \cos (a + 90) \end{aligned} \quad (1.27)$$

Invece il fattore di inclinazione della radiazione diretta è dato dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}
 R_b(n) &= \frac{\cos i(n)}{\sin \alpha} \\
 R_b(e) &= \frac{\cos i(e)}{\sin \alpha} \\
 R_b(s) &= \frac{\cos i(s)}{\sin \alpha} \\
 R_b(w) &= \frac{\cos i(o)}{\sin \alpha}
 \end{aligned}
 \tag{1.28}$$

1.4.5 – LA MASSA D’ARIA RELATIVA.

La massa d’aria viene definita come la lunghezza del percorso dei raggi solari attraverso l’atmosfera terrestre.

L’irraggiamento, e di conseguenza l’illuminamento solare, nell’attraversare l’atmosfera terrestre è attenuato dal cosiddetto “scattering” (o dispersione) e da fenomeni di assorbimento.

Tale assorbimento è tanto maggiore quanto più è lungo il percorso da compiere all’interno dell’atmosfera, di conseguenza la stessa sorgente luminosa appare meno brillante all’orizzonte di quando è allo zenit.

Uno dei fenomeni di scattering ed attenuazione maggiormente studiati è l’”atmospheric extinction” descritto e studiato da diversi autori per la sua importanza che ricopre nell’ambito delle osservazioni satellitari.

In genere ci si riferisce alla “massa d’aria relativa” ovvero la lunghezza del percorso relativa a quella del percorso allo zenit al livello del mare; così, per definizione, la massa d’aria relativa allo zenit al livello del mare è pari a 1 e aumenta all’aumentare dell’angolo tra la sorgente luminosa e lo zenit raggiungendo un valore pari a circa 38 all’orizzonte.

Sono stati condotti molti studi per il calcolo della massa d’aria relativa ed esistono in letteratura diverse correlazioni di diversi autori.

Quella maggiormente utilizzata nei calcoli di ingegneria solare, ed alla quale si farà riferimento nell’ambito della presente tesi, è la formula di Kasten e Young.

$$m = \frac{1}{\cos Z + 0.50572 \cdot (96.07995 - Z)^{-1.6364}}
 \tag{1.28}$$

Con Z angolo zenitale.

1.4.6– DISTANZA PUNTO- SOLE NELLA VOLTA CELESTE

Negli studi che contemplano l'uso delle distribuzioni di luminanza e/o irradianza della volta celeste bisogna spesso fare riferimento alla posizione relativa di un elemento delle volta celeste rispetto alla posizione istantanea del sole.

In Fig. 1.9 è rappresentata la posizione relativa di un elemento di cielo rispetto al sole:

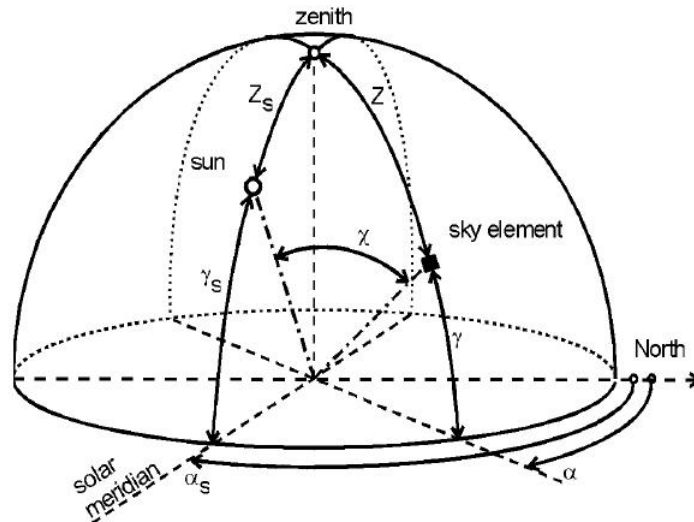


Fig. 1.9 – Angoli che definiscono la posizione del sole e di un elemento di cielo nella volta celeste.

La distanza punto-sole è calcolata con la relazione:

$$\chi = \cos^{-1}(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos A_z) \quad (1.29)$$

con

$$A_z = |\alpha - \alpha_s| \quad (1.30)$$

Dove Z e Z_s sono gli angoli zenitali rispettivamente del punto e del sole e α e α_s sono le altezze rispettivamente del punto e del sole.

1.4.7– CONVENZIONI SUGLI ANGOLI AZIMUTALI

La convenzione sugli angoli azimutali non è ancora univoca.

In Italia si adotta ancora una convenzione che ci portiamo in eredità dagli studi di ingegneria solare della letteratura degli anni 80-90', sostanzialmente è quella rappresentata nella Fig. 1.8 dove gli azimut (del sole o della normale della superficie esposta) a o a_w valgono zero a sud e sono positivi verso est (ruotando sud a est) e negativi verso ovest (ruotando da sud a ovest); tutte le nostre procedure di calcolo che fanno riferimento agli angoli zenitali, se pur affinate nel corso degli anni, fanno riferimento a questa convenzione.

Il CIE negli ultimi anni ha adottato la convenzione riportata in Fig. 1.9 con $a=0$ a nord e a positivi verso Est (ruotando da nord a est) e negativi verso ovest (ruotando da nord a ovest).

Gli strumenti di misura che effettuano la scansione della luminanza celeste riportano un angolo zenitale Z nullo a sud e negativo verso ovest.

In Fig. 1.10 è riportata una rappresentazione sintetica delle convenzioni che è possibile trovare in letteratura.

Spesso si ha la necessità di confrontare ed elaborare i dati rilevati con gli strumenti per la misura delle distribuzioni di luminanza con i dati di illuminamento ed irraggiamento sulle superfici verticali esposte secondo gli assi cardinali, oppure si ha la necessità imporre dei filtri per la pulizia dei dati di luminanza che tengano conto della distanza punto-sole, al fine di non incorre in grossolani errori bisogna fare molta attenzione ad uniformare le varie convenzioni.

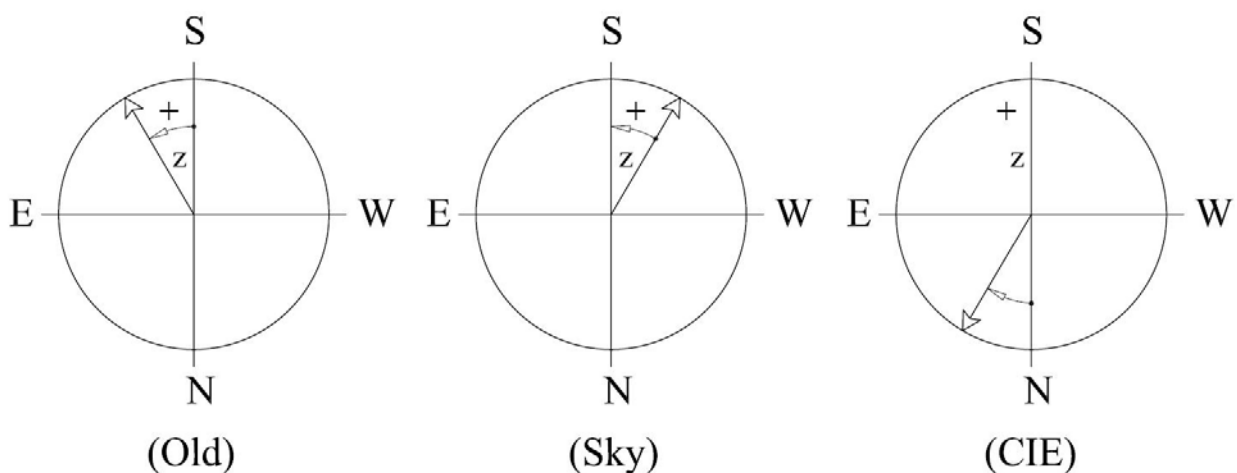


Fig. 1.10 – Convenzioni adottate per la determinazione degli angoli azimutali.

Dove con la simbologia adottata si intende:

- (**Old**) – convenzione tradizionale;
- (**Sky**) – convenzione degli strumenti di misura;
- (**CIE**) – convenzione CIE.

Valgono le seguenti relazioni per il passaggio dall'una all'altra convenzione:

$$\begin{aligned} \alpha_{(Old)} &= -\alpha_{(Sky)} \\ \alpha_{(CIE)} &= 180 + \alpha_{(Sky)} \\ \alpha_{(Old)} &= 180 - \alpha_{(CIE)} \end{aligned} \quad (1.31)$$

1.4.8– INDICI DI SERENITÀ, TORBIDITÀ E BRILLANZA DEL CIELO

A fronte dei 1367 W/m^2 incidenti mediamente a livello extraterrestre ne vengono misurati mediamente in giornate “serene” circa 1000, in giornate “intermedie” e “nuvolose” vengono misurati valori ancora più bassi dipendenti dalla quantità e qualità di nuvole, vapor d'acqua e aerosol presenti in atmosfera.

Al fine di caratterizzare quantitativamente la “serenità” del cielo vengono introdotti degli indici che danno una misura di quanto il cielo è sgombero da fattori che schermano l'irraggiamento solare.

L'indice di serenità, calcolato sul piano orizzontale, viene definito come il rapporto tra la radiazione solare incidente su di una superficie orizzontale (sia essa radiazione solare globale, diretta o diffusa) e la radiazione solare extratmosferica proiettata sul piano orizzontale e quindi:

$$\begin{aligned} k_{eg} &= \frac{E_{eg}}{I_0(t) \sin \alpha} = \frac{E_{eg}}{E_{e0} \sin \alpha} \\ k_{ed} &= \frac{E_{ed}}{I_0(t) \sin \alpha} = \frac{E_{ed}}{E_{e0} \sin \alpha} \\ k_{eb} &= \frac{E_{eb}}{I_0(t) \sin \alpha} = \frac{E_{eb}}{E_{e0} \sin \alpha} \end{aligned} \quad 1.32$$

L'indice di serenità può essere calcolato a livello “istantaneo”, attraverso l'utilizzo di dati “istantanei” misurati nell'arco di 1-4 minuti, a livello medio orario, se le misure si riferiscono a dati medi orari o a livello medio giornaliero, in quest'ultimo caso si utilizza un solo indice

rappresentativo dell'intera giornata e per il suo calcolo si sommano nell'arco della giornata tutta l'energia incidente la superficie rapportandola all'energia, che colpirebbe la stessa superficie, se fosse posizionata all'esterno dell'atmosfera.

Esistono analoghe relazioni per l'eq. 1.32 riferite alla luce naturale, si parla in questo caso di indici di serenità luminosa e vengono definiti dall'eq. 1.33

$$\begin{aligned} k_{vg} &= \frac{E_{vg}}{E_{v0} \sin \alpha} \\ k_{vd} &= \frac{E_{vd}}{E_{v0} \sin \alpha} \\ k_{vb} &= \frac{E_{vb}}{E_{v0} \sin \alpha} \end{aligned} \quad 1.33$$

Entrambi i valori E_e e E_v sono corretti con l'eccentricità dell'orbita terrestre.

I parametri relativi alla radiazione globale delle eqq. 1.32 ed 1.33 sono molto utilizzati in quanto di facile determinazione visto che le stazioni meteorologiche misurano correntemente l'illuminamento e l'irraggiamento al suolo mentre il relativo valore extraterrestre è di facile determinazione con le relazioni della letteratura.

Nei calcoli inerenti la distribuzione di luminanza del cielo vengono utilizzati e correlati ai dati sperimentali l'indice di serenità ε e la brillantezza del cielo Δ definiti dalle eqq. successive:

$$\varepsilon = \frac{\frac{E_{ed} + E_{es}}{E_{ed}} + 1,041 \cdot Z^3}{1 + 1,041 \cdot Z^3} \quad (1.34)$$

$$\Delta = \frac{E_{ed}}{E_{e0} \cos Z} = m \frac{E_{ed}}{E_e} \quad (1.35)$$

Dove Z è l'azimut del sole espresso in radianti.

L'indice di serenità ε consente di distinguere nettamente le condizioni di cielo completamente coperto ($\varepsilon < 1.065$) e di cielo sereno ($\varepsilon > 6.2$) e fornisce altri 5 intervalli ($1.065 < \varepsilon < 6.2$) per la determinazione di cieli intermedi.

Nell'ambito dello studio dei giorni sereni un parametro molto importante ai fini dell'individuazione di correlazioni di calcolo è la torbidità.

La Torbidità esprime il grado di limpidezza del cielo e influisce sia sull'intensità della radiazione diretta, sia su quella diffusa.

L'energia della radiazione diretta incidente viene dispersa per diffusione da parte delle molecole dei gas atmosferici (è la causa del colore blu del cielo), assorbimento di parte dello spettro da parte del vapore acqueo, dell'ozono ed altri gas e per diffusione ed assorbimento dovuto ad aerosol naturali e artificiali.

Con l'aumentare della quota si riduce lo spessore di atmosfera attraversato dai raggi solari e anche la concentrazione di vapor acqueo e aerosol.

Per esprimere matematicamente tutti questi fattori Kasten (1983) ha definito il fattore di torbidità di Linke come:

$$T_L = 1 + \frac{\delta_D}{\delta_D} \quad (1.36)$$

Dove δ_D è lo spessore ottico associato all'estinzione dovuta ad aerosol e all'assorbimento dell'ozono nella stratosfera. δ_R è lo spessore ottico associato alla diffusione molecolare dei gas e all'assorbimento dell'ozono atmosferico.

Kasten ha definito delle equazioni per calcolare questo fattore a partire da misure di radiazione diretta mediante pireliometro e presso l'Università degli Studi della Calabria sono state ottenute nuove correlazioni per il calcolo di T_L descritte più nel dettaglio al paragrafo 3.1.

Esiste anche un fattore di torbidità luminosa, definito idealmente come il numero di atmosfere serene che rappresentano il valore misurato, dato dall'eq. 1.37:

$$T_v = - \frac{\ln \left(\frac{E_{vg} - E_{vd}}{E_{vd}} \right)}{a_v \cdot m} \quad (1.37)$$

Con a_v definito coefficiente di estinzione luminoso e m la massa d'aria relativa di Kasten; a_v calcolato per mezzo dell'eq. 1.38 (Navvab et al. 1984):

$$a_v = \frac{1}{9.9 + 0.043 \cdot m} \quad (1.38)$$

Valori di T_V maggiori di 12 indicano un rapporto dell'argomento del logaritmo abbastanza basso e quindi condizioni di cielo con assenza di sole e sono dati analoghi a quelli corrispondenti ad un indice di serenità $\varepsilon < 1.065$.

1.4.9 - CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO DIFFUSO E DELLA RADIANZA DIFFUSA.

Il dato principale utile alla conoscenza dei valori di illuminamento naturale interno è il valore di illuminamento o irraggiamento naturale esterno diffuso in quanto il relativo valore diretto viene schermato al fine di evitare fenomeni di sovra riscaldamento degli ambienti a causa degli apporti gratuiti solari o per evitare fenomeni di abbagliamento.

L'illuminamento diffuso sperimentale su superficie inclinata si ottiene dalla relazione:

$$E_{vdi} = E_{vg} - E_{vs} \cos \theta \quad (1.39)$$

dove:

- E_{vdi} = illuminamento diffuso della superficie verticale (i =nord, est, sud, ovest);
- E_{vg} = illuminamento globale della superficie verticale;
- E_{vs} = illuminamento diretto normale.
- θ (a volte indicato con i) è l'angolo di incidenza con il quale i raggi solari colpiscono la superficie.

Dalla misura dell'illuminamento diretto e dell'illuminamento globale, si ottengono gli illuminamenti diffusi su ciascuna superficie verticale a nord est, sud e ovest.

Analogamente la radianza diffusa su ogni piano verticale è calcolabile con la relazione:

$$E_{edi} = E_{eg} - E_{es} \cos \theta - 0.5 \cdot E_{eg} \cdot 0.15 \quad (1.40)$$

dove:

- E_{edi} = radianza diffusa della particolare superficie verticale;
- E_{eg} = radianza globale della superficie verticale;
- E_{es} = radianza diretta normale.

I valori dell'illuminamento diffuso sulla superficie verticale calcolati con l'equazione di cui sopra non contengono componenti di riflessione in quanto lo strumento di

misurazione dell'illuminamento verticale lungo le quattro direzioni è dotato di uno scudo cilindrico che intercetta la luce riflessa dal suolo.

Così i valori di E_{vd} misurati indicano solo la somma della componente diretta e diffusa.

Invece la radianza diffusa E_{ed} calcolata con nell'eq. (1.29) è stata epurata della componente riflessa utilizzando un coefficiente di riflessione del terreno di 0,15 adatto per Arcavacata di Rende.

CAPITOLO II

LA STRUMENTAZIONE DI MISURA

Tutti gli strumenti in dotazione alla Stazione di Prova sono installati sulla copertura mentre gli apparati elettronici quali amplificatori, alimentatori e computer per l'acquisizione sono ubicati nel laboratorio sottostante.

L'acquisizione avviene nell'arco di tutte e 24 le ore della giornata e vengono effettuate in corrispondenza dell'ora solare invece che dell'ora locale. Questa scelta facilita i calcoli che contemplano l'uso di altri parametri quali l'altezza solare, la distanza punto-sole ed il confronto con dati di altre località.

Nei paragrafi successivi sono descritti gli strumenti di misura riguardanti specificatamente la misura dell'illuminamento, si ricorda che parallelamente viene effettuata l'analoga misura dell'irraggiamento attraverso cinque piranometri del tipo CM 11 della Kipp & Zonen per la misura dell'irraggiamento globale sul piano orizzontale e sui quattro piani verticali, ed un pireliometro del tipo CH-1 NIP della Kipp & Zonen per la misura della radiazione diretta, montato sull'inseguitore solare. In aggiunta vengono effettuate le misure di temperatura dell'aria esterna, umidità relativa e velocità e direzione del vento.

2.1 – LEGGE DEL COSENO

L'illuminamento è il valore che viene più spesso misurato direttamente e dal quale si ricavano altri parametri come il flusso luminoso.

L'illuminamento come già accennato è l'omologo dell'irraggiamento pesato secondo la curva di visibilità. Irraggiamento ed Illuminamento variano con il coseno dell'angolo d'incidenza secondo la Legge di Lambert:

Se si indica con r è la distanza tra una sorgente puntiforme S e una porzione di superficie $\Delta A'$ orientata. La proiezione di $\Delta A'$ sopra la superficie sferica di centro S e raggio r è:

$$\Delta A = \Delta A' \cdot \cos \alpha \quad 2.1$$

Dove α è l'angolo compreso tra le due normali a $\Delta A'$ e ΔA .

L'angolo solido sotto cui $\Delta A'$ è vista da S risulta quindi:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta A}{r^2} = \frac{\Delta A'}{r^2} \cdot \cos\alpha \quad 2.2$$

Il flusso di radiazione emesso entro l'angolo solido $\Delta\Omega$ è:

$$\Delta\Phi = I \cdot \Delta\Omega = I \cdot \frac{\Delta A'}{r^2} \cdot \cos\alpha \quad 2.3$$

Concludendo, l'irraggiamento $E = \Delta\Phi / \Delta A'$ sopra la superficie sferica A' è:

$$E = I \cdot \frac{\cos\alpha}{r^2} \quad 2.4$$

Nel caso in cui la radiazione colpisce perpendicolarmente la superficie, si avrà $\alpha=0$, quindi la formula diventa:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad 2.5$$

La legge di Lambert mostra che uno stesso flusso energetico emesso da una sorgente luminosa si distribuisce su superfici sempre più grandi al crescere della distanza sorgente-superficie.

Questo significa che se a una distanza unitaria r l'area che intercetta la radiazione è di 1m^2 , a distanza $2r$ la radiazione si distribuirà sopra una superficie quattro volte più grande e di conseguenza riceverà un $1/4$ dell'irraggiamento precedente. In altre parole, perpendicolarmente ci sarà il massimo dell'energia mentre ad un angolo di 60° il coseno sarà uguale a $0,5$, quindi l'energia sarà dimezzata, e a 90° l'energia incidente si annulla.

La distribuzione di energia su una superficie secondo il coseno dell'angolo di incidenza è la base fondamentale nella strumentazione per l'analisi dell'irraggiamento ed illuminamento. Le sonde per la misura di queste due grandezze sono dotate di vere e proprie "lenti" di correzione del coseno, in modo da catturare fotoni nel semispazio secondo la legge di Lambert.

La qualità dello strumento di misura con "lenti" per la correzione del coseno presentano delle variazioni che, solitamente, vengono indicate nelle specifiche.

2.2 - FOTOMETRI PER LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE ESTERNO

Gli strumenti capaci di misurare l'illuminamento di una superficie sono detti fotometri o luxmetri. La parte sensibile dello strumento è costituita da una cellula fotoelettrica, generalmente al silicio, munita di un filtro ottico avente un coefficiente di trasmissione monocromatico $t(\lambda)$ sovrapponibile con la curva di visibilità relativa dell'occhio umano $V(\lambda)$. L'errore rispetto alla curva di visibilità è individuato dal parametro f_1 '% (vedi DIN 5032/6 e pubblicazioni CIE n°53 e n°69). La risposta dello strumento, al variare della direzione della radiazione incidente, deve essere in accordo con la legge del coseno. I Fotometri sono muniti di una copertura emisferica che diffonde all'interno la radiazione incidente con l'effetto di correggere le deviazioni dalla legge del coseno. L'errore rispetto alla legge del coseno è individuato dal parametro f_2 %. Lo strumento è dotato di un amplificatore con risposta in Volts o di un amplificatore con risposta in mA (0-20 mA).

L'intervallo della risposta varia tra 100 mV e 10 V. Il fattore di conversione tra volts e lux è di generalmente pari a circa 50 mV/lux. Per applicazioni outdoors i fotometri sono alloggiati in contenitori a prova d'acqua. Poiché la risposta del filtro ottico varia al variare della temperatura ambiente, i fotometri sono corredati di un controllo termostatico capace di mantenere costante la temperatura del filtro (normalmente a 35 °C), mediante un riscaldatore elettrico.

Affinché le misure siano corrette la copertura di vetro deve essere mantenuta pulita. Per prevenire il deposito di umidità sul sensore, vi è una sostanza igroscopica contenuta nel corpo del fotometro. In tabella 1.1 sono riportati i valori limite degli errori introdotti nelle misure dagli strumenti secondo le raccomandazioni CIE (CIE 108-1994).

Tabella 2.1 – Errori limite per gli strumenti di misura dell'illuminamento per esterno.

	Simbolo	Errore limite %
Curva di Visibilità - $V(\lambda)$	f'	3
Risposta UV	u'	0.2
Risposta IR	r	0.2
Risposta del coseno	f_2	1.5
Fatica a 10 klux	f_5	0.1
Coefficiente di temperatura	a	0.1 %K
linearità	f_3	0.2

2.2.1 - FOTOMETRO GLOBALE SUL PIANO ORIZZONTALE E SUI PIANI VERTICALI

Alcune ditte costruttrici, tra cui la PRC Krochmann GmbH di Berlino, forniscono uno strumento provvisto di 5 fotometri per la misura dell'illuminamento globale sul piano orizzontale e su quattro piani verticali, alloggiati su un supporto cubico.

Lo strumento è provvisto di schermi che intercettano la luce riflessa dal terreno. Ciascun fotometro è provvisto di controllo termostatico e convertitore della fotocorrente in Volts.

La deviazione dalla curva di visibilità $V(\lambda)$ presenta un valore $f_1' < 3\%$; il parametro di correzione per la deviazione dalla legge del coseno $f_2 < 1.5\%$.

Lo strumento è adatto per uso esterno permanente. Il modello della Krochmann è denominato FET-GV; i cinque fotometri sono del tipo FET30-C150UD8.



Fig 2.1 – Strumento per la misura dell'illuminamento sulla sup. orizzontale e sulle 4 sup. verticali esposte a nord, sud, est e ovest.

2.2.2 - FOTOMETRO PER LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO DIRETTO.

Questo strumento deve essere montato su un inseguitore solare; è adatto per uso esterno permanente; è dotato di controllo termostatico e di convertitore della fotocorrente in Volts.

La risposta del sensore si sovrappone alla curva di visibilità $V(\lambda)$ con $f_1' < 3\%$. Il semiangolo del campo visivo dello strumento è pari a 2.8° .

2.2.3 - INSEGUITORE SOLARE

Gli inseguitori solari sono delle apparecchiature capaci di allineare i pireliometri e/o i fotometri per la misura della luce diretta con i raggi solari.

L'inseguitore è provvisto di un micro computer in grado di determinare ad ogni istante l'angolo azimutale e l'angolo zenitale del sole, e di un motore elettrico capace di far ruotare i supporti degli strumenti attorno a due assi, in modo da puntarli verso il sole.

In condizioni climatiche non particolarmente severe (come le regioni polari), è possibile usare un inseguitore a due assi con trasmissione a cinghia.

Nel caso di climi molto severi o di necessità di misure più accurate, viene usato un inseguitore con trasmissione ad ingranaggi.

Il motore elettrico è generalmente alimentato da corrente alternata con 115/230 Volts e frequenza 60/50 Hz con potenza standard da 50 VA.

La Kipp & Zonen fornisce i due tipi di inseguitore, denominati rispettivamente 2AP BD (Belte Drive) e 2AP GD (Gear Drive).

L'accuratezza del posizionamento angolare del tipo 2AP BD è $< 0.1^\circ$, mentre l'accuratezza del tipo 2AP GD è $< 0.05^\circ$; la risoluzione del primo strumento è di 0.036° quella del secondo strumento di 0.0025° .

Per il suo posizionamento iniziale, è indispensabile fornire al software di controllo la latitudine e la longitudine esatta del luogo di installazione dell'inseguitore.

Una volta inserita l'ora esatta, l'inseguitore funziona in modalità stand-alone ed insegue il sole calcolando la sua traiettoria mediante il calcolo dell'angolo azimutale e dell'angolo zenitale con algoritmi memorizzati nella sua scheda madre.



Fig 2.2 – Inseguitore Solare per la misura dell'Illuminamento e dell'Irraggiamento diretti.

2.2.4 - FOTOMETRO PER LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO DIFFUSO ORIZZONTALE

Si tratta di un fotometro posto sul piano orizzontale, provvisto di un anello di guardia capace di intercettare la luce solare diretta. In tal modo il sensore viene illuminato dalla sola luce diffusa.

L'anello deve essere periodicamente posizionato in modo da schermare continuamente il sensore dalla luce diretta, al variare della posizione del sole.

Lo strumento della Krochmann è denominato modello FET-S.

L'anello di guardia di cui è provvisto è del tipo CM 121B. Lo strumento è provvisto di controllo termostatico, amplificatore con output in volts, o, a richiesta, amplificatore con output in corrente da 0-20 mA.

L'output in volts può variare tra 200 mV e 10 V, il fattore di conversione è generalmente 58,8 mV/lux.

Il fotometro richiede un alimentatore in corrente continua da ± 15 V, 0.3 mA DC.



Fig 2.3 – Strumenti per la misura dell'illuminamento e dell'irraggiamento diffusi.

Naturalmente, l'anello di guardia intercetta anche una parte della radiazione diffusa del cielo, pertanto si deve effettuare una correzione delle misure, moltiplicando i dati sperimentali per un coefficiente di correzione. Il fattore di correzione C risulta pari a:

$$C = 1 / (1 - S) \quad (2.6)$$

dove S , pari alla frazione della radiazione diffusa dal cielo intercettata dall'anello di guardia, nell'ipotesi di luminanza uniforme del cielo, è calcolabile con l'espressione:

$$S = 2V \cos \delta (U_0 \sin L \sin \delta + \sin U_0 \cos L \cos \delta) / p \quad (2.7)$$

Nell'eq. (2.2) V è l'angolo sotto il quale il centro dell'anello vede la larghezza dell'anello stesso; esso è pari a 0.185 rad per lo strumento della PRC Krochmann. δ è la declinazione del sole, L la latitudine della località, ed U_0 è calcolabile con la formula:

$$\cos U_0 = -\tan L \tan \delta \quad (2.8)$$

Alla latitudine di 40° il fattore correttivo varia tra 1.04 nella prima metà del mese di Gennaio ed 1.14 nel mese di Giugno e Luglio

2.2.5 - FOTOMETRO PER LA MISURA DELLA LUMINANZA ZENITALE

Lo strumento è provvisto di controllo termostatico e convertitore della fotocorrente in Volts. La deviazione dalla curva di visibilità $V(\lambda)$ presenta un valore $f_1' < 3\%$.

Lo strumento è adatto per uso esterno permanente. Il semiangolo del campo visivo dello strumento è di 5.5 °, pari alla metà dell'angolo piano con cui sono viste dalla terra le 145 aree di cielo circolari del modello Tregenza.

Lo strumento della Krochmann è denominato modello FET 30 L11 0U Dx.



Fig 2.4 – Strumento per la misura della Luminanza Zenitale.

2.2.6 – SKY SCANNER PER LA MISURA DELLA LUMINANZA E DELL'IRRADIANZA DIFFUSA DEL CIELO SECONDO LA DISTRIBUZIONE DI TREGENZA.

Lo strumento è un modello MS-321LR della EKO Instruments (Giappone), conforme alle indicazioni CIE 108-1994, acquisisce i dati sperimentali di luminanza e radianza di 145 punti della volta celeste, con un angolo di apertura dei sensori di 11°; la durata della scansione è di circa 4 minuti e la frequenza di acquisizione dei dati è di 10 minuti. La metodologia di misura adottata dallo strumento è quella proposta da Tregenza e successivamente raccomandata dal CIE

e l'angolo di apertura adottato fa sì che ciascuna area di cielo possa essere trattata come una sorgente puntiforme con errori trascurabili. In Fig. 2.5 è riportata una vista in situ dello strumento. In tabella 2.1 è riportata la suddivisione della volta celeste nei 145 punti di Tregenza; nella Fig. 2.6 è riportato l'ordine di scansione dal 1° al 145° punto: dalla posizione di riposo a sud lo sky scanner effettua una prima elevazione di $\alpha=6$ gradi e con rotazioni di $\Delta\phi=12^\circ$ inizia la scansione muovendosi verso ovest fino al raggiungimento del punto n°30, e così via...; in fig. 2.7 è riportata la schermata principale del software di acquisizione dello skyscanner da quale si può verificare la misura istantanea nei punti di Tregenza dei valori di luminanza ed irradianza della volta celeste.



Fig. 2.5 - Sky scanner con sensori per la misura della luminanza e della radianza della volta celeste.

Tabella 2.2 – Punti di Tregenza della volta celeste.

α (gradi)	$\Delta\phi$ (gradi)	n. punti	$\Delta\omega$ (sr)
6	12	30	0.0435
18	12	30	0.0416
30	15	24	0.0474
42	15	24	0.0407
54	20	18	0.0429
66	20	12	0.0445
78	60	6	0.0455
90		1	0.0344

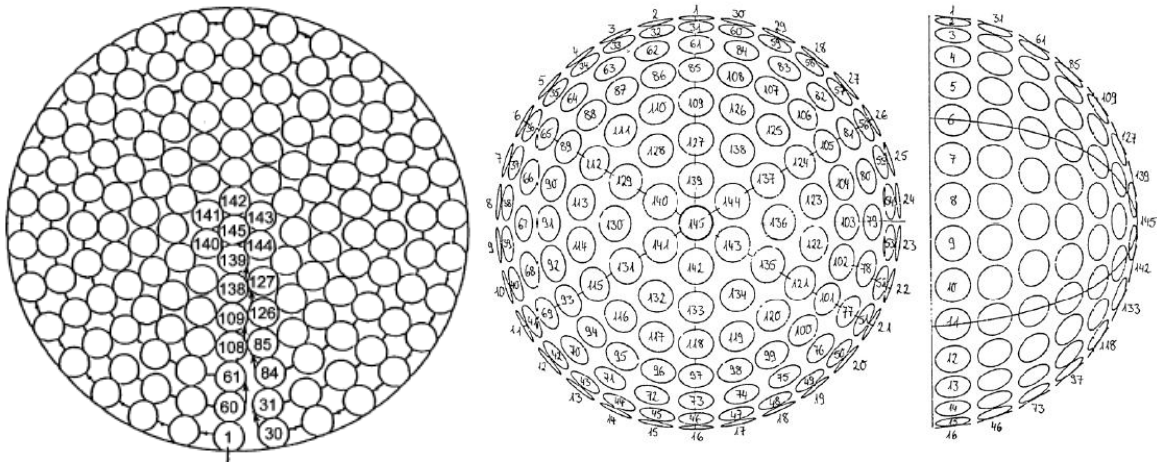


Fig. 2.6 – Ordine di scansione dello Sky scanner a partire dalla direzione sud.

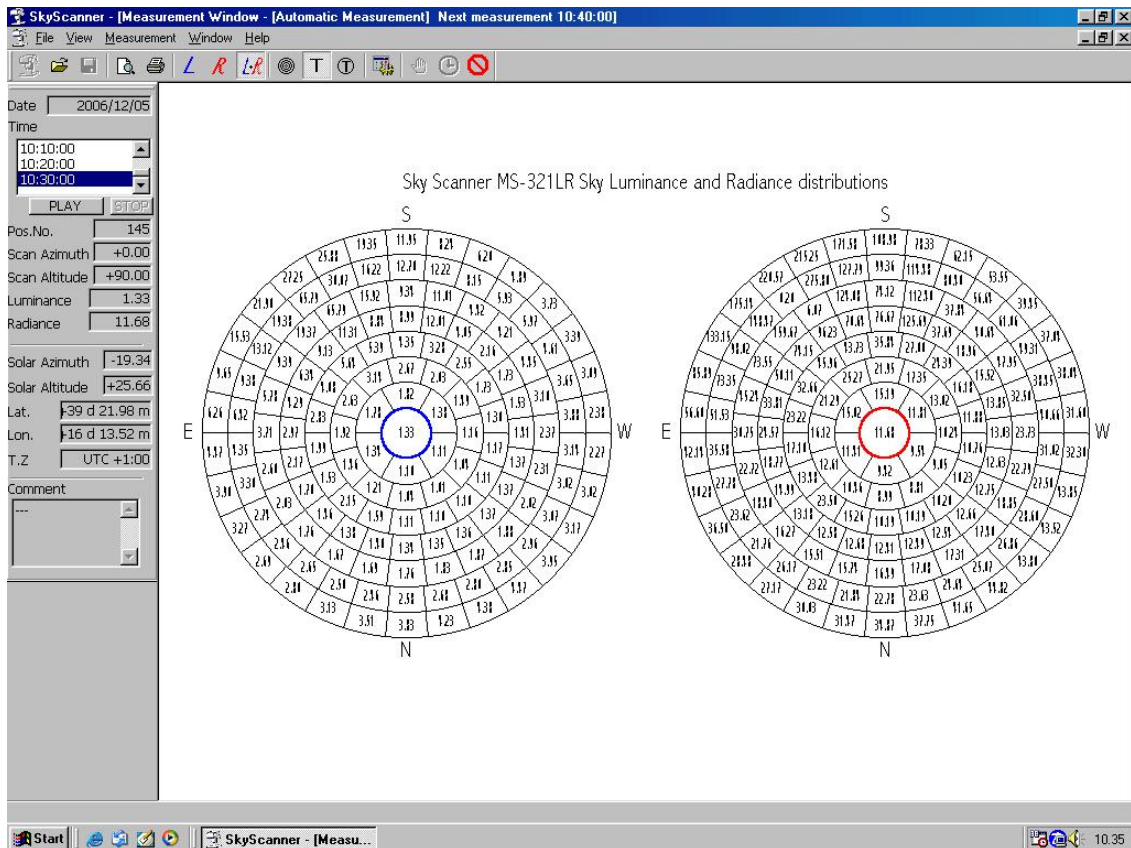


Fig. 2.7 – Schermata software di acquisizione sky scanner.

Per salvaguardare il sensore dello sky scanner, quando viene colpito dalla luce diretta, non viene effettuata la misura delle luminanze superiori a 35 kcdm^{-2} ; in realtà la misura che si vuole effettuare con tale strumento è la distribuzione di luminanza diffusa e molti punti della volta celeste si trovano interessati, nell'arco della giornata, dal passaggio del sole; al IV capitolo sarà descritta la metodologia adottata per la pulizia dei dati affetti dalla presenza del sole nelle immediate vicinanze del punto di misura.

Ciascuna scansione ha una durata di circa 4 minuti e la scansione completa di tutta la volta celeste viene registrata ogni 10 minuti: vale a dire che lo sky scanner inizia la scansione all'inizio dell'intervallo di 10 minuti (10:10, 10:20, 10:30, ecc.) termina e viene registrata dopo circa 4 minuti e ricomincia una nuova scansione all'inizio del successivo intervallo.

Ci sono molti dati che influenzano l'accuratezza delle misure di luminanza del cielo.

Innanzitutto la suddivisione del cielo in 145 aree circolari fa sì che non vengano considerate aree doppie ma esclude alcune porzioni di cielo, infatti la suddivisione di Tregenza individua delle areole quadrangolari mentre la misura viene effettuata in modo discreto per un'areola circolare contenuta in quella quadrangolare: in definitiva viene esclusa una porzione di cielo pari a circa il 32%.

In più la misura è del tipo discreto ciò vale a dire che la misura puntuale è rappresentativa di tutta la regione di cielo di afferenza e non avviene attraverso funzioni analitiche continue.

Le reali distribuzioni di luminanza (dove per reali si intende risultanti dalle misure effettuate) sono influenzate da diversi fattori come ad esempio la posizione del sole nella volta celeste (continuamente variabile), torbidità ed inquinamento atmosferico, la distribuzione delle nuvole, ecc.

In aggiunta a questi fattori "atmosferici" rimane l'incertezza su come trattare i dati cosiddetti "out o range" e cioè di quei punti posizionati vicini al passaggio del sole.

2.3 - STRUMENTAZIONE E SISTEMA PER L'ACQUISIZIONE DEI DATI DELLA RADIAZIONE SOLARE E DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE

2.3.1 - GENERALITÀ

Il sistema di acquisizione dati più semplice prevede l'utilizzo dei Data Loggers.

Un Data Logger è un sistema di acquisizione indipendente ed è in grado di acquisire un certo numero di ingressi, registrare i valori ed eventualmente elaborarli.

Il pregio dei Data Loggers è quello di un sistema autonomo e dedicato al tipo di utilizzo. I difetti di tali sistemi sono la poca flessibilità, nel caso in cui nasca l'esigenza di aggiungere altri punti di misura non previsti inizialmente, e la dipendenza da software dedicati memorizzati sulla EPROM.

Con la nuova generazione di hardware e software è possibile utilizzare gli "strumenti virtuali" per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati sperimentali. Per "strumento virtuale" si intende l'interfaccia grafica sul monitor del computer, una scheda di acquisizione (DAQ), che permette di gestire e configurare uno strumento e lo strumento stesso. I pregi di questi sistemi sono la flessibilità essendo possibile, molto facilmente, di espandere il sistema e l'indipendenza dell'utente da software dedicati che richiedono alti costi di aggiornamento.

La catena di apparecchiature per la creazione degli strumenti virtuali per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali provenienti dai sensori della luce può essere quella di fig. 2.9:

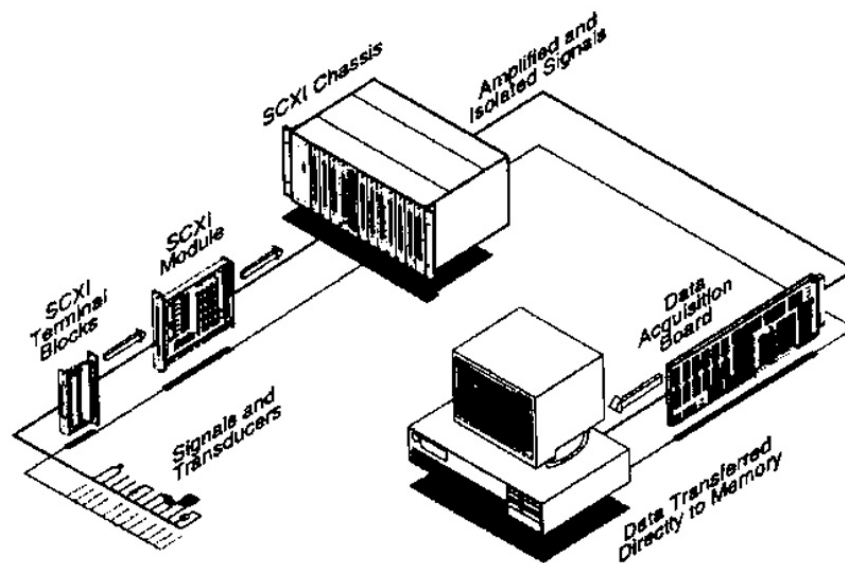


Fig. 2.9– Catena di apparecchiature per il sistema di acquisizione dati.

2.3.2 – MODULI DI CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE

Lo scopo principale dei Moduli di Condizionamento del Segnale è quello di filtrare il segnale proveniente dal sensore da frequenze che possono generare errori di misura, amplificarlo, linearizzarlo, isolarlo e prepararlo per essere inviato alla scheda di acquisizione dati.

I moduli di condizionamento sono contenuti in un chassis del tipo SCXI-1001 a 12 slot della National Instruments. Lo chassis è collegato con la scheda acquisizione dati del tipo PCI posta nel computer.

I moduli usati sono del tipo SCXI-1100 con terminal block SCXI-1300, a 32 canali multiplexati per l'acquisizione di segnali analogici in volt o in ampere.

Il modulo permette di impostare un filtraggio al segnale di 4 Hz o di 10 kHz a seconda se il segnale varia lentamente oppure velocemente, eliminando così il rumore indesiderato.

Un parametro importante nelle impostazioni del modulo è il guadagno che può essere posto pari a 1 oppure a 1000.

Il modulo effettua l'amplificazione del segnale del sensore per poter essere paragonabile a quello elaborato dalla scheda che varia da 0 a 10 volt.

All'interno dei moduli SCXI 1100 sono posizionati una serie di jumpers per la configurazione del modulo. In Appendice A3 è riportata l'attuale configurazione del sistema di acquisizione.

In Figura 2.10 sono riportati moduli utilizzati.

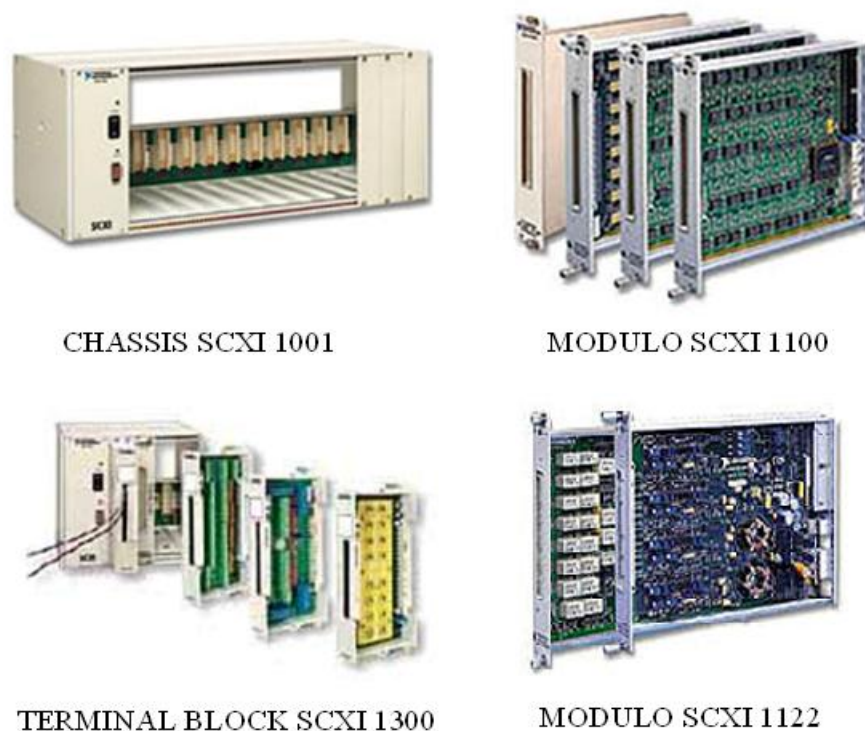


Fig. 2.10– Moduli di condizionamento del segnale.

Per la misura di segnali provenienti da termoresistenze si utilizzano moduli del tipo SCXI-1122 con terminal block SCXI-1300, a 16 canali multiplexer.

2.3.2 – SCHEDA DI ACQUISIZIONE DATI (DAQ)

La scheda di acquisizione dati è una scheda multifunzione provvista di un convertitore analogico/digitale (ADC) con ingressi ed uscite sincronizzate per bus PCI. Lo scopo della scheda di acquisizione dati è quello di convertire il segnale analogico proveniente dai moduli in segnale digitale. Il parametro fondamentale di un ADC è il numero di bit. Il numero di bits determina il range di valori per la conversione binaria in output dal convertitore.

Più alto è il numero di bit, più alto sarà il numero di suddivisioni del range e più piccola sarà la variazione di voltaggio letta del convertitore. Per esempio, le schede a 12 bit, effettuano una suddivisione del campo di misura in $2^{12}= 4096$ parti, mentre quelle a 16 bit effettuano $2^{16}=65536$ suddivisioni..

Un parametro importante nelle impostazioni della scheda è il guadagno che può essere settato per valori che vanno da 1 a 2000. Il guadagno produce l'amplificazione dei bassi segnali provenienti dai sensori per migliorare l'accuratezza di lettura.

Per esempio supponiamo di dover misurare un segnale di basso livello, +30mV, con una scheda da 12 bit con voltaggio di input 0-10V, con guadagno 100, la risoluzione di misura sarà pari a:

$$\frac{\text{Voltaggio in input all'ADC}}{\text{guadagno} \cdot 2^n} = \frac{10}{100 \cdot 2^n} = 0.0244 \text{ mV} \quad 2.9$$

le impostazioni della scheda NI-DAQ del tipo PCI 1200 sono riportate in Appendice A3.

E' sufficiente un PC con slot PCI libero, per l'inserimento della scheda di acquisizione dati, oppure dotato di porta ethernet per il collegamento del modulo FP 1601, nel caso in cui si adottasse la soluzione dei Field Points per l'acquisizione dei dati.

2.3.2 – SOFTWARE

Il pacchetto software utilizzato per l'acquisizione, l'analisi e la presentazione dei dati è il LabVIEW™ della National Instruments Corporation.

Il LabVIEW™ è stato progettato per misurare, controllare, monitorare processi ed applicazioni. Esso consente di operare in un ambiente di programmazione grafica. Il software dispone di un compilatore grafico in grado di convertire il codice sorgente, costituito da diagrammi a blocchi, direttamente in codice macchina.

Utilizzando il LabVIEW™ si possono strutturare i programmi in forma modulare sviluppando una gerarchia di sottoprogrammi chiamati VIs (strumenti virtuali).

La definizione dei sottoprogrammi (VIs), consente al programmatore di gestire una intera sezione di codice, mediante la semplice gestione di una icona precedentemente definita, la quale definirà le connessioni di ingresso e di uscita (diagramma di flusso) alle restanti sezioni che costituiscono il diagramma completo.

Il LabVIEW™ utilizza il modello di programmazione DATAFLOW, cioè le icone (sottoprogrammi "VIs") che compongono il diagramma a blocchi, non vanno in esecuzione fino quando su di esse non arriva il flusso di dati necessario per l'esecuzione. La programmazione di tipo DATAFLOW, rispetto ai linguaggi che utilizzano una programmazione di tipo convenzionale, non ha vincoli per quanto riguarda l'ordine di creazione dei sottoprogrammi.

L'ordine di esecuzione dei VIs in LabVIEW™ è stabilita dal flusso di dati tra i nodi e non dalle linee sequenziali di testo. Inoltre si possono creare diagrammi che hanno flussi di dati multipli ed eseguire più operazioni contemporaneamente.

Nella libreria del LabVIEW™ sono presenti una serie di procedure (VI) con le seguenti funzioni:

- acquisizione, analisi ed elaborazione dei dati;
- gestione dei file.

Un VI di LabVIEW consiste in un pannello frontale (front panel) e di un diagramma a blocchi (block diagram), dove quest'ultimo è composto da icone opportunamente connesse tramite il diagramma di flusso.

Il LabVIEW ha la capacità di poter lavorare in multitasking. Si possono mandare contemporaneamente in esecuzione più Vis indipendenti. In particolare modo può eseguire altre applicazioni senza interrompere il controllo dei dati.

Il pannello frontale costituisce l'interfaccia per l'utente mentre il diagramma a blocchi interfaccia il codice attraverso le icone.

Nel pannello frontale vengono inserite le informazioni che necessitano al VI e vengono visualizzate le informazione di uscita dal diagramma a blocchi.

Il pannello frontale emula perfettamente il pannello fisico degli strumenti, da qui il nome di VI. Esso può contenere tutta la strumentazione virtuale inerente al controllo ed all'indicazione delle grandezze fisiche in esame.

Infatti si possono inserire interruttori di diverse forme (variabili logiche), indicatori digitali, indicatori analogici, grafici, ecc. proprio come in uno strumento reale. Inoltre selezionando questi simboli si attiva la funzione corrispondente nel diagramma a blocchi senza scrivere alcuna istruzione.

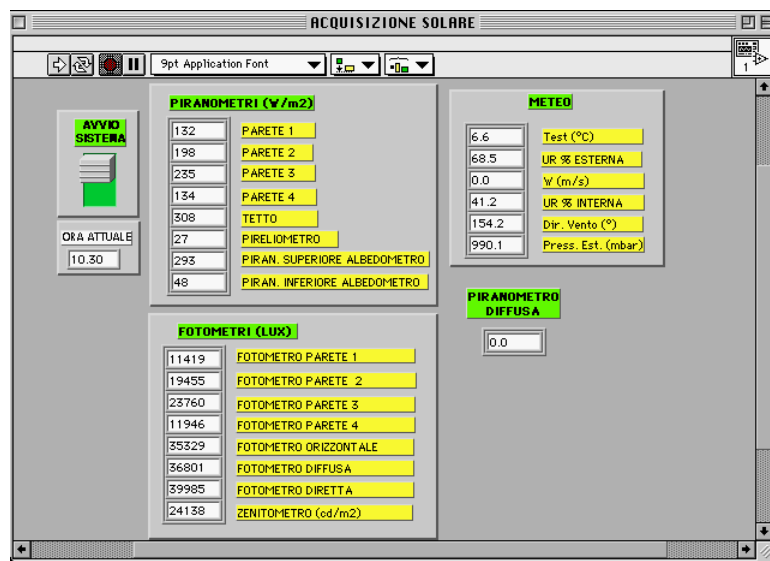


Fig 2.11.- Front Panel del sistema acquisizione dati

Il diagramma a blocchi viene creato collegando i vari blocchi funzionali presenti nella libreria del LabVIEW, con i terminali degli oggetti definiti nel pannello frontale, oppure nel caso di acquisizione e controllo di dati, con i terminali che interfacciano l'hardware esterno. Il collegamento avviene per mezzo di fili (wires) virtuali.

La manipolazione degli oggetti presenti sia nel pannello frontale che nel diagramma a blocchi, avviene utilizzando gli attrezzi di posizionamento presenti sulla tavolozza del pannello frontale o del diagramma a blocchi. Una volta selezionato un oggetto sul diagramma a blocchi o sul pannello frontale, lo si può cancellare, tagliare, copiare o muovere. Nel diagramma a blocchi, non si possono cancellare terminali creati dal pannello frontale. Per rimuovere il terminale bisogna cancellare il controllore dal pannello frontale.

I blocchi funzionali presenti nella libreria del Lab VIEW sono accessibili dalla finestra delle funzioni del menù del block diagram.

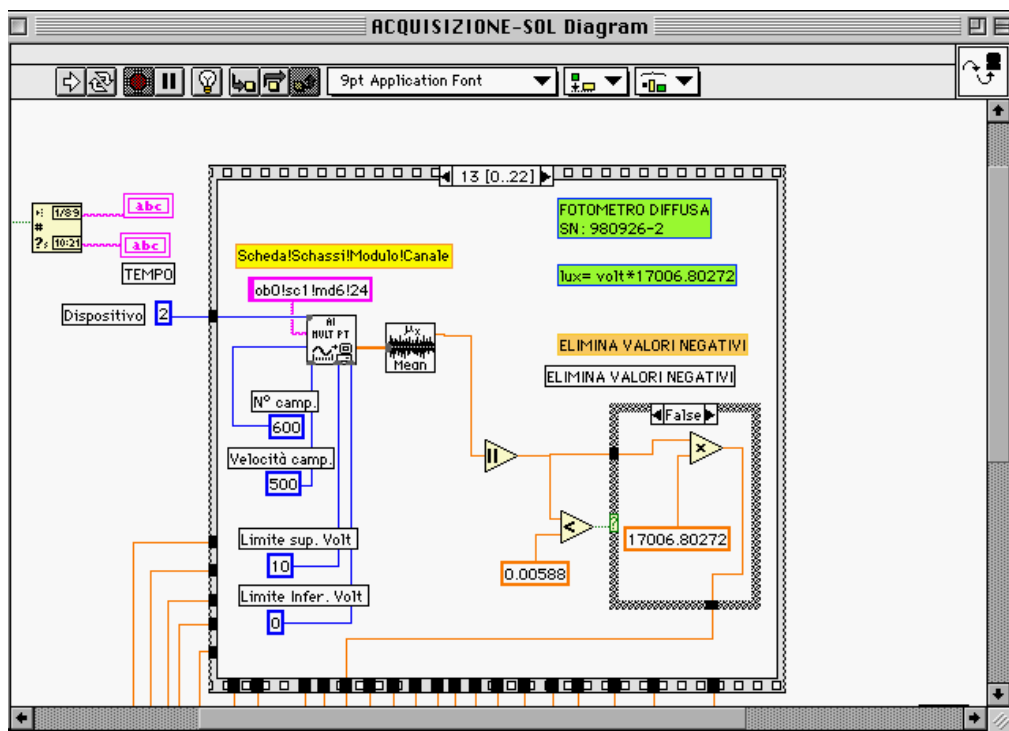


Fig 2.12 - Diagramma a blocchi di un fotometro.

Il LabVIEW offre la possibilità di poter vedere esattamente quello che accade durante l'esecuzione di un VI. Dal diagramma a blocchi è possibile abilitare un comando contrassegnato da una lampadina (virtuale); abilitando la lampadina, si abilita il comando che permette di osservare il flusso di dati. Quando parte l'esecuzione del VI, piccole palline scorrono lungo i fili di collegamento che rappresentano il flusso di dati. Quando le informazioni arrivano alle icone (subVIs) del diagramma, il nodo mostra il dato effettivamente arrivato all'interno di un riquadro.

Questo modo di operare è molto utile, in quanto si possono analizzare i singoli VI punto per punto ed è possibile vedere esattamente cosa succede all'interno dei subVI ed eventualmente trovare errori con molta facilità.

Sul diagramma a blocchi si individuano i seguenti oggetti.

- *Dispositivo*: questo è un numero intero e sta ad indicare lo slot di alloggiamento del dispositivo (scheda acquisizione);
- *Canale*: è una stringa, ed indica l'indirizzo del canale su cui si vuole acquisire; ad esempio la stringa **ob0!scl!md6!24** indica l'indirizzo del canale 24 del modulo alloggiato nello slot numero 6 dello chassis numero 1, connesso al canale 0 della scheda acquisizione.

- *Numero di campionamenti*: è un numero intero ed indica quanti campionamenti si devono effettuare.
- *Velocità di campionamento*: indica la velocità con cui si devono effettuare i campionamenti;
- *Limite superiore ed inferiore*: rappresentano rispettivamente la massima e minima tensione del segnale analogico in ingresso; il LabVIEW usa questi valori per calcolare il guadagno.
- *Mean*: calcola la media dei campionamenti effettuati.

Inoltre sul diagramma a blocchi sono riportati una serie di operatori matematici e booleani.

Le acquisizioni avvengono in modo sequenziale; cioè il VI inizia l'acquisizione dal primo canale del primo modulo e termina l'acquisizione sull'ultimo canale dell'ultimo modulo. Si utilizza questa metodologia perché i moduli operano in maniera multiplex.

Le acquisizioni vengono fatte da 1 a 4 minuti; per far ciò all'interno del VI è presente un contatore di tempo che detta i tempi di acquisizione ed i dati acquisiti vengono conservati in un array temporaneo. All'uscita del subVI di acquisizione i dati contenuti nell'array vengono convertiti in formato stringa. Successivamente, viene inserita un'altra stringa contenente l'orario di acquisizione.

Il VI crea automaticamente un file ogni giorno, etichettato con la data del giorno corrispondente. I dati vengono scaricati su un file di tipo testo; nella prima colonna è riportato l'orario di acquisizione e nelle colonne successive i dati di ogni sensore.

2.4 – CIE DATA QUALITY CONTROL.

Attraverso il “Data Quality Control” si limita l’utilizzo di dati spuri affetti da errori nella misura, effetto del coseno dei sensori, malfunzionamenti accidentali.

Al fine di non effettuare tagli indiscriminati ai dati il CIE ha proposto uno standard per le misure riguardanti la luce naturale.

Nel presente paragrafo sono riportate sommariamente le indicazioni de “Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement” – TECHNICAL REPORT; I test suggeriti sono da applicarsi a dati con frequenza di acquisizione di 1 minuto. I Test possono essere suddivisi in cinque categorie:

1. **La prima categoria** di test riguarda le sei grandezze di base di una “Research Class Station” e quattro per un “General Class Station”. Le sei quantità sono: l’Illuminamento e l’Irraggiamento globali (E_{eg} e E_{vg}), l’Illuminamento e l’Irraggiamento diffusi (E_{ed} e E_{vd}) opportunamente corretti dall’effetto dell’anello di guardia, l’Illuminamento e l’Irraggiamento diretti (E_{es} e E_{vs}). Sono dei check che garantiscono errori di misura grossolani che possono verificarsi:

$$\text{Test 1.1:} \quad 0 < E_{eg} < 1,2 E_{e0}$$

$$\text{Test 1.2:} \quad 0 < E_{vg} < 1,2 E_{v0}$$

$$\text{Test 1.3:} \quad 0 < E_{ed} < 0,8 E_{e0}$$

$$\text{Test 1.4:} \quad 0 < E_{vd} < 0,8 E_{v0}$$

$$\text{Test 1.5:} \quad 0 < E_{es} < E_{e0}$$

$$\text{Test 1.6:} \quad 0 < E_{vs} < E_{v0}$$

Con E_{e0} e E_{v0} rispettivamente l’Irraggiamento e l’Illuminamento extraterrestri definite al paragrafo 1.4.1 ed indicati con I_{cs} e LSC.

2. **La seconda categoria** include due test che verificano la ridondanza tra i valori di componente globale, diretta e diffusa basata sulla conoscenza dell’angolo zenitale Z . Il range di accettabilità dei dati è di seguito definito:

$$\text{Test 2.1:} \quad E_{eg} = (E_{vs} \cos Z + E_{ed}) \pm 15\%$$

$$\text{Test 2.2:} \quad E_{vg} = (E_{vs} \cos Z + E_{vd}) \pm 15\%$$

Inoltre bisogna verificare che:

$$\text{Test 2.3:} \quad E_{ed} < E_{eg} + 10\%$$

$$\text{Test 2.4:} \quad E_{vd} < E_{vg} + 10\%$$

3. **La terza categoria** rende possibile il controllo sui valori di illuminamento ed irraggiamento delle superfici verticali (E_{egi} e E_{vgi} , dove i sta per nord, est, sud e ovest) attraverso una metodologia di ricostruzione di seguito descritta. Dato θ l’angolo di incidenza sulla superficie, i possibili test per ciascuna superficie verticale sono:

$$\text{Test 3.1: } E_{egi} = f(E_{eg}, E_{es}, \cos Z, \cos \theta) \pm 100 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Test 3.2: } E_{egi} = f(E_{eg}, E_{ed}, \cos Z, \cos \theta) \pm 150 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Test 3.3: } E_{egi} = f(E_{es}, E_{ed}, \cos Z, \cos \theta) \pm 150 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Test 3.4: } E_{evi} = f(E_{vg}, E_{vs}, \cos Z, \cos \theta) \pm 12 \text{ Klux}$$

$$\text{Test 3.5: } E_{evi} = f(E_{vg}, E_{vd}, \cos Z, \cos \theta) \pm 18 \text{ Klux}$$

$$\text{Test 3.6: } E_{evi} = f(E_{vs}, E_{vd}, \cos Z, \cos \theta) \pm 18 \text{ Klux}$$

La funzione f è un modello che predice i valori di illuminamento ed irraggiamento su una superficie inclinata dall'illuminamento ed irraggiamento globale e diretto (o diffuso). In particolare si ha:

$$E_{egi} = E_{ed} \left\{ \frac{(1 - F1)}{2} + F1 \frac{r}{\cos Z} + F2 \right\} + rE_{es}$$

$$E_{vgi} = E_{vd} \left\{ \frac{(1 - F1)}{2} + F1 \frac{r}{\cos Z} + F2 \right\} + rE_{vs}$$

Dove r è il numero più grande tra $\cos Z$ e 0 e $F1$ e $F2$ sono dei coefficienti riportati in tabella 2.2.

In funzione dei dati disponibili è possibile ricavare la componente diffusa per differenza dalla conoscenza della componente globale e diretta così come la componente diretta può essere ricavata per differenza tra la componente globale e diretta.

Per maggiori dettagli si rimanda alla pubblicazione CIE. Si precisa che questa metodologia è applicata per la verifica di consistenza dei dati misurati, mentre, per la ricostruzione degli illuminamenti ed irraggiamenti verticali si rimanda al paragrafo 1.4.4.

Tabella 2.2 – Coefficienti di calcolo di E_{egi} e E_{vgi} per la verifica di consistenza.

ε	F11	F12	F13	F21	F22	F23
1.000-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065-1.230	0.130	0.683	-0.150	-0.019	0.066	-0.029
1.230-1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500-1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
1.950-2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800-4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.500-6.200	1.060	1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
6.200- ∞	0.678	-1.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

$$F1 = F11 + \Delta \cdot F12 + Z \cdot F13^{(*)}$$

$$F2 = F21 + \Delta \cdot F22 + Z \cdot F23^{(*)}$$

(*) – Z è espresso in radianti, ε e Δ sono l'indice di serenità e la brillantezza del cielo già definiti.

1. **La quarta categoria** di test riguarda le comparazioni tra le componenti di illuminamento ed irraggiamento:

$$\text{Test 4.1: } \frac{E_{vg}}{E_{eg}} = a_1 \pm b_1$$

$$\text{Test 4.2: } \frac{E_{vd}}{E_{ed}} = a_2 \pm b_2$$

$$\text{Test 4.3: } \frac{E_{vs}}{E_{es}} = a_3 \pm b_3$$

$$\text{Test 4.4: } \frac{E_{vgi}}{E_{egi}} = a_4 \pm b_4$$

Con le seguenti limitazioni:

Se $Z \leq 60^\circ$ e $E_{es} \leq 100 \text{ W/m}^2$:

$$\begin{cases} a_1 = 120 \text{ lm/W} & b_1 = 30 \text{ lm/W} & c_1 = 60 \text{ lm/W} \\ a_2 = 140 \text{ lm/W} & b_2 = 40 \text{ lm/W} & c_2 = 60 \text{ lm/W} \\ a_3 = 105 \text{ lm/W} & b_3 = 30 \text{ lm/W} & c_3 = 50 \text{ lm/W} \end{cases}$$

Oppure se Se $Z > 60^\circ$ e $E_{es} \leq 100 \text{ W/m}^2$:

$$a_3 = -543 \cdot Z^3 + 1639 \cdot Z^2 - 1652 \cdot Z + 661 \text{ lm/W}$$

$$a_4 = a_1, b_4 = b_1, c_4 = c_1$$

Oppure se $\theta > 60^\circ$ e $E_{es} > 100 \text{ W/m}^2$:

$$a_4 = a_3, b_4 = b_1, c_4 = c_2$$

Oppure se $60^\circ < \theta < 85^\circ$ e $E_{es} > 100 \text{ W/m}^2$:

$$a_4 = a_1, b_4 = b_1, c_4 = c_1$$

Oppure se $\theta > 85^\circ$ e $E_{es} > 100 \text{ W/m}^2$:

$$a_4 = a_2, b_4 = b_2, c_4 = c_2$$

2. **La quinta categoria** di test riguarda la luminanza zenitale e riguarda due confronti con l'illuminamento ed irraggiamento diffuso.

Test 5.1: Se $E_{es} < 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $15^\circ < Z < 25^\circ$

$$15 \text{ cd/W} < \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 60 \text{ cd/W}$$

Oppure Se $E_{es} > 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $Z < 25^\circ$

$$40 \text{ cd/W} < \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 100 \text{ cd/W}$$

Test 5.2: Se $E_{es} < 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $15^\circ < Z < 25^\circ$

$$0,1\pi < \pi \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 0,5\pi$$

Oppure Se $E_{es} > 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $Z < 25^\circ$

$$0,35\pi < \pi \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 0,9\pi$$

In particolare utilizzando i criteri anzi descritti e tenendo conto della morfologia del terreno e di possibili disturbi di ostacoli presenti, sono stati eliminati i dati con:

- Altezza solare $\alpha < 5^\circ$ oppure $\sin \alpha < 0.087156$;
- Irraggiamento globale al suolo inferiore di 20 W/m^2 ;
- Illuminamenti diffusi inferiori a 250 lux ;

- Irraggiamento globale al suolo superiore al corrispondente valore extratmosferico;
- Illuminamento diffuso calcolato (Globale –Diretto* $\sin\alpha$) maggiore del corrispondente dato di illuminamento globale;
- Radiazione diretta normale misurata superiore al corrispondente valore extratmosferico;
- Illuminamento diretto su superficie verticale maggiore del corrispondente illuminamento globale sulla superficie;
- Distribuzione di luminanza tale da fornire un valore dell'illuminamento diffuso calcolato per integrazione maggiore del 30% rispetto al corrispondente valore misurato con la strumentazione.

2.5 – DEFINIZIONE DEGLI ERRORI TRA I DATI CALCOLATI E MISURATI.

Nel corso del presente lavoro verrà condotta di frequente l'analisi degli errori al fine di verificare le differenze tra i dati misurati sperimentalmente ed i dati calcolati con le correlazioni. Si definiscono come errori medi ed errori quadratici medi i parametri secondo le eqq. 2.10 e 2.11:

$$MD_i = V_{calc,i} - V_{sper,i} \quad 2.11$$

$$RMSD = \sum_i MD_i = \sum_i V_{calc,i} - V_{sper,i} \quad 2.12$$

Mentre, si definiscono errori medi percentuali ed errori percentuali quadratici medi i parametri secondo le eqq. 2.13 e 2.14:

$$\bar{\varepsilon} = \sum_i \varepsilon_i = \sum_i \frac{V_{calc,i} - V_{sper,i}}{V_{sper,i}} \cdot 100 \quad 2.13$$

$$RMS\% = \sqrt{\frac{\sum_i \varepsilon_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_i \frac{V_{calc,i} - V_{sper,i}}{V_{sper,i}}^2}{N}} \quad 2.14$$

In generale saranno utilizzate le definizioni delle eqq. 2.13 e 2.14 che forniscono una stima “percentuale” del discostamento dei dati calcolati rispetto a quelli reali; l’utilizzo delle eqq. 2.11 e 2.12 sarà limitato a quei casi in cui si desidera fornire una misura “assoluta” di quanto il dato calcolato si discosta dal dato reale.

CAPITOLO III

CALCOLI DI ILLUMINAMENTO CON IL METODO DELLE EFFICACIE LUMINOSE

Nel presente Capitolo viene effettuata la trattazione sistematica del calcolo dei valori di illuminamento esterno (globale, diffuso e diretto) attraverso il metodo delle efficacie luminose.

La predizione dei valori di illuminamento esterno a partire dall'irraggiamento solare è una metodologia necessaria quando non si hanno a disposizione nel sito di interesse una rete di strumenti che siano in grado di effettuare delle misure dirette.

Poiché l'irraggiamento esterno è facilmente misurabile o calcolabile attraverso le relazioni della letteratura l'attenzione di diversi ricercatori si è focalizzata sulla predizione dell'illuminamento utilizzando quale dato di partenza l'irraggiamento solare.

3.1 – IL CALOLO DELLA RADIAZIONE SOLARE DIRETTA E DIFFUSA

Prima di affrontare lo studio della luce naturale ci si è dedicati per diverso tempo alla predizione dell'irraggiamento naturale esterno.

La conoscenza delle componenti diretta e diffusa della radiazione globale oraria è molto importante in molte applicazioni dell'energia solare, tra le quali: il calcolo della radiazione globale oraria incidente su un collettore piano comunque orientato ed inclinato, la stima delle prestazioni dei collettori a concentrazione, che dipendono dalla radiazione diretta, il calcolo dell'illuminamento naturale diffuso, diretto e globale delle superfici esterne, etc.

In moltissime località viene misurata, con un piranometro, la radiazione globale sul piano orizzontale, ma non è disponibile un inseguitore solare con un pireliometro installato in modo da misurare la radiazione diretta, né un piranometro con anello di guardia per la misura della radiazione diffusa, per cui il calcolo delle due componenti deve necessariamente avvenire per mezzo di correlazioni di scomposizione.

In letteratura esistono molte correlazioni di scomposizione della radiazione globale oraria. Sono state confrontate le predizioni ottenute con alcune di queste correlazioni con circa 4000 dati

sperimentali di radiazione oraria diretta e diffusa rilevati ad Arcavacata di Rende (CS) nel periodo dal 23-07-2004 al 15-02-2006.

La radiazione globale oraria sul piano orizzontale è stata misurata per mezzo di un piranometro del tipo CM 11 della Kipp & Zonen, la radiazione diretta normale per mezzo di un pireliometro del tipo CH-1 NIP della Kipp & Zonen montato su un inseguitore solare del tipo 2AP della Kipp & Zonen, e la radiazione diffusa è stata calcolata per differenza tra la radiazione globale e la radiazione diretta incidente sul piano orizzontale.

Di seguito sono riportati i risultati della ricerca condotta, da considerarsi propedeutici a tutte le speculazioni scientifiche inerenti le efficacie luminose, dove viene presentato un nuovo modello di scomposizione che, nella predizione delle due componenti diretta e diffusa della radiazione in giornate serene, tiene conto dell'influenza del fattore di torbidità del Linke, e tiene successivamente conto della nuvolosità del cielo per predire le due componenti nei vari climi possibili.

3.1.1 – LE CORRELAZIONI DELLA LETTERATURA

Come già affermato, in letteratura esistono molte correlazioni di scomposizione, alcune di queste, utilizzate per i confronti sono di seguito riassunte:

Per un maggior riscontro, la simbologia relativa agli irraggiamenti globali, diffusi e diretti ed extratmosferici è quella originale riportata nella letteratura.

Correlazione di Erbs:

Secondo questa correlazione, il rapporto tra la radiazione diffusa D e la radiazione globale H sul piano orizzontale è funzione dell'indice di serenità k , definito come il rapporto la radiazione globale oraria incidente al suolo H e la radiazione incidente su un piano orizzontale al di fuori dell'atmosfera H_{ex} .

$$\frac{D}{H} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k & k \leq 0.22 \\ 0.99511 - 0.1604k + 4.388k^2 - 16.638k^3 + 12.336k^4 & 0.22 \leq k \leq 0.80 \\ 0.165 & k > 0.80 \end{cases} \quad (3.1)$$

Dove

$$k = \frac{H}{H_{ex}} \quad (3.2)$$

Correlazione CLIMED2:

Questa correlazione è stata sviluppata utilizzando misure in zone del nord del Mediterraneo, per le quali il parametro indipendente è ancora l'indice di serenità:

$$\frac{D}{H} = \begin{cases} 0.995 - 0,081k & k \leq 0.21 \\ 0.724 + 2.738k - 8.32k^2 + 4.967k^3 & 0.21 \leq k \leq 0.76 \\ 0.18 & k > 0.76 \end{cases} \quad (3.3)$$

Correlazione di Macagnan et al.

In questa correlazione il rapporto D/H è funzione di due parametric meteorologici: l'indice di serenità k e l'altezza solare α .

$$\frac{D}{H} = \begin{cases} 0.995 - 2.3979k - 0.7033 \sin \alpha^2 & k \leq 0.18 \\ 1.123 - 1.220k - 0.000273 \sin \alpha & 0.18 \leq k \leq 0.81 \\ 0.18 & k > 0.81 \end{cases} \quad (3.4)$$

Correlazione di Skartveit and Olseth

Anche in questa correlazione, molto più complessa delle precedenti, il rapporto D/H è funzione dell'indice di serenità e dell'altezza solare.

$$\frac{D}{H} = \begin{cases} 1.0 & k \leq 0.2 \\ 1 - (1 - d_1)[0.27\sqrt{K} + (1 - 0.27)K^2] & 0.2 \leq k \leq 1.09k_1 \\ 1 - 1.09k_1 \left(\frac{1 - f(1.09k_1)}{k} \right) & k > 1.09k_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$K = 0.5 \left[1 + \sin \pi \left(\frac{k-0.2}{k_1-0.2} - 0.5 \right) \right] \quad (3.6)$$

Essendo:

$$k_1 = 0.87 - 0.56 \exp(-0.06\alpha) \quad (3.7)$$

$$d_1 = 0.15 + 0.43 \exp(-0.06\alpha) \quad (3.8)$$

$$f(1.09k_1) = 1 - (1 - d_1)[0.27\sqrt{K} + (1 - 0.27)K^2] \quad (3.9)$$

Tale correlazione verrà d'ora in poi definita come Skartveit OLD

Nuova correlazione di Skartveit et.al.

In questa correlazione il rapport D/H è ancora una funzione dell'indice di serenità e dell'altezza solare, ma gli autori introducono due correzioni al rapport D/H; la prima per tenere in conto la presenza di cielo variabile con nuvolosità non uniforme, come funzione di un nuovo indice, definite clear sky index, e l'altra per tenere in conto l'albedo della Terra quando questo si discosta dal valore di riferimento di 0.15.

$$\frac{D}{H} = \begin{cases} 1.0 & k \leq 0.22 \\ 1 - (1 - d_1)[0.011\sqrt{K} + 0.15K + 0.74K^2] & 0.22 \leq k \leq k_2 \\ \frac{f(k_2)k_2(1-k)}{k(1-k_2)} & \underline{k_2 \leq k \leq k_{max}} \\ 1 - \frac{k_{max}(1-d_{max})}{k} & k \geq k_{max} \end{cases} \quad (3.10)$$

con:

$$K = 0.5 \left\{ 1 + \sin \left[\pi \left(\frac{k-0.22}{k_1-0.22} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (3.11)$$

$$k_1 = 0.83 - 0.56 \exp(-0.06\alpha) \quad (3.12)$$

$$k_2 = 0.95k_1 \quad (3.13)$$

$$K_{max} = \frac{k_{bmax} + \frac{f(k_2)k_2}{1-k_2}}{1 + \frac{f(k_2)k_2}{1-k_2}} \quad (3.14)$$

$$d_1 = 0.07 + \frac{0.046(90-\alpha)}{\alpha+3} \quad (3.15)$$

$$f(k_2) = 1 - (1 - d_1)[0.011\sqrt{K} + 0.15K + 0.74K^2] \quad (3.16)$$

$$k_{bmax} = 0.81^\alpha \quad (3.17)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{\sin \alpha} \right)^{0.6} \quad (3.18)$$

$$d_{max} = \frac{f(k_2)k_2(1-k_{max})}{k_{max}(1-k_2)} \quad (3.19)$$

Per tenere conto dell'effetto della presenza di nuvolosità variabile e nuvole non omogenee bisogna aggiungere al rapporto D/H il termine Δ .

$$\frac{D}{H} = \begin{cases} 0 & k \leq 0.14 \\ -3k_L^2(1 - k_L)\sigma_3^{1.3} & 0.14 \leq k \leq k_{x2} \\ 3k_R(1 - k_R)^2\sigma_3^{0.6} & k_X \leq k \leq (k_X + 0.71) \\ 1 - \frac{k_{max}(1-d_{max})}{k} & k \geq (k_X + 0.71) \end{cases} \quad (3.20)$$

$$k_X = 0.56 - 0.32 \exp(-0.06\alpha) \quad (3.21)$$

$$k_L = \frac{k-0.14}{k_x-0.14} \quad (3.22)$$

$$k_R = \frac{k-k_x}{0.71} \quad (3.23)$$

$$\sigma_3 = \left(\frac{(\rho - \rho_{-1})^2 + (\rho - \rho_{+1})^2}{2} \right)^{0.5} \quad (3.24)$$

$$\rho = \frac{k}{k_1} \quad (3.25)$$

Dove ρ è l'indice di cielo sereno dell'ora in esame, ρ_{-1} è l'indice riferito all'ora precedente e ρ_{+1} l'indice dell'ora successiva. Per l'effetto dell'albedo si rimanda ai testi originali. Questa correlazione sarà, nel prosieguo, definita Skartveit NEW.

Correlazione di Maxwell

Maxwell ha sviluppato una correlazione per il calcolo del rapporto tra la radiazione diretta al suolo B_n e la radiazione diretta extratmosferica $B_{n,ex}$, definito come funzione dell'indice di massa relativa $m(\alpha)$ e dell'indice di serenità orario k .

$$\frac{B_n}{B_{n,ex}} = \left(\frac{B_n}{B_{n,ex}} \right)_{clear\ sky} - (a + b \exp(m)) \quad (3.26)$$

$$\left(\frac{B_n}{B_{n,ex}} \right)_{clear\ sky} = 0.866 - 0.122m + 0.0121m^2 - 0.000653m^3 + 0.000014m^4 \quad (3.27)$$

$$m = [\sin \alpha + 0.15(\alpha + 3.885)^{-1.253}]^{-1} \quad (3.28)$$

Per $k \leq 0.6$

$$\begin{aligned} a &= 0.512 - 1.56k + 2.286k^2 - 2.222k^3 \\ b &= 0.370 + 0.962k \\ c &= -0.280 + 0.932k - 2.0486k^2 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Per $k > 0.6$

$$\begin{aligned} a &= -5.743 + 21.77k - 27.49k^2 + 11.56k^3 \\ b &= 41.40 - 118.5k + 66.05k^2 + 31.96k^3 \\ c &= -47.01 + 184.2k - 222.0k^2 + 73.81k^3 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Da queste equazioni è possibile ottenere facilmente il rapporto D/H:

$$\frac{D}{H} = 1 - \frac{B_n \sin \alpha}{H} \quad (3.31)$$

3.1.2 – NUOVE CORRELAZIONI DI RADIAZIONE SOLARE

Nell'ambito degli studi condotti sulla radiazione solare e la luce naturale sono state ricavate nuove correlazioni per il calcolo del rapporto tra la radiazione diretta e diffusa al suolo e la radiazione normale extraterrestre calcolabili quali funzioni del fattore di torbidità di Linke $T_L(\alpha)$ e l'indice di serenità orario k .

E' noto come il fattore di torbidità di Linke influenzi la radiazione solare al suolo in giornata serena; diversi valori del fattore di torbidità sono stati ottenuti sperimentalmente per Arcavacata di Rende ed altre località d'Italia: per maggiori dettagli si rimanda alle pubblicazioni della letteratura.

In giorni sereni, la radiazione diretta normale al suolo E_{es} è calcolabile con la seguente equazione:

$$B_{ex} = E_{es} = k_d I_{cs} \exp[-\delta_R m(a) T_L(\alpha)] \quad (3.32)$$

Dove k_d è il fattore di correzione per la distanza Terra-Sole, I_{cs} è la costante solare, δ_R è il fattore di estinzione di Rayleigh, $m(a)$ la massa d'aria relative e $T_L(\alpha)$ il fattore di torbidità di Linke istantaneo.

Il fattore k_d è calcolabile dalla relazione:

$$k_d = 1.0 + 0.03344 \cos\left(\frac{N-360}{365.25} - 2.8\right) \quad (3.33)$$

Con N pari al numero progressive del giorno dell'anno.

Il fattore di estinzione di Rayleigh è calcolato dall'equazione di Louche et al. Corretta da Kasten:

$$\delta_R = 6.6296 + 1.7513m - 0.102m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4 \quad (3.34)$$

Per il calcolo del fattore di torbidità del Linke, da studi condotti in Arcavacata di Rende, in giorni sereni negli anni 2004-2006 sono stati ottenuti i valori medi riportati in Figura 3.1.

Tali valori sono interpolate dalla correlazione:

$$T_L = 2.0484 + 0.0169N - 0.00005N^2 \quad (3.35)$$

Con un errore medio del -5.29% ed un RMS del 18.69%.

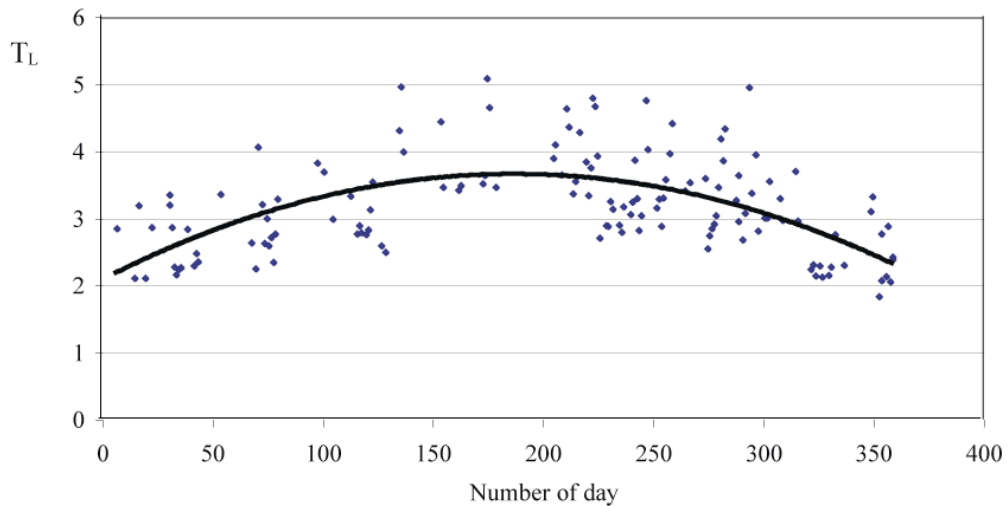


Figura 3.1 – Fattore di Linke medio giornaliero funzione del numero del giorno.

E' stato osservato che il fattore T_L dipende dall'altezza solare, per cui è stata ottenuta una nuova correlazione per $T_L(\alpha)$

$$T_L(\alpha) = T_L - 3.746 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha + 2.378 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha - 8.229 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 8.169 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha^3 \quad (3.36)$$

Con un errore medio del 2.03% ed un RMS del 20.21%.

Inserendo la correlazione di $T_L(a)$ nell'eq. 3.36 è possibile ottenere la radiazione diretta al suolo in giornate serene. La radiazione diretta on giornate nuvolose è ottenibile moltiplicando l'eq. 3.32 per un fattore correttivo pari a:

$$F_c = a(k) \exp[-b(k)m(\alpha)] \quad (3.37)$$

Le funzioni $a(k)$ e $b(k)$ sono state determinate con il metodo dei minimi quadrati, sulla base dei dati sperimentali disponibili:

$$\begin{aligned} a(k) &= 0.0986 + 0.0058k - 1.888k^2 + 4.803k^3 \\ b(k) &= 2.476 - 11.390k + 14763k^2 - 5.729k^3 \end{aligned} \quad (3.38)$$

In Figura 3.2 è riportato l'andamento del fattore correttivo in funzione dell'indice di serenità.

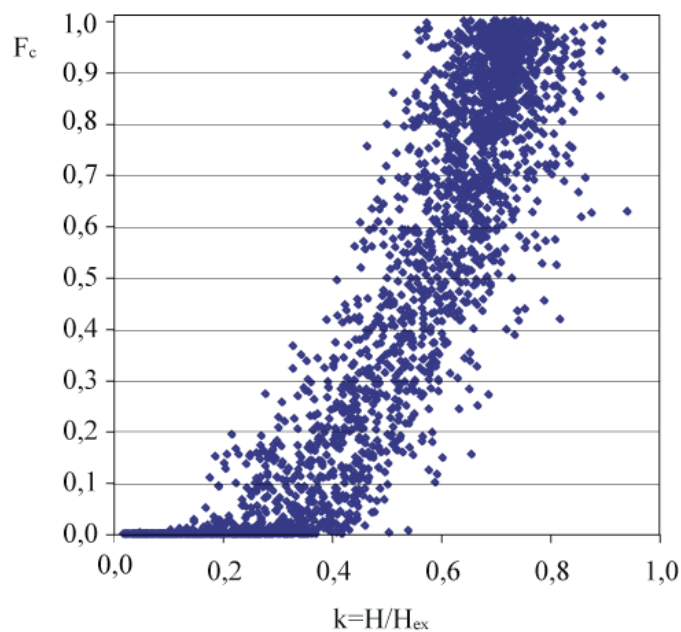


Figura 3.2 – fattore correttivo per giornate nuvolose in funzione dell'indice di serenità k

$$(H/H_{ex}=E_{eg}/E_{es}).$$

Il rapporto tra la radiazione diretta al suolo sul piano orizzontale e la radiazione globale sullo stesso piano è dato da:

$$\frac{B}{H} = \frac{E_{es}}{E_{eg}} = B_n F_c \frac{\sin \alpha}{E_{eg}} \quad (3.39)$$

Mentre il rapporto tra la radiazione diffusa e la radiazione globale sul piano orizzontale è dato da:

$$\frac{D}{H} = \frac{E_{ed}}{E_{eg}} = 1 - \frac{E_{es} \sin \alpha}{E_{eg}} \quad (3.40)$$

Le eqq. (3.39) e (3.40) saranno di seguito indicate come correlazioni *TL-1*. E' stata ricavata una ulteriore correlazione, più semplice, funzione degli indici T_L e k che definiremo nel prosieguo *TL-2*:

$$\frac{D}{H} = \frac{E_{ed}}{E_{eg}} = -0.1045 + 2.2259T_L(\alpha) - 1.888T_L^2(\alpha) + 1.888T_L^3(\alpha) + 1.14k - 0.429k^2 + 0.0515k^3 \quad (3.41)$$

3.1.3 – CONFRONTI TRA LE CORRELAZIONI ED I DATI DI ARCAVACATA

Le precedenti correlazioni della letteratura e le nuove correlazioni sono state confrontate con i dati di radiazione diretta e diffusa rilevati ad ARcavacata di Rende.

In Fig. 3.3 e 3.4 sono mostrati rispettivamente i dati sperimentali del rapporto B/H e D/H in funzione dell'indice di serenità. La dispersione dei dati è evidente a dimostrazione che oltre all'influenza dell'indice di serenità k , hanno grande influenza sul rapporto tra le radiazioni diretta e diffusa e la globale, la distribuzione spaziale, le caratteristiche delle nuvole (spessore, densità, ecc.), così come la torbidità atmosferica influenza.

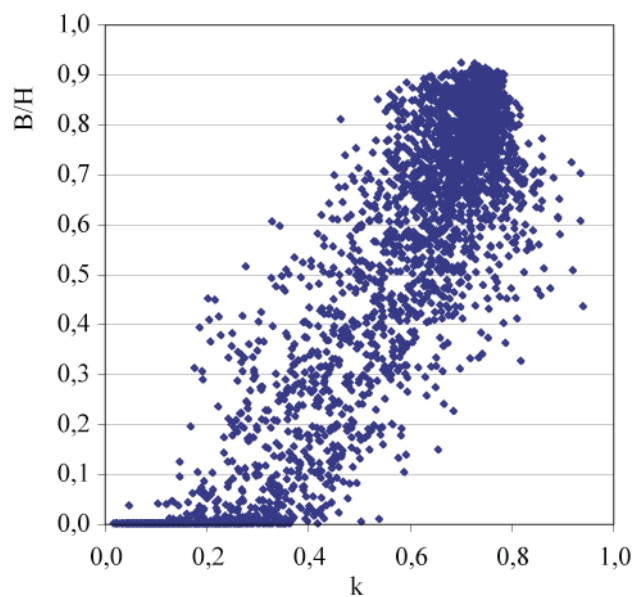


Figura 3.3 – Rapporti sperimentali B/H in funzione dell'indice di serenità.

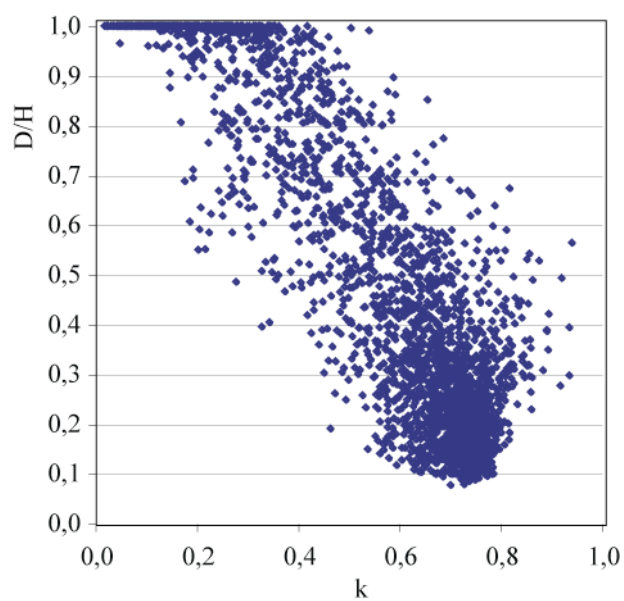


Figura 3.4 – Rapporti sperimentali D/H in funzione dell'indice di serenità.

Le Figg. 5 e 6 mostrano i confronti dei rapporti B/H e D/H tra i dati calcolati con Erbs, Maxwell, Skartveit New e $TL-2$ ed i dati sperimentali.

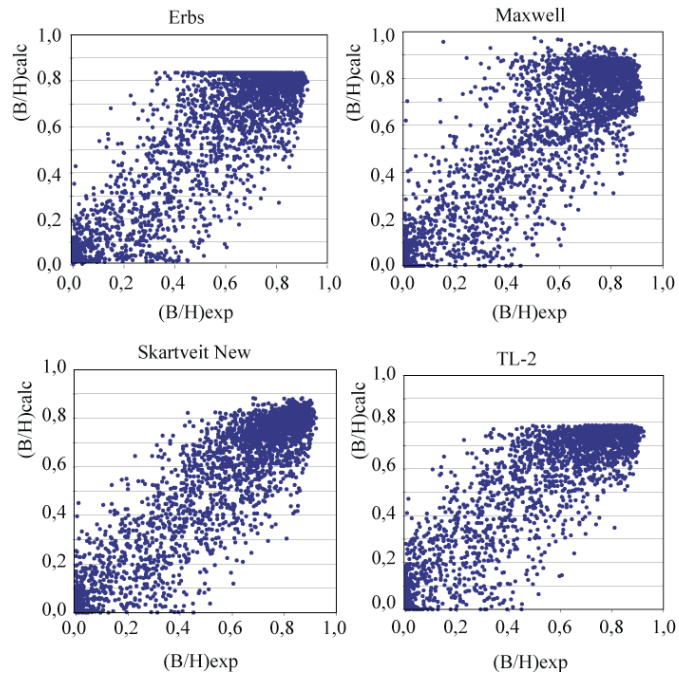


Figura 3.5 – Rapporti sperimentali B/H calcolati in funzione dei rapporti B/H sperimentali.

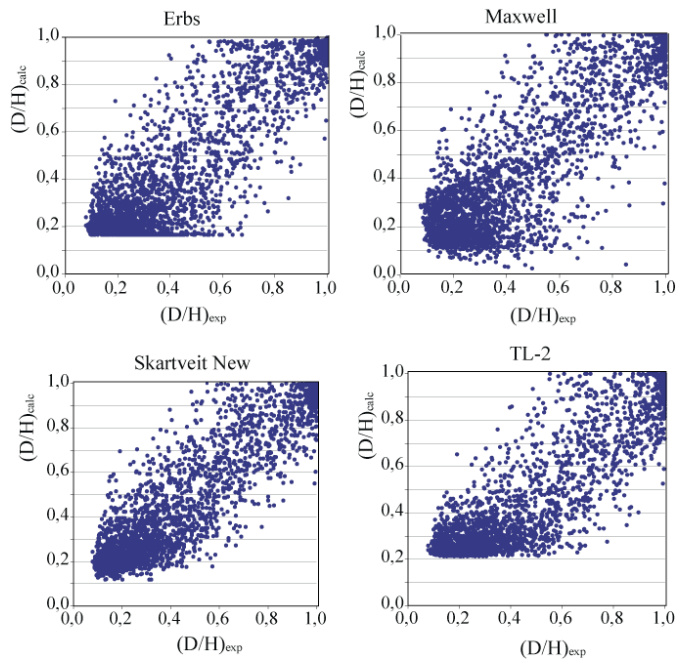


Figura 3.6 – Rapporti sperimentali D/H calcolati in funzione dei rapporti D/H sperimentali.

La tabella 1 mostra gli errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ e gli errori quadratici RMS tra i valori calcolati e sperimentali per il rapporto B/H .

Da una analisi della tabella, si può osservare che per i differenti modelli, e per tutte le condizioni climatiche, gli errori medi variano tra un -6% ed un +7% e gli RMS tra il 29% (Skartveit new) e 39% (modello $TL-1$).

Riferendosi ai solo giorni sereni gli errori medi variano tra il -12% (Skartveit old) ed il 3% (modello $TL-1$) mentre gli RMS variano tra il 13% ed il 16%.

La tabella 2 mostra gli errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ e gli errori quadratici RMS tra i valori calcolati e sperimentali per il rapporto D/H .

L'errore medio si attesta per tutti i modelli e per le diverse condizioni climatiche intorno al 10% mentre gli RMS variano dal 43% (Skartveit new) al 56% (Skartveit old).

Per le sole giornate serene il modello migliore è $TL-1$ con un errore medio del 3% ed un RMS del 51%.

Tabella 3.1 – Errore medio percentuale ed RMS del rapporto B/H tra i valori calcolati e quelli sperimentali.

	All Data		Clear Sky Data	
	$\bar{\epsilon}\%$	RMS%	$\bar{\epsilon}\%$	RMS%
Erbs	1.03	34.44	-5.58	13.87
Macagnan	7.59	38.80	-8.41	15.57
Climed 2	0.75	33.22	-7.54	14.37
Skartveit Old	-5.98	32.55	-11.70	16.28
Skartveit New	-1.64	28.80	-5.58	12.71
Maxwell	3.81	38.58	-4.17	15.84
TL-1	3.07	38.71	3.19	14.99
TL-2	3.51	35.32	-8.81	13.16

Tabella 3.2 – Errore medio percentuale ed RMS del rapporto D/H tra i valori calcolati e quelli sperimentali.

	All Data		Clear Sky Data	
	$\bar{\epsilon}\%$	RMS%	$\bar{\epsilon}\%$	RMS%
Erbs	9.50	46.13	34.63	65.08
Macagnan	8.36	48.75	45.70	70.88
Climed 2	11.58	48.76	43.42	71.46
Skartveit Old	23.51	56.40	62.12	86.15
Skartveit New	12.13	43.34	33.05	61.16
Maxwell	7.05	51.13	31.76	72.89
TL-1	11.40	48.06	3.16	50.82
TL-2	14.57	48.27	51.09	73.12

Si è ritenuto utile calcolare anche le deviazioni medie MD e le deviazioni quadratiche medie RMSD tra i valori calcolati e sperimentali della radiazione diretta e diffusa per avere una misura quantitativa degli errori commessi. La tabella 3 mostra i valori MD e RMSD per la radiazione diretta, mentre, la tabella 4 si riferisce alla radiazione diffusa.

Tabella 3.3 – Errore medio MD ed errore quadratico medio RMSD tra i valori calcolati e quelli sperimentali della radiazione B (W/m^2).

	All Data		Clear Sky Data	
	MD	RMSD	MD	RMSD
Erbs	2.96	72.56	-26.22	54.78
Macagnan	1.70	76.72	-40.61	65.49
Climed 2	-3.11	71.04	-36.08	59.88
Skartveit Old	-25.61	75.33	-58.93	77.71
Skartveit New	-8.59	62.80	-26.99	54.50
Maxwell	-0.14	81.94	-30.07	74.54
TL-1	-0.89	73.76	4.27	58.87
TL-2	-5.00	69.45	-45.12	61.65

Tabella 3.4 – Errore medio MD ed errore quadratico medio RMSD tra i valori calcolati e quelli sperimentali della radiazione D (W/m^2).

	All Data		Clear Sky Data	
	MD	RMSD	MD	RMSD
Erbs	-3.63	63.96	26.22	54.78
Macagnan	-9.64	70.98	40.61	65.49
Climed 2	-1.17	63.13	36.08	59.88
Skartveit Old	20.17	66.00	58.93	77.71
Skartveit New	5.17	55.56	26.99	54.50
Maxwell	-1.94	72.02	30.07	74.54
TL-1	-2.69	65.63	-4.27	58.87
TL-2	.92	62.36	45.12	61.65

L'analisi delle ultime due tabelle mostra che per i giorni sereni, per la radiazione diretta, tutti i modelli, ad eccezione di Skartveit Old presentano scarti minimi di qualche W/m^2 e valori di RMSD tra 60 e 80 W/m^2 . Trattasi di errori molto accettabili per la radiazione diretta. I migliori modelli sono Skartveit New e TL-2.

In giornata qualunque peggiorano i dati relativi ad MD mentre sostanzialmente rimangono invariati gli RMSD. Le sette correlazioni della letteratura confrontate con i dati orari sperimentali con, in aggiunta, le due nove correlazioni ottenute ad Arcavacata, hanno dimostrato, soprattutto nell'analisi degli errori assoluti, come sia possibile calcolare, con errori accettabili, i valori di radiazione Diretta B e Diffusa D .

Tutte queste correlazioni sono di grande utilità nella predizione degli illuminamenti diretti e diffusi attraverso il metodo delle efficacie luminose in assenza di misure dirette in situ.

3.2 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA LUMINOSA

Esiste un legame diretto tra i valori di illuminamento globale, diretto e diffuso ed i relativi valori di irraggiamento al suolo.

A livello extratmosferico il rapporto tra illuminamento ed irraggiamento è costante ed è dato dall'eq. 1.16, al suolo si discosta abbastanza da tale valore a causa dei fenomeni di scattering, assorbimento dell'atmosfera ecc.

L'irraggiamento solare è ormai disponibile in diverse stazioni meteorologiche sparse per il globo e, come visto, nel caso in cui non dovesse essere noto è calcolabile con diverse correlazioni.

Il rapporto tra l'illuminamento e l'irraggiamento viene definita efficacia luminosa ed è fornita dall'equazione:

$$K = \frac{E_v}{E_e} \quad (3.42)$$

L'efficacia luminosa della radiazione globale dipende principalmente dall'assorbimento atmosferico, il quale, aumenta all'aumentare della distanza percorsa dai raggi luminosi in atmosfera.

Poiché l'atmosfera normalmente assorbe maggiore radiazione infrarossa rispetto a quella visibile, l'efficacia luminosa sulla terra è più alta rispetto a quella extratmosferica ed è fortemente dipendente dai valori di soleggiamento e dalle condizioni di nuvolosità.

Qualora si riuscisse a conoscere, o predire, tali valori sarebbe agevole convertire i dati di irraggiamento in illuminamento su superfici variamente inclinate ed orientate.

Nei paragrafi successivi sono presentati i risultati degli studi condotti utilizzando i dati sperimentali rilevati ad Arcavacata ed in altre stazioni di misura di centri di ricerca esteri.

Sono stati utilizzati i valori istantanei acquisiti con una frequenza di 5 minuti circa dai quali sono stati calcolati i valori medi di illuminamento ed irraggiamento considerando insieme tutte le condizioni di cielo sereno, intermedio e coperto.

3.3 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA GLOBALE E DIFFUSA SUL PIANO ORIZZONTALE PER TUTTI I TIPI DI CIELO E CONFRONTI CON I MODELLI DELLA LETTERATURA

L'efficacia luminosa della radiazione globale è definita come il rapporto tra l'illuminamento globale sul piano orizzontale E_{vg} e l'irradianza globale E_{eg} sulla stessa superficie.

$$K_g = \frac{E_{vg}}{E_{eg}} \quad (3.43)$$

L'efficacia luminosa della radiazione diffusa è definita come il rapporto tra l'illuminamento diffuso sul piano orizzontale E_{v0} e l'irradianza diffusa E_{e0} sulla stessa superficie.

$$K_g = \frac{E_{vd}}{E_{ed}} \quad (3.44)$$

La Figura 3.7 mostra l'andamento dei dati medi orari sperimentali dell'illuminamento globale in funzione dell'irraggiamento orario sperimentale misurati ad Arcavacata di Rende nell'anno 2006.

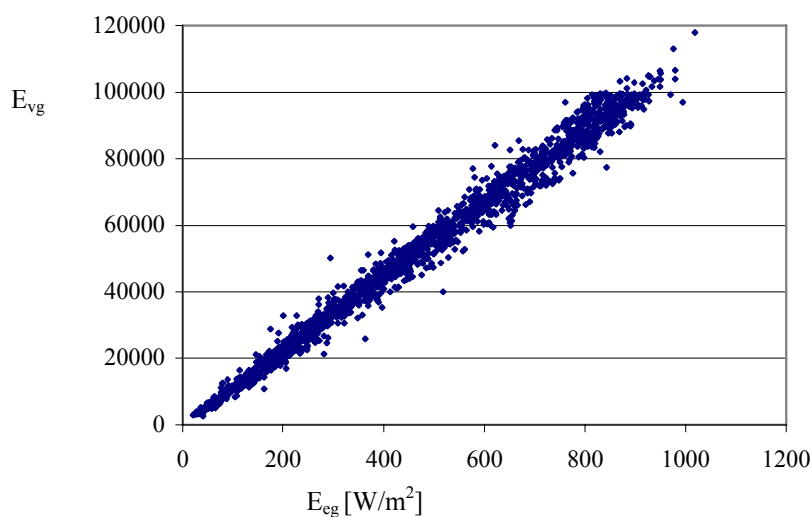


Fig. 3.7 – Illuminamento Globale in funzione dell'irraggiamento globale ad Arcavacata di Rende.

La Figura 3.8 mostra l'andamento dei dati medi orari sperimentali dell'illuminamento diffuso in funzione dell'irraggiamento orario sperimentale diffuso misurati ad Arcavacata di Rende nello stesso anno.

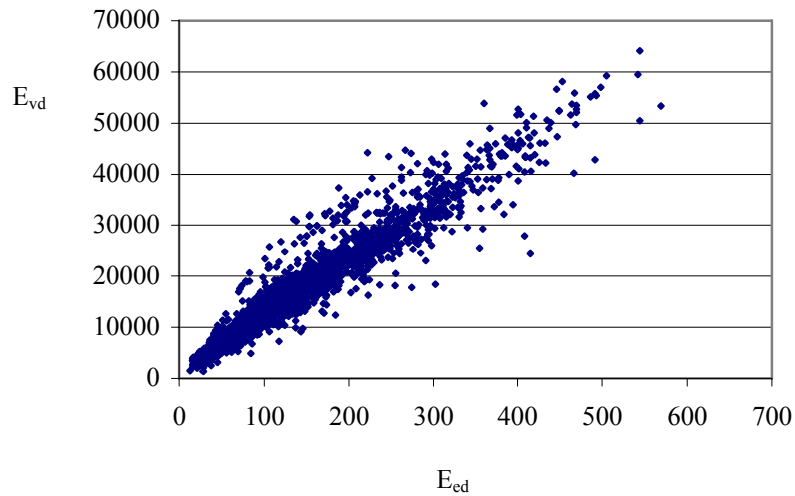


Fig. 3.8 – Illuminamento Diffuso in funzione dell'irraggiamento Diffuso ad Arcavacata di Rende.

L'illuminamento diffuso sul piano orizzontale è stato calcolato dalla relazione:

$$E_{vd} = E_{vg} - E_{vb} \sin \alpha \quad (3.45)$$

Mentre l'irraggiamento diffuso sul piano orizzontale è stato calcolato dalla relazione:

$$E_{ed} = E_{eg} - E_{eb} \sin \alpha \quad (3.46)$$

Perciò i dati ottenuti direttamente per via sperimentale sono stati quelli globali e diretti E_{vg} , E_{vb} , E_{eg} e E_{eb} mentre i valori diffusi sono stati calcolati per differenza dalle relazioni anzi descritte.

Tutti i dati sono stati sottoposti al controllo di qualità raccomandato dal CIE e riportato al nel parag. 2.2; in aggiunta tutti i dati caratterizzati da una altezza solare inferiore a 6° sono stati eliminati a causa della presenza di ostacoli intorno alla stazione di prova.

Le Figg. 3.7 e 3.8 mostrano un andamento lineare tra l'illuminamento e l'irraggiamento, di conseguenza sono state ottenute le seguenti correlazioni semplificate di efficacia luminosa:

$$K_g = \frac{E_{vg}}{E_{eg}} = 109.95 \left(\frac{lm}{W} \right) \quad \bar{\epsilon} = 0.61\% \text{ e } RMS = 8.22\% \quad (3.47)$$

$$K_d = \frac{E_{vd}}{E_{ed}} = 127.41 \left(\frac{lm}{W} \right) \quad \bar{\varepsilon} = 3.7\% \text{ e } RMS = 20.15\% \quad (3.48)$$

Le definizioni di $\bar{\varepsilon}$ ed RMS sono quelle descritte al paragrafo relative al calcolo degli errori.

Le correlazioni 3.46 e 3.47, le quali presentano valori costanti di efficacia luminosa, sono nel seguito definite Model 1G e Model 1D.

Per l'efficacia diffusa, in alternative al modello costante, è stato ottenuto un modello lineare di efficacia in funzione di α del tipo:

$$K_d = a + b\alpha \quad (3.49)$$

Per Arcavacata di Rende sono stati ottenuti i valori $a=133.6$ e $b= -0.181$ con $\bar{\varepsilon} =3.67\%$ ed $RMS=19.89\%$.

La correlazione lineare di efficacia fornisce dunque risultati migliori rispetto all'efficacia costante; l'eq. 3.48 nel seguito sarà definita Model 2D

3.3.1 – GRAFICI DI EFFICACIE LUMINOSE GLOBALI E DIFFUSE SPERIMENTALI

Le predizioni dei modelli semplificati Model 1G, Model 1D e Model 2D, sviluppati per arca vacata di Rende, sono stati comparati con altri modelli più complessi, riportati nella letteratura, per la stima dell'efficacia luminosa sul piano orizzontale.

Tutti i modelli sono stati confrontati con i dati sperimentali orari, di un anno di dati, in altre quattro località:

Ginevra, Svizzera (Lat: 46°20'N, Long: 6°01'E), dati del 1993

Vaulx-en-Velin, Francia (Lat: 45°47'N, Long: 4°56'E), dati del 2005

Bratislava, Slovacchia (Lat: 48°10'N, Long: 17°05'E), dati del 2005

Osaka, Giappone (Lat: 34°36'N, Long: 135°30'E), dati del 2006

Vengono proposti una serie di grafici al fine di avere una fotografia della dipendenza dell'efficacia luminosa dai principali parametri utilizzati nelle correlazioni.

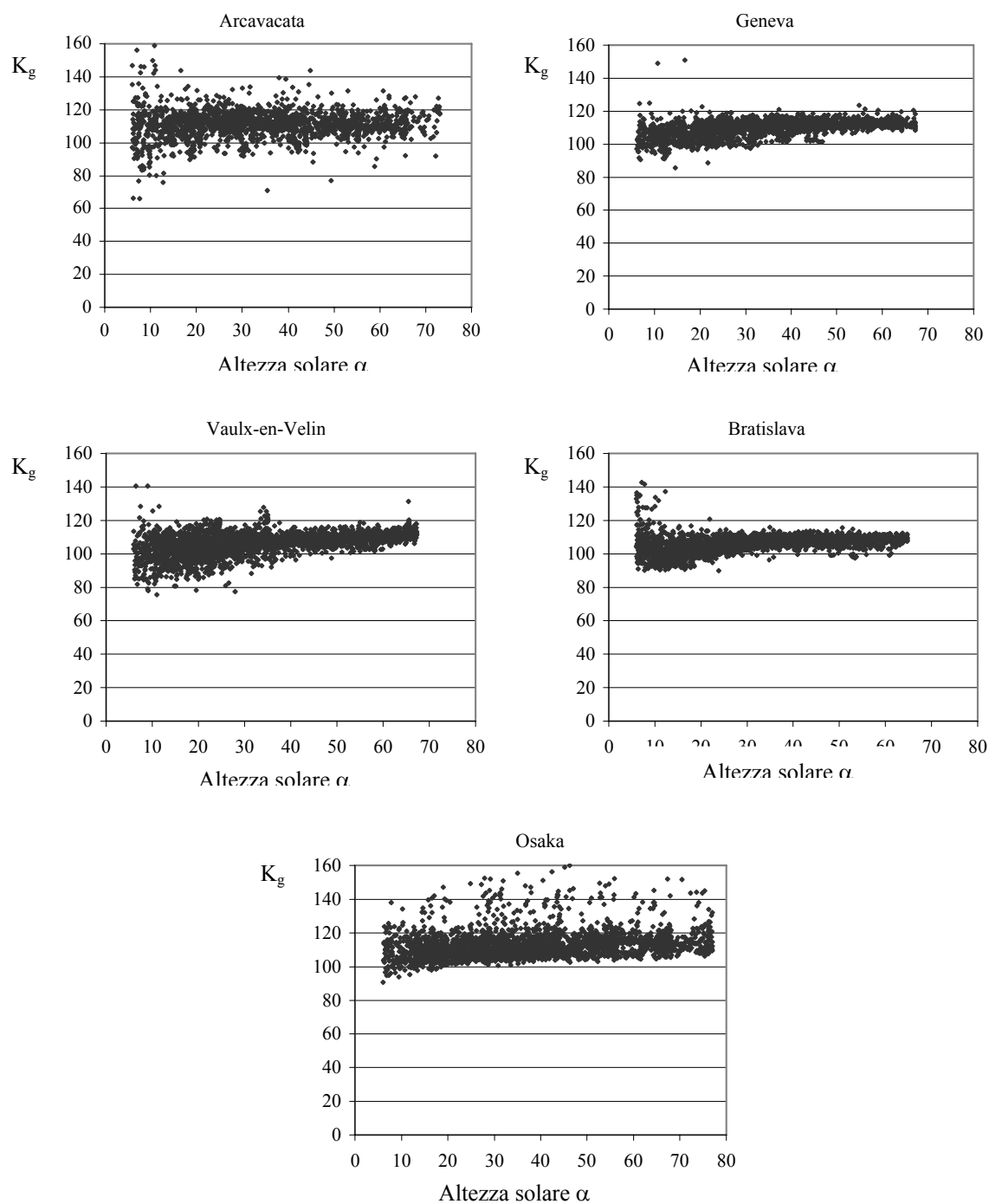


Fig. 3.9 – Efficacia Luminosa Globale in funzione dell'altezza solare

La Fig. 3.9 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa globale in funzione dell'altezza solare per tutte le località. Si può osservare un andamento all'incirca costante.

La Fig. 3.10 mostra, altresì, l'andamento dell'efficacia luminosa globale in funzione

dell'indica di serenità k_t già definito come il rapporto dell'irradianza globale sul piano orizzontale e l'irraggiamento extraterrestre sullo stesso piano. Le Figure mostrano un andamento all'incirca costante, ad eccezione dei dati di Osaka, per i quali si può osservare un più ampio range dell'efficacia luminosa, rispetto alle altre località, ed in particolare per bassi valori dell'indica di serenità (cielo coperto) sono stati rilevati valori di efficacia più elevati.

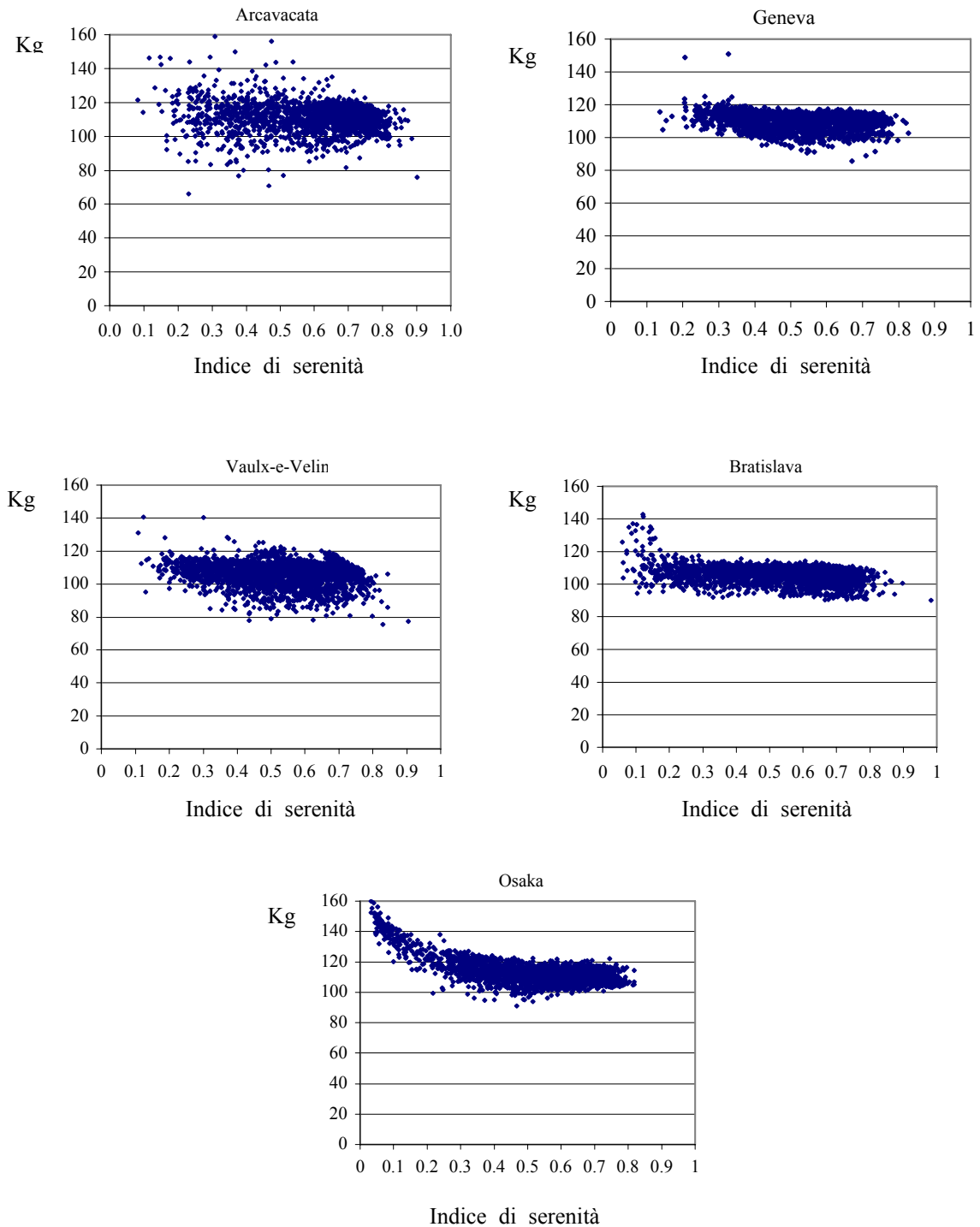


Fig. 3.10 – Efficacia luminosa globale in funzione dell'indica di serenità

La Fig. 3.11 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa diffusa in funzione dell'altezza solare per tutte le località. Si può osservare un andamento dell'efficacia diffusa all'incirca costante in tutte le località ma a confronto con i dati dell'efficacia globale si può notare una maggiore dispersione.

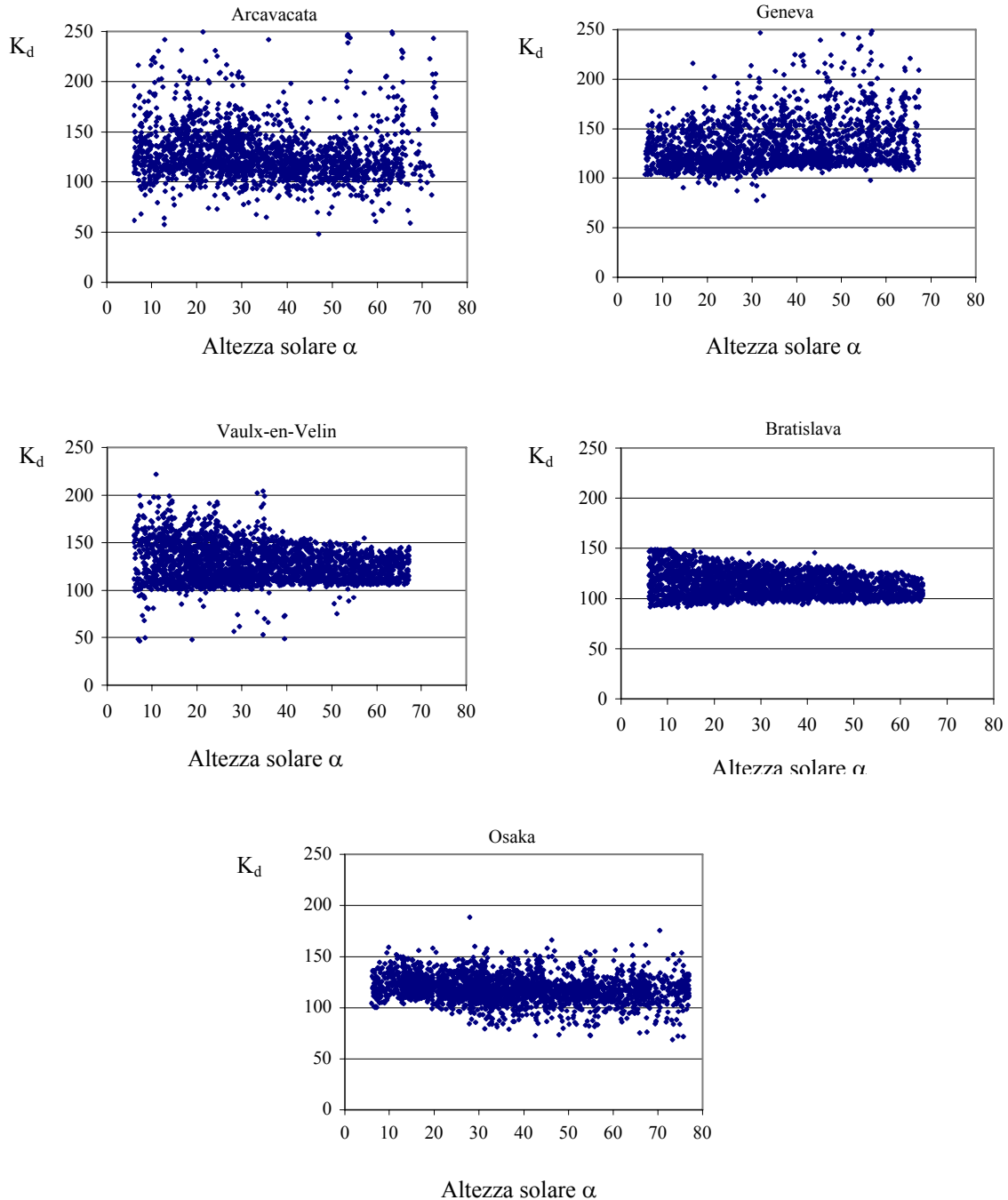


Fig. 3.11 – Efficacia luminosa diffusa in funzione dell'altezza solare

La Fig. 3.12 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa diffusa in funzione dell'indice di serenità. La Figura mostra una forte dispersione dei dati ad eccezione del grafico di Osaka, dove i dati presentano un andamento più regolare e, per bassi valori dell'indice di serenità, si possono notare valori più alti di efficacia luminosa.

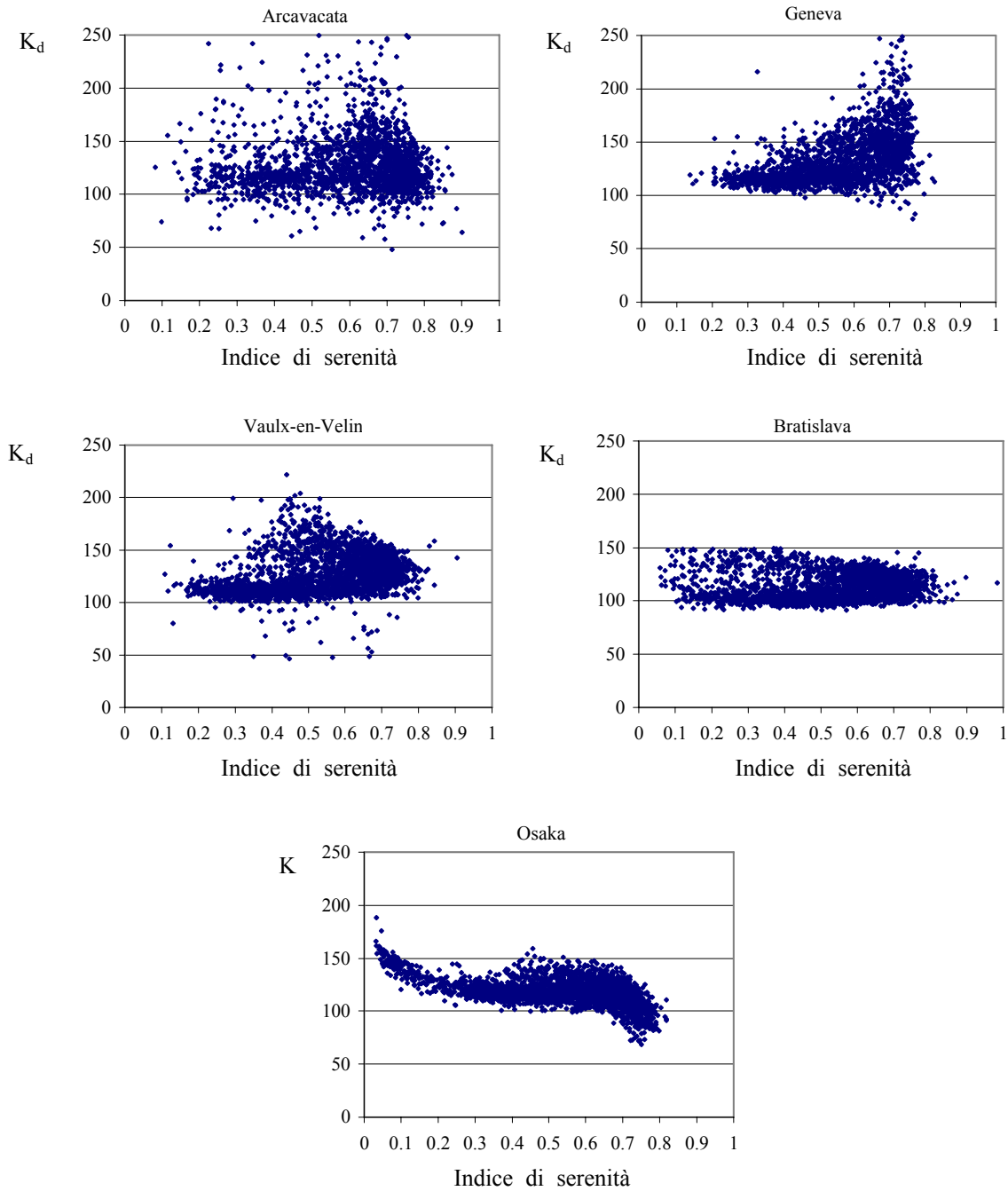


Fig. 3.12 – Efficacia luminosa diffusa in funzione dell'indice di serenità

La Fig. 7 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa diffusa in funzione dell'indice di serenità k_d , già definito come il rapporto tra l'irradianza diffusa sul piano orizzontale e l'irradianza extratmosferica sullo stesso piano. Per tutte le località l'efficacia diffusa diminuisce all'aumentare del parametro k_d .

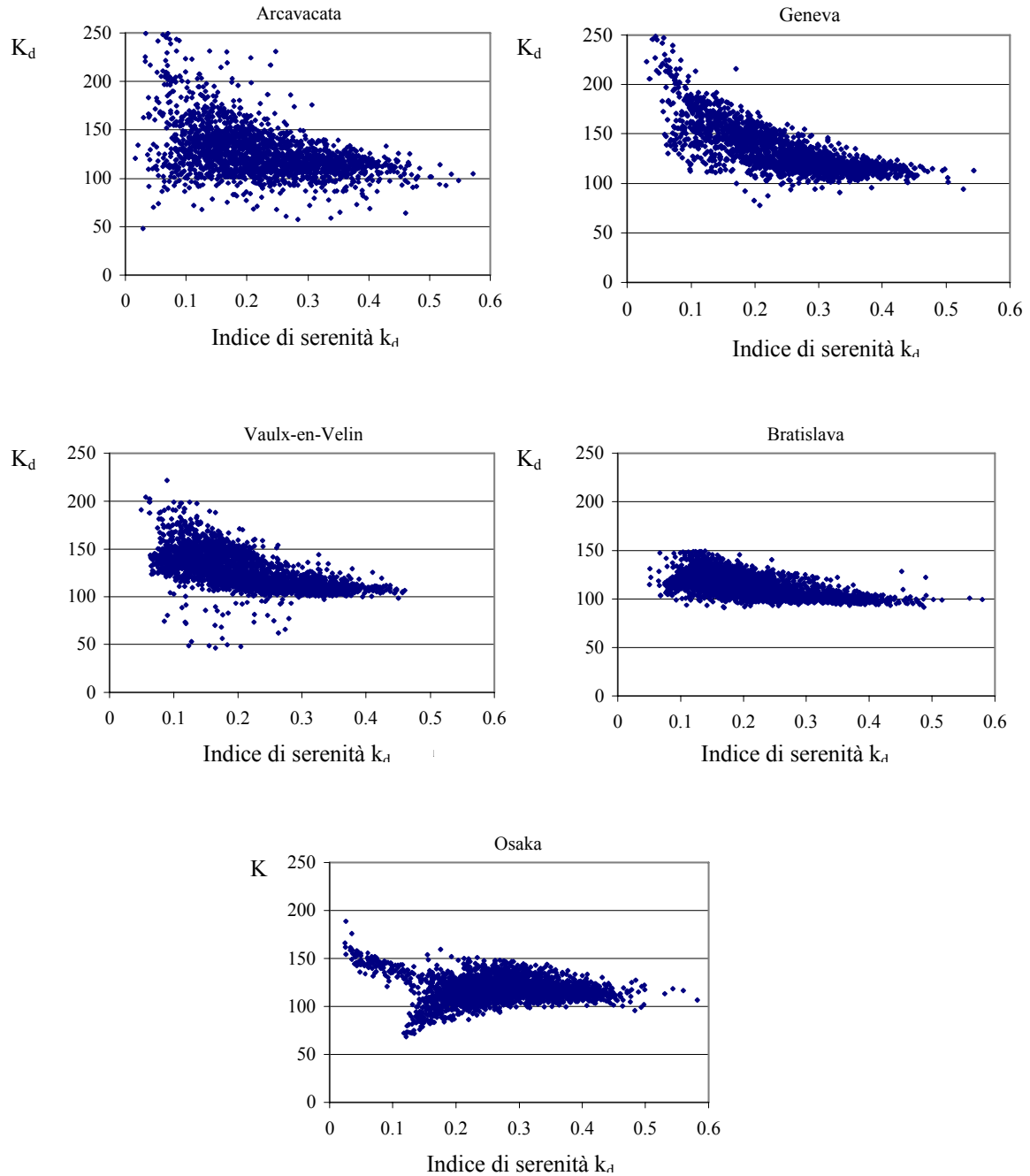


Fig. 3.13 – Efficacia luminosa diffusa in funzione dell'indice di serenità

Prima di effettuare il confronto tra i dati sperimentali ed i dati calcolati con i modelli di calcolo, è utile stimare il valore atteso dell'incertezza dell'efficacia luminosa dovuta agli errori di misura dei fotometri e dei piranometri.

L'errore principale di cui sono affetti i fotometri è la deviazione della risposta spettrale dello strumento dalla curva dell'occhio umano standard $V(\lambda)$: questo errore è caratterizzato per mezzo del parametro f_1' , pari alla deviazione media in valore assoluto (per maggiori dettagli si rimanda alla pubblicazione CIE 69-1987 “*Methods of Characterizing illuminant meters and luminance meters*” - Technical Report.

I fotometri installati presso Arcavacata di Rende presentano un valore di f_1' molto prossimo a 2%. Una precisione simile si può riscontrare per tutti gli strumenti delle altre quattro località. L'errore del coseno f_2 , per tutti i fotometri utilizzati, è di circa l'1%.

Tutti i piranometri utilizzati sono strumenti con standard secondario ed hanno un'incertezza totale media del 2%.

Poiché l'efficacia luminosa della radiazione solare è definita come il rapporto tra l'illuminamento E_v e l'irradianza E_e , indicando con x e y tali variabili e con u_x e u_y i relativi errori assoluti (non percentuali), l'incertezza combinata u_f della funzione $K=F(x, y)$ può essere ottenuta applicando la formula:

$$u_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 (u_x)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 (u_y)^2} \quad (3.51)$$

Dall'eq. 3.51 risulta che l'errore percentuale $(u_f/F) \times 100$ della funzione $K=x/y$ è pari a:

$$\frac{u_F}{F} \times 100 = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x} \times 100\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y} \times 100\right)^2} \quad (3.52)$$

Inserendo nell'eq. 3.52 un'incertezza totale dei fotometri del 3% e dei piranometri del 2%, l'errore atteso per l'efficacia luminosa è del 3,6% tenendo in considerazione i soli errori dovuti agli strumenti.

3.3.2 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA GLOBALE.

I modelli considerati per la stima dell'efficacia globale sono i seguenti:

Modello di Muneer, Gul and Kubie – (Model 2G)

Questi autori legano l'efficacia luminosa globale all'indice di serenità k_t :

$$K_g = 136.6 - 74.541k_t + 57.342k_t^2 \quad (3.53)$$

Modello di Muneer- Robledo – (Model 3G)

Questa è una correlazione locale ottenuta per Madrid dalla precedente correlazione:

$$K_g = 138.45 - 91.64k_t + 67.08k_t^2 \quad (3.54)$$

Modello di Ruiz, Soler e Robledo – (Model 4G)

In questo modello, gli autori correlano l'efficacia al seno dell'altezza solare e all'indice di serenità:

$$K_g = 138.45(\sin \alpha)^{0.026}k_t^{-0.108} \quad (3.55)$$

Modello di Perez, Ineichen, et al. – (Model 5G)

Questi autori correlano l'efficacia globale all'indice di serenità (ε), al contenuto di acqua precipitabile (w), all'angolo zenitale (z) e alla brillantezza (Δ), attraverso la correlazione:

$$K_g = a_i + b_iw + c_i \cos z + d_i \ln(\Delta) \quad (3.56)$$

Dove, utilizzando la simbologia originale degli autori, a_i , b_i , c_i , d_i sono delle costanti dipendenti dall'indice di serenità e sono fornite dagli autori per 8 tipi di cielo variabili da cielo molto sereno a cielo coperto. In totale sono utilizzate 32 costanti, e, inoltre la stima del

parametro w necessita della conoscenza della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria esterna.

L'indice di serenità ε di Perez et al. è definito come:

$$\varepsilon = \frac{\left[\frac{(E_{ed} + E_{vs})}{E_{ed}} \right] + 5.535 \cdot 10^{-6} \cdot Z^3}{1 + 5.535 \cdot 10^{-6} \cdot Z^3} \quad (3.57)$$

La brillantezza del cielo (Δ) è definita come:

$$\Delta = m \times \frac{E_{ed}}{E_e} \quad (3.58)$$

Dove m rappresenta la massa d'aria relativa, E_{vs} l'irradianza diretta e E_e l'irradianza normale diretta extraterrestre.

Il parametro (Δ) è molto simile all'indice di serenità della radiazione diffusa k_d precedentemente definito; i due parametri sono perfettamente identici se m nell'eq. 3.58 è calcolato dalla formula approssimata $(1/\sin\alpha)$. Generalmente, m è calcolato dalla più precisa formula di Kasten.

La tabella 3.4 mostra i valori degli errori medi percentuali e degli errori quadratici medi tra i dati di efficacia globale calcolati dai vari modelli e i dati sperimentali di efficacia ottenuti in tutte le località considerate, utilizzato sia le costanti correlazioni originali che le costanti ricalcolate per la località in esame al fine di ridurre gli errori.

Tabella 3.4 – Errori medi percentuali $\bar{\varepsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS% tra i valori calcolati di efficacia luminosa globale ed i dati sperimentali.

		Arcavacata		Geneva		Vaulx-en-Velin		Bratislava		Osaka	
		$\bar{\varepsilon}$	RMS	$\bar{\varepsilon}$	RMS	$\bar{\varepsilon}$	RMS	$\bar{\varepsilon}$	RMS	$\bar{\varepsilon}$	RMS
Model 1G		0.61	8.22	0.45	4.97	4.00	8.18	4.03	6.52	-2.1	6.71
Model 1G-loc		-	-	0.23	4.94	0.37	6.89	0.24	4.94	0.47	6.56
Model 2G	Muneer	3.34	9.41	4.36	6.76	8.13	10.98	8.63	10.4	2.18	5.29
Model 2G-loc		0.61	8.24	0.22	4.78	0.34	6.77	0.22	4.81	0.19	4.47
Model 3G	Ro-Mu	-0.88	8.81	0.34	5.32	4.02	7.94	4.62	7.76	-1.58	4.73
Model 4G	Robledo	-0.94	8.38	0.80	4.65	4.42	7.94	4.72	7.04	-0.79	3.92
Model 4G-loc		0.58	8.03	0.12	3.51	0.27	5.39	0.14	3.65	0.12	3.55
Model 5G	Perez	-4.12	10.22	-3.82	8.32	0.28	8.38	-	-	-6.51	10.12

In tabella 3.5 sono riportati i coefficienti locali per tutte le correlazioni. La tabella 3.5 mostra che i valori sperimentali dell'efficacia media globale nelle varie località, sono molto vicini gli

uni con gli altri, variando da 106 a 113 lumen/W; tali riscontri confermano i risultati ottenuti in precedenza da altri ricercatori: Littlefair per Garston, U.K. (Lat: 51°43'N, Long: 0°22'W) ha trovato un valore di efficacia globale media di 109 lumen/W, Glette e Treado trovarono, per diverse località degli Stati Uniti, un valore medio di 107 lumen/W.

Tabella 3.5 – Costanti locali delle correlazioni di efficacia luminosa globale.

Models	Arcavacata	Geneva	Vaulx-en-Velin	Bratislava	Osaka
Mod. 1G - loc. $K_g = cost$	109,95	110.43	106.11	105.94	112.84
Mod. 2G - loc. $K_g = a + bk_t + ck_t^2$	a= 114.44 b= -3.65 c=-3.33	a= 127.43 b= -68.22 c= 60.98	a= 119.59 b= -48.52 c= 40.47	a=111.89 b= -16.096 c= 8.416	a=147.04 b=-123.76 c=100.74
Mod. 4G - loc. $K_g = a(\sin \alpha)k_t^2$	a= 110.05 b= 0.0293 c=- 0.053	a= 109.72 b= 0.067 c= -0.0732	a= 106.08 b= 0.0753 c= -0.0853	a= 105.79 b= 0.0607 c=- 0.0725	a=107.28 b=0.05638 c=-0.1152

Analizzando gli errori riportati in tabella 3.4, si può notare come non ci siano differenze significative tra i vari modelli, e, i modelli migliori appaiono essere quelli ad efficacia costante (model 1G-loc), modello di Muneer locale (Model 2G-loce modello di Robledo locale (Model 4G-loc). Vista la sua semplicità di applicazione si è giunti alla determinazione che il miglior modello, adottabile nei calcoli di ingegneria illuminotecnica, sia proprio il modello 1G per il calcolo dell'illuminamento globale sul piano orizzontale in tutte le condizioni di cielo.

Si è ritenuto interessante affrontare lo studio dell'efficacia sperimentale globale e diffusa in diverse condizioni di cielo: clear sky (cielo sereno), intermediate sky (cielo intermedio) e overcast sky (cielo coperto) secondo la seguente classificazione semplificata:

$$\begin{cases} \text{clear sky} & K_t \geq 0.65 \\ \text{intermediate sky} & 0.2 \leq K_t < 0.65 \\ \text{overcast sky} & K_t < 0.2 \end{cases} \quad (3.59)$$

Nella tabella 3.6 sono riportati i valori dell'efficacia globale i tutte le località.

Tabella 3.6 – Valori medi sperimentali dell'efficacia luminosa globale in diverse condizioni di cielo.

	Clear sky	Intermediate sky	Overcast sky
--	-----------	------------------	--------------

Arcavacata	110.44	111.47	119.36
Geneva	109.83	109.71	110.96
Vaulx-en-Velin	106.02	106.11	112.91
Bratislava	104.75	106.1	112.18
Osaka	109.77	112.18	136.26

3.3.3 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSA.

I modelli considerate per il calcolo dell'efficacia luminosa diffusa sono i seguenti:

Modello di Muneer, Gul e Kubie – (Model 3D)

Questi autori correlano l'efficacia luminosa diffusa all'indice di serenità k_t :

$$K_d = 130.2 - 39.828k_t + 49.975k_t^2 \quad (3.60)$$

Primo Modello di Ruiz, Soler e Robledo – (Model 4D)

E' una correlazione locale, ottenuta per Madrid, del modello di Muneer

$$K_d = 130.17 - 0.0651k_t + 30.829k_t^2 \quad (3.61)$$

Secondo Modello di Ruiz, Soler e Robledo – (Model 5D)

In questo modello gli autori correlano l'efficacia luminosa diffusa all'indice di serenità k_d .
La seguente correlazione è stata ottenuta per Madrid:

$$K_d = 160.61 - 47.05k_d - 196.94k_d^2 \quad (3.62)$$

Terzo Modello di Ruiz, Soler e Robledo – (Model 6D)

In questo modello gli autori correlano l'efficacia luminosa diffusa al seno dell'altezza solare e all'indice di serenità della radiazione diffusa:

$$K_d = 86.97(\sin \alpha)^{-0.143} k_d^{0.218} \quad (3.63)$$

Modello di Robledo e Soler (Model 7D)

In questo modello gli autori correlano l'efficacia luminosa diffusa alla brillantezza di cielo Δ :

$$K_d = 91.07 \times \Delta^{-0.254} \quad (3.64)$$

Modello di Perez, Ineichen, et al. – (Model 8D)

Questi autori correlano l'efficacia luminosa diffusa all'indice di serenità (ε), al contenuto di acqua precipitabile (w), all'angolo zenitale (z) e alla brillantezza (Δ), attraverso la correlazione:

$$K_d = a_i + b_i w + c_i \cos z + d_i \ln(\Delta) \quad (3.65)$$

Dove le costanti a_i , b_i , c_i , d_i , dipendono dall'indice di serenità e sono fornite dagli autori per otto diversi tipi di cielo variabili da cielo molto sereno a cielo completamente coperto.

Anche in questo modello come per l'efficacia luminosa globale, sono utilizzate complessivamente 32 costanti.

La tabella 3.7 mostra i valori degli errori medi percentuali e degli errori quadratici medi tra i dati di efficacia diffusa calcolati dai vari modelli e i dati sperimentali di efficacia diffusa ottenuti in tutte le località considerate, utilizzato sia le costanti correlazioni originali che le costanti ricalcolate per la località in esame al fine di ridurre gli errori.

Tabella 3.7 - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori calcolati di efficacia luminosa diffusa ed i dati sperimentali.

		Arcavacata		Geneva		Vaulx-en-Velin		Bratislava		Osaka	
		$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS
Model 1D		3.7	20.15	-1.4	14.61	2.68	16.92	13.23	17.75	8.74	14.97
Model1D-loc				2.67	15.87	2.38	16.83	1.13	10.62	1.17	11.36
Model 2D		3.67	19.89	-3.09	15.35	2.69	17.03	13.58	17.85	8.04	14.3
Model 2D-loc		-	-	2.54	15.66	2.07	16.88	1.05	10.39	1.14	11.14
Model 3D	Muneer	2.16	19.85	-3.72	14.70	0.09	15.92	10.79	15.62	6.4	14.29
Model 3D-loc		3.66	19.80	1.91	14.32	1.95	15.89	1.09	10.37	0.88	9.64
Modello 4D	Robledo	15.54	27.3	8.18	17.39	12.9	21.38	24.26	27.50	19.4	25.4
Model 5D	Robledo	12.0	24.01	3.29	12.37	12.18	20.13	23.48	25.99	11.96	21.27
Model 5D-loc		2.86	18.84	1.01	10.71	1.26	14.16	0.66	8.22	1.15	11.60
Model 6D	Robledo	11.94	23.96	2.77	14.65	11.10	20.33	23.85	27.2	9.45	18.48
Model 6D-loc		2.69	18.84	-5.86	12.46	-1.18	14.16	0.64	8.1	1.08	11.34
Model 7D	Rob-Sol	11.94	25.46	1.01	10.55	11.05	19.24	22.42	25.38	10.22	19.58
Model 7D-loc		2.96	19.38	1.02	10.62	-1.06	14.11	0.65	8.39	1.14	11.61
Model 8D	Perez	8.23	24.38	-1.78	11.49	5.79	12.86	-	-	5.93	16.39

In tabella 3.8 sono riportati i coefficienti locali delle varie correlazioni.

La tabella 3.8 mostra che l'efficacia luminosa diffusa varia tra 114 e 132 lumen/W. Anche in questo caso i valori sono in linea con quelli calcolati da Littlefair a Garston (120 lm/W) e il valore medio per le varie località USA calcolato da Gillette e Treado (117 lm/W).

Dall'analisi de gli errori riportato in tabella 3.7 si può notare come non ci siano grosse differenze tra i vari modelli soprattutto se sono utilizzate le correlazioni con i coefficienti locali.

Tabella 3.8 – Costanti locali delle correlazioni di efficacia luminosa diffusa.

Modelli	Arcavacata	Geneva	Vaulx-en-Velin	Bratislava	Osaka
Model 1D-loc $K_d = cost$	127.41	132.62	129.49	113.79	118.54
Model 2D-loc $K_d = a + ba$	a=133.6 b=-0.181	a=119.91 b=0.3657	a=133.68 b=-0.2022	a=120.45 b=-0.2105	a=123.02 b=-0.116
Model 3D-loc $K_d = a + bk_t + ck_t^2$	a=90.128 b=149.34 c=-135.7	a=124.03 b=-72.75 c=150.87	a=88.95 b=111.39 c=-70.53	a=121.71 b=-47.43 c=55.17	a=138.9 b=-42.66 c=6.879
Model 5D-loc $K_d = a + bk_d + ck_d^2$	a=162.41 b=-204.95 c=173.70	a=209.803 b=-475.29 c=580.935	a=169.311 b=-269.77 c=280.41	a=135.37 b=-116.35 c=63.22	a=134.24 b=-108.2 c=169.49
Model 6D-loc $K_d = a(\sin \alpha)^b k_d^c$	a=88.37 b=-0.0816 c=-0.185	a=86.92 b=0.01357 c=-0.2861	a=98.457 b=-0.03279 c=-0.1219	a=85.98 b=-0.0512 c=-0.145	a=106.51 b=-0.041 c=-0.059
Model 7D-loc $K_d = a \times \Delta^b$	a=95.769 b= -0.1729	a=85.211 b=-0.2918	a=100.24 b=-0.1256	a=89.41 b=-0.146	a=109.13 b=-0.061

Il modello Model 2d, di correlazione lineare tra l'efficacia e l'altezza solare, fornisce risultati molto vicini al modello Model 1D, di efficacie costanti.

I migliori modelli di calcolo sono, per Arcavacata il modello Model 3D (Muneer); per Ginevra il modello Model 7D (Robledo-Soler); per Vaulx-en-Velin il modello locale Model 7D-loc (Robledo-Soler), per Bratislava il modello locale Model 6D-loc (Robledo), per Osaka il modello Model 3D (Muneer).

A dispetto della sua semplicità, il modello Model 1 ad efficacia costante può fornire una prima stima abbastanza accurate dell'illuminamento diffuse.

In tabella 3.9 sono riportati i valori medi di efficacia luminosa diffusa per i diversi tipi di cielo e per tutte le località.

Tabella 3.9 – Valori medi sperimentali di efficacia luminosa diffusa nelle diverse condizioni di cielo.

	Clear sky	Intermediate sky	Overcast sky
Arcavacata	127.68	127.69	121.16
Geneva	149.15	124.97	116.48
Vaulx-en-Velin	132.03	125.12	114.92
Bratislava	115.76	112.45	116.51
Osaka	110.73	120.21	140.42

E' risultato molto interessante confrontare le efficacie luminose calcolate con questa metodologia con alcuni calcoli teorici di efficacia luminosa in condizioni di cielo sereno ottenuto attraverso il modello spettrale di irradianza solare SMARTS

Messo a punto presso il Florida Solar Energy Center da Guyemard CA e molto utilizzato per applicazioni del genere.

Tale modello calcola la distribuzione spettrale dell'irraggiamento e dell'illuminamento diretto, globale e diffuso al suolo, l'efficacia luminosa della radiazione solare, per atmosfere di diverse composizioni in condizioni di diversa torbidità atmosferica e contenuto di acqua precipitabile.

I calcoli ottenuti dal codice SMARTS mostrano per condizioni estremamente serene un'efficacia globale di 112 lm/W e un'efficacia diffusa di 110.5 lm/W. Tali Valori sono molto vicini ai valori misurati nelle cinque località dove variano da 105 a 110.5 per l'efficacia globale e da 111 a 149 per l'efficacia diffusa.

A dimostrazione che le differenze osservate per le varie località sono dovute a variazioni locali delle caratteristiche dell'atmosfera.

In conclusione è possibile affermare che per l'efficacia globale non si notano grosse differenze tra i vari modelli nelle varie località e i modelli migliori risultano essere quelli a efficacia costanti e i modelli locali di Muneer (Model 2G-loc) e Robledo (Model 4G-loc). Per la loro semplicità e lo stretto range di variabilità si suggerisce di utilizzare sempre il modello Model 1G.

Anche per i modelli di efficacia luminosa diffusa non si osservano grosse differenze tra i vari modelli, si nota comunque una maggiore dispersione ed un aumento degli errori rispetto ai valori di efficacia globale, e per una prima stima, in assenza di misura o possibilità di calcolo con

una certa accuratezza dei parametri meteorologici necessari, si suggerisce di utilizzare ancora il modello ad efficacia costante.

3.5 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA DIRETTA PER TUTTI I TIPI DI CIELO, CIELO SERENO A CIELO INTERMEDIO E CONFRONTI CON I MODELLI DELLA LETTERATURA

La metodologia di verifica dei dati sperimentali applicata nei paragrafi precedenti, è stata utilizzata per effettuare le speculazioni di carattere scientifico sul calcolo dell'efficacia luminosa della radiazione diretta definita come noto, dal rapporto tra l'illuminamento diretto normale e l'irraggiamento diretto normale.

In questo caso sulla scorta dei risultati ottenuti per l'efficacia globale e diffusa, sono stati utilizzati solo alcuni modelli della letteratura, e sono stati ricercati nuovi modelli di calcolo .

La forma matematica delle varie correlazioni, dalla più semplice alle più complesse, rispecchia un po' le esperienze condotte nel campo da vari ricercatori: avendo a disposizione molti dati sperimentali, e avendo la possibilità di calcolare molti dei parametri che generalmente intervengono in questo tipo di calcoli, si è proceduto alla ricerca di nuove correlazioni di calcolo e sono stati verificati 12 diversi modelli di efficacia luminosa.

3.5.1 – GRAFICI DI EFFICACIA LUMINOSA DIRETTA SPERIMENTALI

Prima di effettuare tutte le analisi quantitative dei dati sperimentali vengono diagrammati gli illuminamenti normali e le efficacie dirette in funzione di alcuni parametri al fine di valutarne qualitativamente gli andamenti per le varie località oggetto dello studio.

I dati di riferimento sono i dati medi orari per un anno di riferimento indicato al paragrafo 3.3.

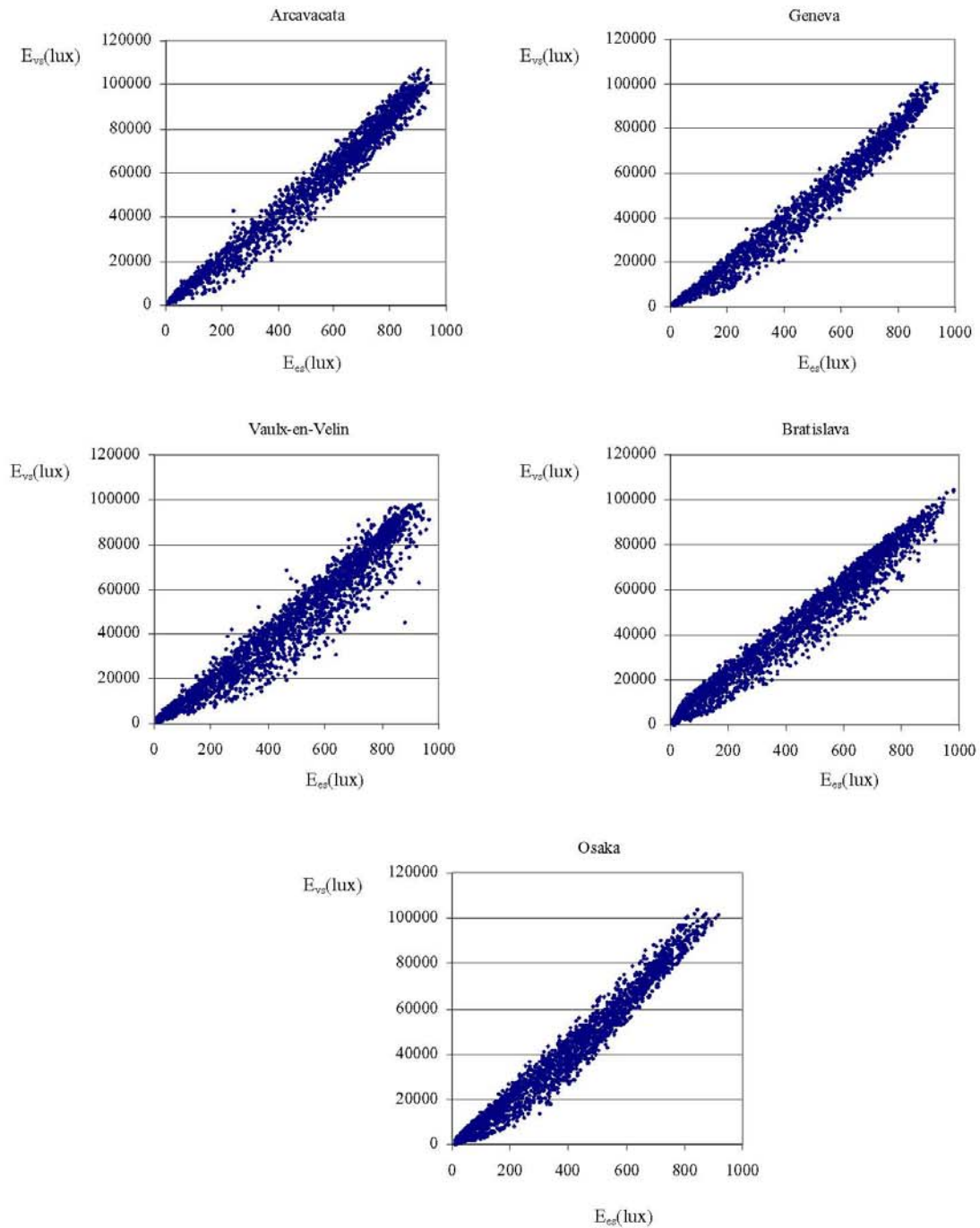


Fig. 14 – Irraggiamento Normale Diretto E_{bn} in funzione dell'Irradianza Diretta G_{bn} .

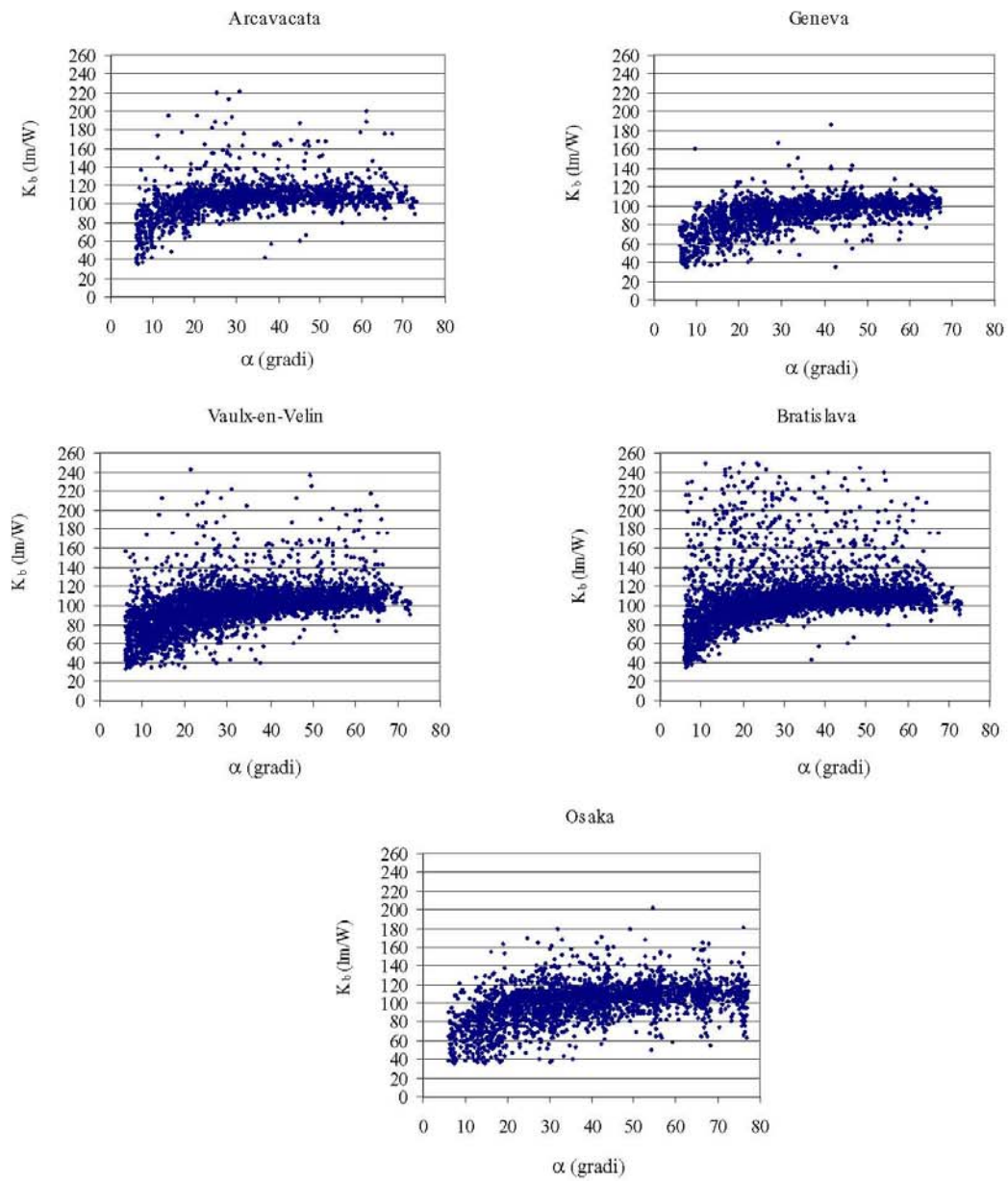


Fig. 3.15 – Efficacia luminosa diretta K_b in funzione dell'altezza solare α per le cinque località.

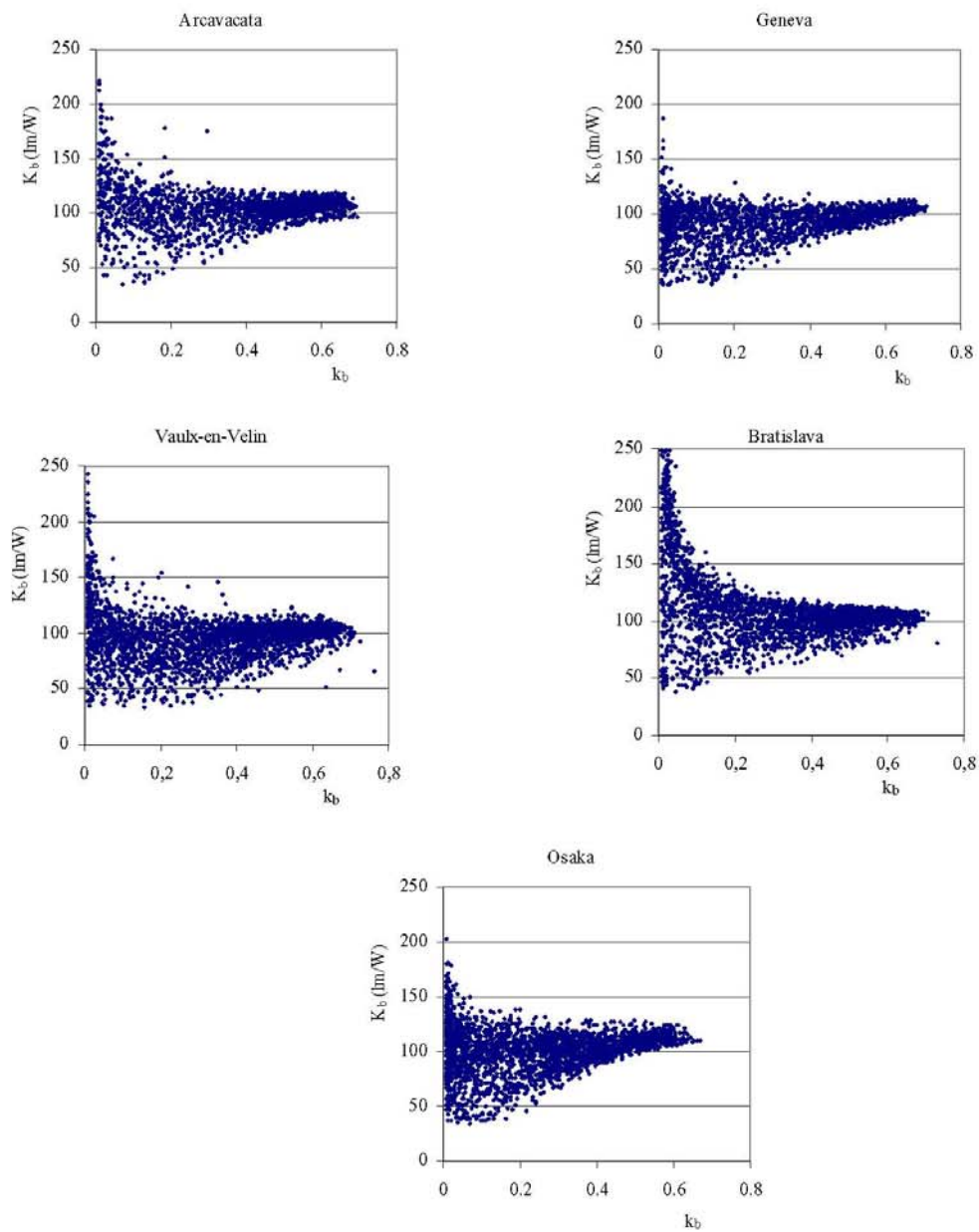


Fig. 3.16 – Efficacia luminosa diretta K_b in funzione dell'indice di serenità della radiazione diretta k_b per le cinque località.

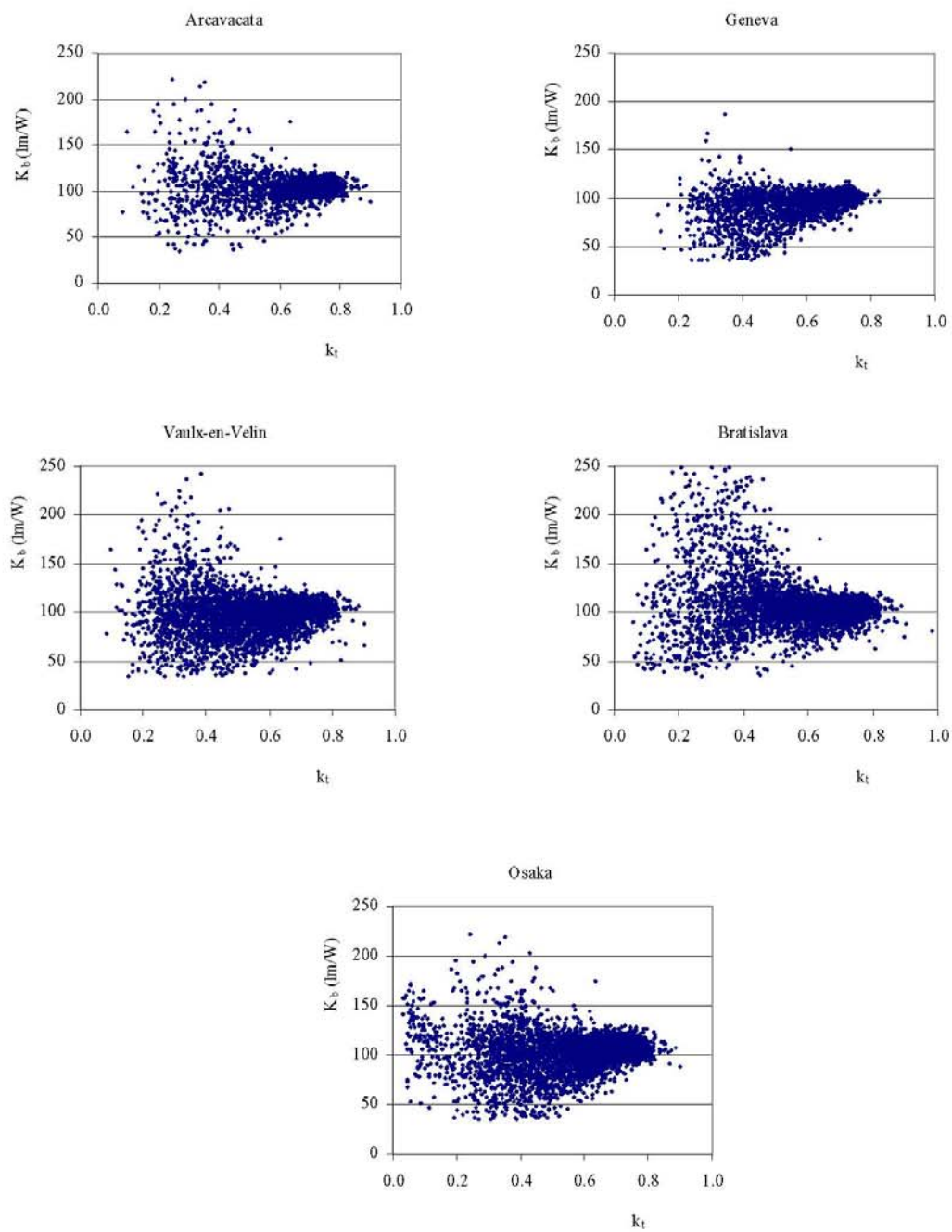


Fig. 3.17 – Efficacia luminosa diretta K_b in funzione dell'indice di serenità k_t per le cinque località.

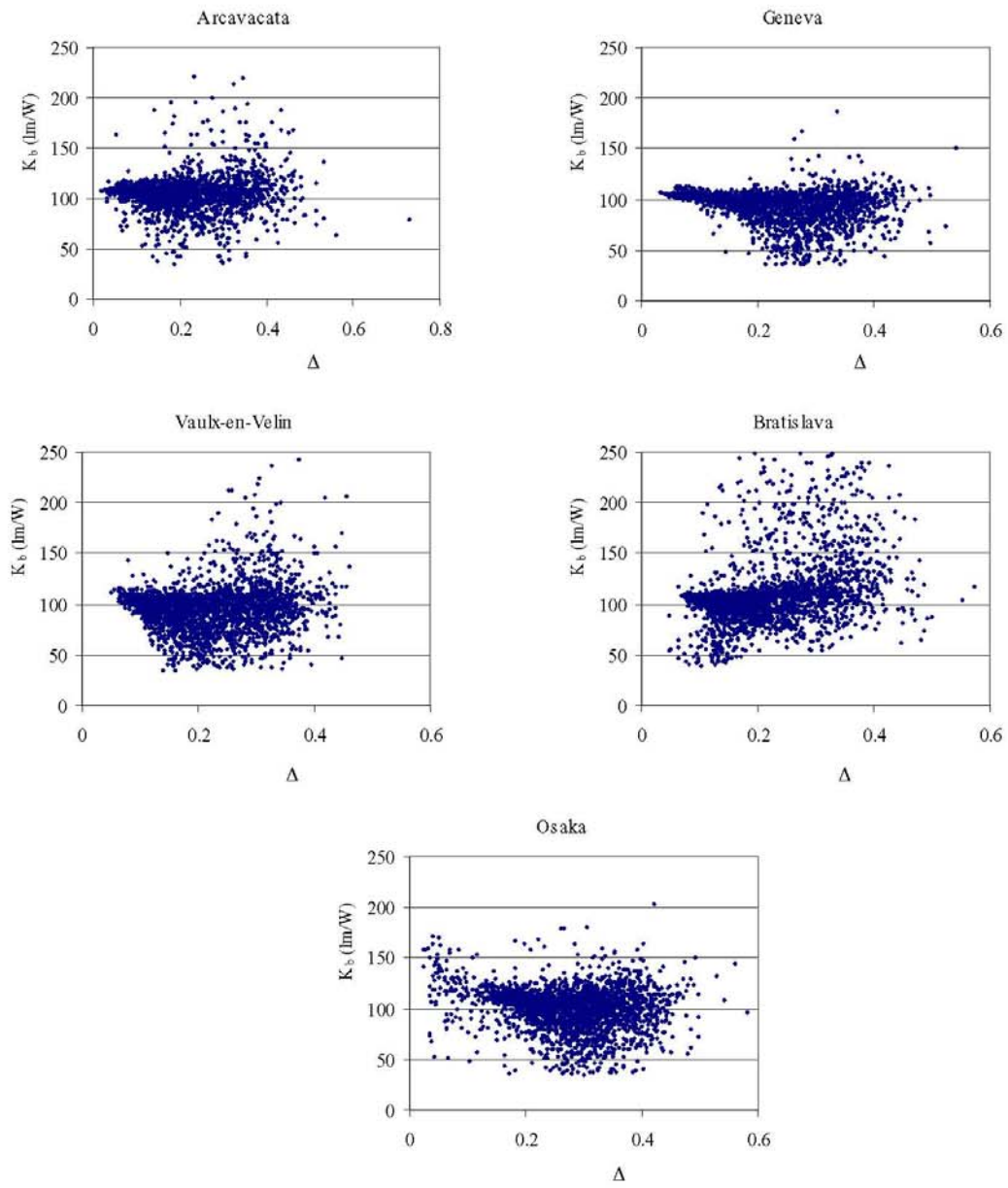


Fig. 3.18 – Efficacia luminosa diretta K_b in funzione della brillantezza di cielo Δ per le cinque località.

La Fig. 3.14 mostra l'andamento dell'illuminamento medio orario sperimentale in funzione dell'irraggiamento normale medio orario sperimentale delle cinque località.

La Fig. 3.15 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa diretta sperimentale rilevata in ciascuna località: è possibile osservare un andamento all'incirca lineare.

La Fig. 3.16 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa in funzione dell'indice di serenità k_b . L'efficacia aumenta al diminuire del valore di tale parametro.

La Fig. 3.17 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa in funzione dell'indice di serenità k_t . I dati, in questo caso mostrano una ampia dispersione e non è ben chiaro il tipo di trend che assume l'efficacia luminosa in funzione di tale parametro.

La Fig. 3.18 mostra l'andamento dell'efficacia luminosa in funzione della brillantezza del cielo Δ , anche in questa Figura si osserva una forte dispersione dei dati ed una non chiara dipendenza dal parametro.

Questi ultimi due parametri sono stati comunque presi in considerazione per poter effettuare delle comparazioni con quanto riportato dalla letteratura.

3.5.2 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA DIRETTA.

I modelli considerate per il calcolo dell'efficacia luminosa diffusa sono i seguenti:

Modello Model 1

E' il più semplice di tutti e assume un valore costante di efficacia:

$$K_b = cost \quad (3.66)$$

Modello Model 2

In questo modello l'efficacia luminosa della radiazione diretta è correlata all'altezza solare da una funzione logaritmica:

$$K_b = a + b \cdot \ln(\alpha) \quad (3.67)$$

Model 3

In questo modello l'efficacia luminosa della radiazione diretta è correlata all'altezza solare attraverso una funzione cubica:

$$K_b = a + b \cdot \alpha + c \cdot \alpha^2 + d \cdot \alpha^3 \quad (3.68)$$

Molti autori hanno correlato l'efficacia diretta ad espressioni polinomiali.

Modello Model 4

In questo modello l'efficacia luminosa della radiazione diretta è correlate all'indice di serenità della radiazione diretta k_b attraverso una funzione cubica:

$$K_b = a + b \cdot k_b + c \cdot k_b^2 + d \cdot k_b^3 \quad (3.69)$$

Modello Model 5

In questo modello l'efficacia luminosa diretta è correlata all'indice di serenità della radiazione globale k_t attraverso una funzione cubica:

$$K_b = a + b \cdot k_t + c \cdot k_t^2 + d \cdot k_t^3 \quad (3.69)$$

Il parametro k_t è stato utilizzato da vari autori per correlare l'efficacia globale e diffusa.

Modello Model 6

Questo modello di efficacia luminosa diretta è stato ottenuto correlando il seno dell'altezza solare e l'indice di serenità della radiazione diretta attraverso la seguente funzione:

$$K_b = a(\sin \alpha)^b k_b^c \quad (3.70)$$

Modello Model 7

Questo modello di efficacia luminosa diretta è stato ottenuto correlando il seno dell'altezza solare e l'indice di serenità della radiazione globale attraverso la seguente funzione:

$$K_b = a(\sin \alpha)^b k_t^c \quad (3.71)$$

Modello Model 8

In questo modello l'efficacia diretta è calcolata dall'equazione:

$$K_b = (a + b \cdot \ln(\alpha))k_b^c \quad (3.72)$$

Modello Model 9

In questo modello l'efficacia diretta è calcolata dall'equazione:

$$K_b = (a + b \cdot \ln(\alpha))k_t^c \quad (3.73)$$

In aggiunta ai modelli da 1 a 9 sono stati scelti tre modelli, tra i più complessi, della letteratura.

Modello di Robledo-Soler – (Model 10)

Questi autori correlano l'efficacia luminosa diretta all'altezza solare e alla brillantezza di cielo attraverso la correlazione:

$$K_d = 134.27(\sin\alpha)^{0.269}e^{-0.0045\alpha}(1.045 - 0.427\Delta) \quad (3.74)$$

Modello di De Souza, Robledo, Soler and Pereira – (Model 11)

E' una variazione del precedente modello:

$$K_d = 143.14(\sin\alpha)^{0.241}e^{-0.0031\alpha}\Delta^{0.023} \quad (3.75)$$

Modello di Perez, Ineichen, et al. – (Model 12)

Questi autori correlano l'efficacia luminosa diffusa all'indice di serenità (ε), al contenuto di acqua precipitabile (w), all'angolo zenitale (z) e alla brillantezza (Δ), attraverso la correlazione:

$$K_d = a_i + b_i w + c_i e^{(5.73z-5)} + d_i \Delta \quad (3.76)$$

Dove le costanti a_i , b_i , c_i , d_i , dipendono dall'indice di serenità e sono fornite dagli autori per

otto diversi tipi di cielo variabili da cielo molto sereno a cielo completamente coperto.

Anche in questo modello come per l'efficacia luminosa globale, sono utilizzate complessivamente 32 costanti.

Tutti i modelli sono stati confrontati con i dati sperimentali delle cinque località. Al fine di valutare la validità dei modelli è stata condotta una analisi degli errori attraverso il calcolo di $\bar{\epsilon}$ ed RMS percentuali.

La Tabella 3.10 riporta i valori di $\bar{\epsilon}$ ed RMS percentuali relativi al confronto tra le efficacie luminose sperimentali e quelle calcolate con i vari modelli utilizzando le correlazioni proposte.

Tabella 3.10 - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori calcolati di efficacia luminosa diretta ed i dati sperimentali in tutte le condizioni di cielo.

	Arcavacata		Geneva		Vaulx-en-Velin		Bratislava		Osaka		
	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	
Model 1	3.25	21.89	17.33	34.55	15.16	34.65	1.84	26.72	8.30	30.84	
Model 2	2.36	16.69	16.70	17.48	13.42	27.79	-0.49	21.23	9.04	26.49	
Model 3	1.92	15.21	16.26	26.87	13.20	27.26	-1.00	20.18	8.77	26.17	
Model 4	2.99	21.46	18.31	36.88	14.50	33.81	1.18	27.14	8.59	33.14	
Model 5	3.05	21.87	17.05	34.07	14.56	34.30	1.70	27.49	8.13	30.59	
Model 6	1.94	16.91	20.15	33.59	14.59	28.94	-0.19	19.83	14.13	31.74	
Model 7	2.46	17.31	18.63	30.50	15.2	29.27	1.21	22.45	12.53	29.64	
Model 8	2.04	16.96	20.32	33.88	14.77	29.19	-0.08	19.84	14.44	32.11	
Model 9	2.19	17.07	18.30	30.08	14.89	28.87	0.86	22.12	12.47	29.55	
Model 10	Ro-Sol	-11.49	18.30	-0.38	18.58	-1.39	21.45	-13.3	23.68	-8.64	22.47
Model 11	deS-Ro	2.25	16.09	17.18	28.38	13.50	27.92	-0.52	20.52	9.40	27.00
Model 12	Perez	-10.60	18.09	1.10	19.84	0.18	25.44	-	-	-6.62	23.41

La tabella mostra che il modello Model 1, ad efficacia costante, presenta errori medi tra il 2% and 17% e RMS tra il 22% ed il 35%. Tali errori sono da considerarsi più che accettabili in considerazione del fatto che trattasi di un modello molto semplice.

“**Model 2**” (dipendenza logaritmica da α) presenta errori medi tra -0.5% e 17% ed RMS tra il 22% ed il 35%; anche in questo caso sono variazioni abbastanza accettabili vista la semplicità della correlazione e complessivamente genera risultati migliori rispetto al “Model 1”.

“**Model 3**” (dipendenza cubica da α) presenta errori medi tra -1% e 16% ed RMS tra il 17%

ed il 28%; complessivamente genera risultati migliori rispetto al Model2.

“**Model4**” (dipendenza cubica da k_b) presenta errori medi tra 1% e 18% ed RMS tra il 21% ed il 37%; complessivamente genera risultati migliori rispetto al Model1.

“**Model6**” (dipendenza dal $\sin\alpha$ e da k_b) presenta errori medi tra 0% e 20% ed RMS tra il 13% ed il 34%; complessivamente genera risultati migliori rispetto a Model4 e Model5 ma peggiori di Model2 e Model3.

“**Model8**” (dipendenza da $\ln\alpha$ e da k_b) e Model 9 (dipendenza da $\ln\alpha$ e da k_i) presenta errori medi tra 0% e 20% ed RMS tra il 17% ed il 34%; complessivamente genera risultati analoghi a Model6 e Model7.

“**Model10**” (dipendenza da $\sin\alpha$, α e da Δ) presenta errori medi tra -13% e 17% ed RMS tra il 18% ed il 24%; complessivamente genera risultati leggermente migliori rispetto a Model 2 e 3.

“**Model11**” (dipendenza da $\sin\alpha$, α e da Δ) presenta errori medi tra -1% e 0% ed RMS tra il 16% ed il 28%;

“**Model12**” (dipendenza α , Δ , ε e ω) presenta errori medi tra -11% e 1% ed RMS tra il 18% ed il 25%; complessivamente genera risultati leggermente migliori rispetto a Model 2 e 3.

La Fig. 3.19 fornisce una visione generale degli errori medi e degli RMS per tutti i modelli: modelli 1-9 presentano errore medi molto vicini tra di loro.

Gli errori percentuali medi più bassi sono generati dal “Model12” di Perez et al. Seguito dal “Model10” di Robledo-Soler e “Model3” (forma cubica).

Gli RMS percentuali più bassi sono generati dal “Model10” seguito dal “Model12 ” e “Model2” (forma logaritmica).

Per Arcavacata il miglior modello è “Model 3”, per Ginevra e Vaulx-en-Velin è “Model 10”, per Bratislava è “Model3” e per Osaka i migliori modelli sono “Model 10” e “Model 12”.

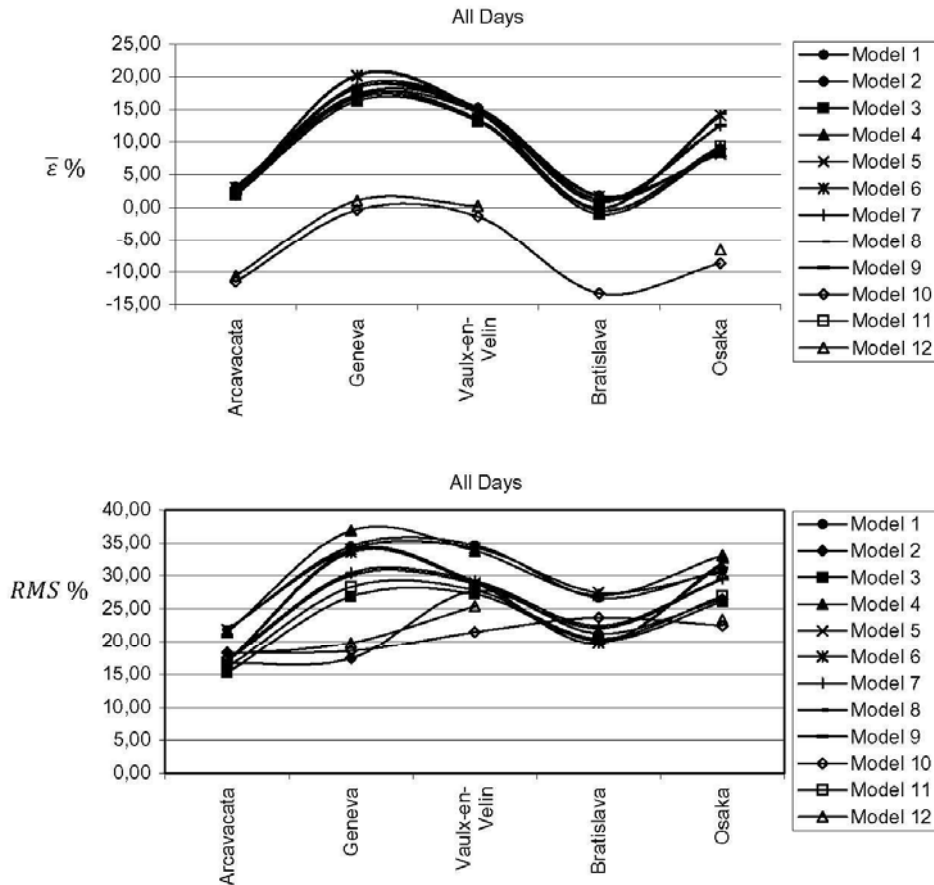


Fig. 3.19 – Errori medi ed errori quadratici medi tra le efficace luminose dirette calcolate e sperimentali per tutti i giorni.

Dopo una prima verifica delle correlazioni proposte e di quelle della letteratura con i dati delle varie località, si è proceduto a ottimizzare le predizioni dell'efficacia luminosa e ridurre al minimo gli errori, usando le stesse equazioni ricalcolando dei coefficienti "locali" ad eccezione del modello di Perez.

In Tabella 3.11 sono riportati i risultati di questi nuovi calcoli ed in Tabella 3.12 sono riportati i risultati dei nuovi calcoli e in Tabella 3 sono riportati e coefficienti locali di tutte le località.

Tabella 3.11 - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori calcolati di efficacia luminosa diretta con coefficienti locali ed i dati sperimentali in tutte le condizioni di cielo.

	Arcavacata		Geneva		Vaulx-en-Velin		Bratislava		Osaka		
	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	
Model 1-loc.	3.25	21.89	4.32	26.62	5.69	29.15	6.77	28.77	5.33	29.33	
Model 2-loc.	2.36	16.69	2.43	17.85	-1.08	18.77	5.73	23.49	3.70	22.73	
Model 3-loc	1.92	15.21	2.16	17.17	3.41	19.87	5.63	22.80	-3.39	14.82	
Model 4-loc	2.99	21.46	3.77	23.99	5.03	28.04	5.56	33.15	4.73	27.53	
Model 5-loc	3.05	21.87	3.75	23.69	5.59	29.02	6.36	30.68	4.67	26.96	
Model 6-loc.	1.94	16.91	1.93	17.29	3.08	20.82	2.88	22.47	3.73	23.01	
Model 7-loc.	2.46	17.31	1.43	17.34	2.67	20.31	4.87	25.65	3.69	22.93	
Model 8-loc	2.04	16.96	2.45	17.66	3.06	20.77	2.45	21.39	3.71	23.04	
Model 9-loc	2.19	17.07	6.00	19.66	3.20	20.53	4.49	24.96	5.72	24.16	
Model 10-loc.	Ro-So	1.95	15.18	2.25	17.08	-1.27	21.37	4.36	21.30	1.35	20.59
Model 11-loc.	deS-Ro	2.00	15.19	2.34	17.07	3.27	20.10	4.85	21.65	3.35	21.32

L'analisi della Tabella 3.11 mostra che gli errori medi e gli RMS sono, come ovvio, ridotti rispetto a quelli della Tabella 3.10. Per Arcavacata i migliori modelli sono "Model 3" e "Model 10"; per Ginevra i migliori modelli sono "Model 3", "Model 10" e "Model11"; per Bratislava i migliori modelli sono "Model 8" e "Model 10" e "Model3"; per Osaka il "Model" 3. In assoluto il modello "Model 3" con i coefficienti ricalcolati fornisce i migliori risultati. La Fig. 3.20 propone una rappresentazione visiva dei risultati.

Tabella 3.12 - Coefficienti locali dei vari modelli per il calcolo dell'efficacia luminosa diretta in tutte le condizioni di cielo.

Models		Arcavacata	Geneva	Vaulx-en-Velin	Bratislava	Osaka
Model 1- loc	$K_b = cost$	104.23	92.36	95.66	109.28	101.27
Model 2- loc.	$K_b = a + b \cdot \ln(\alpha)$	a=57.186 b=13.859	a=28.84 b=18.58	a=20.436 b=21.06	a=63.82 b=13.78	a=34.30 b=19.01
Model 3- loc	$K_b = a + b \cdot \alpha + c \cdot \alpha^2 + d \cdot \alpha^3$	a=52.67 b=3.83 c=-0.0811 d=0.00054	a=36.10 b=3.89 c=-0.0809 d=0.00057	a=49.8 b=2.66 c=-0.0453 d=0.00029	a=65.736 b=3.356 c=-0.0741 d=0.000536	a=48.27 b=2.98 c=-0.0475 d=0.000249
Model 4- loc	$K_b = a + b \cdot k_b + c \cdot k_b^2 + d \cdot k_b^3$	a=126 b=-290.17 c=821.49 d=-648.87	a=90.64 b=-59.38 c=228.76 d=-163.17	a=117.55 b=-317. c=920.6 d=-727.4	a=161.95 b=-556.75 c=1446.1 d=-1132.7	a=108.61 b=-201.13 c=739.12 d=-659..60
Model 5- loc	$K_b = a + b \cdot k_t + c \cdot k_t^2 + d \cdot k_t^3$	a=115.62 b=-50.03 c=50.49 d=-3.98	a=95.71 b=-62.62 c=98.88 d=-4.28	a=115.79 b=-60.52 c=-26.92 d=108.95	a=47.07 b=593.32 c=-1360.5 d=883.38	a=132.47 b=-195.57 c=282.94 d=-80.45
Model 6- loc.	$K_b = a(\sin \alpha)^b k_b^c$	a=110.22 b=0.2023 c=-0.068	a=110.398 b=0.24756 c=0.00916	a=106.52 b=0.298 c=-0.069	a=101.9 b=0.31 c=-0.2	a=113.22 b=0.2295 c=-0.0136
Model 7- loc.	$K_b = a(\sin \alpha)^b k_t^c$	a=110.25 b=0.19 c=-0.146	a=110.97 b=0.245 c=0.0345	a=105.38 b=0.3099 c=-0.180	a=109.07 b=0.287 c=-0.3262	a=111.79 b=0.2347 c=-0.0565
Model 8- loc	$K_b = (a + b \cdot \ln(\alpha))k_b^c$	a=39.45 b=16.51 c=-0.0695	a=30.46 b=18.44 c=0.00747	a=12.35 b=21.89 c=-0.069	a=6.0063 b=22.28 c=-0.2052	a=31.99 b=18.955 c=-0.01355
Model 9- loc	$K_b = (a + b \cdot \ln(\alpha))k_t^c$	a=40.11 b=16.46 c=-0.15	a=31.069 b=18.38 c=0.0264	a=9.29 b=22.31 c=-0.188	a=10.083 b=22.97 c=-0.3499	a=31.706 b=18.61 c=-0.0817
Model 10- loc.	$K_d = 134.27(\sin \alpha)^{0.269} e^{-0.0045\alpha} (1.045 - 0.427\Delta)$	a=150.71 b=0.394 c=0.00728 d=1.117 e=-0.2864	a=139.01 b=0.401 c=0.00526 d=1.1092 e=0.160	a=108.32 b=0.262 c=-0.00012 d=1.00 e=-0.265	a=113.81 b=0.224 c=0.00273 d=0.9438 e=-1.44	a=157.46 b=0.37 c=0.003608 d=1.042 e=0.4295
Model 11- loc	$K_d = a_i + b_i w + c_i e^{(5.73z-5)} + d_i \Delta$	a=189.42 b=0.395 c=0.00734 d=0.0371	a=138.99 b=0.401 c=0.00538 d=-0.0376	a=123.46 b=0.266 c=-0.000034 d=0.04	a=204.78 b=0.212 c=0.00233 d=0.239	a=125.47 b=0.368 c=0.00364 d=-0.1083

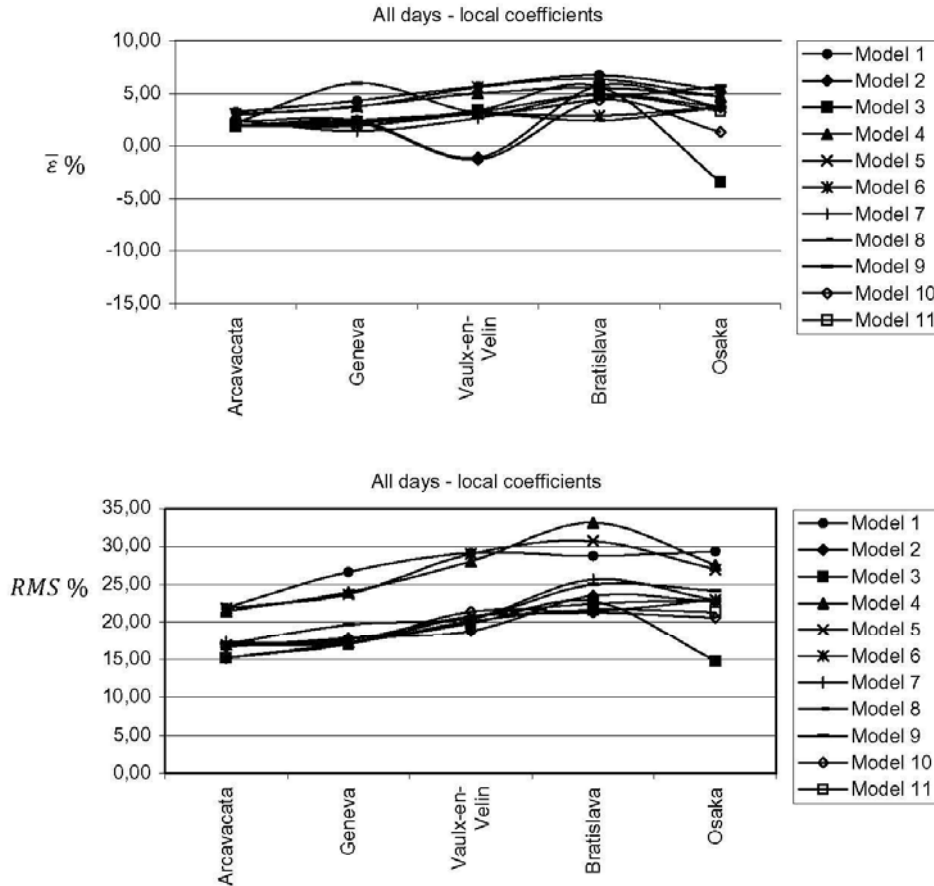


Fig. 3.20 – Errori medi ed errori quadratici medi tra le efficacie luminose dirette calcolate (con coefficienti locali) e sperimentali per tutti i giorni.

3.5.3 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA DIRETTA IN CONDIZIONI DI CIELO INTERMEDIO E CIELO SERENO.

I precedenti risultati hanno riguardato tutti i tipi di cielo; si è provveduto ad effettuare analoghe considerazioni estrapolando dai dati le sole giornate serene ed intermedie validando i principali modelli per le località considerate. La suddivisione adottata è quella dell'eq. 3.59 che sono da considerarsi del tutto convenzionali in quanto nelle prime e nelle ultime ore di un giorno sereno k_t può essere ben al di sotto di 0.65.

La Tabella 3.13 mostra i valori medi di efficacia luminosa diretta per le diverse condizioni di cielo.

Tabella 3.13 – Valori medi sperimentali dell’efficacia luminosa diretta in diverse condizioni di cielo.

	Clear sky	Intermediate sky	All sky
Arcavacata	105.42	102.85	104.23
Geneva	99.53	88.97	92.36
Vaulx-en-Velin	99.49	93.93	95.66
Bratislava	101.24	113.79	109.28
Osaka	107.71	97.18	101.27

La Fig. 3.20 mostra gli andamenti delle efficacie luminosa dirette per clear skies in funzione dell’altezza solare per tutte le località. Si può osservare una minore dispersione dei dati rispetto all’analogia Fig. 3.15 rappresentate tutte le condizioni di cielo.

La Fig. 3.21 mostra le efficacie dirette per cieli intermedi in funzione dell’altezza solare e per tutte le località; in questo caso si osserva una maggiore dispersione dei dati rispetto alla precedente Fig. 3.20: questo è comprensibile in quanto in giornata serena i parametri meteo climatici influenzano di meno il calcolo dell’efficacia.

I Modelli Considerati per effettuare i confronti sono stati “Model 1, 2, 3, 6, 10, 11 e 12” inoltre, per i modelli “Model 10” e “Model 11” sono state utilizzate le correlazioni originariamente calcolate per clear skies dai rispettivi autori.

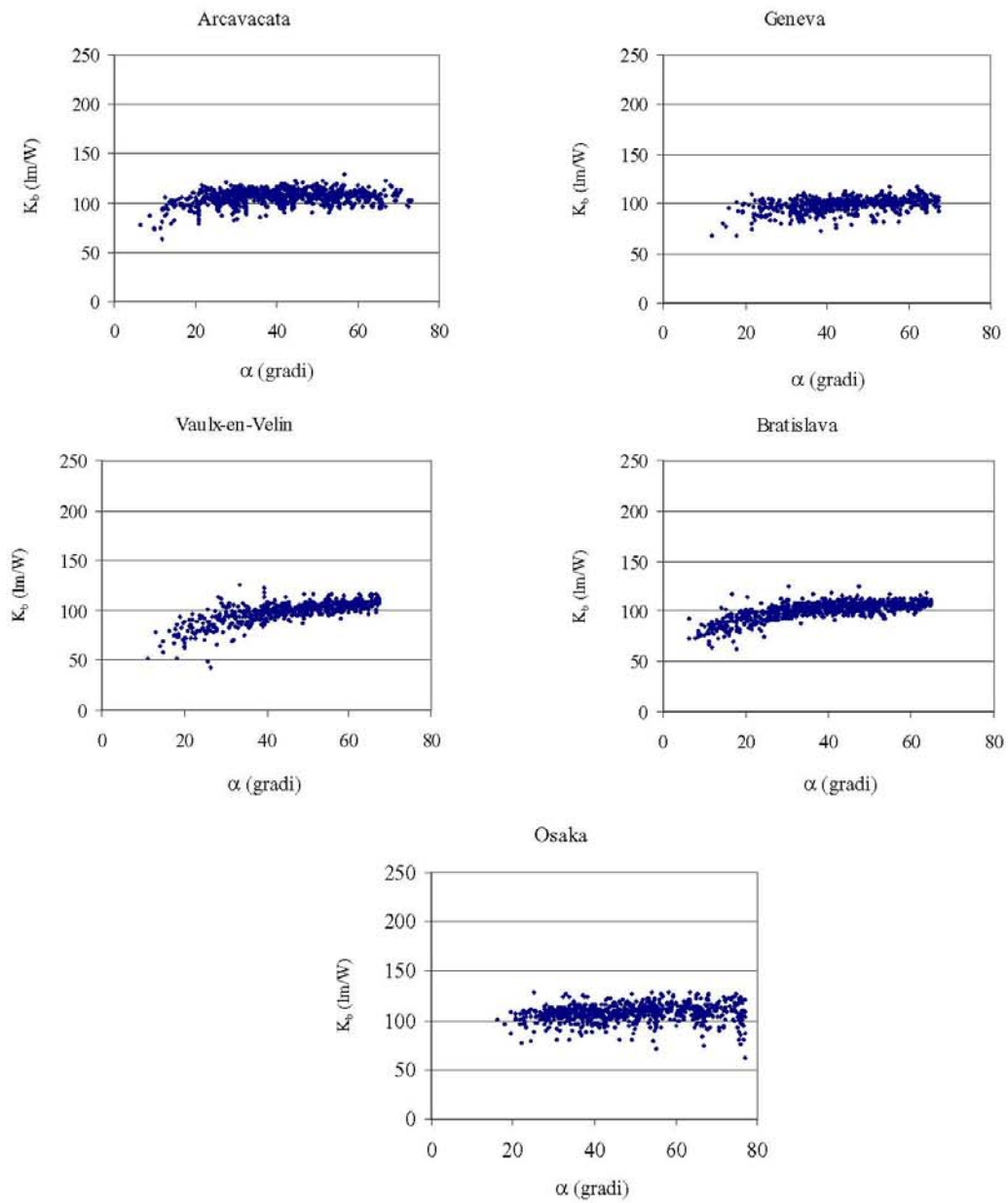


Fig. 3.21 – Efficacia luminosa diretta K_b in funzione dell'altezza solare α per le cinque località in giorni sereni ($k_t > 0.65$).

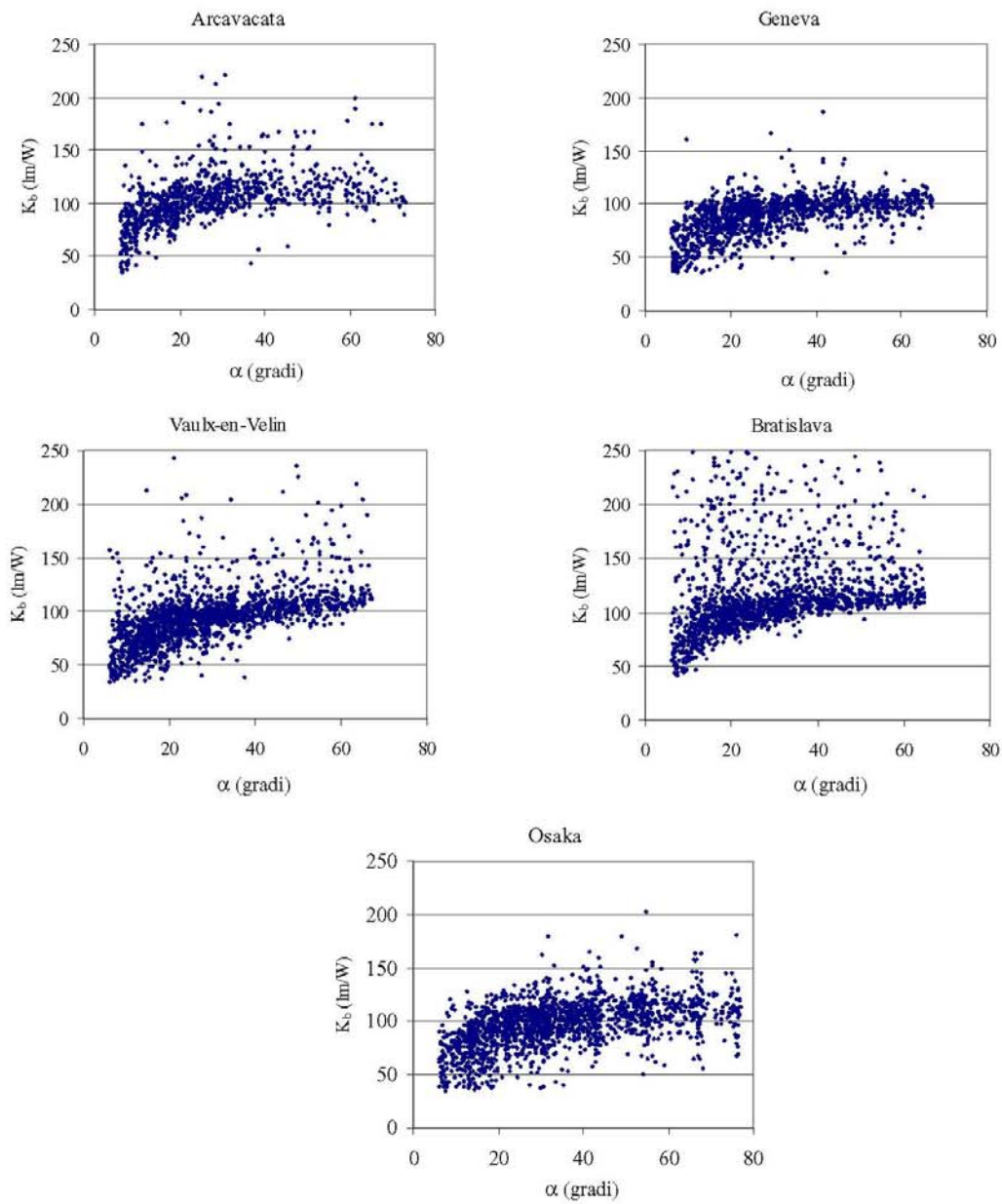


Fig. 3.22 – Efficacia luminosa diretta K_b in funzione dell'altezza solare α per le cinque località in giorni intermedi ($0.2 < k_t < 0.65$).

In Tabella 3.14 è riportata l'analisi degli errori. La simbologia indica un primo calcolo ottenuto per tutti i tipi di giorni (AD) ad Arcavacata, successivamente è stato effettuato un calcolo i soli giorni sereni (CD) ed infine per giorni sereni con costanti locali per tutte le località.

Tabella 3.14 - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori calcolati di efficacia luminosa diretta ed i dati sperimentali in condizioni di cielo sereno.

	Arcavacata		Geneva		Vaulx-en-Velin		Bratislava		Osaka		
	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	
Model 1 AD	-0.60	7.68	5.27	9.65	6.10	15.25	3.84	11.11	-2.56	9.14	
Model 1 CD	0.53	7.77	6.47	10.43	7.32	15.91	5.03	11.68	-1.44	8.99	
Model 1 loc- CD			0.52	7.73	1.28	13.40	0.87	10.16	0.71	9.09	
Model 2 AD	2.71	8.09	10.66	13.04	10.63	15.23	5.65	8.38	2.92	10.26	
Model 2 CD	0.47	7.14	7.02	10.43	7.68	14.62	4.24	9.11	-0.53	8.98	
Model 2 loc- CD			0.41	6.83	0.58	8.62	0.29	5.76	-0.69	9.06	
Model 3 AD	2.64	7.41	9.7	12.74	9.98	16.25	5.35	8.55	1.88	9.59	
Model 3 CD	-0.73	6.67	6.00	9.81	6.36	13.90	2.40	7.15	-1.85	9.00	
Model 3 loc- CD			0.396	6.81	0.48	8.311	0.07	5.47	0.68	8.90	
Model 6 AD	-0.57	8.13	7.72	11.13	7.05	12.35	1.80	6.03	1.19	10.93	
Model 6 CD	0.45	6.93	7.15	10.11	7.84	14.62	4.25	9.08	-1.36	8.47	
Model 6 loc- CD			0.38	6.24	-4.16	9.06	0.32	5.71	0.58	7.88	
Model 10 CD	Ro-So	-7.00	9.34	-0.42	7.18	-0.22	11.31	-4.09	7.27	-8.25	11.59
Model 10 loc- CD		0.46	6.71	0.46	6.83	0.52	8.41	0.34	5.54	0.70	8.94
Model 11 CD	deS-Ro	6.53	9.72	14.4	16.43	14.49	18.94	9.70	11.64	5.67	10.94
Model 12	Perez	-7.21	9.95	-1.08	14.79	1.16	10.48	-	-	-8.62	11.69

Non ci sono grosse differenze tra i vari modelli ed anche il “Model 1” ad efficacia costante fornisce delle buone predizioni sull'efficacia luminosa. Gli errori maggiori li fornisce il “Model11” a dispetto della sua complessità soprattutto per la determinazione dei diversi parametri meteorologici che intervengono nel calcolo.

La Fig. 10 fornisce una rappresentazione visiva di questi errori che risultano tutti più che accettabili, nello specifico i modelli migliori sono “Model 3” e “Model 10”.

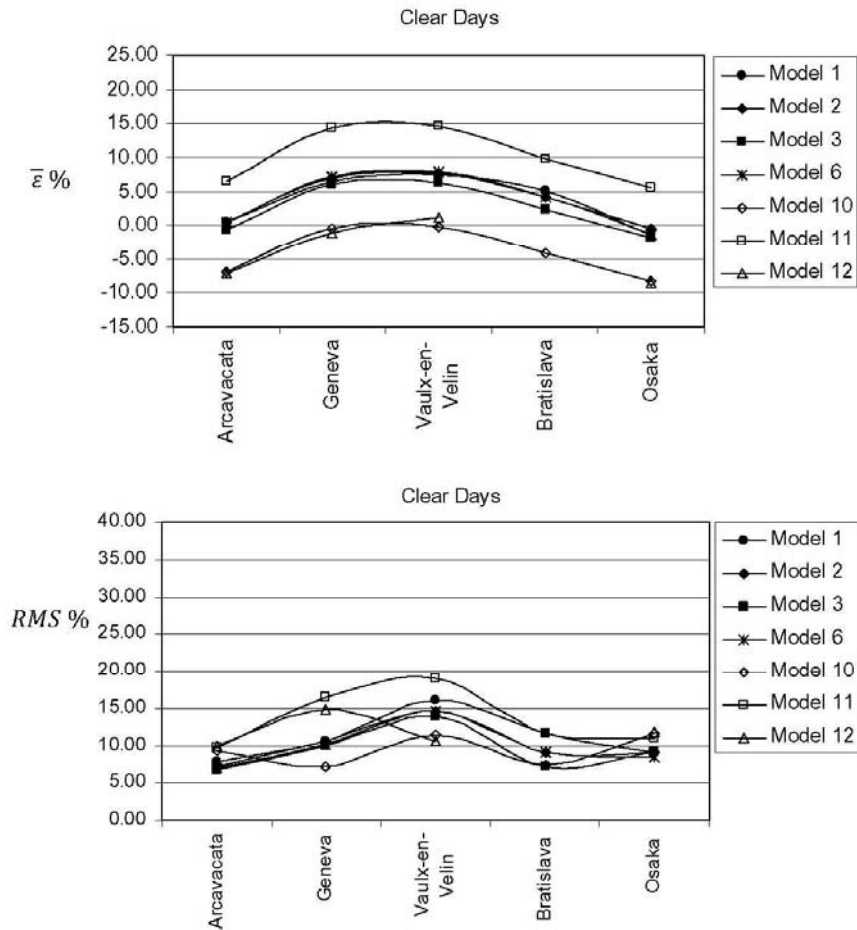


Fig. 3.23 - Errori medi ed errori quadratici medi tra le efficace luminose dirette calcolate e sperimentali per tutti i giorni sereni.

In Tabella 3.15 sono riportati i valori dei coefficienti locali delle correlazioni per clear skies, mentre, in Tabella 3.16 è riportata l’analisi degli errori per giorni intermedi.

La Tabella 3.15 mostra che, il miglior modello per Arcavacata è il “Model3”, per Ginevra e Vaulx-en-Velin i migliori sono “Model 10” e “Model 12”, per Bratislava “Model 6” e per Osaka “Model 10”.

Tabella 3.15 - Coefficienti locali dei vari modelli per il calcolo dell'efficacia luminosa diretta in condizioni di cielo sereno.

	Models	Arcavacata	Geneva	Vaulx-en-Velin	Bratislava	Osaka
Model 1-loc	$K_b = cost$	105.42	99.53	99.49	101.24	107.71
Model 2-loc.	$K_b = a + b \cdot \ln(\alpha)$	a=83.385 b=6.027	a=61.89 b=9.93	a=19.30 b=21.40	a=49.34 b=14.56	a=34.30 b=19.01
Model 3-loc	$K_b = a + b \cdot \alpha + c \cdot \alpha^2 + d \cdot \alpha^3$	a=68.85 b=2.27 c=-0.0443 d=0.00027	a=69.72 b=1.508 c=-0.0263 d=0.00017	a=13.72 b=5.01 c=-0.098 d=0.00067	a= a=57.32 b=2.66 c=-0.0503 d=0.00033	a=103.05 b=-0.2134 c=0.01345 d=-0.0001
Model 6-loc.	$K_b = a(\sin \alpha)^b k_b^c$	a=111.93 b=0.06193 c=0.04635	a=111.14 b=0.0861 c=0.123	a=111.48 b=0.266 c=-0.00915	a=107.34 b=0.179 c=-0.0655	a=124.28 b=0.0688 c=0.151
Model 10-loc.	K_d $= 134.27(\sin \alpha)^{0.269} e^{-0.0045\alpha} (1. (b=0.274$ $- 0.427\Delta)$	a=132.64 b=0.274 c=0.00294	a=106.37 b=0.139 c=0.00031	a=135.38 b=0.416 c=0.00308	a=134.27 b=0.269 c=-0.0045	a=127.5 b=0.18 c=- 0.00215

Tabella 3.16 - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori calcolati di efficacia luminosa diretta in condizioni di cielo intermedio.

		Arcavacata		Geneva		Vaulx-en-Velin		Bratislava		Osaka	
		$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS
Model 1 AD		7.14	29.99	23.64	41.42	19.12	39.03	-0.67	28.47	14.24	36.82
Model 1-loc ID		-	-	5.53	29.55	7.35	32.43	8.43	32.20	6.51	32.32
Model 2 AD		2.19	22.06	19.55	32.75	14.54	31.11	-3.98	23.29	12.70	31.28
Model 2-loc ID		-	-	3.35	20.85	4.36	22.30	6.85	25.56	4.52	25.44
Model 3 AD		1.38	20.02	19.37	31.42	14.41	30.22	-4.16	22.36	12.68	30.99
Model 3-loc ID		-	-	3.13	20.23	4.51	22.46	6.87	25.25	4.47	25.22
Model 6 AD		4.44	22.25	26.03	39.98	17.55	32.46	-2.44	20.55	19.35	36.98
Model 6-loc ID		-	-	3.71	20.93	3.92	23.24	2.52	20.17	4.65	25.77
Model 10 AD	Ro-So	-12.57	22.71	0.93	22.02	-1.06	24.09	-16.9	27.10	-6.23	24.84
Model 10-loc ID	Ro-So	-	-	3.22	20.19	4.48	22.67	5.46	23.13	4.32	24.64
Model 11 AD	deS-Ro	2.44	21.35	20.78	33.35	15.25	31.38	-3.53	22.64	13.79	32.06
Model 11-loc ID	deS-Ro	-	-	3.18	20.11	4.44	22.55	5.52	23.39	4.35	24.52
Model 12	Perez	-13.94	22.35	1.30	23.55	-0.21	29.23	-	-	-3.63	30.55

La Fig 3.24 fornisce una fotografia degli errori : l'errore percentuale medio più basso lo fornisce la correlazione di Perez, seguito da "Model 10" e "Model 2", mentre gli RMS più bassi li forniscono "Model 10" e "Model 12".

Ovviamente se si utilizzano i coefficienti locali per le varie località , tutti gli errori si riducono e le differenze tra i vari modelli diventano minime.

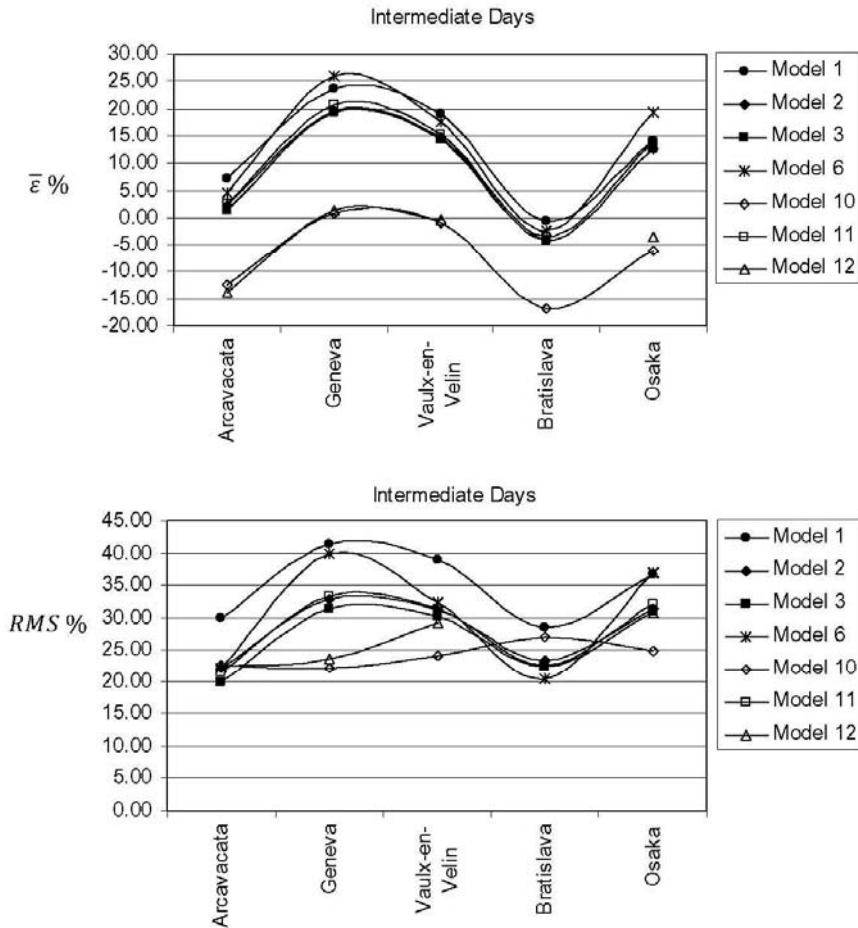


Fig. 3.24 – Errori medi ed errori quadratici medi tra le efficace luminose dirette calcolate e sperimentali per tutti i giorni intermedi.

3.6 – CORRELAZIONI DI EFFICACIA DIFFUSA SU SUPERFICI VERTICALI

Nei precedenti paragrafi sono state studiate le metodologie di calcolo dell'efficacia e quindi indirettamente dell'illuminamento, previa conoscenza dell'irraggiamento, su superficie orizzontale.

Nei calcoli di ingegneria illuminotecnica che faccia uso della luce naturale così come nell'utilizzo dei software di calcolo, che tengano in conto l'aliquota di luce naturale proveniente dall'esterno, è utile conoscere i valori di illuminamento incidenti su superfici verticali.

Nel presente paragrafo saranno verificate con i dati sperimentali diverse correlazioni di calcolo su superfici inclinate a 90° (verticali) e variamente orientate.

Lo studio pur essendo stato condotto per i diversi valori di illuminamento (o efficacie luminose) globale, diretto e diffuso, sarà proposto per la sola aliquota di componente diffusa, in quanto, è quella che realmente viene utilizzata per l'illuminamento naturale di ambienti essendo la componente diretta schermata al fine di evitare fenomeni di sovra riscaldamento degli ambienti o di abbagliamento.

C'è da sottolineare che in letteratura esistono diverse correlazioni di calcolo per superfici orizzontali mentre, solo alcuni autori, sebbene l'argomento sia di maggiore interesse tecnico-applicativo, si sono cimentati con le procedure di calcolo su superficie verticali, soprattutto per la difficoltà oggettiva nel reperire dati sperimentali di irraggiamento ed illuminamento su superfici verticali.

I valori sperimentali di illuminamento diffuso e di irraggiamento diffuso sono stati calcolati con le eqq. 1.18-1.19 utilizzando i valori sperimentali di illuminamento ed irraggiamento globale incidente sulla superficie variamente orientata ed i valori sperimentali di illuminamento ed irraggiamento normali rilevati con l'inseguitore solare.

3.6.1 – DATI DI ILLUMINAMENTO ED EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSI SU SUPERFICI VERTICALI

Prima di effettuare tutte le analisi quantitative dei dati sperimentali vengono diagrammati gli illuminamenti e le efficacie luminose rilevate sperimentalmente.

Anche per le superfici verticali si può osservare una dipendenza lineare tra gli illuminamenti e gli irraggiamenti.

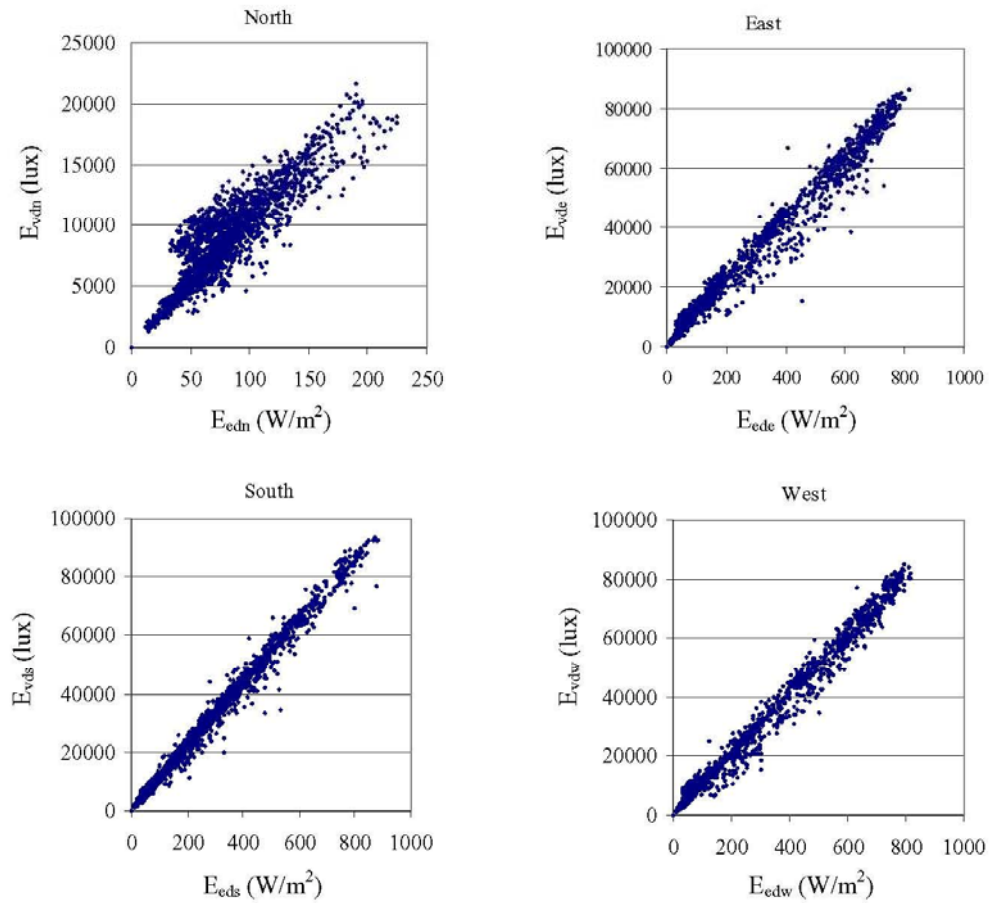


Fig. 3.25 – Illuminamento globale funzione dell'irradianza globale per superfici verticali ad Arcavacata di Rende.

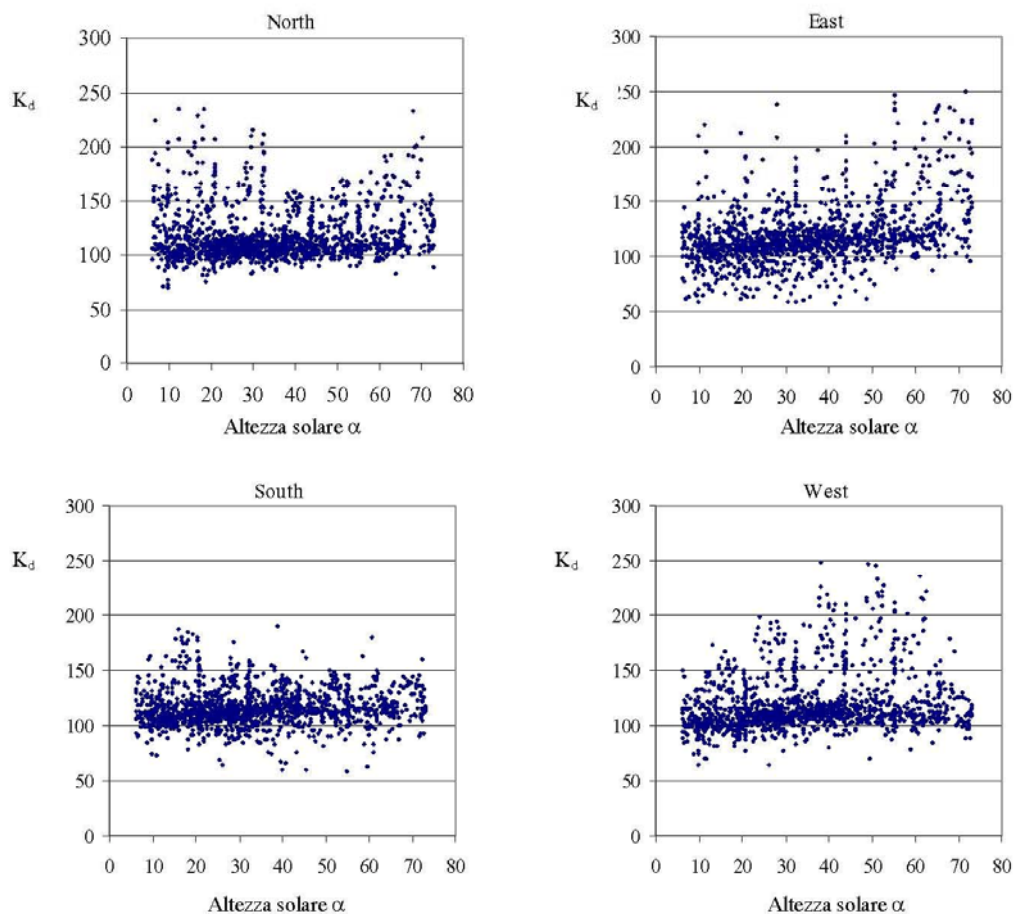


Fig. 3.26 – Efficacia luminosa diffusa in funzione dell'altezza solare per superfici verticali

3.6.2 – MODELLI DI CALCOLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSA.

Modello M1

Per le quattro superfici verticali a fronte dei numerosi dati sperimentali a disposizione, sono state ricavate le seguenti correlazioni semplificate di efficacia diffusa:

$$\begin{aligned}
 K_{d,north} &= 117 \text{ (lm/W)} \\
 K_{d,east} &= 115 \text{ (lm/W)} \\
 K_{d,south} &= 116 \text{ (lm/W)} \\
 K_{d,west} &= 119 \text{ (lm/W)}
 \end{aligned}
 \tag{3.77}$$

Modello M2

Tra i modelli più generali e complessi esistenti in letteratura, quello di Perez et al. rappresenta uno standard.

La particolarità nella metodologia adottata da Perez è di considerare diversi intervalli dell'indice di serenità per la determinazione dei coefficienti nelle correlazioni proposte. La metodologia delle efficacie costanti (*MI*) è stata estesa ed applicata per ciascun intervallo di Perez.

In tabella 3.17 sono riportate efficacie luminose costanti per ciascun intervallo dell'indice di serenità di Perez e ciascuna superficie.

Tabella 3.17- Valori di efficacia luminosa medi orari per Arcavacata di Rende

	ε	North	East	South	West
Bin 1	1-1.065	108	112	112	109
Bin 2	1.065-1.23	105	110	108	105
Bin 3	1.23-1.5	103	108	108	105
Bin 4	1.5-1.95	112	113	111	110
Bin 5	1.95-2.8	126	115	117	121
Bin 6	2.8-4.5	135	124	128	139
Bin 7	4.5-6.2	141	140	127	159
Bin 8	Over 6.2	150	137	130	160

Modello MU

E' il modello già denominato Model 3D di Muneer et al. dell'eq. 3.60, alla quale si rimanda, ottenuto dagli autori per le superfici orizzontali ed in questa sede utilizzato anche per le superfici verticali.

Modello R1

E' il modello già denominato Model 5D di Ruiz et al. dell'eq. 3.62, alla quale si rimanda, ottenuto dagli autori per le superfici orizzontali, e specificatamente per Madrid, ed in questa sede utilizzato anche per le superfici verticali ricalcolando degli opportuni coefficienti locali.

Modello R2

E' il modello già denominato Model 6D di Ruiz et al. dell'eq. 3.63, alla quale si rimanda, ottenuto dagli autori per le superfici orizzontali, ed in questa sede utilizzato anche per le superfici verticali ricalcolando degli opportuni coefficienti locali.

Modello R3

E' il modello già denominato Model 7D di Robledo e Soler. dell'eq. 3.64, alla quale si rimanda, ottenuto dagli autori per le superfici orizzontali, ed in questa sede utilizzato anche per le superfici verticali ricalcolando degli opportuni coefficienti locali.

Modello di Perez et al. – Modelli P1, P2, P3

E' il modello riportato in modo esteso in Appendice 2 applicato in questa sede in tre diverse versioni: in una prima versione (P1) sono stati utilizzati i coefficienti f_{ij} ed i parametri F1 ed F2 forniti da Perez ed ottenuti empiricamente analizzando i dati sperimentali di 10 località degli Stati Uniti e tre in Europa; nella versione definita P2, i coefficienti f_{ij} sono stati ricalcolati per Arcavacata di Rende mettendo insieme tutte le superfici verticali così come fatto da Perez nello sviluppo del suo modello; nella terza versione definita P3 i coefficienti f_{ij} sono ricalcolati utilizzando i dati di Arcavacata per ciascuna superficie separatamente.

Un lavoro simile è stato fatto da Robledo e Soler per Madrid; si è anche provveduto a verificare tale modello per i dati di Arcavacata ma i risultati non sono stati soddisfacenti e non sono stati riportati nel presente lavoro.

Tabella 3.18 – coefficienti di illuminamento f_{ij} per il Modello P2

ε bin	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
<i>(a) Coefficienti di Illuminamento determinati utilizzando i dati sperimentali per tutte le superfici verticali (P2)</i>						
1	0.119	0.377	-0.123	-0.0447	-0.0109	0.0146
2	0.449	0.182	-0.286	0.0956	-0.115	-0.0826
3	0.539	0.0981	-0.293	0.154	-0.225	-0.0814
4	0.645	-0.116	-0.308	0.199	-0.356	-0.0828
5	0.813	-0.452	-0.365	0.233	-0.516	-0.0821
6	0.705	-0.466	-0.316	0.377	-1.174	-0.109
7	0.830	-2.215	-0.238	0.978	-4.96	-0.161
8	3.26	-21.06	-1.11	2.350	-16.810	-0.500

Tabella 3.19 – coefficienti di illuminamento f_{ij} per il Modello P3

ε bin	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
<i>(b) - Coefficienti di Illuminamento determinati utilizzando i dati sperimentali per la sup. Nord (P3)</i>						
1	0.142	0.386	-0.154	-0.0166	-0.0976	-0.00893
2	0.231	0.621	-0.211	0.0688	-0.0814	-0.0676
3	0.862	0.163	-0.570	0.310	-0.252	-0.195
4	1.566	-0.159	-1.012	0.649	-0.483	-0.405
5	1.557	-0.692	-0.891	0.607	-0.792	-0.313
6	2.69	-0.411	-1.819	1.311	-1.457	-0.760
7	1.349	13.44	-2.398	1.107	2.295	-1.026
8	-0.996	9.594	-0.241	0.452	-4.162	0.0694
<i>(c) - Coefficienti di Illuminamento determinati utilizzando i dati sperimentali per la sup. Est (P3)</i>						
1	0.0545	0.698	-0.156	-0.131	0.139	0.0698
2	0.521	0.0737	-0.314	0.0958	-0.103	-0.0808
3	0.624	-0.112	-0.290	0.158	-0.186	-0.111
4	0.664	-0.190	-0.287	0.219	-0.384	-0.0977
5	0.736	-0.587	-0.276	0.101	-0.243	-0.0594
6	0.687	-0.824	-0.219	0.261	-0.798	-0.106
7	0.290	0.0553	-0.0211	0.549	-2.938	-0.0454
8	1.220	-9.830	-0.176	1.496	-12.650	-0.0726
<i>(d) - Coefficienti di Illuminamento determinati utilizzando i dati sperimentali per la sup. Sud (P3)</i>						
1	0.0559	0.189	-0.0366	-0.102	0.172	0.0270
2	0.267	0.0772	-0.135	-0.0898	0.148	0.0399
3	0.404	0.164	-0.224	0.111	-0.213	-0.0298
4	0.462	-0.254	-0.156	0.0256	-0.0971	0.03105
5	0.555	-0.0914	-0.280	0.105	-0.260	0.000774
6	-0.0625	0.809	-0.0011	0.197	-0.528	-0.0537
7	-2.19	13.71	0.0396	0.641	-2.506	-0.292
8	-3.939	33.91	-0.639	0.822	-3.693	-0.532
<i>(e) - Coefficienti di Illuminamento determinati utilizzando i dati sperimentali per la sup. ovest (P3)</i>						
1	0.218	0.539	-0.222	0.0556	-0.0332	-0.0489
2	0.559	0.0676	-0.338	0.112	-0.0540	-0.121
3	0.597	-0.0219	-0.319	0.188	-0.243	-0.116
4	0.785	-0.219	-0.391	0.240	-0.238	-0.173
5	0.990	-0.586	-0.464	0.385	-0.657	-0.191
6	0.776	0.590	-0.553	0.419	-0.617	-0.274
7	0.488	3.121	-0.778	1.120	-3.865	-0.557
8	4.195	-24.45	-2.000	2.750	-17.60	-0.891

Nella Tabella 3.20 sono riportati i coefficienti dei modelli MU, R1, R2 e R3 ricalcolati con i dati di Arcavata; tali coefficienti consentono di adattare le correlazioni originariamente ricavate per superficie orizzontale alle superfici verticali.

Tabella 3.20 – Coefficienti locali per le correlazioni di efficacia luminosa MU, R1, R2 e R3

Modelli	Nord, Est, Sud e Ovest
Modello MU	a=109.77
$K_d = a + b \cdot k_t + c \cdot k_t^2$	b=-20.92
	c=59.97
Modello R1 :	a=128.60
$K_d = a + b \cdot k_d + c \cdot k_d^2$	b=-35.96
	c=-45.19
Modello R2 :	a=105.7
$K_d = a(\sin \alpha)^b k_d^c$	b=0.00324
	c=-0.06746
Modello R3 :	a=105.24
$K_d = a\Delta^b$	b=-0.06849

Dall'analisi dei dati è risultata una scarsa variabilità dei coefficienti in funzione dell'orientazione, per cui si è ritenuto utile fornire lo stesso set di costanti per tutte le orientazioni.

La tabella 3.21 mostra i valori degli errori medi MBD e degli errori quadratici medi RMSD tra i valori sperimentali e calcolati per ciascun intervallo e ciascuna superficie. Nelle ultime due colonne, indicate con A.D., sono stati considerati i dati di tutte le superfici insieme.

La parte finale della tabella si riferisce a tutte le possibili condizioni di cielo $\varepsilon \geq 1$.

Tabella 3.21 – Errore relativo medio MBD ed errore quadratico medio relativo RMSD tra i dati di illuminamento diffuse calcolato con i vari modelli ed i dati sperimentali di Arcavacata per ciascun intervallo di Perez.

Model	North		East		South		West		A.D.		
	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	
1 ≤ ε ≤ 1.065	M1	8.86	13.36	3.74	12.94	4.31	11.70	9.89	14.39	6.70	13.09
	M2	0.82	9.14	1.16	11.98	0.99	10.72	1.00	10.83	0.99	10.66
	MU	0.98	9.47	-2.07	12.14	-2.38	10.71	0.23	9.66	-0.81	10.49
	R1	10.96	15.01	7.51	14.22	7.18	12.66	10.10	14.37	8.94	14.06
	R2	10.40	14.42	7.00	13.98	6.65	12.30	9.54	13.71	8.39	13.60
	R3	10.40	14.45	7.00	14.03	6.65	12.32	9.54	13.73	8.39	13.63
	P1	11.60	23.11	9.98	26.30	10.61	23.29	7.24	25.88	9.86	24.64
	P2	4.88	16.05	1.72	22.34	4.54	19.85	-1.03	23.25	2.52	20.56
	P3	2.01	14.90	2.96	22.39	1.98	18.81	4.21	25.32	2.79	20.35
1.065 ≤ ε ≤ 1.230	M1	12.94	16.54	7.03	16.24	11.10	23.79	15.75	23.01	11.70	19.89
	M2	0.76	9.14	1.23	11.60	2.85	19.63	1.84	14.95	1.67	13.83
	MU	6.94	12.20	3.13	14.90	6.14	21.31	7.74	17.46	5.98	16.46
	R1	8.09	13.64	4.14	15.36	7.16	21.88	8.92	18.94	7.07	17.45
	R2	10.13	14.36	6.16	15.83	9.23	22.59	10.95	19.45	9.11	18.05
	R3	10.06	14.36	6.09	15.87	9.15	22.56	10.88	19.45	9.04	18.06
	P1	8.40	21.67	10.99	26.81	8.21	22.12	9.46	28.73	9.26	24.83
	P2	2.87	17.69	2.94	21.01	0.36	18.15	4.01	24.20	2.54	20.26
	P3	-0.11	16.10	4.22	21.68	2.75	17.98	4.25	23.37	2.77	19.78
1.230 ≤ ε ≤ 1.500	M1	13.77	16.82	7.68	18.68	9.07	20.28	14.91	20.44	11.35	19.05
	M2	0.46	8.59	1.86	17.98	2.05	18.12	1.31	12.41	1.42	14.27
	MU	10.45	14.69	6.50	19.61	6.86	19.54	9.70	17.05	8.37	17.72
	R1	7.72	12.95	3.52	15.99	4.08	18.61	6.93	15.32	5.56	15.71
	R2	3.57	11.75	2.89	20.97	2.98	14.95	4.08	12.75	3.38	15.10
	R3	3.48	11.67	2.82	21.01	2.90	14.88	4.00	12.74	3.30	15.07
	P1	6.95	22.24	12.92	26.52	6.96	21.44	15.19	28.87	10.50	22.26
	P2	2.85	18.28	7.67	23.67	-1.01	17.60	5.87	21.95	3.84	20.37
	P3	1.17	16.96	3.44	21.70	2.67	16.78	5.17	21.03	3.11	19.11
1.500 ≤ ε ≤ 1.950	M1	6.81	13.32	4.39	21.98	5.31	15.80	9.17	15.62	6.42	16.68
	M2	0.94	11.38	2.50	22.30	0.61	16.61	0.37	11.90	1.11	15.54
	MU	8.05	11.38	7.66	25.78	7.51	18.35	8.44	15.72	7.91	17.80
	R1	0.84	11.55	-0.01	19.50	0.22	14.85	1.38	12.58	0.60	14.62
	R2	3.57	11.75	2.89	20.97	2.98	14.95	4.08	12.75	3.38	15.10
	R3	3.48	11.67	2.82	21.01	2.90	14.88	4.00	12.74	3.30	15.07
	P1	13.31	27.85	16.20	27.66	12.37	26.97	18.98	29.28	15.21	27.94
	P2	5.13	21.45	5.01	19.37	-2.11	19.44	5.57	20.24	3.39	20.12
	P3	1.40	18.45	5.05	21.12	3.17	19.07	4.12	20.64	3.43	19.82
1.950 ≤ ε ≤ 2.800	M1	-3.57	16.25	2.96	19.69	-0.62	11.09	1.34	15.96	0.03	15.74
	M2	3.06	17.22	3.29	19.98	2.61	22.14	2.67	16.69	2.90	19.00
	MU	0.53	18.14	9.01	22.68	4.44	14.28	3.54	16.45	4.38	17.88
	R1	-5.72	16.54	2.44	19.88	-2.05	10.77	-2.57	15.53	-1.97	15.68

CAPITOLO III – CALCOLI DI ILLUMINAMENTO CON IL METODO DELLE EFFICACIE LUMINOSE

	R2	-5.40	16.25	2.96	19.69	-0.62	11.09	1.34	15.96	-0.43	15.74
	R3	-5.43	16.45	2.73	19.76	-1.72	10.86	-2.28	15.47	-1.67	15.63
	P1	12.97	27.18	27.25	38.03	15.76	28.83	20.24	31.25	19.05	31.32
	P2	3.86	21.29	8.91	21.17	-4.72	17.20	2.68	20.38	2.68	20.01
	P3	2.55	20.09	2.66	18.26	0.85	14.93	2.21	19.68	2.06	18.24
	M1	-9.10	21.40	-2.88	27.13	-7.73	15.65	-10.52	20.77	-7.55	21.23
	M2	4.22	22.53	4.47	28.17	1.58	14.93	4.11	21.28	3.59	21.72
	MU	-2.69	21.91	5.59	30.32	-0.44	15.61	-6.09	19.35	-0.91	21.79
2.800 ≤ ε ≤ 4.500	R1	-7.06	21.05	1.05	28.29	-4.86	14.79	-10.09	20.50	-5.24	21.15
	R2	-8.53	21.31	-0.55	27.75	-6.35	15.21	-11.50	21.02	-6.73	21.34
	R3	-8.59	21.30	-0.61	27.77	-6.41	15.19	-11.55	21.06	-6.79	21.33
	P1	6.59	28.33	29.54	43.41	18.83	36.76	18.74	33.33	18.42	35.45
	P2	3.24	23.32	8.62	22.59	-4.26	19.27	2.96	22.39	2.64	21.89
	P3	2.79	21.68	3.46	19.47	0.66	15.44	1.45	20.96	2.09	19.38
	M1	-13.05	23.49	-5.82	37.49	-7.39	14.64	-20.31	29.19	-11.64	26.20
	M2	3.03	23.32	4.00	36.09	-0.06	12.84	6.33	28.61	3.32	25.21
	MU	-5.8	22.47	3.51	40.54	1.06	13.71	-15.40	26.29	-4.15	25.75
4.500 ≤ ε ≤ 6.200	R1	-8.85	22.26	0.47	39.63	-2.07	13.58	-17.85	28.10	-7.07	25.89
	R2	-10.42	22.60	-1.25	38.95	-3.75	13.73	-19.26	28.75	-8.67	28.50
	R3	-10.50	22.64	-1.33	38.97	-3.84	13.75	-19.33	28.81	-8.75	26.04
	P1	-13.64	26.64	14.77	41.39	8.12	30.08	1.04	30.22	2.57	32.08
	P2	2.44	22.41	10.30	25.39	-2.75	17.77	-0.95	19.24	2.26	21.30
	P3	2.36	21.36	4.03	22.87	-0.51	14.32	1.24	19.3	1.78	19.46
	M1	-13.91	25.37	1.59	39.33	-6.42	14.09	-19.02	32.82	-9.44	27.90
	M2	5.49	25.43	8.89	34.87	1.86	12.00	1.03	29.79	4.31	25.52
	MU	-7.64	23.48	9.98	39.99	1.27	12.75	-15.07	30.02	-2.86	26.56
ε ≥ 6.200	R1	-8.39	24.12	10.17	44.41	0.46	13.69	-15.21	32.19	-3.24	28.60
	R2	-9.21	24.30	9.33	44.45	-0.41	13.86	-15.90	32.55	-4.04	28.79
	R3	-9.24	24.36	9.34	44.66	-0.45	13.93	-15.91	32.64	-4.06	28.89
	P1	-25.1	29.70	-9.50	42.39	7.61	48.37	-19.43	33.90	-11.60	38.59
	P2	0.09	13.88	12.85	28.80	2.76	22.62	-7.67	18.27	2.01	20.89
	P3	-0.12	12.56	2.94	20.29	-0.44	13.63	1.59	17.88	0.99	16.09
	M1	2.66	17.08	1.61	21.50	1.50	15.04	3.76	18.84	2.38	18.11
	M2	1.62	13.69	2.37	19.14	1.35	14.97	1.91	15.38	1.81	15.79
	MU	1.82	14.61	3.23	21.03	1.10	14.71	1.31	16.58	1.86	16.73
ε ≥ 1	R1	2.40	16.61	3.11	21.77	2.12	14.38	1.72	17.56	2.33	17.58
	R2	2.65	16.73	3.35	21.80	2.37	14.68	2.00	17.94	2.59	17.78
	R3	2.65	16.73	3.35	21.80	2.37	14.66	2.00	17.94	2.59	17.78
	P1	7.51	25.72	17.93	33.79	12.78	28.60	12.84	29.78	12.76	29.47
	P2	3.26	19.79	4.24	22.20	-0.98	18.84	2.02	21.86	2.13	20.67
	P3	1.97	18.28	3.42	20.73	1.53	16.80	3.09	21.85	2.50	19.41

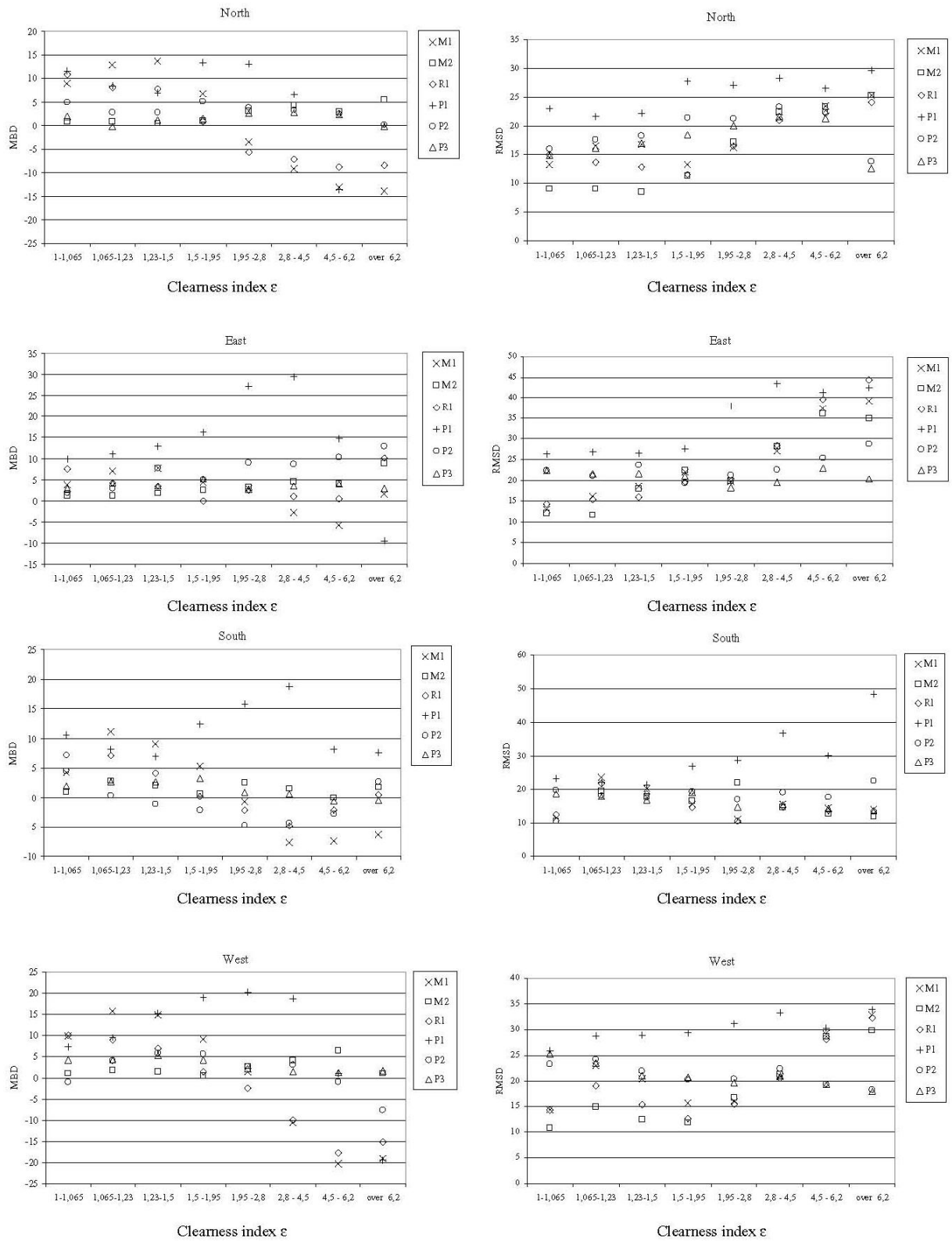


Fig. 3.27 – errori MBD e RMSD dei modelli di efficacia diffusa su superfici verticali in funzione dell'indice di serenità.

In Fig. 3.27 è riportata l'analisi degli errori per tutte le superfici, i valori dei modelli Mu, R2 ed R3 non sono stati riportati per una migliore comprensione grafica.

Tutti i migliori risultati sono stati riassunti nella Tabella 3.22, la quale, mostra una elevata presenza dei modelli M2 e P3; per cielo coperto $1 \leq \varepsilon \leq 1.230$, M2 è il modello migliore, mentre, per cieli sereni $\varepsilon \geq 4.5$ il modello migliore è P3 ad eccezione della direzione sud.

Table 3.22 – Modelli migliori per ciascun intervallo ε .

	ε	North	East	South	West
Bin 1	1-1.065	M2	M2	M2	Mu
Bin 2	1.065-1.23	M2	M2	P2	M2
Bin 3	1.23-1.5	M2	M2	P2	M2
Bin 4	1.5-1.95	M2	R1	R1	M2
Bin 5	1.95-2.8	Mu	P3	P3	M1
Bin 6	2.8-4.5	P3	P3	M2	P3
Bin 7	4.5-6.2	P3	P3	M2	P2
Bin 8	Over 6.2	P3	P3	M2	P3

Dall'analisi della tabella 3.21 si può notare che i modelli R1, R2 e R3 generalmente forniscono risultati molto vicini tra di loro. I risultati peggiori li fornisce il modello P1, ovvero il modello di Perez con i coefficienti originari; un grosso miglioramento si ottiene con il modello P2 ricalcolando i coefficienti, ed un ulteriore piccolo affinamento si ottiene ricalcolando i coefficienti per ciascuna superficie.

Nella Figura 3.28 sono riportati i risultati per tutti i tipi di cielo e tutte le orientazioni. Analizzando l'istogramma si nota come i vari modelli con i coefficienti ricalcolati forniscono risultati simili ad eccezione del modello P1 ed i risultati migliori li forniscono i modelli M1 e MU.

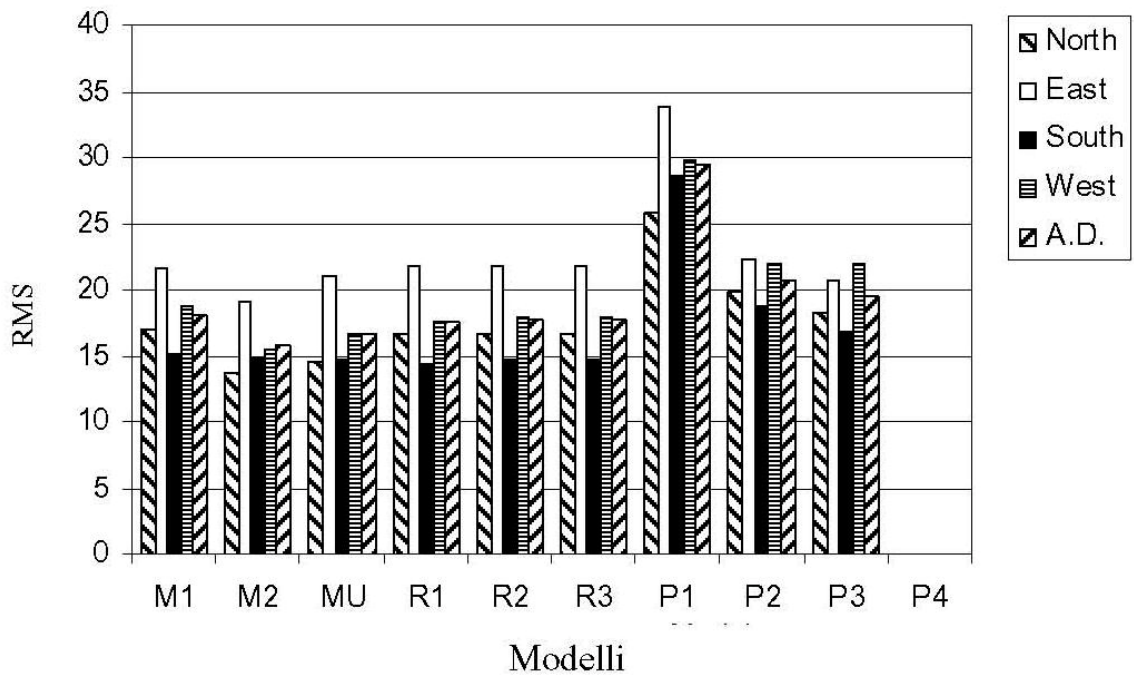
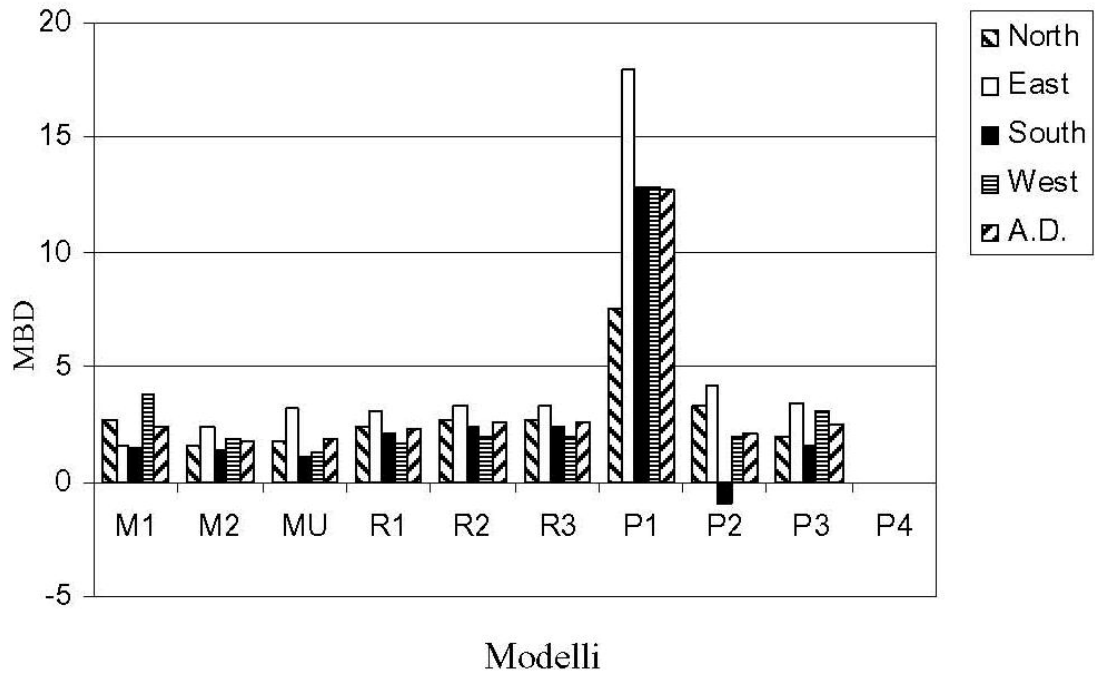


Fig. 3.28 – Istogramma per gli errori MBD and RMSD per tutti i modelli in tutte le condizioni di cielo.

In conclusione è possibile affermare che i modelli ad efficacia costante sono confrontabili con modelli molto più complessi che comunque richiederebbero una serie di calcoli e conoscenza di parametri meteo climatici, non sempre rilevati sperimentalmente, e spesso risultano essere i migliori modelli.

Sulla stessa linea precedenti metodologie è stato condotto il calcolo delle efficacie globali dirette e diffuse, confrontando i modelli ad efficacia costante con il modello di Perez a coefficienti ricalcolati per le varie orientazioni, i vari tipi di cielo e per le località di Arcavacata ed Osaka per le quali si hanno a disposizione i dati di illuminamento sperimentale verticali: per maggiori approfondimenti si rimanda alle pubblicazioni prodotte su rivista internazionale redatte nel corso dello svolgimento del presente Dottorato di Ricerca.

CAPITOLO IV

CALCOLI DI ILLUMINAMENTO DIFFUSO CON IL METODO DELLE LUMINANZE

L'attrezzatura sperimentale disponibile presso il dipartimento di Meccanica sezione Fisica Tecnica per la misura dell'irraggiamento ed illuminamento solare, è stata potenziata, nell'ambito del progetto PRIN 2005, con l'acquisto di uno skyscanner per la misura della distribuzione della luminanza e della radianza del cielo.

Lo strumento, modello MS-321LR della EKO Instruments Giappone, conforme alle indicazioni CIE 108 1994, acquisisce i dati sperimentali di 145 punti della volta celeste con un angolo di apertura del sensore di 11° secondo il modello proposto da Tregenza; la durata della scansione è di 4 minuti con una frequenza di 10 minuti, il range di misura luminanza è di 0-50 kcd/m² ed il range di misura radianza è di 0-300 W/m²sr.

I dati sono disponibili, in modo continuo, dal mese di luglio 2007, e, nel presente capitolo sono presentate la metodologia di integrazione delle luminanze per la determinazione dell'illuminamento diffuso e le convalide tra i modelli di distribuzione della luminanza, esistenti in letteratura, e i dati sperimentali di irraggiamento ed illuminamento sul piano orizzontale e sulle 4 superfici verticali orientate secondo gli assi cardinali, e i dati di radianza e luminanza della volta celeste.

Il confronto dei metodi di integrazione della luminanza e della radianza della volta celeste è stato effettuato con i dati di illuminamento ed irraggiamento misurati in modo "diretto" con piranometri e luxmetri installati presso il nostro dipartimento.

L'illuminamento diffuso così ottenuto costituisce una misura di tipo globale, più esatta della misura ottenuta per integrazione dei 145 valori puntuali di luminanza influenzati dalla distribuzione delle nuvole. La stima dell'illuminamento ottenuto per integrazione ha il vantaggio di permettere il calcolo dell'illuminamento su una qualunque superficie, comunque inclinata ed orientata, con la limitazione dovuta al numero discreto di punti in cui viene suddivisa la volta celeste.

Nel presente lavoro viene proposta una metodologia per la correzione dei valori ottenuti per integrazione dei dati di luminanza della volta celeste.

4.1 – DISTRIBUZIONI DI LUMINANZA ED IRRADIANZA.

La distribuzione di luminanza del cielo dipende molto dalle condizioni locali del tempo e varia con la posizione del sole da una scansione all'altra.

Questo rende l'analisi della distribuzione di luminanza molto complicata.

Cionondimeno, si è osservato, condizioni meteo climatiche simili hanno distribuzioni di luminanza simili ed i corrispondenti parametri ed indici meteo climatici variano all'interno di certi range.

Per questa ragione è possibile utilizzare due diversi approcci: il primo prevede la misura attraverso lo skyscanner delle distribuzioni di luminanza della volta celeste e la creazione di database contenenti svariate centinaia di migliaia di dati; il secondo è quello di generare di volta in volta idonee distribuzioni di luminanza che causano degli illuminamenti simili a quelli delle distribuzioni "reali" attraverso l'uso di correlazioni della letteratura e di idonei parametri ed indici meteo climatici.

Il primo approccio rappresenta una fotografia reale delle distribuzioni presenti in una data località e presenta lo svantaggio di doversi dotare di uno sky scanner, il secondo introduce delle approssimazioni ma consente di effettuare delle prime stime sui livelli di illuminamento esterni di una data località.

Nell'ambito della presente tesi si è voluto mettere in evidenza le problematiche relative alla misura diretta, delle distribuzioni di luminanza, ed al suo utilizzo, anche se per completezza è riportata una descrizione delle metodologie di calcolo delle distribuzioni di luminanza secondo la letteratura e gli standard CIE.

Una immediata classificazione che si usa effettuare nei calcoli di illuminamento è la suddivisione della volta celeste in: perfettamente serena (clear sky), perfettamente coperta (overcast) e parzialmente nuvolose (partly cloudy sky). Nelle Figg. 4.1, 4.2 e 4.3 sono riportate le distribuzioni di luminanza per queste tre tipologie di cielo misurate in diversi periodi dell'anno.

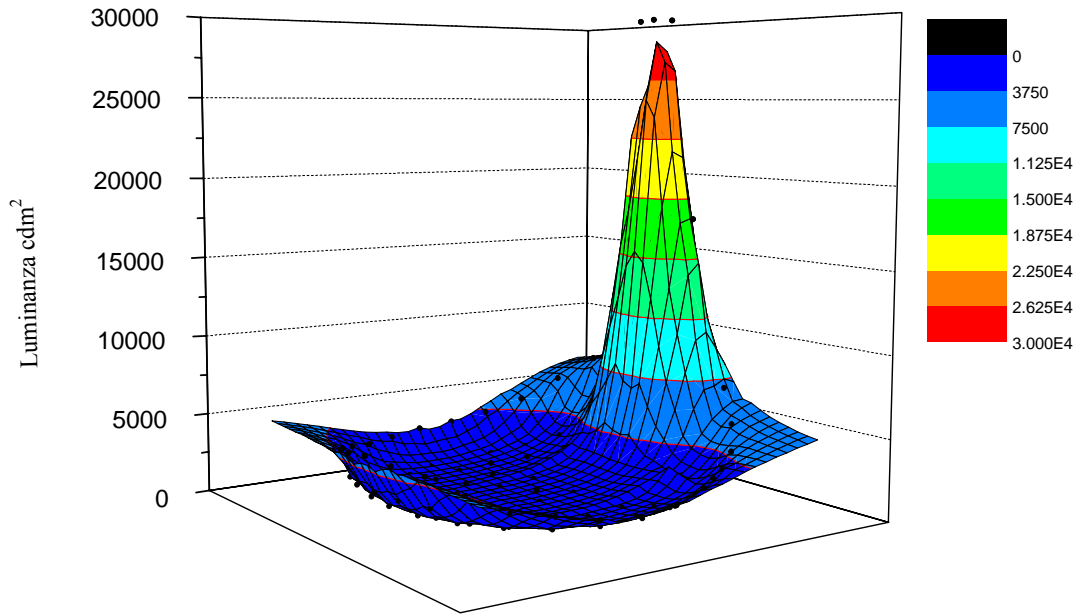


Fig. 4.1 – Distribuzione della luminanza e della radianza del cielo rilevata dallo sky scanner in una giornata serena.

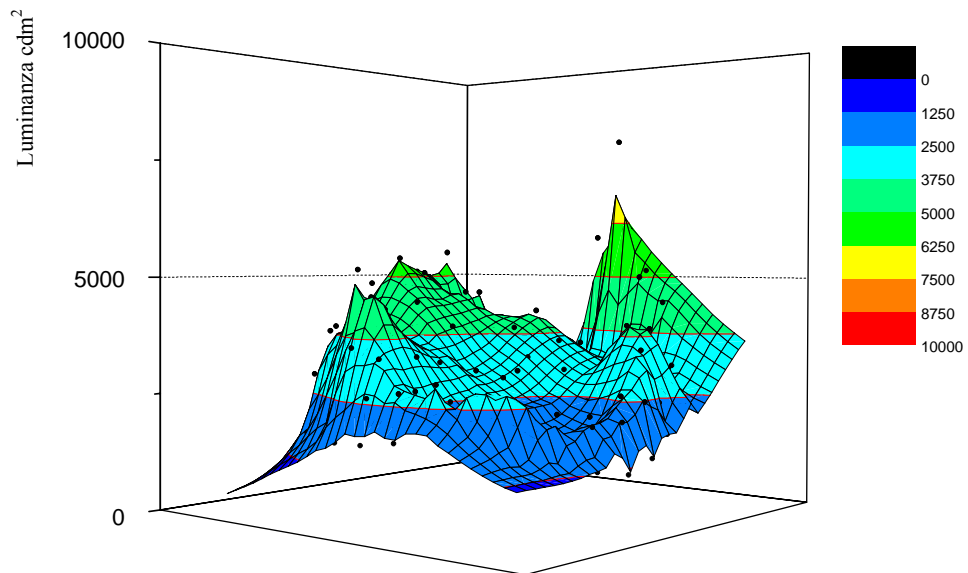


Fig. 4.2 – distribuzione della luminanza e della radianza del cielo rilevata dallo sky scanner in una giornata intermedia.

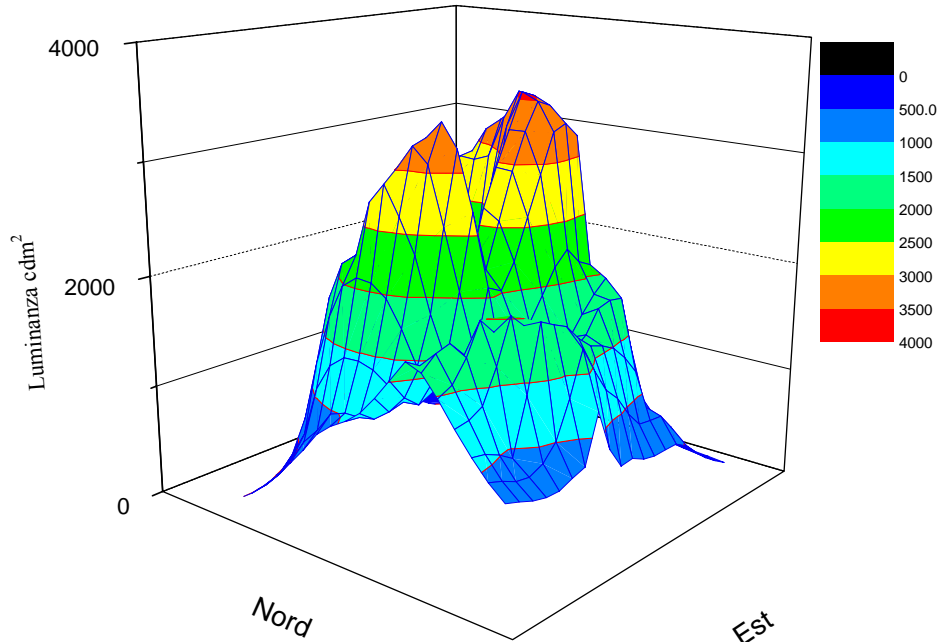


Fig. 4.3 – distribuzione della luminanza e della radianza del cielo rilevata dallo sky scanner in una giornata nuvolosa.

I grafici delle Figg. 4.1, 4.2 e 4.3 sono stati ottenuti selezionando delle singole scansioni dello strumento.

I cieli completamente sereni sono molto importanti per la stima dei carichi termici massimi di climatizzazione negli edifici in concomitanza con l'utilizzo della luce naturale, soprattutto per quelle località ad alta frequenza di giorni sereni.

La distribuzione di luminanza dipende dalla posizione del sole nella volta celeste e dai fenomeni di scattering della luce in atmosfera.

Il picco di luminanza è posizionato nelle vicinanze del sole e decresce rapidamente all'aumentare della distanza dal sole.

Dalla distribuzione sperimentale riportata in Fig 4.1, per la quale è stata scelta una scansione in prossimità del mezzogiorno solare, è possibile osservare come vicino al sole vi siano valori di luminanza centinaia di volte superiori ai valori degli altri elementi di cielo (tali valori sono stati comunque limitati a 30 kcdm^{-2}).

I valori più bassi di luminanza si trovano in prossimità dell'orizzonte in direzione nord mentre, per la stessa elevazione, il più alto valore è in direzione sud: ciò a dimostrazione che in giornate serene la distribuzione di luminanza dipende fortemente dalla posizione del sole.

Si osservi come per il particolare caso in esame la linea dell'orizzonte presenti valori di luminanza leggermente più alti, rispetto agli altri valori a bassa altezza solare, a testimonianza della presenza della "brillanza dell'orizzonte" descritta da Perez.

I cieli parzialmente nuvolosi possono essere considerati tutti i tipi di cielo ad esclusione dei cieli perfettamente sereni e perfettamente nuvolosi.

Corrispondono alla condizione con frequenza prevalente e quindi i più considerati per la progettazione.

Tuttavia rappresentano la categoria più difficile da trattare si procedendo con l'integrazione delle misure dirette sia attraverso l'utilizzo di distribuzioni di luminanza simulate dai modelli: in entrambe i casi si introducono forti errori computazionali a causa della forte variabilità tra un punto ed un altro della volta celeste.

I cieli completamente coperti spesso forniscono le peggiori condizioni per la progettazione legata alla luce naturale ed all'analisi delle relative prestazioni.

Sono caratterizzati da una copertura nuvolosa uniforme del cielo che impedisce completamente la visione del cielo.

E' possibile osservare dalla Fig. 4.3 come per il cielo completamente coperto non esistono fenomeni di disturbo sulla distribuzione di luminanza intorno alla posizione del sole.

Il picco di luminanza si ha in prossimità dello zenit con un valore intorno a 4000 kcdm^{-2} mentre il valore più basso è all'orizzonte con valori variabili tra circa 300 e circa 800 kcdm^{-2} ; questa variabilità nei valori di luminanza all'orizzonte è da attribuirsi ai differenti valori di riflessione nei dintorni dell'orizzonte a basse elevazioni della scansione, tali differenze diminuiscono in corrispondenza delle diverse orientazioni all'aumentare dell'elevazione della scansione.

Nell'Figg. 4.4 e 4.5 sono riportati degli ulteriori esempi di distribuzione della distribuzione di luminanza (cd/m^2) e della radianza ($\text{W/m}^2\text{sr}$) del cielo rilevata dallo sky scanner in una giornata serena e nuvolosa.

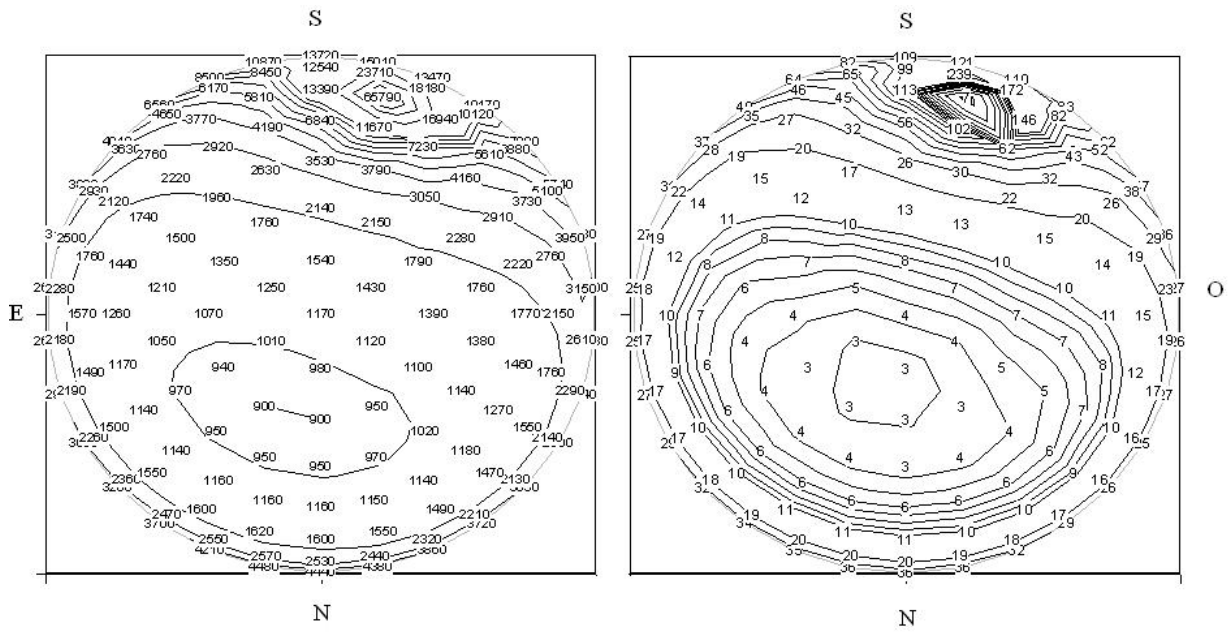


Fig. 4.4 – distribuzione della luminanza e della radianza del cielo rilevata dallo sky scanner in una giornata serena.

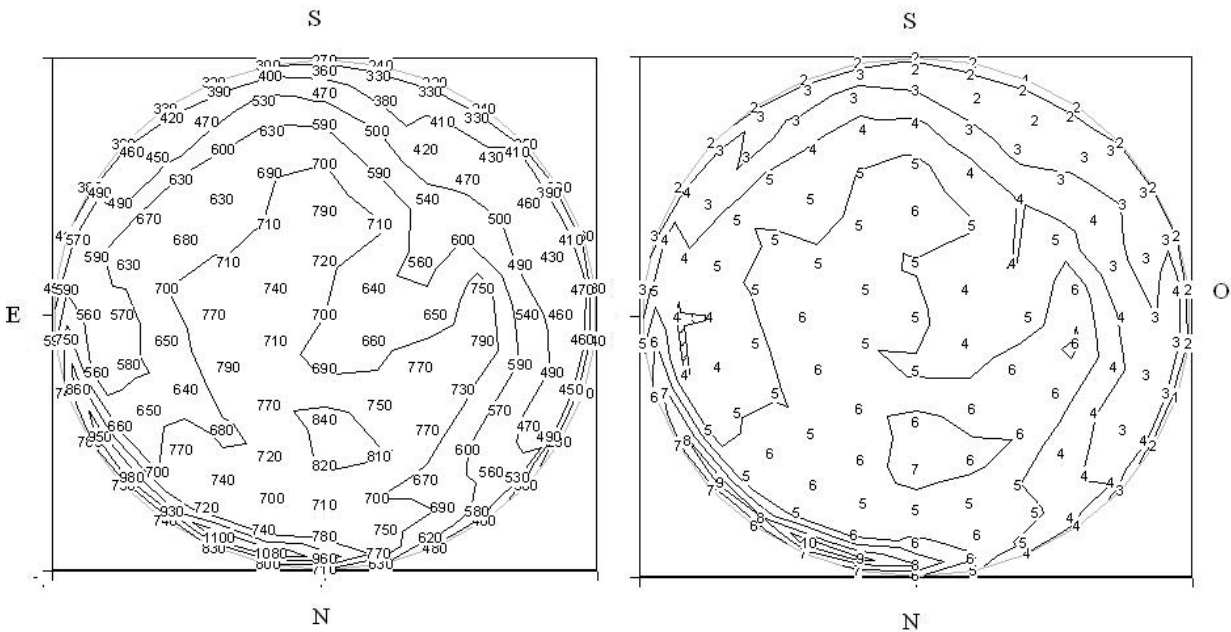


Fig. 4.5 – distribuzione della luminanza e della radianza del cielo rilevata dallo sky scanner in una giornata nuvolosa.

Si può osservare infatti, dalle distribuzioni di luminanza e radianza come, a meno che il cielo non sia completamente coperto, esista un picco in corrispondenza della posizione del sole, e come i valori decrescano sensibilmente all'aumentare della distanza punto-sole tra la posizione del sole ed un punto della volta celeste.

Tale diminuzione è tanto più sensibile quanto più sereno è il cielo; in condizioni di elevata variabilità i valori di luminanza rimangono mediamente alti in una ampia zona intorno al sole.

All'aumentare della copertura e della torbidità del cielo i valori si uniformano facendo appiattare le curve in 3D riportate nelle fig. 4.1-4.2.

4.2 - METODO DI CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO E DELL'IRRADIANZA DELLA SUPERFICIE ORIZZONTALE E DELLE SUPERFICI VERTICALI CON I DATI DELLO SKY SCANNER.

L'illuminamento diffuso prodotto dalla volta celeste su una superficie di area unitaria comunque inclinata ed orientata è pari a:

$$E_0 = \iint L_p \cos \theta d\omega = \iint L_p \frac{\cos \theta dA_c}{r^2} \quad (4.1)$$

Dove:

- θ è l'angolo tra la direzione normale alla superficie e la retta congiungente il centro della superficie e la superficie elementare dA_c sulla volta celeste;
- $d\omega$ ed r sono rispettivamente l'angolo solido e la distanza tra le due superfici.

Nell'eq. (4.1) l'integrazione va effettuata sulla porzione della volta celeste vista dalla superficie ricevente. Essendo, vedi Fig. 4.1:

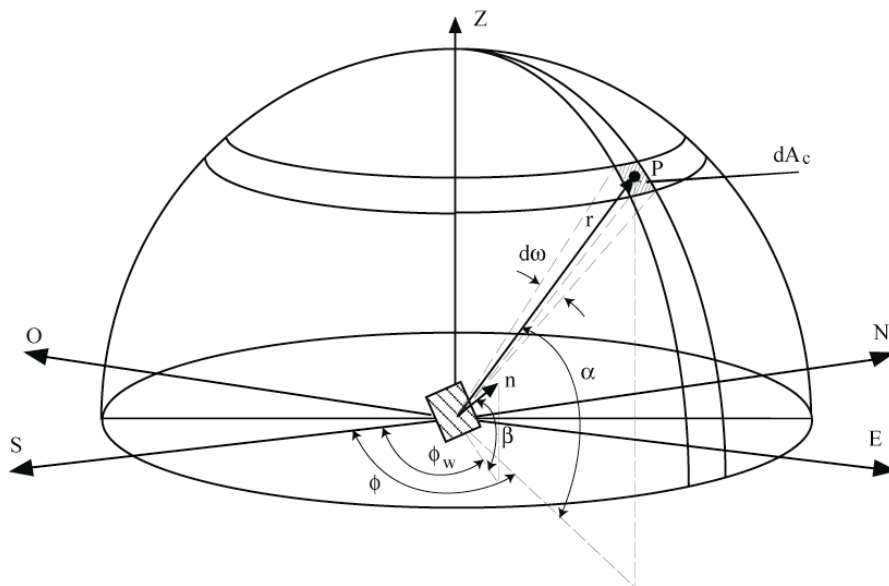


Fig. 4.4 – Coordinate della superficie elementare dA_c della volta celeste.

$$dA_c = r \cos \alpha d\phi r d\alpha \quad (4.2)$$

dove α è l'altezza angolare della retta r sul piano orizzontale e φ l'azimut del centro dell'areola dA_c , per una superficie orizzontale risulta:

$$\cos \theta = \sin \alpha \quad (4.3)$$

mentre, per una superficie verticale, risulta:

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos(\varphi - \varphi_M) \quad (4.4)$$

dove φ è l'azimut del punto φ_M è l'azimut della normale n alla superficie verticale.

Dalle relazioni precedenti si trova che l'illuminamento di una superficie orizzontale è pari a:

$$E_0 = \iint L_p \sin \alpha \cos \alpha \, d\varphi \, d\alpha \quad (4.5)$$

mentre l'illuminamento di una superficie verticale è pari a:

$$E_V = \iint L_p \cos \alpha \cos(\varphi - \varphi_M) \, d\varphi \, d\alpha \quad (4.6)$$

Integrando l'eq. (4.5) su una areola di cielo attorno al punto di misura, compresa tra le altezze angolari α_1 e α_2 e gli angoli azimutali φ_1 e φ_2 , si ottiene, nell'ipotesi di costanza del valore di illuminanza L_p sulla superficie:

$$E_0 = \sum 0,5 (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1) L_p \quad (4.7)$$

L'eq.(4.7) indica che la quantità

$$P_I = 0,5 (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1) \quad (4.8)$$

rappresenta il peso per cui bisogna moltiplicare la luminanza L_p di una areola di cielo per ottenere il suo contributo di illuminamento sul piano orizzontale.

L'illuminamento sul piano orizzontale si ottiene sommando tutti i contributi delle areole in cui è stato scomposto il cielo:

$$E_0 = \sum P_1 L_P \quad (4.9)$$

E' facile verificare che, attraverso semplici passaggi matematici, per le superfici verticali, i pesi per cui bisogna moltiplicare la luminanza L_P di un areola di cielo per ottenere il suo contributo di illuminamento è invece

$$P_2 = 0,5 [\sin(\varphi_2 - \varphi_W) - \sin(\varphi_1 - \varphi_W)] \cdot [(\alpha_2 - \alpha_1) + 0,5(\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1)] \quad (4.10)$$

L'illuminamento della superficie verticale risulta pari a:

$$E_V = \sum P_2 L_P \quad (4.11)$$

La tabella 4.1 indica la collocazione dei 145 punti di misura sulla volta celeste.

La scelta delle coordinate è stata effettuata da Tregenza in modo da assicurare un angolo solido circa costante tra la superficie ricevente e le areole in cui è suddiviso il cielo.

Tabella 4.1 – coordinate dei punti di misura.

α (gradi)	$\Delta\phi$ (gradi)	n. punti	$\Delta\omega$ (sr)
6	12	30	0,0435
18	12	30	0,0416
30	15	24	0,0474
42	15	24	0,0407
54	20	18	0,0429
66	20	12	0,0445
78	60	6	0,0455
90		1	0,0344

Nella Figura 4.5 sono riportati i pesi percentuali dei valori di luminanza (o radianza) nei punti di misura ai fini del calcolo dell'illuminamento (o dell'irradianza) sul piano orizzontale.

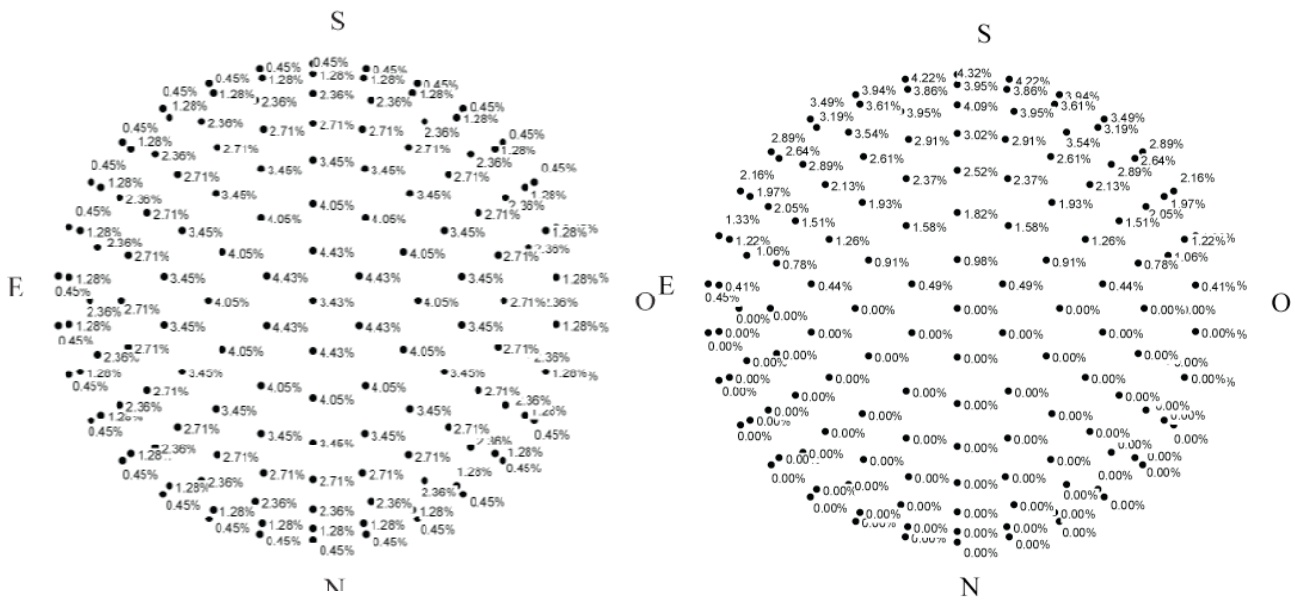


Fig. 4.5 – Pesi percentuali P1 della luminanza (radianza) del cielo ai fini del calcolo dell’illuminamento (irradianza) sul piano orizzontale e pesi percentuali P2 sul piano verticale a sud.

Nella Figura 4.5 sono riportati i pesi percentuali dei valori luminanza (o radianza) nei punti di misura ai fini del calcolo dell’illuminamento (o dell’irradianza) sul piano verticale esposto a sud.

Sulle altre superfici verticali esposte ad ovest, nord ed est, si ha una distribuzione di pesi uguale a quella della Fig. 4.3, essendo le coordinate dei punti del cielo visti dalla superficie variare di un angolo pari all’azimut della superficie.

In Tabella 4.2, per una maggior comprensione dei valori numerici, sono riportati i pesi P1 e P2.

Tab 4.2 – Pesi per il calcolo delle radianze e luminanze dei 145 punti di Tregenza.

Punti	P2nord	P2est	P2sud	P2ovest	P1	Punti di	P2nord	P2est	P2sud	P2ovest	P1
1	0	2.29E-17	0.043150168	2.29E-17	0.004526749	74	0.039512	0.010587	0	0	0.023569
2	0	0	0.042207234	0.008971	0.004526749	75	0.035426	0.020453	0	0	0.023569
3	0	0	0.03941964	0.017551	0.004526749	76	0.028925	0.028925	0	0	0.023569
4	0	0	0.034909219	0.025363	0.004526749	77	0.020453	0.035426	0	0	0.023569
5	0	0	0.028873098	0.032067	0.004526749	78	0.010587	0.039512	0	0	0.023569
6	0	0	0.021575084	0.037369	0.004526749	79	0	0.040906	1.74E-17	0	0.023569
7	0	0	0.013334135	0.041038	0.004526749	80	0	0.039512	0.010587	0	0.023569
8	0	0	0.004510421	0.042914	0.004526749	81	0	0.035426	0.020453	0	0.023569
9	0.00451	0	0	0.042914	0.004526749	82	0	0.028925	0.028925	0	0.023569
10	0.013334	0	0	0.041038	0.004526749	83	0	0.020453	0.035426	0	0.023569
11	0.021575	0	0	0.037369	0.004526749	84	0	0.010587	0.039512	0	0.023569
12	0.028873	0	0	0.032067	0.004526749	85	0	0.00781	0.029146	0	0.027066
13	0.034909	0	0	0.025363	0.004526749	86	0	0.015087	0.026131	0	0.027066
14	0.03942	0	0	0.017551	0.004526749	87	0	0.021336	0.021336	0	0.027066
15	0.042207	0	0	0.008971	0.004526749	88	0	0.026131	0.015087	0	0.027066
16	0.04315	2.29E-17	0	2.29E-17	0.004526749	89	0	0.029146	0.00781	0	0.027066
17	0.042207	0.008971	0	0	0.004526749	90	0	0.030174	1.28E-17	0	0.027066
18	0.03942	0.017551	0	0	0.004526749	91	0.00781	0.029146	0	0	0.027066
19	0.034909	0.025363	0	0	0.004526749	92	0.015087	0.026131	0	0	0.027066
20	0.028873	0.032067	0	0	0.004526749	93	0.021336	0.021336	0	0	0.027066
21	0.021575	0.037369	0	0	0.004526749	94	0.026131	0.015087	0	0	0.027066
22	0.013334	0.041038	0	0	0.004526749	95	0.029146	0.00781	0	0	0.027066
23	0.00451	0.042914	0	0	0.004526749	96	0.030174	0	0	0	0.027066
24	0	0.042914	0.004510421	0	0.004526749	97	0.029146	0	0	0.00781	0.027066
25	0	0.041038	0.013334135	0	0.004526749	98	0.026131	0	0	0.015087	0.027066
26	0	0.037369	0.021575084	0	0.004526749	99	0.021336	0	0	0.021336	0.027066
27	0	0.032067	0.028873098	0	0.004526749	100	0.015087	0	0	0.026131	0.027066
28	0	0.025363	0.034909219	0	0.004526749	101	0.00781	0	0	0.029146	0.027066
29	0	0.017551	0.03941964	0	0.004526749	102	1.28E-17	0	1.28E-17	0.030174	0.027066
30	0	0.008971	0.042207234	0	0.004526749	103	0	0	0.00781	0.029146	0.027066
31	0	0.008207	0.038611893	0	0.012797532	104	0	0	0.015087	0.026131	0.027066
32	0	0.016056	0.036061755	0	0.012797532	105	0	0	0.021336	0.021336	0.027066
33	0	0.023203	0.031935546	0	0.012797532	106	0	0	0.026131	0.015087	0.027066
34	0	0.029335	0.0264136	0	0.012797532	107	0	0	0.029146	0.00781	0.027066
35	0	0.034186	0.019737253	0	0.012797532	108	0	0	0.030174	0	0.027066
36	0	0.037542	0.012198293	0	0.012797532	109	0	0	0.025212	0	0.034511
37	0	0.039258	0.004126209	0	0.012797532	110	0	0	0.023692	0.008623	0.034511
38	0.004126	0.039258	0	0	0.012797532	111	0	0	0.019314	0.016206	0.034511
39	0.012198	0.037542	0	0	0.012797532	112	0	0	0.012606	0.021834	0.034511
40	0.019737	0.034186	0	0	0.012797532	113	0	0	0.004378	0.024829	0.034511
41	0.026414	0.029335	0	0	0.012797532	114	0.004378	0	0	0.024829	0.034511
42	0.031936	0.023203	0	0	0.012797532	115	0.012606	0	0	0.021834	0.034511
43	0.036062	0.016056	0	0	0.012797532	116	0.019314	0	0	0.016206	0.034511
44	0.038612	0.008207	0	0	0.012797532	117	0.023692	0	0	0.008623	0.034511
45	0.039475	2.1E-17	0	2.1E-17	0.012797532	118	0.025212	0	0	0	0.034511
46	0.038612	0	0	0.008207	0.012797532	119	0.023692	0.008623	0	0	0.034511
47	0.036062	0	0	0.016056	0.012797532	120	0.019314	0.016206	0	0	0.034511
48	0.031936	0	0	0.023203	0.012797532	121	0.012606	0.021834	0	0	0.034511
49	0.026414	0	0	0.029335	0.012797532	122	0.004378	0.024829	0	0	0.034511
50	0.019737	0	0	0.034186	0.012797532	123	0	0.024829	0.004378	0	0.034511
51	0.012198	0	0	0.037542	0.012797532	124	0	0.021834	0.012606	0	0.034511
52	0.004126	0	0	0.039258	0.012797532	125	0	0.016206	0.019314	0	0.034511
53	0	0	0.004126209	0.039258	0.012797532	126	0	0.008623	0.023692	0	0.034511
54	0	0	0.012198293	0.037542	0.012797532	127	0	0.0091	0.015762	0	0.04045
55	0	0	0.019737253	0.034186	0.012797532	128	0	0.015762	0.0091	0	0.04045
56	0	0	0.0264136	0.029335	0.012797532	129	3.9E-18	0.0182	1.17E-17	0	0.04045
57	0	0	0.031935546	0.023203	0.012797532	130	0.0091	0.015762	0	0	0.04045
58	0	0	0.036061755	0.016056	0.012797532	131	0.015762	0.0091	0	0	0.04045
59	0	0	0.038611893	0.008207	0.012797532	132	0.0182	3.9E-18	0	3.9E-18	0.04045
60	0	2.1E-17	0.039474505	2.1E-17	0.012797532	133	0.015762	0	0	0.0091	0.04045
61	0	0	0.040906302	0	0.023569381	134	0.0091	0	0	0.015762	0.04045
62	0	0	0.039512454	0.010587	0.023569381	135	3.9E-18	0	0	0.0182	0.04045
63	0	0	0.035425897	0.020453	0.023569381	136	0	0	0.0091	0.015762	0.04045
64	0	0	0.028925124	0.028925	0.023569381	137	0	0	0.015762	0.0091	0.04045
65	0	0	0.020453151	0.035426	0.023569381	138	0	0	0.0182	0	0.04045
66	0	0	0.01058733	0.039512	0.023569381	139	0	2.17E-18	0.009751	2.17E-18	0.044278
67	1.74E-17	0	1.73969E-17	0.040906	0.023569381	140	0	0	0.004876	0.008445	0.044278
68	0.010587	0	0	0.039512	0.023569381	141	0.004876	0	0	0.008445	0.044278
69	0.020453	0	0	0.035426	0.023569381	142	0.009751	3.25E-18	0	3.25E-18	0.044278
70	0.028925	0	0	0.028925	0.023569381	143	0.004876	0.008445	0	0	0.044278
71	0.035426	0	0	0.020453	0.023569381	144	0	0.008445	0.004876	0	0.044278
72	0.039512	0	0	0.010587	0.023569	145	0	0	0	0	0.034326
73	0.040906	0	0	0	0.023569						

4.3 – COMPOSIZIONE DEI DATABASE DI CALCOLO.

Per poter effettuare i confronti tra i valori di illuminamento ed irraggiamento calcolati per integrazione e quelli misurati direttamente dagli strumenti di misura necessario trattare opportunamente i dati acquisiti dagli strumenti.

Nel presente paragrafo viene descritta la procedura da seguire per poter elaborare correttamente i dati acquisiti dagli strumenti ubicati presso la Stazione di Prova e quelli dello sky scanner.

I database di acquisizione sono due:

- Database Strumentazione Stazione di Prova, dove sono acquisiti con le frequenze di 1 min - 1 h la maggior parte dei dati meteo climatici tra i quali l'Illuminamento ed Irraggiamento (Irradianze);
- Database delle Luminanze e delle Radianze della volta celeste dove sono acquisite con frequenza di 10 min. le distribuzioni di dati dello sky scanner.

Gli steps da seguire sono:

- Acquisizione dati sperimentali;
- Pulizia dei Dati dei due database secondo le specifiche CIE;
- Calcolo di parametri meteo climatici e determinazione di irraggiamenti diffusi sulle superfici verticali del database della Stazione di Prova ed Integrazione database delle luminanze;
- Merge dei dati di irraggiamento ed illuminamento diffusi ricavati dai due database.

4.3.1 - ACQUISIZIONE DATI SPERIMENTALI.

Con riferimento a quanto riportato nei precedenti capitoli in termini di simbologia dei vari parametri, si riporta nella figura seguente una scheda sintetica indicante i dati acquisiti dalla strumentazione installata presso la Stazione di Prova:

ACQUISIZIONE DATI STAZIONE DI PROVA												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
Time	Azis	Evg	Evd	Evs	Evgn	Evge	Evgs	Evgw	Eeg	Eed	Ees	
hh:min	Deg	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	W/m ²	W/m ²	W/m ²	
M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
Eegn	Eege	Eegs	Eegw	Lvz	Rh	Wd	Ws	Dbt	Pext	Pir. Sup	Pir. Inf.	Rhi
W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	Cd/m ²	%	DgN->E	m/s	°C	mbar	W/m ²	W/m ²	%

4.3.2 – PULIZIA DEI DATABASE.

Di seguito è riportata, sinteticamente, la procedura di pulizia dei database.

PULIZIA DEI DATI																																																																					
<p style="text-align: center;"><u>TEST 1</u></p> <p>Test 1.1: $0 < E_{eg} < 1,2 E_{e0}$</p> <p>Test 1.2: $0 < E_{vg} < 1,2 E_{v0}$</p> <p>Test 1.3: $0 < E_{ed} < 0,8 E_{e0}$</p> <p>Test 1.4: $0 < E_{vd} < 0,8 E_{v0}$</p> <p>Test 1.5: $0 < E_{es} < E_{e0}$</p> <p>Test 1.6: $0 < E_{vs} < E_{v0}$</p>	<p style="text-align: center;"><u>TEST 2</u></p> <p>Test 2.1: $E_{eg} = (E_{vs} \cos Z + E_{ed}) \pm 15\%$</p> <p>Test 2.2: $E_{vg} = (E_{vs} \cos Z + E_{vd}) \pm 15\%$</p> <p>Test 2.3: $E_{ed} < E_{eg} + 10\%$</p> <p>Test 2.3: $E_{vd} < E_{vg} + 10\%$</p>				<p style="text-align: center;"><u>TEST 4</u></p> <p>Test 4.1: $\frac{E_{vg}}{E_{eg}} = a_1 \pm b_1$</p> <p>Test 4.2: $\frac{E_{vd}}{E_{ed}} = a_2 \pm b_2$</p> <p>Test 4.3: $\frac{E_{vs}}{E_{es}} = a_3 \pm b_3$</p> <p>Test 4.4: $\frac{E_{vgi}}{E_{egi}} = a_4 \pm b_4$</p> <p>Con le limitazioni: Se $Z \leq 60^\circ$ e $E_{es} \leq 100 \text{ W/m}^2$: $\begin{cases} a_1 = 120 \text{ lm/W} & b_1 = 30 \text{ lm/W} & c_1 = 60 \\ a_2 = 140 \text{ lm/W} & b_2 = 40 \text{ lm/W} & c_2 = 60 \\ a_3 = 105 \text{ lm/W} & b_3 = 30 \text{ lm/W} & c_3 = 50 \end{cases}$ Oppure se $Se Z > 60^\circ$ e $E_{es} \leq 100 \text{ W/m}^2$: $a_3 = -543 \cdot Z^3 + 1639 \cdot Z^2 - 1652 \cdot Z + 661 \text{ lm/W}$ $a_4 = a_1, b_4 = b_1, c_4 = c_1$ Oppure se $Se Z > 60^\circ$ e $E_{es} > 100 \text{ W/m}^2$: $a_4 = a_3, b_4 = b_1, c_4 = c_2$ Oppure se $Se 60^\circ < \theta < 85^\circ$ e $E_{es} > 100 \text{ W/m}^2$: $a_4 = a_1, b_4 = b_1, c_4 = c_1$ Oppure se $Se \theta > 85^\circ$ e $E_{es} > 100 \text{ W/m}^2$: $a_4 = a_2, b_4 = b_2, c_4 = c_2$</p>																																																																
<p style="text-align: center;"><u>TEST 3</u></p> <p>Test 3.1: $E_{egi} = f(E_{eg}, E_{es}, \cos Z, \cos \theta) \pm 100 \text{ W/m}^2$</p> <p>Test 3.2: $E_{egi} = f(E_{eg}, E_{ed}, \cos Z, \cos \theta) \pm 150 \text{ W/m}^2$</p> <p>Test 3.3: $E_{egi} = f(E_{es}, E_{ed}, \cos Z, \cos \theta) \pm 150 \text{ W/m}^2$</p> <p>Test 3.4: $E_{evi} = f(E_{vg}, E_{vs}, \cos Z, \cos \theta) \pm 12 \text{ Klux}$</p> <p>Test 3.5: $E_{evi} = f(E_{vg}, E_{vd}, \cos Z, \cos \theta) \pm 18 \text{ Klux}$</p> <p>Test 3.6: $E_{evi} = f(E_{vs}, E_{vd}, \cos Z, \cos \theta) \pm 18 \text{ Klux}$</p> <p>$E_{egi} = E_{ed} \left\{ \frac{(1 - F1)}{2} + F1 \frac{r}{\cos Z} + F2 \right\} + rE_{es}$</p> <p>$E_{vgi} = E_{vd} \left\{ \frac{(1 - F1)}{2} + F1 \frac{r}{\cos Z} + F2 \right\} + rE_{vs}$</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">ε</th> <th style="width: 10%;">F11</th> <th style="width: 10%;">F12</th> <th style="width: 10%;">F13</th> <th style="width: 10%;">F21</th> <th style="width: 10%;">F22</th> <th style="width: 10%;">F23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.000-1.065</td> <td>-0.008</td> <td>0.588</td> <td>-0.062</td> <td>-0.060</td> <td>0.072</td> <td>-0.022</td> </tr> <tr> <td>1.065-1.230</td> <td>0.130</td> <td>0.683</td> <td>-0.150</td> <td>-0.019</td> <td>0.066</td> <td>-0.029</td> </tr> <tr> <td>1.230-1.500</td> <td>0.330</td> <td>0.487</td> <td>-0.221</td> <td>0.055</td> <td>-0.064</td> <td>-0.026</td> </tr> <tr> <td>1.500-1.950</td> <td>0.568</td> <td>0.187</td> <td>-0.295</td> <td>0.109</td> <td>-0.152</td> <td>-0.014</td> </tr> <tr> <td>1.950-2.800</td> <td>0.873</td> <td>-0.392</td> <td>-0.362</td> <td>0.226</td> <td>-0.462</td> <td>0.001</td> </tr> <tr> <td>2.800-4.500</td> <td>1.132</td> <td>-1.237</td> <td>-0.412</td> <td>0.288</td> <td>-0.823</td> <td>0.056</td> </tr> <tr> <td>4.500-6.200</td> <td>1.060</td> <td>1.600</td> <td>-0.359</td> <td>0.264</td> <td>-1.127</td> <td>0.131</td> </tr> <tr> <td>6.200-∞</td> <td>0.678</td> <td>-1.327</td> <td>-0.250</td> <td>0.156</td> <td>-1.377</td> <td>0.251</td> </tr> </tbody> </table> <p>$F1 = F11 + \Delta \cdot F12 + Z \cdot F13$ (*) $F2 = F21 + \Delta \cdot F22 + Z \cdot F23$ (*)</p>							ε	F11	F12	F13	F21	F22	F23	1.000-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022	1.065-1.230	0.130	0.683	-0.150	-0.019	0.066	-0.029	1.230-1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026	1.500-1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014	1.950-2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001	2.800-4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056	4.500-6.200	1.060	1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131	6.200-∞	0.678	-1.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251
ε	F11	F12	F13	F21	F22	F23																																																															
1.000-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022																																																															
1.065-1.230	0.130	0.683	-0.150	-0.019	0.066	-0.029																																																															
1.230-1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026																																																															
1.500-1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014																																																															
1.950-2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001																																																															
2.800-4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056																																																															
4.500-6.200	1.060	1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131																																																															
6.200-∞	0.678	-1.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251																																																															
<p style="text-align: center;"><u>TEST 5</u></p> <p>Se $E_{es} < 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $15^\circ < Z < 25^\circ$ $15 \text{ cd/W} < \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 60 \text{ cd/W}$ Oppure Se $E_{es} > 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $Z < 25^\circ$ $40 \text{ cd/W} < \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 100 \text{ cd/W}$ Se $E_{es} < 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $15^\circ < Z < 25^\circ$ $0,1\pi < \pi \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 0,5\pi$ Oppure Se $E_{es} > 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ e $Z < 25^\circ$ $0,35\pi < \pi \frac{L_{vz}}{E_{ed}} < 0,9\pi$</p>																																																																					

- Altezza solare $\alpha < 5^\circ$ oppure $\sin \alpha < 0.087156$;
- Irraggiamento globale al suolo inferiore di 20 W/m^2 ;
- Illuminamenti diffusi inferiori a 250 lux ;
- Irraggiamento globale al suolo superiore al corrispondente valore extratmosferico;
- Illuminamento diffuso calcolato (Globale – Diretto * $\sin \alpha$) maggiore del corrispondente dato di illuminamento globale;
- Radiazione diretta normale misurata superiore al corrispondente valore extratmosferico;
- Illuminamento diretto su superficie verticale maggiore del corrispondente illuminamento globale sulla superficie;
- Distribuzione di luminanza tale da fornire un valore dell'illuminamento diffuso calcolato per integrazione maggiore del 30% rispetto al corrispondente valore misurato con la strumentazione.

4.3.3 – CALCOLO PARAMETRI INTERMEDI E ILLUMINAMENTI DIFFUSI.

 CALCOLO PARAMETRI METEOCLIMATICI E GEOMETRICI
 DATABASE STAZIONE DI PROVA

$$\vartheta_0(\text{rad}) = \frac{2\pi n(t)}{365}$$

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \vartheta_0 + 0.070257 \sin \vartheta_0 \\ - 0.006758 \cos 2\vartheta_0 + 0.000908 \sin 2\vartheta_0$$

$$ET = 0.0172 + 0.4281 \cos \vartheta_0 - 7.3515 \sin \vartheta_0 \\ - 3.3495 \cos 2\vartheta_0 - 9.3619 \sin 2\vartheta_0$$

$$h_a = -h_t = \arccos\left(-\frac{\tan L}{\tan \delta}\right)$$

$$\alpha = \arcsen[(\sin L \sin L\delta) + (\cos \delta \cos L \cos h)]$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha} \quad \text{valida se} \quad \sin a \geq \frac{\sin \delta}{\sin L} a$$

$$\text{altrimenti } a = \text{segno}(a)(180 - |a|)$$

$$\cos \theta = \cos(a - a_w) \cos \alpha$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\sin \alpha}$$

$$E_{vdi} = E_{vg} - E_{vs} \cos \theta$$

$$E_{edi} = E_{eg} - E_{es} \cos \theta - 0.5 \cdot E_{eg} \cdot \rho$$

$$E_{vd}, E_{vdn}, E_{vde}, E_{vds}, E_{vdw}, E_{ed}, E_{edn}, E_{ede}, E_{eds}, E_{edw}$$

$$k_{eg} = \frac{E_{eg}}{H_{ex} \sin \alpha} = \frac{E_{eg}}{E_e \sin \alpha}$$

$$k_{ed} = \frac{E_{ed}}{H_{ex} \sin \alpha} = \frac{E_{ed}}{E_e \sin \alpha}$$

$$k_{eb} = \frac{E_{eb}}{H_{ex} \sin \alpha} = \frac{E_{eb}}{E_e \sin \alpha}$$

$$k_{vg} = \frac{E_{vg}}{E_v \sin \alpha}$$

$$k_{vd} = \frac{E_{vd}}{E_v \sin \alpha}$$

$$k_{vb} = \frac{E_{vb}}{E_v \sin \alpha}$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{E_{ed} + E_{es}}{E_{ed}} + 1.041 \cdot Z^3}{1 + 1.041 \cdot Z^3}$$

$$\Delta = \frac{E_{ed}}{E_e \cos Z} = m \frac{E_{ed}}{E_{e0}}$$

$$T_L = 1 + \frac{\delta_D}{\delta_D} e T_v = - \frac{\ln\left(\frac{E_{vg} - E_{vd}}{E_{vd}}\right)}{a_v \cdot m} \quad \text{con } a_v = \frac{1}{9.9 + 0.043 \cdot m}$$

$$m = \frac{1}{\cos Z + 0.50572 \cdot (96.07995 - Z)^{-1.6364}}$$

CALCOLI DATABASE LUMINANZE

$$E_0 = \iint L_p \cos \theta \, d\omega = \iint L_p \frac{\cos \theta \, dA_c}{r^2}$$

$$dA_c = r \cos \alpha \, d\varphi \, r \, d\alpha$$

$$\cos \theta = \sin \alpha$$

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos(\varphi - \varphi_M)$$

$$E_0 = \iint L_p \sin \alpha \cos \alpha \, d\varphi \, d\alpha$$

$$E_v = \iint L_p \cos \alpha \cos(\varphi - \varphi_M) \, d\varphi \, d\alpha$$

$$\text{Calcolo } E_0 = \sum P_1 L_p \quad e \quad E_v = \sum P_2 L_p$$

$$P_1 = 0,5 (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1)$$

$$P_2 = 0,5 [\sin(\varphi_2 - \varphi_W) - \sin(\varphi_1 - \varphi_W)] \\ \cdot [(\alpha_2 - \alpha_1) + 0,5(\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1)]$$

$$E_{vd}, E_{vdn}, E_{vde}, E_{vds}, E_{vdw}, E_{ed}, E_{edn}, E_{ede}, E_{eds}, E_{edw}$$

4.3.3 – MERGE DEI DATI.

Il Merge dei dati è stato per diverso tempo condotto manualmente. Tale scelta era dettata dalla non uniformità dei dati a disposizione che rendevano molto complessa la realizzazione di una procedura automatica di merge; i dati acquisiti con frequenza variabile di 1-2-5 minuti, frequenze di acquisizione non coincidenti tra di loro, presenza di “buchi” nelle acquisizioni, ed altri leaks di acquisizione implicavano una scelta punto per punto dei dati da confrontare. Negli ultimi mesi, è stata messa a punto una procedura di merge che consente di effettuare la fusione dei due database in modo istantaneo purchè i dati vengano “pre-filtrati” secondo la procedura riportata in Appendice A4. Tale procedura ha consentito di velocizzare di molto la messa a punto dei database di calcolo, ed ha permesso di giungere alle conclusioni che sono presentate nei prossimi paragrafi.

4.4 – I DATI SPERIMENTALI DI DISTRIBUZIONE DI LUMINANZA.

A seguito delle operazioni indicate nei paragrafi precedenti si ottiene un unico database riportante la “fusione” dei due database principali; nelle Figure successive è riportato un confronto tra gli illuminamenti sperimentali calcolati per ricostruzione dai dati acquisiti presso la Stazione di Prova (E_{vd}) e gli illuminamenti calcolati per integrazione delle distribuzioni di luminanza acquisite con lo sky scanner ($E_{vd,sky}$).

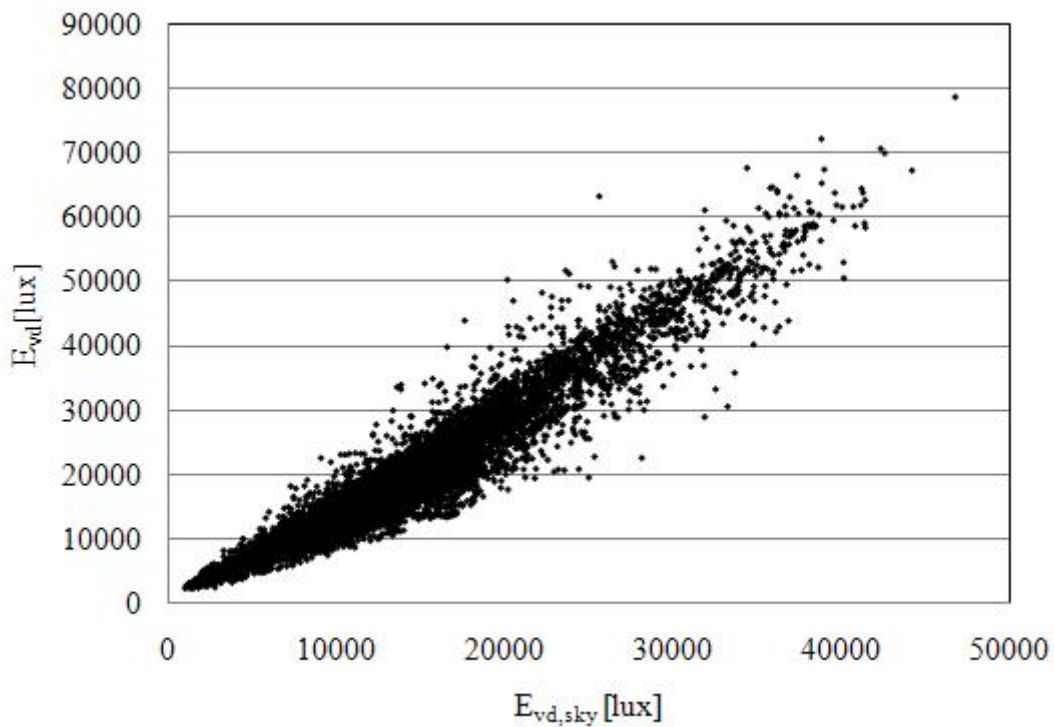


Fig. 4.6 – Confronto tra gli illuminamenti diffusi ottenuti per misura diretta E_{vd} e gli illuminamenti ottenuti per integrazione delle distribuzioni di luminanza $E_{vd,sky}$ sul piano orizzontale.

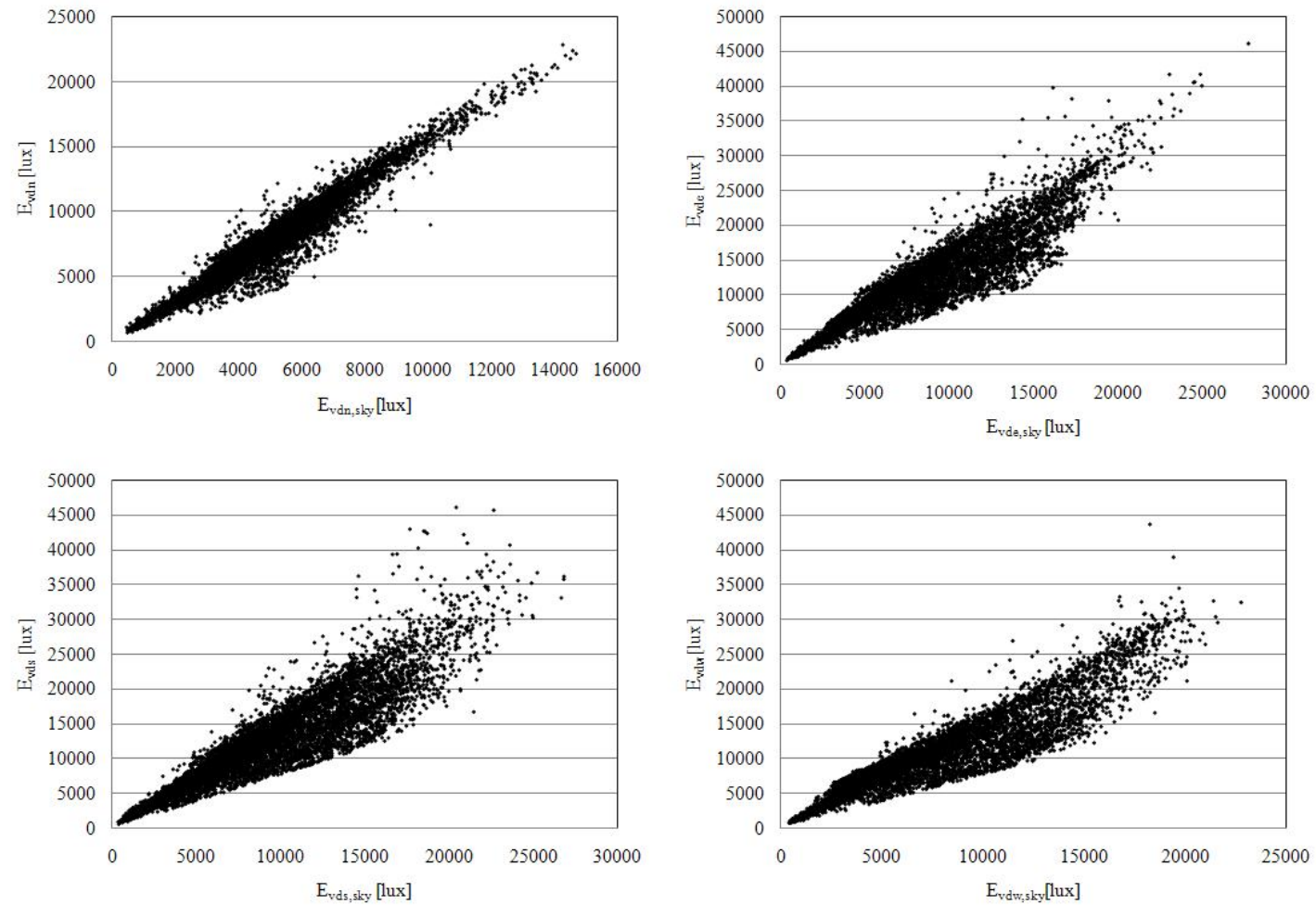


Fig. 4.7 – Confronto tra gli illuminamenti diffusi ottenuti per misura diretta E_{vd} e gli illuminamenti ottenuti per integrazione delle distribuzioni di luminanza $E_{vd,sky}$ Sulle quattro superfici verticali esposte a nord, est, sud e ovest.

I grafici mostrano un andamento pressochè lineare tra gli illuminamenti calcolati per integrazione e per ricostruzione.

Come già accennato, l'integrazione delle luminanze fornisce valori diversi dalla misura diretta; obiettivo del seguente paragrafo è la determinazione di correlazioni di calcolo che consentano di apportare delle opportune modifiche ai valori integrati per uniformare i due dati.

4.5 – ANALISI QUALITATIVA DELLE MISURE OTTENUTE PER INTEGRAZIONE.

Poiché lo sky scanner rileva i valori di luminanza (ed irradianza) in 145 punti discreti del cielo la predizione dei valori di illuminamento ed irraggiamento ottenuti per integrazione non fornisce valori esatti. E' necessario correggere i valori dell'illuminamento (o dell'irradianza) ottenuti per integrazione con le eqq. (4.9) ed (4.11), in modo che i risultati siano coerenti con i valori di illuminamento rilevati direttamente con i fotometri ed i piranometri. Per una migliore comprensione vengono proposti, in Appendice A5, una serie di grafici che mostrano gli andamenti orari di illuminamento (E_{vd}) ed irraggiamento (E_{ed}) misurati in modo diretto con gli strumenti di misura (piranometri e luxmetri) sul piano orizzontale e quelli ottenuti per integrazione per un giorno sereno, un giorno intermedio ed un giorno nuvoloso.

L'illuminamento diffuso di una superficie arbitraria è infatti pari a:

$$E_{vd} = E_{vg} - E_{vs} \cos\vartheta \quad (4.12)$$

Dove E_g è l'illuminamento globale della superficie (misurato con un fotometro posto sul piano della superficie) ed E_{bn} è l'illuminamento diretto misurato con un fotometro montato sull'inseguitore solare.

Una relazione analoga all'eq. 4.12 vale per l'irradianza diffusa.

Nelle Figg. da A5.5 in poi sono riportati i rapporti tra gli illuminamenti ($E_{vd,sky}/E_{vd}$) e le irradianze ($E_{ed,sky}/E_{ed}$) per le stesse giornate, sulla superficie orizzontale e sulle superfici verticali.

Queste ultime Figure indicano delle differenze importanti tra i dati ottenuti per integrazione delle misure dello sky scanner e di dati di tipo globale ottenuti per misura diretta con fotometri e piranometri.

Si osserva che i rapporti tra gli illuminamenti ottenuti con i due metodi di misura sono spesso diversi dai rapporti tra le irradianze rilevate nello stesso periodo di misura, e dunque le due elaborazioni vanno effettuate separatamente, applicando due fattori correttivi diversi.

Cause possibili della differenza tra le grandezze ottenute per integrazione e le grandezze misurate globalmente sono, per le giornate serene, l'effetto della vicinanza della posizione del sole ad alcuni punti di misura sulla volta celeste, che altera il valore della luminanza di tipo diffuso, incrementandone il valore.

Nelle giornate intermedie vi è sicuramente un effetto della distribuzione della nuvolosità: se, per esempio, le zone di cielo verso cui vengono orientati i sensori durante la scansione risultano prevalentemente libere da nuvole, il valore ottenuto per integrazione risulterà più alto del valore della misura globale, mentre il contrario capita se le stesse zone di cielo sono a prevalenza nuvolosa.

4.6 – CORRELAZIONI DI CALCOLO $E_{VD}=F(E_{VD,SKY})$.

E' stata eseguita un'indagine approfondita circa la dipendenza degli illuminamenti dai parametri meteo climatici; nell'ambito di questa tesi sono proposte le correlazioni di calcolo che hanno fornito i risultati migliori.

4.6.1 – CORRELAZIONI DI CALCOLO SEMPLIFICATE SKY1.

I dati diagrammati nelle figg. 4.6-4.7 suggeriscono in prima approssimazione di correlare E_{vd} ed $E_{vd,sky}$ con delle correlazioni semplici del tipo lineare o di potenza con due coefficienti (a e b) da ottenere con il metodo dei minimi quadrati.

Sono state ottenute le seguenti correlazioni, sul piano orizzontale, per tutti i tipi di cielo

Piano Orizzontale (SKY – A)

$$E_{vd} = a \cdot E_{vd,sky} + b \quad (4.13)$$

Piano Orizzontale (SKY – B)

$$E_{vd} = a \cdot E_{vd,sky}^b \quad (4.14)$$

Piani Verticali – (SKY-A)

$$E_{vdi} = a_i \cdot E_{vd,sky} + b_i \quad (4.15)$$

Piani Verticali – (SKY-B)

$$E_{vdi} = a_i \cdot E_{vd,sky}^{b_i} \quad (4.16)$$

Il pedice i indica le diverse orientazioni secondo le quattro direzioni e nell'ordine nord, est, sud e ovest.

I risultati sono riportati nelle tabelle 4.3a e 4.3b per il piano orizzontale e nelle tabelle 4.4a e 4.4b; dall'analisi delle tabelle si evince che i due modelli danno risultati molto simili, con una leggera preferenza per il modello esponenziale, ciò probabilmente è dovuto ad una migliore predizione dei valori ad alti illuminamenti.

Sono stati effettuati dei calcoli introducendo delle polinomiali del 2° e 3° ordine ma i risultati si sono dimostrati in linea con i modelli SKY-A e SKY-B e non sono quindi stati riportati nel presente studio.

E' stata altresì, condotta una analisi più accurata che tenesse conto delle diverse condizioni di cielo; il parametro utilizzato è stato l'indice di serenità e ε sono stati considerati i seguenti intervalli:

$1 \leq \varepsilon \leq 1.065$	(Overcast Sky)
$1.065 \leq \varepsilon \leq 6.2$	(Intermediate Sky)
$\varepsilon \geq 6.2$	(Clear Sky)

Sono stati presi in considerazione, quindi, i cieli completamente coperti, perfettamente sereni e genericamente intermedi.

Per le sole condizioni di cielo completamente coperto ($1 \leq \varepsilon \leq 1.065$) i coefficienti interpolanti le curve scelte nei modelli SKY-A e SKY-B risultavano molto vicini tra di loro così come i relativi grafici, si è scelto, per questa ragione, di considerare l'insieme di tutti i dati senza

effettuare la distinzione tra le diverse orientazioni. Nella Fig. 4.8 è riportato l'andamento di tutti i dati aggregati per tutte le direzioni in condizioni di cielo coperto.

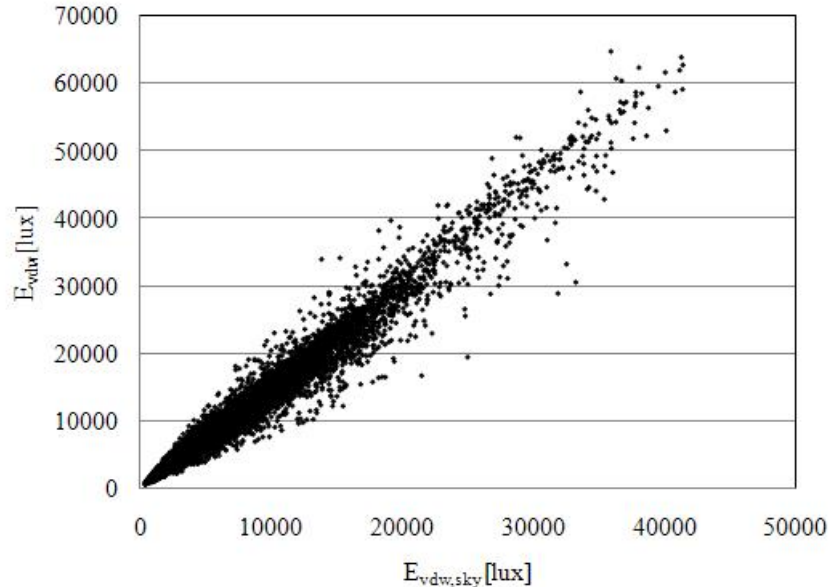


Fig. 4.8 – Confronto tra gli illuminamenti diffusi ottenuti per misura diretta E_{vd} e gli illuminamenti ottenuti per integrazione delle distribuzioni di luminanza $E_{vd,sky}$ tutte le direzioni per $\varepsilon < 1.065$ (cielo coperto).

Nelle tabelle 4.3 e 4.4 sono riportati le correlazioni di calcolo su superfici orizzontale e verticali variamente orientate nelle diverse condizioni di cielo.

Dall'analisi delle tabelle 4.3 e 4.4 si nota come i risultati in termini di errori cambino in funzione delle condizioni di cielo. I risultati migliori per tutte le orientazioni si ottengono o per cieli completamente coperti o per cieli perfettamente nuvolosi, mentre le condizioni di cielo intermedio caratterizzata da una elevata variabilità delle condizioni di illuminamento naturale forniscono risultati peggiori. per il piano orizzontale si hanno errori medi percentuali tra -0.21% e il 211% ed RMS tra 13.62% e 15.35%; la condizione di cielo intermedio fornisce comunque RMS al di sotto del 22%.

Per le superfici verticali i risultati sono leggermente peggiori rispetto a quelli del piano orizzontale ma, tutto sommato, i dati risultano ben correlati da entrambi i modelli, SKY1A e SKY1B, con errori medi che variano tra 0.36% e 3.86% ed RMS tra il 14.24 e 23.02% per cieli intermedi e tra -0.47% e 1.75% ed RMS tra il 3.70 e 14.42%.

I risultati migliori sono forniti dalla direzione nord anche per cieli intermedi e sereni con valori di $\bar{\varepsilon}$ prossimi a zero e valori di RMS allineati ai rispettivi valori di cielo nuvoloso.

In generale i dati risultano ben correlati con ottimi risultati per i cieli perfettamente coperti o perfettamente sereni e per la direzione nord.

I risultati peggiori si hanno per l'esposizione sud sia per cieli intermedi che per cieli sereni (per cieli nuvolosi le differenze con le altre superfici verticali si attenuano notevolmente).

Si osservi che la parete esposta a sud, a parte la superficie orizzontale, è anche quella più soleggiata durante tutto l'anno, cioè quella caratterizzata da un maggior numero di dati compresi tra l'alba ed il tramonto del sole sulla superficie; la superficie nord di contro è caratterizzata da un elevato numero di dati al di fuori dell'intervallo compreso tra l'alba ed il tramonto sulla superficie stessa: per i sei mesi invernali la superficie nord non "vede" mai il sole mentre per i mesi estivi sulla superficie nord esistono in un giorno due albe e due tramonti.

Questo aspetto sarà approfondito nel par.4.5.3 dove sarà introdotto un altro discriminante nelle correlazioni di calcolo che tenga conto dell'alba e del tramonto sulla superficie.

Tabella 4.3a – Costanti delle correlazioni di calcolo di $E_{vd}=f(E_{vd,sky})$ piano orizzontale.

Modelli	All sky	Overcast $\epsilon < 1.065$	Intermediate $1.065 < \epsilon < 6.2$	Clear $\epsilon > 6.2$
SKY A	a=-1285	a=227	a=-2471	a=-4252
$E_{vd} = a + b \cdot E_{vd,sky}$	b=1.49	b=1.471	b=1.567	b=1.407
SKY B	a=1.69	a=1.992	a=0.854	a=0.193
$E_{vd} = a \cdot E_{vd,sky}^b$	b=0.977	b=0.968	b=1.047	b=1.181

Tabella 4.3b - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori di Illuminamento Diffuso, calcolati per integrazione delle luminanze, ed i dati sperimentali sul piano orizzontale.

	All sky		Overcast $\epsilon < 1.065$		Intermediate $1.065 < \epsilon < 6.2$		Clear $\epsilon > 6.2$	
	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS
SKY A	0.16	20.97	1.34	13.70	5.97	21.94	2.11	16.22
SKY B	1.51	18.31	1.37	13.62	1.18	17.24	-0.21	15.35

Tabella 4.4a – Costanti delle correlazioni di calcolo di $E_{vd}=f(E_{vd,sky})$ piani verticali.

Modelli	Nord		Est		Sud		Ovest		All		
	Interm.	Clear	Interm.	Clear	Interm.	Clear	Interm.	Clear	Interm.	Clear	Overcast
SKY A	a=-54.5	a=1330	a=1362	a=3520	a=836	a=2675	a=1189	a=4404	a=1268	a=3627	a=1.462
$E_{vd} = a + b \cdot E_{vd,sky}$	b=1.55	b=1.433	b=1.23	b=1.01	b=1.21	b=1.038	b=1.19	b=0.707	b=1.21	b=0.915	b=0
SKY B	a=1.77	a=7.102	a=6.845	a=27.34	a=4.42	a=17.35	a=7.43	a=107.8	a=5.781	a=43.43	a=1.848
$E_{vd} = a \cdot E_{vd,sky}^b$	b=0.982	b=0.832	b=0.824	b=0.675	b=0.865	b=0.717	b=0.81	b=0.506	b=0.84	b=0.616	b=0.974

 Tabella 4.4b – Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori di Illuminamento Diffuso, calcolati per integrazione delle luminanze, ed i dati sperimentali sui piani verticali.

Modelli	Nord				Est				Sud				Ovest				All					
	Interm.		Clear		Interm.		Clear		Interm.		Clear		Interm.		Clear		Interm.		Clear		Overcast	
	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS
SKY-A	1.26	14.49	0.10	3.83	3.4	21.80	1.67	12.27	3.86	23.02	1.75	14.42	3.01	21.74	1.69	13.53	3.59	21.24	2.56	16.65	0.08	11.95
SKY-B	0.36	14.24	-0.19	3.70	1.87	20.9	0.24	11.22	1.51	22.27	0.44	14.20	1.80	20.82	-0.47	12.79	1.78	20.35	1.83	16.41	-1.27	11.95

4.6.2– CORRELAZIONE DI CALCOLO A DUE PARAMETRI SKY2.

Nonostante le correlazioni semplificate forniscano dei risultati più che accettabili si è cercato di affinare le correlazioni sfruttando i parametri meteo climatici più utilizzati in letteratura.

Tra tutti i parametri che intervengono nei calcoli sulla luce naturale l'attenzione è stata focalizzata sull'indice di serenità dell'illuminamento naturale diffuso:

$$k_{vd} = \frac{E_{vd}}{E_v} \quad 4.17$$

E' risultato, al momento, l'unico parametro che combinato con l'indice di massa d'aria relativa e l'illuminamento extraterrestre, ha fornito delle serie di dati correlabili in tutte le condizioni di cielo. La metodologia utilizzata è stata quella di diagrammare i dati di $E_{vd,sky}$ in funzione dei vari parametri meteo climatici di uso comune nella letteratura, vale a dire: Rapporto L_z/D_v , torbidità luminosa, altezza solare, indici di serenità della radiazione solare e dell'illuminamento naturale, ecc.

E' stato di volta in volta fissato uno di questi parametri e successivamente è stata studiata la correlabilità dei dati facendo variare, per intervalli, gli altri parametri disponibili.

Tale metodologia ha permesso di trovare la correlazione che andiamo di seguito a descrivere.

Nella Fig. 4.9 è riportato l'andamento dell'illuminamento diffuso sul piano orizzontale ottenuto per integrazione dei dati di luminanza in funzione dell'indice di serenità dell'illuminamento diffuso:

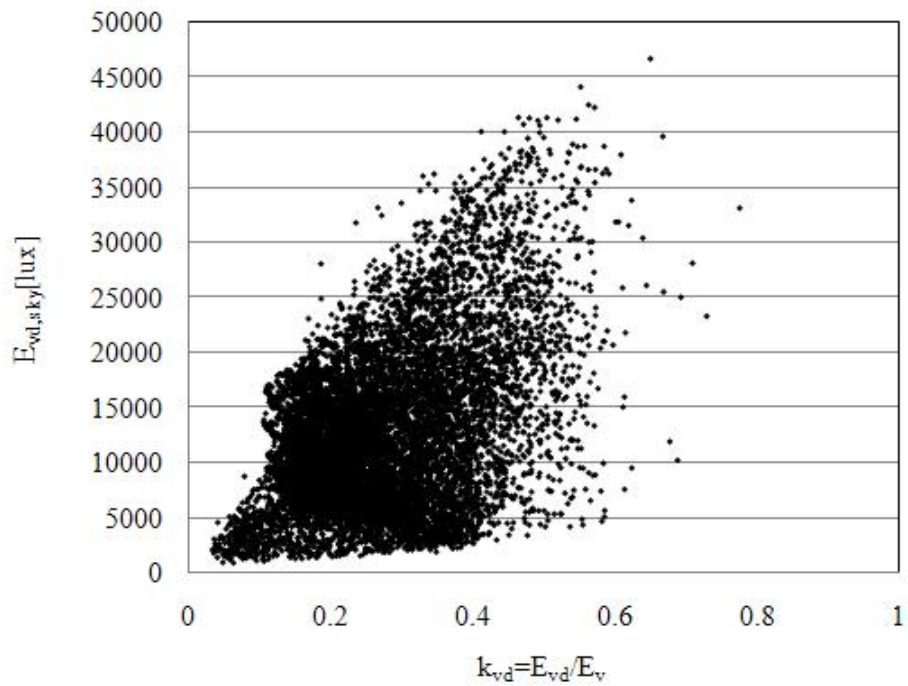


Fig. 4.9 – Illuminamenti diffusi ottenuti integrazione delle distribuzioni di luminanza $E_{vd,sky}$ tutte in funzione dell'indice di serenità della luce diffusa k_{vd} .

Analoghi grafici, che omettiamo di riportare, si ottengono per i quattro illuminamenti delle superfici verticali esposte a nord, est, sud e ovest.

A prima vista non $E_{vd,sky}$ non sembra granché correlabile a k_{vd} suddividendo però i dati in intervalli di m (massa d'aria relativa) si ottiene la situazione riportata nella fig. 4.10:

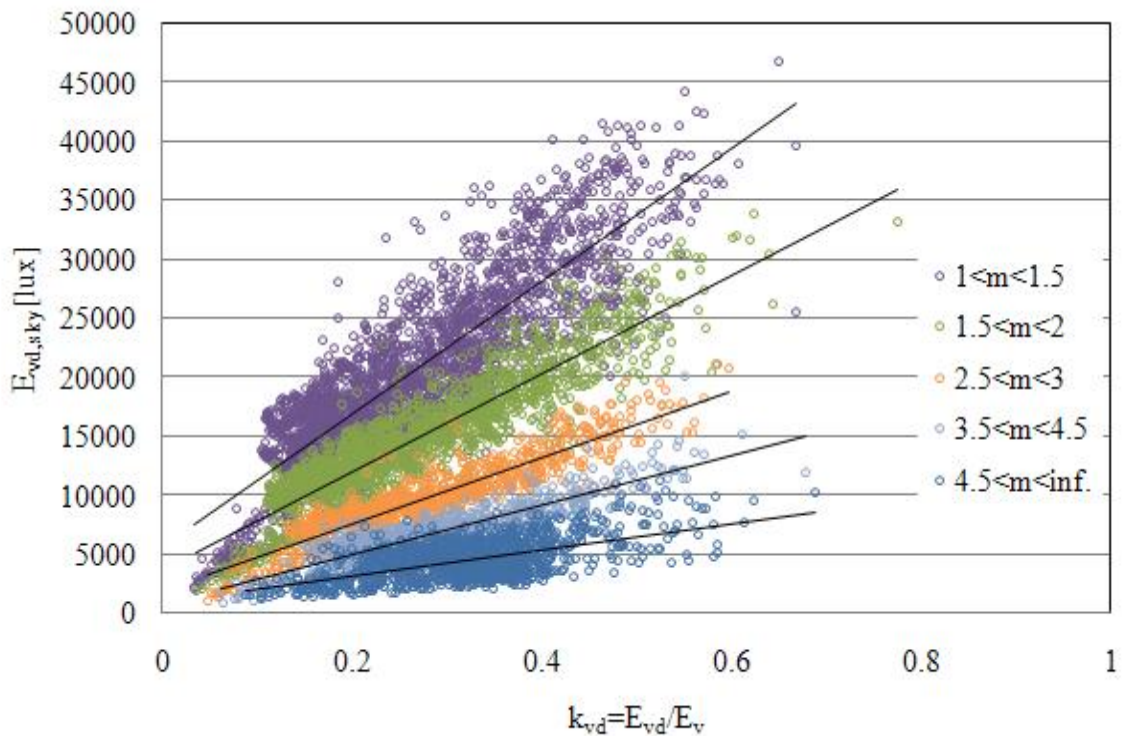


Fig. 4.10 – Illuminamenti diffusi ottenuti integrazione delle distribuzioni di luminanza $E_{vd,sky}$ tutte in funzione dell'indice di serenità della luce diffusa k_{vd} e per diversi intervalli della massa d'aria relativa m .

La Fig. 4.10 mostra come, suddividendo i dati in classi di m , $E_{vd,sky}$ e k_{vd} si addensano lungo una retta; nell'esempio sono stati scelti ampi intervalli ma, infittendo e restringendo tali intervalli, si ottiene un fascio di rette più fitto.

L'equazione adatta a descrivere il legame tra $E_{vd,sky}$ e k_{vd} è del tipo:

$$E_{vd,sky} = a + b \cdot k_{vd} = a + b \frac{E_{vd}}{E_v} \quad 4.18$$

Dove a e b sono dei coefficienti da ottenerli con il metodo dei minimi quadrati funzione della massa d'aria relativa m .

L'intero set di dati è stato suddiviso una serie di intervalli con diversi valori di m e, per la serie di dati di pertinenza, sono stati ricavati i coefficienti ricavando i coefficienti dell'eq. 4.18, nella Fig. 4.11 è riportato l'andamento di tali coefficienti in funzione di m :

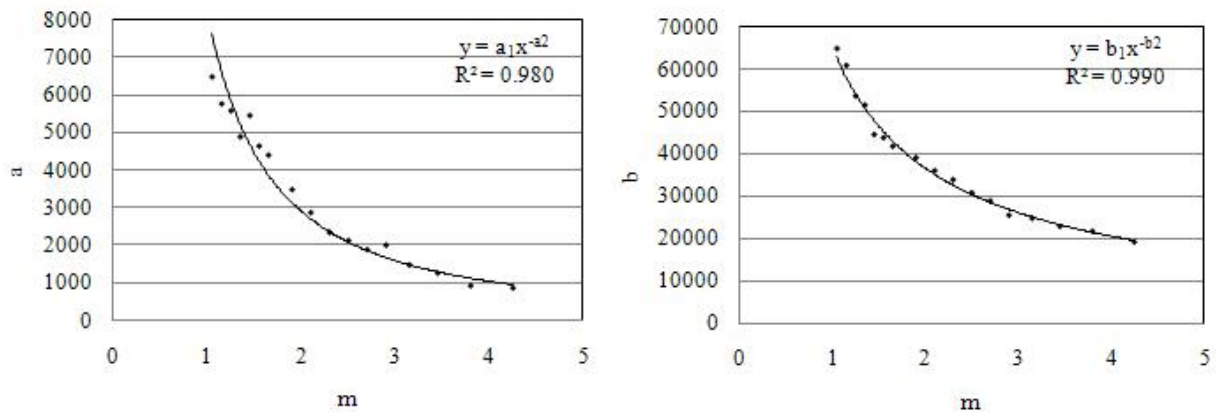


Fig. 4.11 – coefficienti a e b in funzione della massa d’aria relativa m.

I coefficienti *a* e *b* sono a loro volta ben correlabili con un’equazione del tipo esponenziale con coefficienti di correlazione R^2 pari a 0.98 per *a* e 0.99 per *b*.

Nell’eq. 4.18 sono contenuti $E_{vd, sky}$ ed E_{vd} quindi, esplicitando rispetto a E_{vd} è possibile ottenere il legame $E_{vd}=f(E_{vd,sky})$ come funzione di due parametri; la correlazione è riportata nell’eq.4.19.

$$\begin{cases} E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right) \\ a = a_1 + a_2 * m \\ b = b_1 + b_2 * m \end{cases} \quad 4.19$$

Applicando l’eq. 4.19 si ottengono i risultati riportati nelle tabelle 4.5a e 4.5b;

Tabella 4.5a – Costanti delle correlazioni di calcolo di $E_{vd}=f(E_{vd,sky})$ piano orizzontale.

Modelli	All sky	Overcast $\epsilon < 1.065$	Intermediate $1.065 < \epsilon < 6.2$	Clear $\epsilon > 6.2$
SKY 2	$a_1 = 5750$	$a_1 = 1$	$a_1 = 8957.6$	$a_1 = 5100$
$E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right)$	$a_2 = -2.11$	$a_2 = 0$	$a_2 = -0.9542$	$a_2 = -1.12$
$a = a_1 \cdot m^{a_2}$	$b_1 = 84000$	$b_1 = 94000$	$b_1 = 62364$	$b_1 = 88000$
$b = b_1 \cdot m^{b_2}$	$b_2 = -0.933$	$b_2 = 1.04$	$b_2 = -0.951$	$b_2 = -0.84$

Tabella 4.3b - Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori di Illuminamento Diffuso, calcolati per integrazione delle luminanze, ed i dati sperimentali sul piano orizzontale.

	All sky		Overcast $\epsilon < 1.065$		Intermediate $1.065 < \epsilon < 6.2$		Clear $\epsilon > 6.2$	
	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS
SKY 2	-2.65	18.83	-1.37	10.74	-1	14.76	-1.27	15.10

Dall'esame della tabella si osserva come gli errori migliorino sensibilmente nel caso di giorni intermedi e nuvolosi, presi per gruppi distinti, mentre, sono del tutti allineati a quelli delle correlazioni SKY1, per cieli sereni e per tutti i tipi di cielo.

Per i cieli sereni il modello a due parametri non introduce sensibili miglioramenti e quindi è possibile utilizzare il modello SKY1B di più semplice applicazione.

Per tutti i tipi di cielo il risultato dimostra che non è conveniente correlare con la stessa equazione diversi tipi di dati: osservando i coefficienti relativi alle sole giornate nuvolose si nota come la forma dell'eq. 4.19 cambi infatti, si annulla di fatto il coefficiente a ; questo significa che per ottenere risultati più vicini alle misure sperimentali non è possibile utilizzare coefficienti unici per tutte le tipologie di cielo ma è necessario effettuare una distinzione tra i diversi intervalli dell'indice di serenità ϵ inserire gli opportuni coefficienti.

4.6.3– INFLUENZA DEL FATTORE DI INCLINAZIONE R_b .

Al fine di estendere i buoni risultati ottenuti dalla correlazione SKY2 per il piano orizzontale si è cercato di applicare la nuova metodologia ai 4 piani verticali sia aggregando i dati di tutte le superfici sia considerando la suddivisione dei dati in funzione di ϵ . I risultati, in un primo momento, sono risultati in linea con le correlazioni SKY1A e SKY1B. In analogia a quanto fatto per la superficie verticale è stata indagata la dipendenza di $E_{vd,sky}$ dal parametro m ma non sono state trovate subito delle equazioni che ben correlassero i coefficienti a e b dell'eq. 4.19.

Da un esame più approfondito delle tabelle 4.3 e 4.4, si è osservato come le superfici che forniscono i migliori risultati, in tutte le condizioni di cielo siano quelle in “ombra” ovvero o completamente coperte oppure non esposte alla posizione del sole come la superficie nord; questo a suggerito di applicare la metodologia eseguendo la distinzione per tipi di cielo e per serie di dati interessati dalla presenza del sole sulla superficie o dalla sua assenza.

Per essere più precisi sono stati suddivisi i dati in due classi distinte di dati la prima tra l'alba ed il tramonto del sole sulla superficie (indipendentemente dal fatto se la superficie fosse realmente soleggiata), l'altra classe di dati all'esterno dell'intervallo.

La spiegazione fisica di questo fenomeno sta probabilmente nel fatto che la presenza del sole influenza notevolmente i valori di luminanza diffusa della volta celeste soprattutto in condizioni di cielo variabile.

Ai fini dei calcoli si è scelto di utilizzare come discriminante il parametro R_b , in quanto, volendo effettuare lo studio aggregando i dati di tutte le superfici, l'angolo orario o l'altezza solare avrebbero introdotto troppi ulteriori condizioni. In questo modo è sufficiente controllare se $R_b \leq 0$ o $R_b > 0$ per verificare se, in quel dato istante, la superficie è o meno esposta al sole indipendentemente dal fatto che sia realmente colpita dalla luce diretta.

In figura 4.12 è riportato l'andamento di $E_{vd,sky}$ in funzione di k_{vd} per alcuni intervalli di m , per giorni intermedi $1.065 \leq \varepsilon \leq 6.2$ e distinti per $R_b=0$ ed $R_b>0$, mentre in Fig. 4.13 è riportato il *fit* dei coefficienti a dell'eq. 4.19.

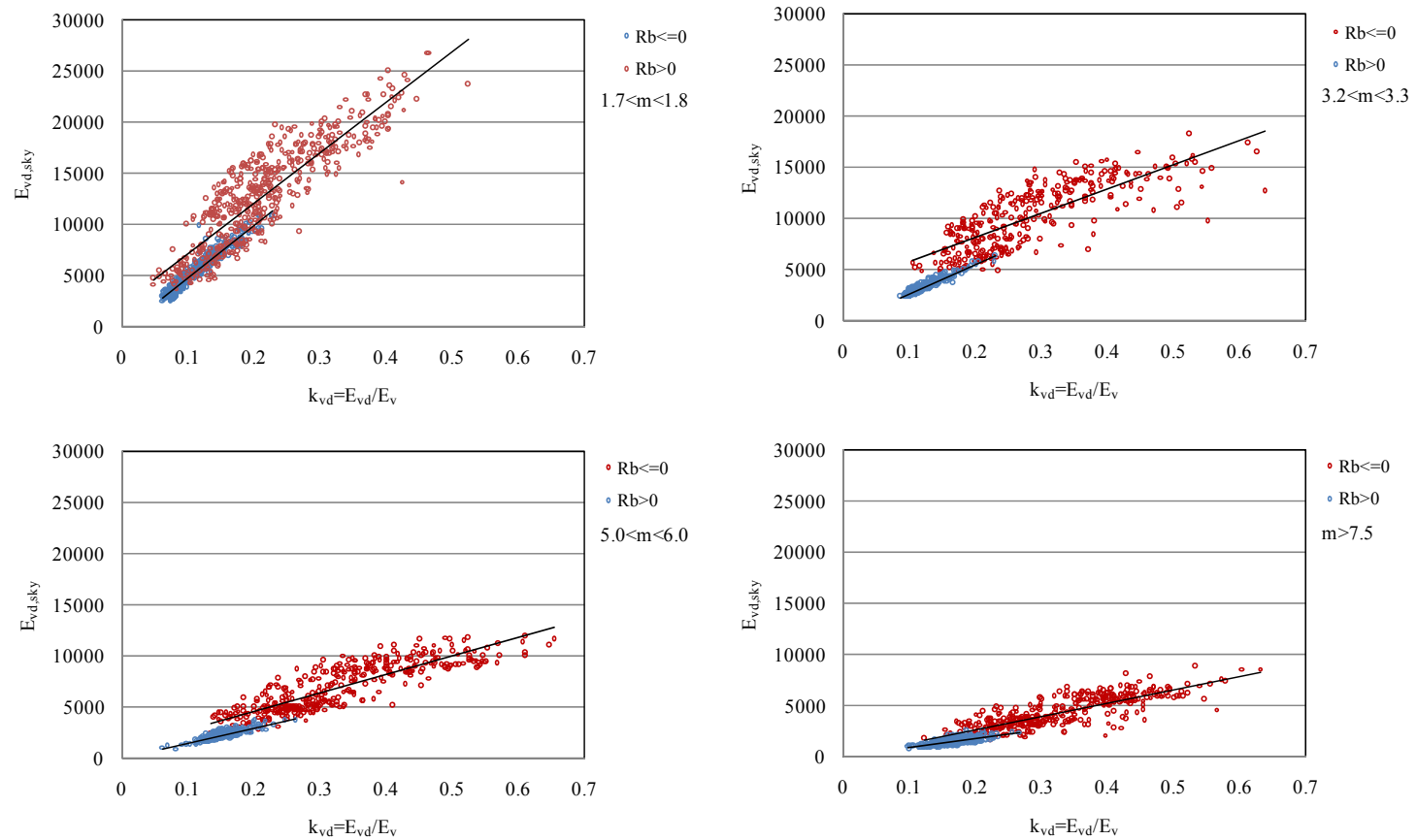


Fig. 4.12 – Illuminamenti $E_{vd,sky}$ in funzione di k_{vd} per tutte le orientazioni in giorni intermedi e classi di m .

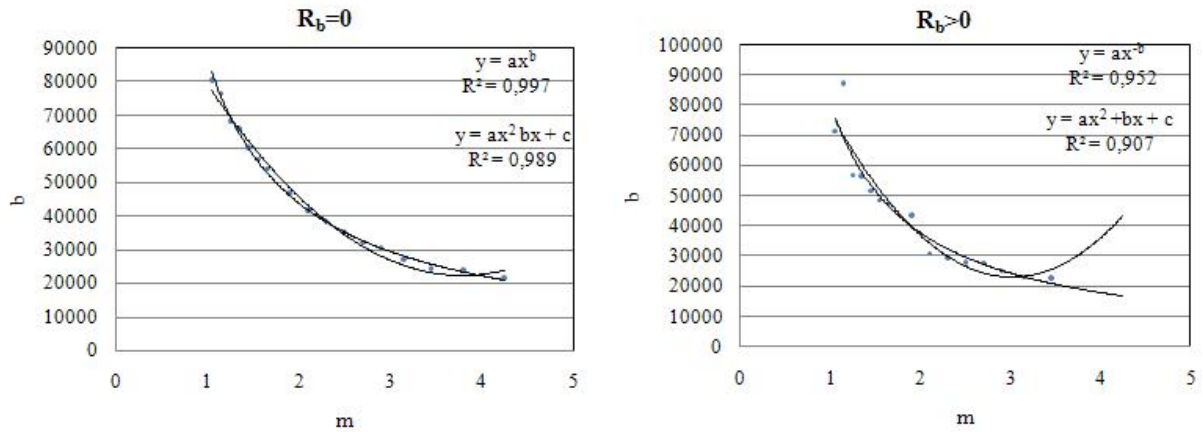


Fig. 4.11 – Coefficienti b in funzione della massa d'aria relativa m , per giorni intermedi e con $R_b \leq 0$ e $R_b > 0$.

Dalle figure si nota la netta distinzione tra i dati interessati da $R_b \leq 0$ e quelli interessati da $R_b > 0$; questa distinzione permane per tutti i valori di m .

In Fig. 4.11 si nota come i coefficienti b siano ben correlati anche da una polinomiale del secondo ordine.

Si è evitato di riportare i grafici relativi a tutta la casistica di giorni nuvolosi e sereni, sia per i coefficienti a che per i coefficienti b , poiché stata cambiata di volta in volta la curva interpolatrice e di seguito vengono proposte le migliori correlazioni.

In tab. 4.4 sono riportati i risultati dei calcoli.

Tabella 4.5a – Costanti delle correlazioni di calcolo di $E_{vd}=f(E_{vd,sky})$ con distinzione tra superfici esposte al sole e superfici in ombra.

	Interm.	Clear	Overcast
<p>SKY2</p> $E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right)$ $a = a_1 + a_2 \cdot m$ $b = b_1 \cdot m^{b_2}$	$R_b \leq 0$ $b_1 = 87000$ $b_2 = -1.06$ $a_1 = 0$ $a_2 = 0$ $a_3 = 0$	$R_b \leq 0$ $b_1 = 84430$ $b_2 = 0.53$ $a_1 = 5800$ $a_2 = -6430$ $a_3 = 0$	$R_b \leq 0$ $b_1 = 90000$ $b_2 = 1.014$ $a_1 = 0$ $a_2 = 0$
	$R_b > 0$ $b_1 = 87000$ $b_2 = -0.718$ $a_1 = 0$ $a_2 = 0$	$R_b > 0$ $b_1 = 90000$ $b_2 = 1.82$ $a_1 = 17500$ $a_2 = -17500$	$R_b > 0$ $b_1 = 90000$ $b_2 = 0.96$ $a_1 = 0$ $a_2 = 0$

Tabella 4.5b – Errori medi percentuali $\bar{\epsilon}$ ed errori quadratici medi percentuali RMS tra i valori di Illuminamento Diffuso, calcolati per integrazione delle luminanze, ed i dati sperimentali sul piano orizzontale e sui 4 piani verticali con $R_b \leq 0$ e $R_b > 0$.

	Interm.		Clear		Overcast	
SKY2A	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS	$\bar{\epsilon}$	RMS
$R_b \leq 0$	-0.44	8.62	-0.01	4.83	0.39	12.09
$R_b > 0$	-0.52	22.80	-0.66	15.35	0.67	13.6
Tutti i dati	-1.45	16.84	-0.31	11.28	-1.28	12.11

In Tabella 4.5b sono riportati i risultati suddividendo i dati per $R_b \leq 0$ e per $R_b > 0$, nella riga riportante “tutti i dati” sono stati riaggregati i dati degli errori medi complessivi applicando la correlazione nelle due classi di dati. I risultati relativi a cieli coperti indicano che la correlazione proposta “degenera” in una curva di tipo lineare ed infatti riapplicando le correlazioni SKY1 suddividendo i dati in $R_b \leq 0$ ed $R_b > 0$ si ottengono dei risultati del tutto confrontabili con quelli di tabella 4.5b.

Dal confronto tra le tabelle 4.5b si nota come i risultati siano nettamente migliorati gli errori in termini di RMS di circa il 4% per i cieli intermedi e sereni.

In definitiva le migliori correlazioni da utilizzare nella correzione dell’illuminamento ottenuto per integrazione delle luminanze $E_{vd,sky}$ al fine di poterlo confrontare con il dato misurato direttamente dagli strumenti sono riportate nelle eqq. 4.20 e 4.21 rispettivamente per superficie orizzontale e superfici verticali:

Superficie Orizzontale

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \leq \varepsilon \leq 1.065 \\ 1.065 \leq \varepsilon \leq 6.2 \\ \varepsilon \geq 6.2 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky}}{a} \right) \\ a = a_1 \cdot m^{a_2} \\ E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right) \\ a = a_1 \cdot m^{a_2} \\ b = b_1 \cdot m^{b_2} \\ E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right) \\ a = a_1 \cdot m^{a_2} \\ b = b_1 \cdot m^{b_2} \end{array} \right. \begin{array}{l} a_1 = 94000 \\ a_2 = -1.04 \\ a_1 = 8957.6 \\ a_2 = -0.9542 \\ b_1 = 62364 \\ b_2 = -0.951 \\ a_1 = 5100 \\ a_2 = -1.12 \\ b_1 = 88000 \\ b_2 = -0.84 \end{array}$$

Superfici Verticali

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \leq \varepsilon \leq 1.065 \\ 1.065 \leq \varepsilon \leq 6.2 \\ \varepsilon \geq 6.2 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} E_{vd} = a \cdot E_{vd,sky} \\ E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right) \\ b = b_1 \cdot m^{b_2} \\ E_{vd} = E_v \left(\frac{E_{vd,sky} - a}{b} \right) \\ a = a_1 + a_2 \cdot m \\ b = b_1 \cdot m^{b_2} \end{array} \right. \begin{array}{l} Rb \leq 0 \\ Rb > 0 \\ Rb \leq 0 \\ Rb > 0 \\ Rb \leq 0 \\ Rb > 0 \end{array} \begin{array}{l} a = 1.759 \\ b = 0.981 \\ a = 1.994 \\ b = 0.962 \\ b_1 = 87000 \\ b_2 = -0.718 \\ b_1 = 87000 \\ b_2 = -1.05 \\ b_1 = 84430 \\ b_2 = 0.53 \\ a_1 = 5800 \\ a_2 = -6430 \\ b_1 = 90000 \\ b_2 = -1.82 \\ a_1 = 17500 \\ a_2 = -17500 \end{array}$$

Nella fig. 4.13 è riportato, per tutti i dati aggregati delle superfici verticali il grafico di confronto tra i dati di illuminamento diffuso calcolati per integrazione, calcolati con la metodologia proposta indicati con $E_{vd,calc}$ e quelli ottenuti per misura diretta con gli strumenti E_{vd} .

Dall'esame della figura si nota come la correzione consente di ottenere una predizione nettamente migliore rispetto alla sola integrazione dei dati di luminanza

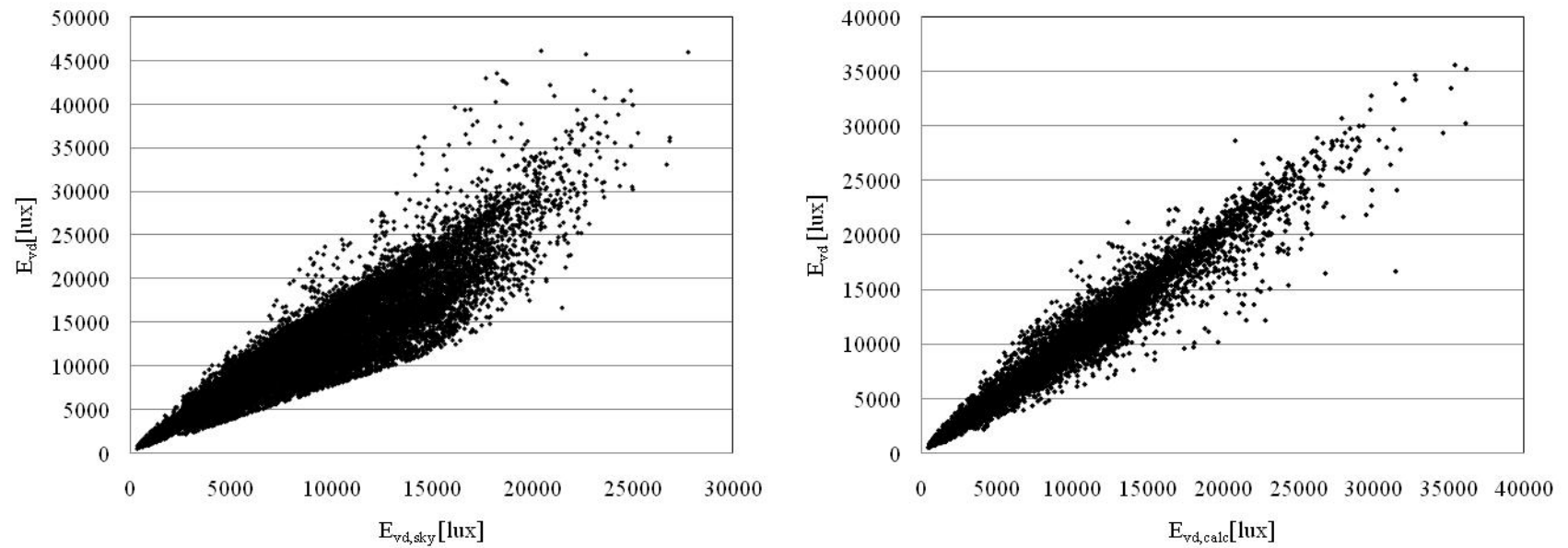


Fig. 4.13 - Confronto tra gli illuminamenti diffusi ottenuti per misura diretta E_{vd} e gli illuminamenti ottenuti per integrazione delle distribuzioni di luminanza $E_{vd,sky}$, e tra gli illuminamento E_{vd} e gli illuminamenti corretti $E_{vd,calc}$ con la metodologia proposta, per superfici verticali, tutte le orientazioni.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi tratta lo studio teorico-sperimentale per il calcolo dei dati di illuminazione naturale incidente sulle superfici variamente inclinate ed orientate; il lavoro condotto è la prosecuzione degli studi, effettuati nel corso degli anni, presso la sezione di Fisica Tecnica dell'Università della Calabria, sulla radiazione solare e l'illuminamento naturale.

I primi studi condotti, circa 15 anni fa, confrontando i principali metodi di calcolo dell'illuminamento, hanno mostrato notevoli differenze di predizione dei valori dell'illuminamento forniti dai principali metodi di calcolo quali il modello CIE, il modello del CSTB, i modelli della IESNA, e le più recenti correlazioni di Perez, talvolta anche dell'ordine del 200-250 %

Nel corso degli ultimi anni è stato rinnovato, in termini di nuove procedure di acquisizione in Labview delle grandezze solari, e potenziato, al livello strumentale attraverso l'acquisto di numerosi strumenti inerenti la misura della luce naturale, il sistema di acquisizione dati presente presso la Stazione di Prova ad Orientamento Variabile.

La Stazione di misura presente presso il Dipartimento di Meccanica dell'UNICAL ha raggiunto, di fatto, il grado di "Research Class Station" secondo lo standard IDMP, e vengono effettuate, con frequenza di 1 minuto ed 1 ora, anche altre misure, legate alla radiazione solare, di grande rilevanza scientifica tra le quali l'illuminamento e l'irraggiamento solare diretto e diffuso.

L'"upgrade" del sistema di acquisizione ed il nuovo stimolo verso questa ricerca sono stati favoriti dalla partecipazione, dell'unità di ricerca locale, agli ultimi due Programmi di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale", il PRIN 2003 dal titolo "*Sistemi di illuminazione naturale e artificiale e loro integrazione ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico*" ed il PRIN 2005 dal titolo "*Parametri climatici, strumenti di valutazione e tecnologie per l'ambiente luminoso naturale ed artificiale ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico*".

Tra la nuova strumentazione installata è stato acquisito uno sky scanner, esperienza unica nel panorama nazionale, con il quale è possibile effettuare con frequenza di 10 min. la scansione dei valori di luminanza ed irradianza della volta celeste secondo il modello proposto da Tregenza.

Negli ultimi anni, inoltre, sono stati intensificati i rapporti con altre unità di ricerca estere, ed è stato avviato un programma di interscambio dei dati acquisiti che ha consentito di avere a disposizione decine di migliaia di dati su cui basare le ricerche.

Nei primi capitoli, di carattere generale, sono state definite le grandezze di interesse nell'ambito della misura della luce naturale ed è stata descritta la strumentazione e le modalità di acquisizione ed elaborazione dei dati secondo gli standard CIE.

Nel terzo capitolo sono state proposte diverse correlazioni per il calcolo dell'illuminamento naturale globale, diretto e diffuso su superfici variamente inclinate ed orientate; sono state verificate le principali correlazioni esistenti in letteratura e sono state ottenute nuove correlazioni di calcolo, basate sul metodo delle "Efficacie Luminose", validate con l'utilizzo dei nostri database, di dati sperimentali, e di quelli di località estere.

E' stata altresì descritta la procedura, semiautomatica, per costruzione e la "fusione" dei database, di Illuminamento ed Irraggiamento e di Luminanza e Radianza, che stanno alla base di tutte le speculazioni di carattere scientifico.

I dati sperimentali, infatti, necessitano a seguito dell'acquisizione, di una classificazione e selezione, secondo gli standard CIE, nonché di elaborazione "intermedie", per il calcolo di alcuni parametri meteo climatici, necessari all'applicazione delle procedure di calcolo, della letteratura e proposte nell'ambito della presente tesi.

Nel quarto capitolo, è stata, proposta una metodologia per il calcolo dei valori illuminamento che parte dalla distribuzione della luminanza della volta celeste, in alternativa alla misura diretta con luxmetri.

La metodologia di integrazione dei dati di luminanza della volta celeste consente di ottenere un dato di illuminamento che può essere messo a confronto con il dato misurato direttamente dagli strumenti.

Le indagini preliminari hanno mostrato delle differenze tra i due diversi dati dovute, prevalentemente, alle condizioni meteo climatiche al momento dell'acquisizione, alle condizioni di variabilità della volta celeste, alla discretizzazione della volta celeste, indotta dalla suddivisione proposta da Tregenza e sulla quale si basano gli strumenti che eseguono la scansione.

E' stata, quindi, proposta una metodologia, per il calcolo del dato di illuminamento su superficie orizzontale o verticale $E_{vd,calc}$, utilizzando l'integrazione delle luminanze acquisite dallo sky scanner $E_{vd,sky}$. La correlazione, è stata individuata attraverso la verifica di dipendenza dei dati di illuminamento $E_{vd,sky}$, dai parametri meteo climatici di uso comune nella letteratura. E' stata individuata un forte dipendenza di $E_{vd,sky}$, nelle diverse condizioni di cielo (perfettamente sereno, completamente nuvoloso e variabile), dall'indice di serenità

dell'illuminamento naturale k_v ; tale legame con dei semplici passaggi matematici ha permesso di correlare $E_{vd,sky}$ a E_{vd} attraverso l'indice di massa d'aria relativa m e attraverso l'illuminamento naturale extratmosferico E_v su piano orizzontale.

La metodologia ha mostrato, un buon accordo con i dati sperimentali, su un anno di dati acquisiti con frequenza di 10 minuti, in tutte le condizioni di cielo con una netta preferenza per i cieli completamente coperti o perfettamente sereni.

Gli studi condotti nel presente lavoro, sebbene per la parte relativa al metodo delle Efficacie luminosa possano considerarsi "esauriti", in quanto la mole di calcoli e verifiche effettuate non danno molti margini per ulteriori affinamenti, aprono diverse linee di ricerca che meriterebbero di essere approfondite negli anni futuri.

POSSIBILI SVILUPPI DELLA RICERCA

Lo studio sul metodo delle efficacie luminose è stato approfondito, avendo a disposizione diverse decine di migliaia di dati rilevati in diverse parti del mondo, sotto molteplici aspetti nell'ambito del presente lavoro.

E' stata studiata nel dettaglio la dipendenza dai vari parametri meteo climatici della letteratura e non sembra possano esserci margini per ulteriori affinamenti.

Gli studi condotti sulle distribuzioni di luminanza e di radianza della volta celeste, di contro, aprono un finestra su diverse strade, da poter indagare ed ancora più complicate da percorrere in virtù dell'elevato numero di dati in gioco.

La metodologia proposta nell'ambito del presente lavoro offre "uno", dei sistemi possibili, per "correggere" i dati integrati dallo sky scanner, basato sulla conoscenza dell'indice di serenità luminosa; possibili sviluppi futuri potrebbero essere:

- Realizzazione di un software dedicato che automatizzi completamente la procedura di costruzione, elaborazione, pulizia, calcolo dei parametri meteo climatici e merge dei database attualmente allo stadio di procedura semi-automatica;
- Applicazione delle correlazioni SKY1 e SKY2 ai dati rilevati nelle altre stazioni di misura distribuite in giro per il mondo con possibile correzione dei coefficienti delle correlazioni e ricerca di un modello "complessivo" di validità generale;
- Ulteriori studi sull'influenza dei parametri meteo climatici nel calcolo di $E_{vd} = f(E_{vd,sky})$ quali la torbidità luminosa T_v , l'indice di serenità luminosa della luce diretta k_{vs} , ed il rapporto L_z/E_v . Il rapporto L_z/E_{vd} , in particolare, è uno dei parametri più utilizzati per identificare le condizioni del cielo, sebbene non sia molto disponibile dalle misure effettuate in situ. L'integrazione della distribuzione di luminanza delle areole dei 145 punti di Tregenza fornisce la radiazione diffusa, e poiché lo zenit rappresenta, per la superficie, orizzontale una posizione dominante rispetto alle altre, l'illuminamento diffuso risulta influenzato da L_z , in che modo e con che entità bisognerebbe stabilirlo con ulteriori indagini e speculazioni scientifiche.
- Ricerca di nuove distribuzioni di luminanza e di radianza con superfici 3D costruite sulla base di dati sperimentali con il metodo dei minimi quadrati, funzione dei parametri meteo climatici principali, e che possano sostituirsi alle distribuzioni "misurate" con lo sky-

scanner per l'effettuazione di rapidi calcoli di integrazione. Una simile ricerca comporterebbe di ottenere delle distribuzioni già "corrette" che sarebbe sufficiente integrare sulle superfici di interesse per ottenerne l'illuminamento diffuso incidente.

BIBLIOGRAFIA

CAPITOLO I

M. A. Cucumo, V. Marinelli e G. Oliveti, *Ingegneria Solare, Principi ed applicazioni*, Pitagora Editrice, Bologna, 1994.

[M. A. Cucumo, V. Marinelli and G. Oliveti, Experimental Data of the Linke Turbidity Factor and Estimates of Angstrom Turbidity Coefficient for two Italian Localities, *Renewable Energy*, 1999, n. 17, pp. 397-410.

M. A Cucumo, D. Kaliakatsos and V. Marinelli, A calculation Method for the Estimation of the Linke Turbidity Factor, *Renewable Energy*, 2000, n. 19, pp. 249-258.

M. A. Cucumo, D. Kaliakatsos and V. Marinelli, Modelli di calcolo della radiazione solare oraria in clear days - Convalida Sperimentale, (CDA) Condizionamento dell'aria Riscaldamento Refrigerazione, 1999, n. 6, pp. 547-557.

J.K. Page *Prediction of Solar Radiation on inclined Surfaces*, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1986.

F. Kasten, The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness, *Solar Energy*, vol. 56 pp.239-244, 1996.

Kasten, F. and A. T. Young (1989). "Revised optical air mass tables and approximation formula." *Applied Optics* 28 (22), 4735-4738.

Kasten A., "A new table and approximate formula for relative optical air mass", *Archiv. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. B*, 14, p. 206-223, (1966).

Stan Darula, Richard Kittler, Christian A. Gueymard "Reference luminous solar constant and solar luminance for illuminance calculations" *Solar Energy*, vol. 79, p. 559-565, 2005.

CAPITOLO II

CIE 69-1987, "Technical Report. Methods of Characterizing illuminance meters and luminance meters", (1987).

CIE 108-1994, "Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement" – TECHNICAL REPORT (1994);

Dieck R. H., "Measurement uncertainty. Methods and Applications", ISA (1997).

CAPITOLO III

Muneer T., Gul M. S., Kubie J., "Models for Estimating Solar Radiation and Illuminance from Meteorological Parameters", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 122, p. 146-153, (2000).

Ruiz E., Soler A., Robledo L., "Assessments of Muneer's Luminous Efficacy Models in Madrid and a Proposal for New Models Based on his Approach", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 123, p. 220-224, (2001).

- Littlefair P. J., "The luminous efficacy of Daylight: a review", *Lighting Research Technology*, vol. 17 (4), p. 162-182, (1985).
- Littlefair P. J., "Measurements of the luminous efficacy of daylight", *Lighting Research Technology*, vol. 20 (4), p. 177-188, (1988).
- Gillette P.E. and Treado S. J., "Correlaciones of Solar Irradiance and Daylight Illuminance for Building Energy Analysis", *ASHRAE Trans.* 91(1A), p. 180-192, (1985).
- Robledo L. and Soler A., "On The Luminous Efficacy of Diffuse Solar Radiation", *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, p. 1181-1190, (2001).
- Gueymard C. A., "SMARTS, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment", Professional Paper FSEC-PF-270-95. Florida Solar Energy Center, 1679 Clearlake Rd., Cocoa, FL 32922, (1995).
- Gueymard C. A., "Parameterized Transmittance Model for Direct Beam and Circumsolar Spectral Irradiance", *Solar Energy*, vol. 71(5), p. 325-346, (2001).
- Gueymard C. A., "Interdisciplinary applications of a versatile spectral solar irradiance model: a review", *Energy*, vol. 30, p. 1551-1576, (2005).
- Gueymard C. A., "Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy modelling", *Energy*, vol. 30, p. 1603-1621, (2005).
- Robledo L. , Soler A., " Luminous Efficacy of Direct Solar Radiation For All Sky Types", *Energy* , Vol. 26, (2001) p. 669-677.
- De Souza R. G., Robledo L., Soler A., Pereira F. O. R., "Clear Sky and all sky direct luminous efficacies for Florianopolis, Brazil", *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, (2005) p. 361-371.
- Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R., (1990) "Modelling daylight availability and irradiance components from direct ad global irradiance", *Solar Energy*, 44, n°5, p.271-289.
- G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly Average Global Radiation, *Solar Energy*, Vol. 28, 1982.
- A. De Miguel, J. Bilbao, R. Aguiar, H. Kambezidis and E. Negro, Diffuse Solar Irradiation Model Evaluation in the North Mediterranean Belt Area, *Solar Energy*, Vol. 70, pp.143-153, 2001.
- M. H. Macagnan, E. Lorenzo and C. Jimenez, Solar Radiation in Madrid, *International J. Solar Energy* 16(1), 1.
- A. Skartveit and J.A. Olseth, A Model for the Diffuse Fraction of Hourly Global Radiation, *Solar Energy*, Vol. 38, pp.271-274, 1987.
- A. Skartveit, J.A. Olseth and M.E. Tuft, An Hourly Diffuse Fraction Model with Correction for Variability and Surface Albedo, *Solar Energy*, Vol. 63, pp.173-183,1998.
- E. L. Maxwell, A Quasi-Physical Model for Converting Hourly global Horizontal to Direct Normal Insolation SERI/ TR-215-3087, 198

M.A. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, Correlaciones of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities. *Renewable Energy* 2008; 33: 2036-2047.

M.A. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, Correlaciones of direct solar luminous efficacy for all sky. Clear sky and intermediate sky conditions and comparisons with experimental data of five localities. *Renewable Energy*, accepted for publication January 2008.

Robledo L, Soler A. Dependence on surface orientation of coefficients in the circumsolar simplified Perez illuminance model for vertical planes at Madrid. *Energy Conversion and Management* 1998; 39(15): 1585-1595.

Li DHW, Lam JC. Evaluation of Slope Irradiance and Illuminance Models Against Measured Hong Kong Data. *Building and Environment* 2000; 35: 501-509.

Soler A, Robledo L. Global Luminous Efficacies on Vertical Surfaces For All Sky Types. *Renewable Energy* 2000; 19: 61-64.

Robledo L, Soler A. Modelling the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces for all sky conditions. *Energy Conversion and Management* 2003; 44: 177-189.

Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 1990; 44(5): 271-289.

The European Solar Radiation Atlas, Vol. 2. Ecole des Mines de Paris 2000.

Mahendra J, Sawhney RL, Buddhi D. Estimation of luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indoor city in Mid Western India. *Renewable Energy* 2007; 32: 1363-1378.

CAPITOLO IV

Robledo L, Soler A. Dependence on surface orientation of coefficients in the circumsolar simplified Perez illuminance model for vertical planes at Madrid. *Energy Conversion and Management* 1998; 39(15): 1585-1595.

Soler A, Robledo L, Global Luminous Efficacies on Vertical Surfaces For All Sky Types. *Renewable Energy* 2000; 19: 61-64.

Li D H W. Lam J.C., Evaluation of Slope Irradiance and Illuminance Models Against Measured Hong Kong Data. *Building and Environment* 2000; 35: 501-509.

Chirattanon S, Rukkwansuk P, Chaiwiwatworakul P, Pakdeepol P. Evaluation of Vertical Illuminance and Irradiance Models Against Data From North Bangkok. *Building and Environment* 2007; 42 (11): 3894-3904.

CIE Technical Report Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, Wien, CIE 108-1994.

P.R. Tregenza, R. Perez, J. Michalsky and R. Seals, Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE TC-3.07, 1993.

D.H.W. Li, C.C.S. Lau, J.C. Lam, Predicting Daylight Illuminance on Inclined Surfaces using Sky Luminance Data, *Energy*, Vol.30 p. 1649-1665, 2005.

R. Perez, R. Seals and J. Michalsky, All Weather Model for Sky Luminance Distribution – Preliminary Configuration and Validation, *Solar Energy*, Vol. 50 (3) p. 235-245, 1993.

- R. Kittler, R. Perez, S. Darula, A New Generation of Sky Standards. Proceedings of the LUX EUROPA Conference, Amsterdam, p. 359-373, 1997.
- Moon, P., Spencer, D. E., „Illumination from a nonuniform sky“, *Illum. Eng. (N.Y.)*, 37, pp. 707-726, 1942.
- CIE, „Spatial distribution of Daylight - Overcast Sky and Clear Sky, Pub. CIEDS 003.2, 1994A.
- CIE, „Spatial Distribution of Daylight – Luminance Distributions of Various Reference Skies“, Pub. CIE No.110 1994 ISBN 3 900 734 52 6, 1994B.
- Kittler, R., „Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies“, *Proc. The CIE International Conference on Sunlight in Buildings, Rotterdam*, pp. 273-285, 1967.
- CIE, „Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky“, CIE S 003/E, 1996.
- CIE, „Standardization of Luminance Distribution on Clear Skies“, Pub. CIE 22 - 1973 (TC-4.2), 1973.
- Nakamura, H., Oki, M., Hayashi, Y., „Luminance distribution of intermediate sky“, *J. Light&Vis. Env.*, Vol. 9, No. 1, pp. 6 - 13, 1985.
- Littlefair, P. J., „The luminance distribution of an AVERAGE SKY“, *Lighting Res. &Tech.*, Vol. 13, No. 4, pp. 192 - 198, 1981.
- Kittler, R., „Luminance distribution characteristics of homogeneous skies: a measurement and prediction strategy“, *Lighting Res. & Tech.*, Vol. 17, No. 4, pp.183-188, 1985.
- Perraudau, M., „Luminance models“, *National Lighting Conference 1988, Cambridge*, pp.291-292, 1988
- Kittler, R., Darula, S., Perez, R., „A set of standard skies, characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design“, *American-Slovak grant project US-SK 92 052*, 1998.
- Nakamura, H., et al., „New sky scanner for the measurement of sky luminance distribution“, *22nd CIE Session Melbourne*, pp.61-62, 1991.
- Igawa, N., Nakamura, H., Koga, Y., Kojo, S., „Classification of sky luminance distribution by coefficient of correlation between measured sky and CIE standard sky – A study on classification method of sky luminance distribution Part 1“, *J. Archit. Environ. Eng., AIJ*, No.494, pp. 15-22, 1997A.
- Igawa, N., Nakamura, H., Koga, Y., Kojo, S., „Relation between the indexes of sky conditions and luminance distribution – A study on classification method of sky luminance distribution Part 2“, *J. Archit. Environ. Eng., AIJ*, No.496, pp. 23-28, 1997B.

RINGRAZIAMENTI

Per aver fornito i dati sperimentali acquisiti presso le stazioni di misura ubicate nelle loro università ed Enti di Ricerca:

Dr. Prof. Dominique Dumortier, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), Vaulx-en-Velin, France.

Dr. Prof. Pierre Ineichen, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie (CUEPE) University of Geneva, Switzerland.

Dr. Prof. Stanislav Darula, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia.

Dr. Prof. Norio Igawa, Graduate School of Human Life Science, Osaka City University, Osaka, Japan.

Per aver coordinato le Unità di Ricerca Nazionali sullo studio della luce naturale:

Prof. Chiara Aghemo, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, Coordinatore Nazionale dei progetti PRIN 2003 dal titolo "*Sistemi di illuminazione naturale e artificiale e loro integrazione ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico*" e 2005 dal titolo "*Parametri climatici, strumenti di valutazione e tecnologie per l'ambiente luminoso naturale ed artificiale ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico*".

Per aver formattato ed impaginato il manoscritto:

Domenico De Rosa, in qualità di babbo del sottoscritto.