



Ricerca di Sistema elettrico

Verso un nuovo parametro per la valutazione del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione

D. Iatauro, B. Mattoni, A. Mangione, F. Bisegna

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AERONAUTICA,
ELETTRICA ED ENERGETICA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

VERSO UN NUOVO PARAMETRO PER LA VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAZIONE

D. Iatauro (ENEA)

B. Mattoni (Dottorando presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica – DIAEE, Università degli Studi Roma “La Sapienza”)

A. Mangione (Dottorando presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica – DIAEE, Università degli Studi Roma “La Sapienza”)

F. Bisegna (Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica – DIAEE, Università degli Studi Roma “La Sapienza”)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D2 Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Metodi per la verifica delle disponibilità di luce naturale e per la stima dei requisiti energetici per illuminazione naturale in edifici nZEB .

Responsabile del Progetto: Luciano Terrinoni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “Verso un nuovo parametro la valutazione del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione” con l'Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica e Energetica

Responsabile scientifico ENEA: Domenico Iatauro

Responsabile scientifico Università: Fabio Bisegna

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 OBIETTIVI ED OGGETTO DELLA RICERCA.....	6
3 METODOLOGIA	6
4 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	7
5 RISULTATI	10
6 CONCLUSIONI.....	26
7 BIBLIOGRAFIA.....	29

Sommario

L'incidenza dei consumi energetici per l'illuminazione artificiale negli ambienti costruiti è sempre più consistente. È evidente quindi come sia fondamentale poter adeguatamente calcolare quale sia il contributo della luce naturale per ottimizzare la spesa energetica. Attualmente nella normativa il parametro di riferimento per mettere in relazione la luce naturale e l'organismo architettonico è il Daylight factor (D). Nel precedente Report si è riscontrato che la condizione standard di cielo con la quale viene calcolato D , valutata nei giorni degli equinozi e dei solstizi ed analizzata ora per ora per un determinato caso studio, non è sempre conservativa, dimostrando che si possono ottenere valori di D inferiori in condizioni di minore nuvolosità.

Nel presente Report, attraverso un confronto tra i valori di D ottenuti con la procedura standard e quelli calcolati con una procedura basata su simulazioni orarie utilizzando dati climatici annuali misurati, ci si pone l'obiettivo di approfondire la potenziale validità di D quale parametro sintetico di valutazione del contributo della luce naturale a fini energetici. Il caso studio preso in esame, al fine di rendere confrontabili i risultati di questa e della precedente ricerca, è un ufficio del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA a Cesano di Roma, lo stesso analizzato lo scorso anno. I risultati mostrano che D standard confrontato con D calcolato come media annuale ottenuto attraverso il set di dati misurati e il modello di cielo di Perez, risulta essere sempre conservativo, non sensibile alla variazione della località e dell'orientamento, e quindi adatto a verifiche di tipo energetico.

Summary

Energy consumption for artificial lighting in built environments is highly increasing. There is therefore the need to adequately calculate the contribution of daylight to optimize energy expense. Currently in the international Standard UNI EN 15193, the reference parameter to relate daylight and buildings is the Daylight factor (D). In the previous Report it was observed that the sky standard condition for D calculation, evaluated on a simple case study in the equinoxes and solstices on a hourly basis, is not always conservative, proving that it is possible to obtain lower D values with an intermediate CIE sky, characterized by a lower level of cloudiness.

In this Report the previous analysis will be further examined: the potential validity of D as a synthetic parameter for the evaluation of natural light contribution for energy purposes will be assessed through a comparison between standard D obtained with the CIE overcast sky and D calculated using an experimental procedure. The latter calculation is based on hourly simulations developed with measured annual climate data. In order to make the results of two Reports comparable, the same case study was used: an office of the Casaccia Research Center of ENEA in Cesano di Roma. The results show that the standard D compared with the annual average D calculated using measured data and the Perez sky model, is always conservative, is not sensitive to the variation of location and orientation, and therefore it is suitable for energy analysis.

1 Introduzione

La luce naturale è una risorsa importante per gli utenti degli edifici e gioca un ruolo essenziale per la salute ed il benessere psico-fisico delle persone.

È una risorsa importante anche in termini economici e di efficienza energetica, in quanto la sua disponibilità consente di ridurre l'utilizzo dell'illuminazione artificiale e quindi di energia. Consente inoltre di diminuire le emissioni di CO₂ ed il riscaldamento globale, ai quali i sistemi di illuminazione artificiale contribuiscono in maniera considerevole [1]

È evidente quindi come sia fondamentale poter valutare con precisione il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale degli ambienti costruiti, ovvero calcolare quale sia il contributo della luce naturale alla loro illuminazione.

Ad oggi, l'unico metodo di stima di questi consumi (nel settore terziario) riconosciuto ufficialmente a livello europeo, è quello contenuto nella norma UNI EN 15193 [2]. Essa definisce un indicatore di densità di energia annua per l'illuminazione (*LENI*), da impiegare nella certificazione energetica degli edifici.

In questa norma il parametro proposto per mettere in relazione la luce naturale e l'organismo architettonico è il Daylight factor (*D*), parametro di riferimento a livello internazionale.

D è una grandezza sintetica adimensionale che indica il rapporto tra l'illuminamento di un punto su un piano orizzontale interno ad un ambiente, comunicante con l'esterno tramite una o più aperture, ed un punto posto all'esterno dell'ambiente, nello stesso istante, considerando l'assenza di ostruzioni esterne ed un cielo con forte nuvolosità (CIE Standard Overcast Sky), escludendo pertanto la componente diretta della luce solare.

Il cielo coperto dovrebbe rappresentare la situazione con la peggiore condizione di luce naturale e quindi la situazione più cautelativa [3] nella valutazione del contributo della luce diurna all'illuminazione di spazi interni: il *D* calcolato con condizioni di cielo Overcast sarebbe perciò quello con il valore minimo ottenibile (il più conservativo).

Con una procedura inversa, attraverso *D* si può calcolare un valore di soglia dell'illuminamento esterno al di sotto del quale non è possibile garantire i livelli di illuminamento interni prescritti per i compiti svolti [4], rendendo necessaria l'accensione dell'impianto di illuminazione artificiale; a livello energetico *D* potrebbe quindi funzionare come "interruttore" per decidere quando accendere o spegnere l'impianto di illuminazione artificiale. La sua conservatività è perciò indispensabile per definire la condizione di consumi energetici massimi per l'illuminazione.

La ricerca presentata lo scorso anno, che si è conclusa con la pubblicazione del report [3], ha evidenziato che la condizione standard di cielo con la quale viene calcolato *D*, valutata nei giorni degli equinozi e dei solstizi ed analizzata ora per ora per un determinato caso studio, non è sempre conservativa, dimostrando che si possono ottenere valori di *D* inferiori in condizioni di minore nuvolosità (cieli Intermediate without Sun e Clear without Sun).

Si è ipotizzato che questa non conservatività potrebbe essere legata alla staticità di *D*, in quanto non tiene in considerazione la variabilità delle condizioni del cielo reale, e non risulta sensibile alle variazioni di latitudine e ai differenti orientamenti degli edifici.

Negli ultimi anni sono stati proposti approcci alternativi [5, 6, 7, 8, 9, 10], i quali però, se da un lato concordano con la necessità di valutare condizioni di cielo reali introducendo i dati climatici nei processi di calcolo, al fine di valutare con maggiore precisione la quantità di luce naturale per ogni specifico ambito analizzato, dall'altro differiscono nella definizione di quale fattore può essere utilizzato per valutare la penetrazione della luce diurna negli edifici.

Benché nei casi studiati si sia evidenziata una non attendibilità di *D* come indicatore del rapporto tra organismo architettonico e clima luminoso, questo parametro conserva degli innegabili punti di forza, tra cui la rapidità di calcolo e la facilità d'uso, caratteristiche che non si ritrovano nei parametri utilizzati per analisi con dati climatici.

Il compromesso tra la facilità e l'accuratezza è quindi l'obiettivo principale da conseguire per la definizione del calcolo delle prestazioni energetiche.

Il presente lavoro approfondirà la presunta non conservatività di *D*, ampliando il numero di casi analizzati, utilizzando, oltre al CIE Standard Overcast Sky, il modello di cielo di Perez [11, 12, 13, 14, 15] e dati climatici locali misurati per la definizione del clima luminoso delle località prese in esame. Questa verifica verrà svolta considerando un *D* giornaliero, mensile e annuale. Qualora se ne riscontrasse la conservatività, partendo da

esso si potrebbe cercare di definire un indicatore della luce naturale semplice ma affidabile, che consentirebbe di mettere in relazione le prestazioni energetiche, i livelli di illuminamento necessari allo svolgimento del compito visivo, la disponibilità di luce naturale in diverse località, secondo differenti orientamenti.

2 Obiettivi ed oggetto della ricerca

I risultati della precedente ricerca [3] hanno evidenziato che:

- D calcolato con cielo Overcast è sempre conservativo rispetto al cielo Clear;
- rispetto al cielo Intermediate, D con cielo Overcast risulta conservativo a Nord solamente nel 20% dei casi, nel 60% dei casi ad Est e Ovest, mentre a Sud è sempre conservativo;
- D calcolato con cielo Clear è sempre superiore a D calcolato con cielo Intermediate;
- non c'è proporzionalità o corrispondenza tra i valori di D (calcolati con qualsiasi tipo di cielo) e i valori di illuminamento interno E_m ;
- avendo riscontrato diversi casi di non conservatività del D calcolato in condizioni standard, si ipotizza il parametro come inattendibile in ambito energetico.

Nel presente report, attraverso un confronto tra i valori di D ottenuti con la procedura standard e quelli calcolati con una procedura basata su simulazioni orarie utilizzando dati climatici annuali misurati (dati di irradianza globale e diffusa forniti da ENEA, misurati dal 2006 al 2016), che verrà chiamato D^* , ci si pone l'obiettivo di approfondire la potenziale validità di D quale parametro sintetico di valutazione del contributo della luce naturale a fini energetici. Estendendo il numero delle simulazioni, si analizzerà l'andamento di D e D^* lungo un anno, per comprendere se cumulativamente la condizione standard possa risultare la più conservativa. Una volta effettuata questa verifica, si valuteranno le differenze tra D e D^* al variare dei parametri presi in esame (ora del giorno, località e orientamento). Nel caso in cui si riscontrassero differenze tra le due grandezze si potrà procedere alla definizione di coefficienti/parametri per metterle in relazione. Successivamente si quantificherà l'impatto di queste eventuali differenze sulla percentuale oraria di disponibilità di luce diurna annuale al variare dei periodi operativi, delle prescrizioni per il compito visivo svolto, dell'orientamento e della latitudine della località analizzata.

Infine verrà effettuato il calcolo del $LENI$ utilizzando sia D che D^* applicando il metodo Alternativo definito nel Report [4], al fine di quantificare il peso del Daylight factor (standard o corretto) nel calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione.

3 Metodologia

In questo approfondimento sulla conservatività di D si è fatto ricorso ad un approccio integrato sia numerico che sperimentale effettuando una serie di simulazioni basate su dati climatici misurati.

Il caso studio preso in esame, al fine di rendere confrontabili i risultati di questa e della precedente ricerca, è un ufficio del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA a Cesano di Roma, lo stesso analizzato lo scorso anno.

Il modello numerico è stato sviluppato attraverso diversi software come ad esempio Rhinoceros 3D v.5.14 [16] per la realizzazione del modello tridimensionale del caso studio.

Con Grasshopper v.0.9 [17] sono stati scritti gli algoritmi di calcolo che hanno permesso di effettuare, in tempi ridotti, oltre 100'000 simulazioni. Grasshopper è un editor di algoritmi grafico sviluppato da David Rutten presso Robert McNeel & Associates. Come plug-in per Rhinoceros 3D, Grasshopper è integrato con l'ambiente di modellazione per permettere un controllo parametrico preciso sui modelli e l'automatizzazione di task, consentendo di controllare i flussi di lavoro attraverso un'interfaccia grafica.

La plug-in per Grasshopper, DIVA-for-Rhino v.4.0 [18], ha operato da interfaccia tra il software di modellazione tridimensionale ed il software di calcolo illuminotecnico Radiance

Sul modello sono state effettuate simulazioni orarie al fine di calcolare i livelli di illuminamento, puntuali per gli esterni e medi per l'area del compito interna. La combinazione di questi dati ha permesso di calcolare il Fattore di luce diurna medio (D_{avg}^*), parametro che non considera la penetrazione di luce diurna in un ambiente in maniera puntuale (come farebbe D o D^*) ma rappresenta una media di valori nell'area del compito precedentemente individuata.

Questi calcoli sono stati ripetuti per un intero anno, utilizzando all'interno del software DIVA-for-Rhino il modello di cielo di Perez (Perez All-Weather Sky Model). Questo è un modello matematico che fornisce una distribuzione spaziale della luminanza del cielo fisicamente corretta, elaborato a partire da un vasto set di dati sperimentali. Ad oggi rappresenta di fatto lo standard per il calcolo della luce naturale in ambito scientifico, in quanto usa dati climatici reali misurati dalle stazioni meteorologiche. Partendo dai valori di irradianza diffusa orizzontale ($Diff.HI$) e diretta normale (DNI) fornisce la variazione spaziale della luminanza della volta celeste. Sono perciò stati forniti in input i dati climatici misurati da ENEA.

Queste simulazioni sono state ripetute per ognuna delle 3 località prese in esame, per i 4 diversi orientamenti. Si è proceduto quindi alla costruzione, tramite un algoritmo scritto in Grasshopper, di un anno tipo composto da 12 giorni (uno per ogni mese) caratterizzati da una forte nuvolosità, dei quali sono stati estrapolati successivamente i valori orari di illuminamento interno ed esterno, e di D_{avg}^* (sempre per le 3 località ed i 4 orientamenti).

Questi valori sono stati analizzati e confrontati con quelli ottenuti in condizioni di cielo CIE Standard Overcast. I livelli di illuminamento medi mantenuti interni E_m sono stati aggregati in diverse fasce orarie ed elaborati per definire percentuali di disponibilità di luce naturale per lo svolgimento di diversi compiti visivi, percentuali che sono in diretta relazione al fabbisogno energetico per l'illuminazione degli edifici.

4 Descrizione del caso studio

Tutte le simulazioni sono state condotte sul modello tridimensionale di uno degli uffici dell'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, costruzione caratterizzata da un'impronta a terra rettangolare di 48 x 12 m e suddivisa in due piani, entrambi con altezza interna di 2.7 m.



Figura 1 Edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA – fonte Bing Maps.

Nell'edificio gli uffici (mono-affaccio) sono esposti a Nord e a Sud, separati da un corridoio.

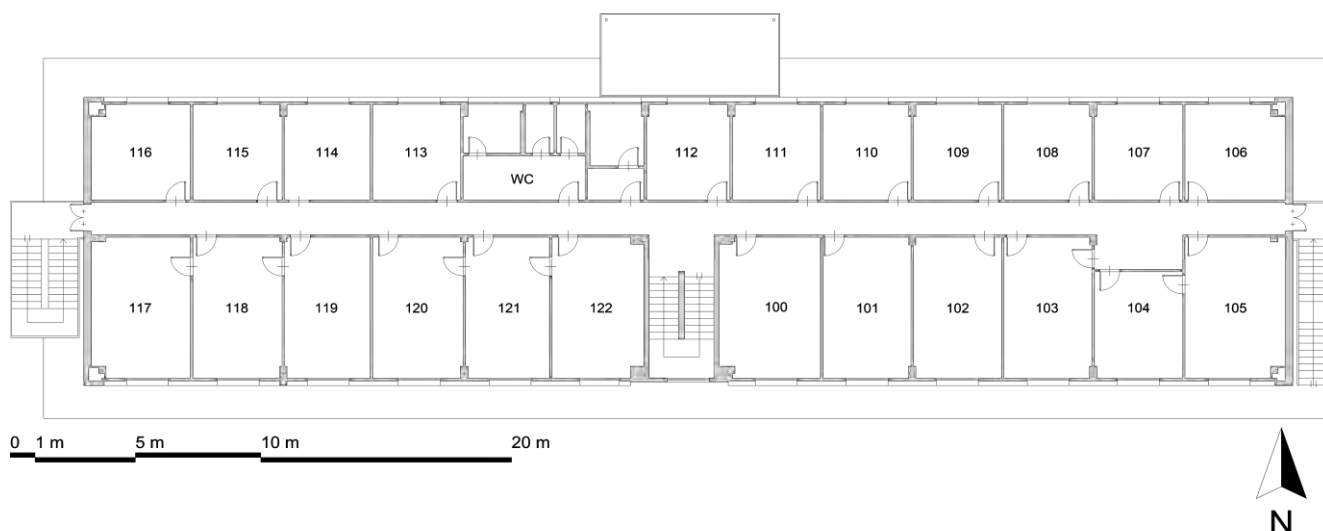


Figura 2 Planimetria dell'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

Nel presente report è stato preso in esame l'ambiente 108 (Figura 2) le cui dimensioni e caratteristiche principali sono riportate in (Tabella 1).

I coefficienti di riflessione sono stati calcolati per mezzo dello spettroradiometro colorimetro Minolta CS-1000-A (Figura 3) che permette di effettuare misure di riflettanza alle varie lunghezze d'onda del visibile. L'illuminante di riferimento utilizzato per le misure è la luce naturale D65.



Figura 3 Spettroradiometro-colorimetro Minolta CS-1000-A.

Le misure di riflettanza medie alle varie lunghezze d'onda e pesate sulla curva di visibilità per ognuna delle superfici dell'ambiente sono riportate in (Tabella 1).

Tabella 1 Caratteristiche fisico/geometriche dell'ufficio n. 108.

Dimensioni dell'ambiente	Larghezza [m]	3.5
	Profondità [m]	4.0
	Altezza [m]	2.7
Caratteristiche della finestra	Altezza [m]	1.25
	Larghezza [m]	3.26
	Altezza davanzale [m]	0.95
	Distanza dal soffitto [m]	0.5
	Coefficiente di trasmissione del vetro τ	0.80
Coefficienti di riflessione	Pareti	0.80
	Soffitto	0.86
	Pavimento	0.18

Si è scelto di simulare l'ufficio ponendo idealmente l'edificio a Milano, Roma e Palermo. I periodi operativi sono stati estrapolati dalla UNI EN 15193 (8:00-17:00) [2] e dalle curve di Dressler (6:00-18:00, 7:00-17:00, 8:00-16:00, 7:00-15:00, 9:00-17:00) [4]. Il caso studio è stato analizzato numericamente modellando l'ambiente con il software Rhinoceros 3D, mentre l'analisi illuminotecnica è stata condotta tramite il software Grasshopper e la sua plug-in DIVA-for-Rhino, interfaccia del motore di calcolo Radiance. I parametri della simulazione sono elencati nella (Tabella 2).

Tabella 2 Parametri del modello per le simulazioni.

Griglia di calcolo	Altezza [m]		0.75
	Distanza dalle pareti [m]		0.5
	Distanze dei punti [m]		0.1
Parametri di calcolo di Radiance	Qualità di calcolo		Alta
	Ambient Bounces (-ab)		8
	Ambient Divisions (-ad)		512
	Ambient super-samples (-as)		256
	Ambient Resolution (-ar)		32
	Ambient accuracy (-aa)		0.1
	Materiali	Soffitto	Coefficiente di riflessione
Specularity			0
Roughness			0
Pareti		Coefficiente di riflessione	0.80
		Specularity	0
		Roughness	0.2
Pavimento		Coefficiente di riflessione	0.18
		Specularity	0
		Roughness	0.3
Porta		Coefficiente di riflessione	0.5
		Specularity	0
		Roughness	0
Infisso		Coefficiente di riflessione	0.52
		Specularity	0.15
		Roughness	0.05
Vetro		Coefficiente di riflessione	0.8
Piano esterno		Coefficiente di riflessione	0.1
		Specularity	0
		Roughness	0

I materiali in Radiance sono descritti tramite i tre valori di riflettenza in corrispondenza delle lunghezze d'onda del rosso, del verde e del blu, la componente speculare e il fattore di ruvidità.

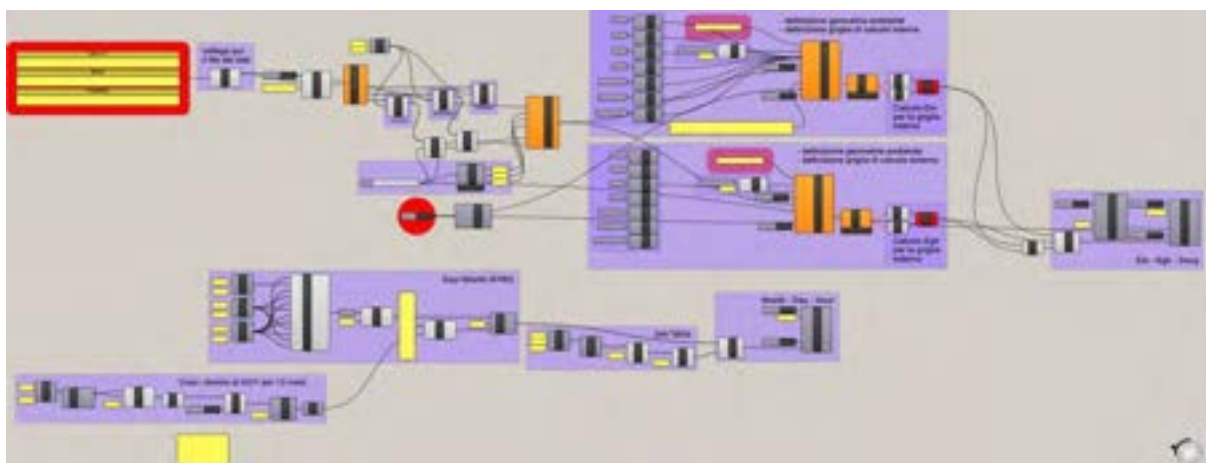


Figura 4 Algoritmo scritto in Grasshopper e DIVA-for-Rhino per il calcolo di E_m , E_{gh} , D_{avg}^* per le 8760 ore di un anno.

L'algoritmo per il calcolo del D_{avg}^* a partire dai valori di illuminamento esterno ed interno, prevede come dati di input l'irradianza diffusa sul piano orizzontale ($Diff.HI$) e l'irradianza diretta sul piano normale alla posizione del sole (DNI). Questi dati sono stati estratti dagli anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale (AMTIN) realizzati dall'ENEA elaborando la serie storica di misurazioni 2006-2016 (11 anni di dati). Attraverso il modello di cielo di Perez sono stati ottenuti i valori di illuminamento globale su un piano orizzontale esterno (E_{gh}) e quelli di illuminamento medio sull'area interna del compito (E_m). Il risultato del rapporto tra E_m ed E_{gh} fornisce il valore del D_{avg}^* . L'algoritmo ha permesso di automatizzare il calcolo del D_{avg}^* per le 8760 ore dell'anno, variando l'orientamento dell'ufficio secondo i quattro punti cardinali, esponendo la finestra a Nord, Est, Sud ed Ovest. Le simulazioni sono state ripetute per Milano, Roma e Palermo, per un totale di 105'120 iterazioni.

Un secondo algoritmo è stato scritto per costruire un anno tipo composto dal giorno mediamente più nuvoloso di ogni mese.

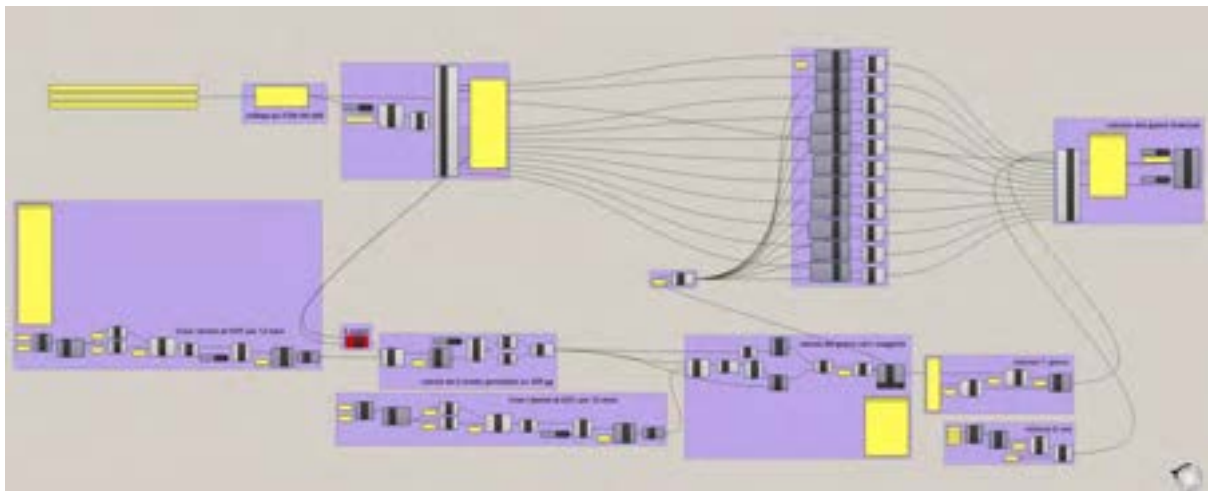


Figura 5 Algoritmo scritto in Grasshopper per la creazione di un anno tipo composta dai giorni medi mensili più nuvolosi.

Per definire il giorno mediamente più nuvoloso si è considerata la frazione dell'irradianza diffusa ($Diff.HI$) rispetto a quella globale (GHI), entrambe calcolate sul piano orizzontale, su base oraria secondo l'Equazione 1:

$$k = \frac{Diff.HI}{GHI} [\%] \quad \text{[Equazione 1]}$$

Per valori di k inferiori a 0.3 l'ora va considerata "serena" (assenza di nubi) [xx]. Stabilite le ore serene, è possibile individuare in maniera complementare quelle "nuvolose". È stato considerato il k medio giornaliero ed è stato scelto il giorno con il valore maggiore per ogni mese. Per questo giorno sono stati estrapolati i dati precedentemente calcolati di D_{avg}^* , E_m ed E_{gh} . L'algoritmo ha formattato automaticamente i dati così ottenuti in un foglio di calcolo attraverso il quale sono state effettuate le comparazioni e le analisi.

Ricapitolando, i parametri di variazione delle simulazioni sono:

- i tipi di cielo (Standard CIE Overcast e modello del cielo di Perez);
- le ore dell'anno (8760);
- gli orientamenti (Nord, Est, Sud, Ovest);
- i periodi operativi (8:00-17:00, 6:00-18:00, 7:00-17:00, 8:00-16:00, 7:00-15:00, 9:00-17:00).

5 Risultati

I risultati ottenuti nello studio dello scorso anno hanno evidenziato come, in diverse ore dei giorni analizzati, il Daylight Factor calcolato in condizioni di cielo standard (CIE Overcast) fosse superiore a quello calcolato in

altre condizioni di cielo (Intermediate without sun). Questo ha mostrato D come non conservativo e quindi non indicato per valutazioni di tipo energetico.

Si è reso perciò necessario un ulteriore approfondimento per comprendere quale sia la reale frequenza di questa non conservatività, questa volta però paragonando D a quello ottenuto partendo da condizioni di cielo reali utilizzando dati climatici misurati (D^*), e quale impatto eventualmente questo disallineamento abbia dal punto di vista energetico.

Attraverso un algoritmo scritto in Grasshopper e DIVA-for-Rhino, sono stati calcolati i valori del Daylight Factor medio (D_{avg}^*) sul piano di lavoro nell'ufficio preso in esame, per le 8760 ore di un anno. Una volta estrapolato per ogni mese il giorno mediamente più nuvoloso (quello con il k orario medio maggiore), il D_{avg}^* ottenuto nelle varie ore di questi 12 giorni è stato confrontato con il D_{avg} , variando la località e l'orientamento dell'ambiente.

Nelle Tabella 3, Tabella 6, Tabella 7 e Figura 6, Figura 9, Figura 10 sono mostrati i giorni in cui si registrano valori di D_{avg}^* inferiore a quelli di D_{avg} , nelle tre località per i vari orientamenti. Nelle Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6, Tabella 8 e Figura 7, Figura 8, Figura 11 sono mostrati i giorni in cui D_{avg}^* risulta essere sempre superiore a D_{avg} .

L'analisi effettuata su tutti i 12 giorni dell'anno tipo ha evidenziato che, mentre in alcune date si riscontra la piena conservatività del D_{avg} ad ogni ora analizzata, soprattutto nei mesi invernali (Figura 7, Figura 8, Figura 11), in altre, a conferma di quanto verificato nella precedente ricerca, il D_{avg} risulta essere non conservativo in diverse ore. Soprattutto nei mesi estivi (Figura 6, Figura 9, Figura 10) si nota un andamento variabile del D_{avg}^* che in diversi casi (Tabella 3, Tabella 6, Tabella 7) è inferiore al D_{avg} (i casi sono indicati in rosso nelle tabelle): a Roma, il 24 luglio alle 12:00, per l'ambiente con finestra orientata a Nord, abbiamo la differenza massima pari a 4.5% (Tabella 6).

Questa variabilità ha chiaramente una diretta correlazione con il k : nei giorni in cui D_{avg} risulta essere conservativo, notiamo come i valori di k siano in linea di massima superiori al 98% per tutte le ore (Tabella 4, Tabella 5, Tabella 8), indicando il cielo come sempre fortemente nuvoloso. Per altre date selezionate, nonostante queste rappresentino il giorno mediamente più nuvoloso del mese, si è riscontrato una grande variabilità della nuvolosità durante l'arco della giornata, e conseguentemente una altrettanta variabilità del k i cui valori oscillano tra il 30.6% ed il 98.8% a Milano (2 luglio), il 13.5% ed il 99.9% a Roma (26 luglio), il 18.7% ed il 96.6% a Palermo (9 agosto).

Come già evidenziato [3], quando il cielo presenta una nuvolosità intermedia (in linea di massima con un $k < 98\%$), il D_{avg} non è sempre conservativo.

È però necessario segnalare che:

- tendenzialmente nell'ora in cui i valori di k risultano bassi (cielo con nuvolosità intermedia o sereno), i valori di D_{avg}^* sono molto alti per l'orientamento che in quel momento è esposto direttamente al Sole, mentre contemporaneamente per gli altri orientamenti, il valore del D_{avg}^* è inferiore a quello del D_{avg} . Questo trend si riscontra perciò ad Est e Ovest all'inizio o alla fine della giornata, nei mesi estivi quando il Sole è piuttosto basso e penetra direttamente nell'ambiente; a Sud il discorso è valido nelle ore centrali della giornata, nei mesi invernali e primaverili. Questi dati si allineano con quanto riscontrato nel report precedente in cui il D_{avg} è risultato non sempre conservativo;
- i cieli con nuvolosità intermedia simulati attraverso il modello di Perez, hanno sia la componente diretta che quella indiretta della luce diurna, rendendo la comparazione tra D_{avg}^* e D_{avg} difficile. Quando il k è inferiore al 30%, il cielo è da considerarsi perfino sereno. In questo caso il D_{avg}^* , stando ai risultati della scorsa ricerca, dovrebbe risultare sempre conservativo, ma in questo nuovo approfondimento, questa relazione non è stata quasi mai riscontrata (Tabella 6 dalle 8:00 alle 12:00); questo è probabilmente dovuto alla impossibilità di isolare la componente diretta del sole in casi in cui il k è inferiore al 90%.
- un cielo con nuvolosità intermedia avrà una distribuzione delle nubi non identificabile: potrebbe quindi risultare "scoperta" la porzione di cielo dove è presente il Sole, facendo entrare nel calcolo la componente diretta della luce solare.

Tabella 3 Confronto D_{avg}^* e D_{avg} , Milano, giorno mediamente più nuvoloso di luglio, 4 orientamenti (in rosso le ore in cui D_{avg} non risulta conservativo).

Day	Hour (CET)	k [%]	Davg* North [%]	Davg* East [%]	Davg* South [%]	Davg* West [%]	Davg [%]
2-Jul	05:00:00	98.6	7.3	7.8	6.3	6.1	5.7
2-Jul	06:00:00	97.4	7.1	8.1	6.4	6.0	5.7
2-Jul	07:00:00	95.6	6.7	8.6	6.5	6.1	5.7
2-Jul	08:00:00	58.0	4.5	25.2	4.4	3.4	5.7
2-Jul	09:00:00	85.9	5.3	14.8	6.5	4.1	5.7
2-Jul	10:00:00	96.3	6.1	6.8	6.4	5.9	5.7
2-Jul	11:00:00	99.3	5.9	6.4	6.4	5.9	5.7
2-Jul	12:00:00	85.0	3.5	5.0	6.9	4.1	5.7
2-Jul	13:00:00	44.8	2.2	2.5	5.2	3.2	5.7
2-Jul	14:00:00	45.2	2.4	2.3	4.3	5.1	5.7
2-Jul	15:00:00	34.2	2.2	2.1	3.4	10.9	5.7
2-Jul	16:00:00	73.9	4.2	3.5	5.1	16.0	5.7
2-Jul	17:00:00	30.6	2.9	2.3	2.8	32.0	5.7
2-Jul	18:00:00	43.7	5.2	3.1	3.6	37.6	5.7
2-Jul	19:00:00	97.0	7.3	5.8	6.3	8.8	5.7
2-Jul	20:00:00	98.8	7.0	6.2	6.4	7.2	5.7

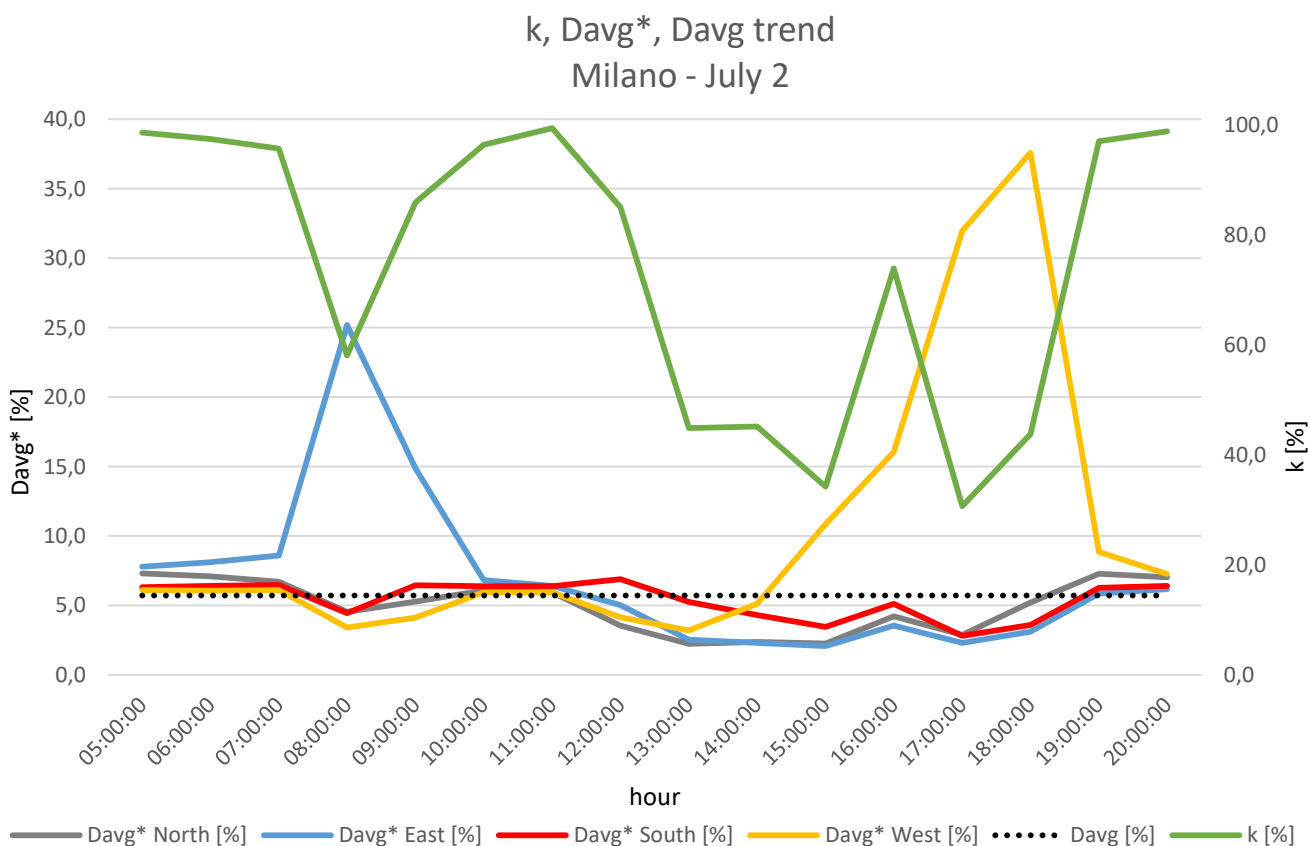


Figura 6 Andamento orario di k , D_{avg}^* e D_{avg} , Milano, giorno mediamente più nuvoloso di luglio, 4 orientamenti.

Tabella 4 Confronto D_{avg}^* e D_{avg} , Milano, giorno mediamente più nuvoloso di novembre, 4 orientamenti.

Day	Hour (CET)	k [%]	Davg* North [%]	Davg* East [%]	Davg* South [%]	Davg* West [%]	Davg [%]
28-Nov	08:00:00	100.0	6.5	6.5	6.6	6.3	5.7
28-Nov	09:00:00	100.0	6.5	6.7	6.7	6.5	5.7
28-Nov	10:00:00	99.9	6.4	6.9	7.0	6.6	5.7
28-Nov	11:00:00	99.9	6.5	6.8	6.9	6.6	5.7
28-Nov	12:00:00	99.9	6.4	6.6	7.2	6.7	5.7
28-Nov	13:00:00	99.9	6.3	6.6	7.2	6.8	5.7
28-Nov	14:00:00	99.9	6.5	6.6	6.9	6.8	5.7
28-Nov	15:00:00	99.9	6.5	6.6	6.9	6.8	5.7
28-Nov	16:00:00	100.0	6.5	6.5	6.7	6.6	5.7

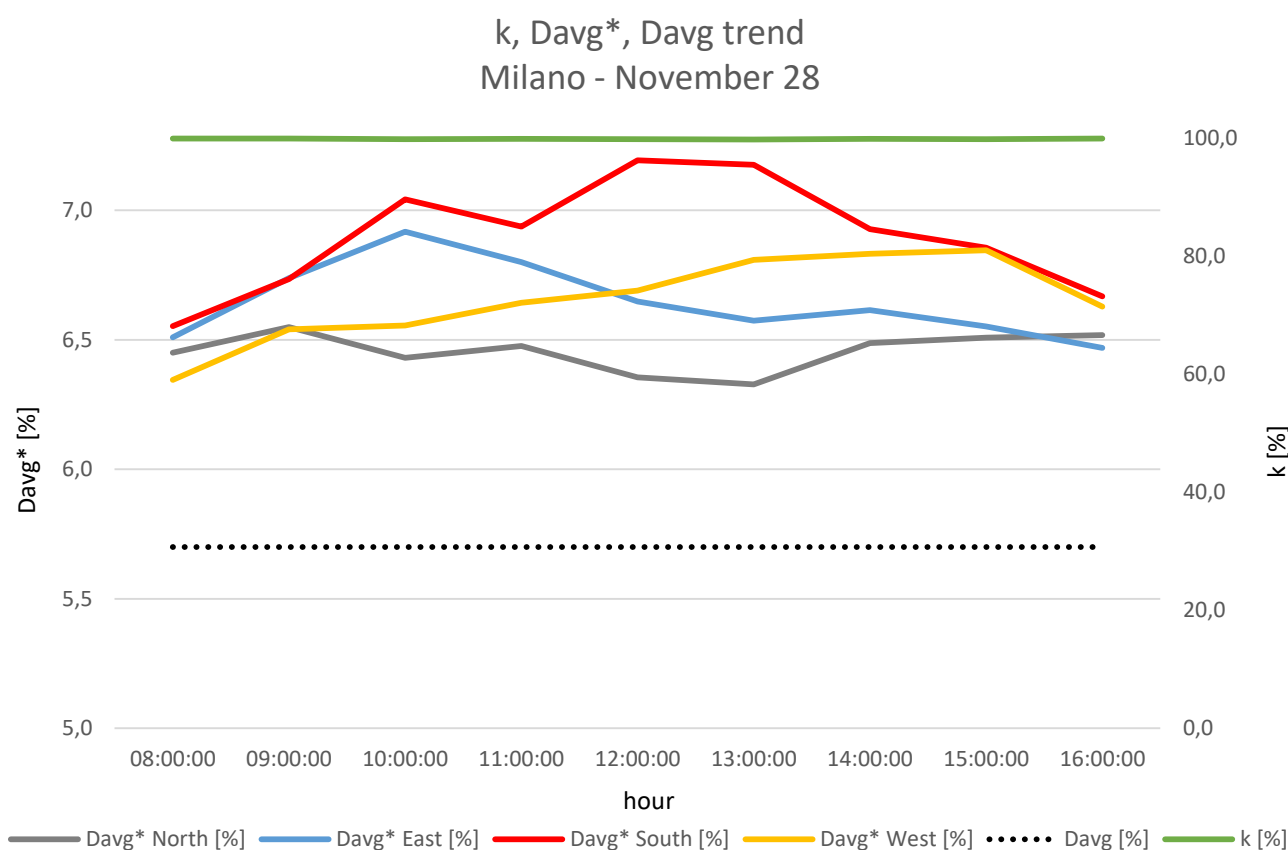


Figura 7 Andamento orario di k , D_{avg}^* e D_{avg} , Milano, giorno mediamente più nuvoloso di novembre, 4 orientamenti.

Tabella 5 Confronto D_{avg}^* e D_{avg} , Roma, giorno mediamente più nuvoloso di gennaio, 4 orientamenti.

Day	Hour (CET)	k [%]	Davg North [%]	Davg East [%]	Davg South [%]	Davg West [%]	D CIE Overcast [%]
26-Jan	08:00:00	100.0	6.5	6.6	6.7	6.4	5.7
26-Jan	09:00:00	99.9	6.5	6.9	6.9	6.5	5.7
26-Jan	10:00:00	99.9	6.4	6.9	7.0	6.5	5.7
26-Jan	11:00:00	99.8	6.3	6.9	7.3	6.5	5.7
26-Jan	12:00:00	99.9	6.4	6.7	7.1	6.7	5.7
26-Jan	13:00:00	99.9	6.5	6.7	6.8	6.7	5.7
26-Jan	14:00:00	99.4	6.2	6.4	7.5	7.0	5.7
26-Jan	15:00:00	99.9	6.5	6.5	6.9	6.8	5.7
26-Jan	16:00:00	100.0	6.6	6.4	6.8	6.8	5.7
26-Jan	17:00:00	100.0	6.4	6.3	6.6	6.5	5.7

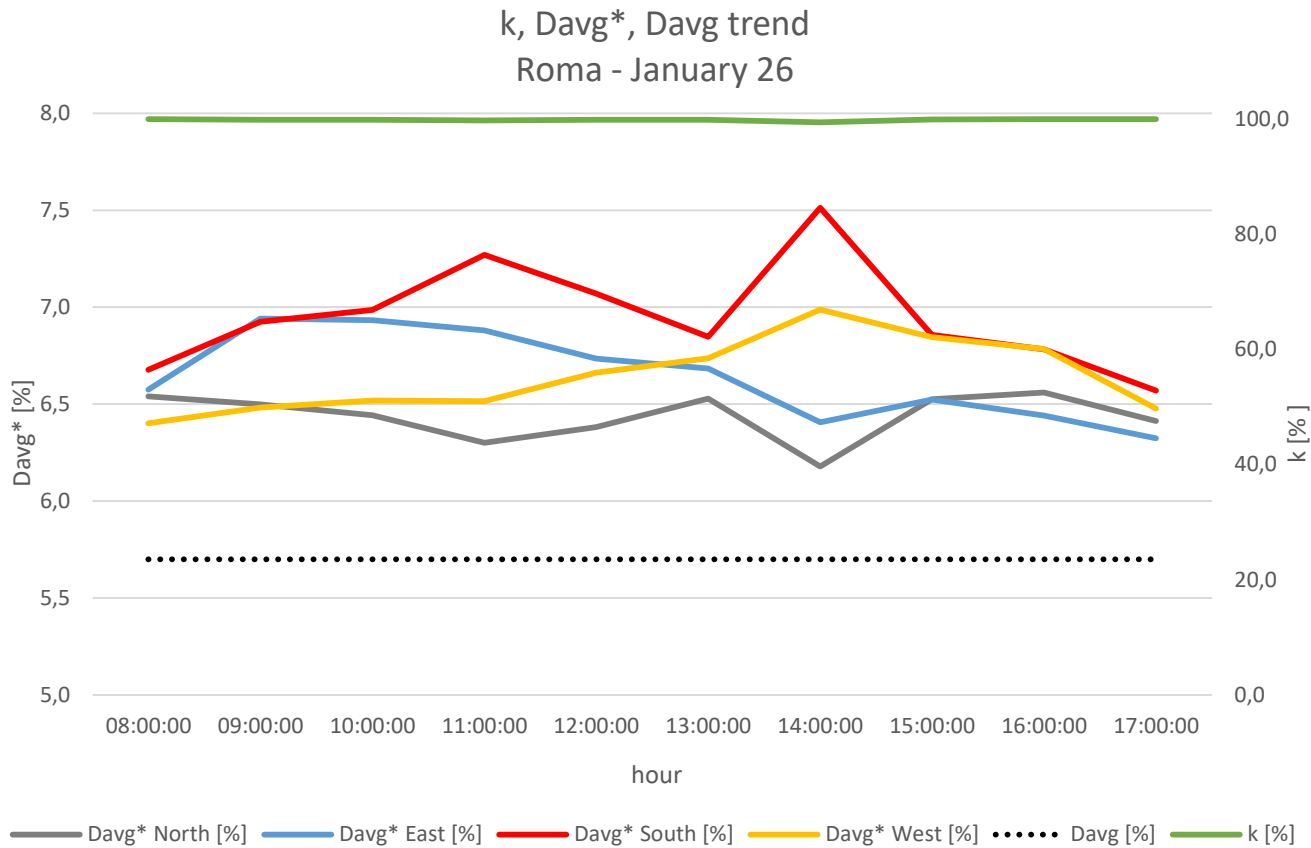


Figura 8 Andamento orario di k , D_{avg}^* e D_{avg} , Roma, giorno mediamente più nuvoloso di gennaio, 4 orientamenti.

Tabella 6 Confronto D_{avg}^* e D_{avg} , Roma, giorno mediamente più nuvoloso di luglio, 4 orientamenti (in rosso le ore in cui D_{avg} non risulta conservativo).

Day	Hour (CET)	k [%]	Davg* North [%]	Davg* East [%]	Davg* South [%]	Davg* West [%]	Davg [%]
29-lug	06:00:00	93.9	9.2	20.1	6.5	5.9	5.7
29-lug	07:00:00	39.9	4.5	42.2	3.6	3.1	5.7
29-lug	08:00:00	26.5	2.6	32.7	2.8	2.2	5.7
29-lug	09:00:00	20.2	1.8	20.3	2.4	1.7	5.7
29-lug	10:00:00	20.7	1.6	9.3	2.7	1.5	5.7
29-lug	11:00:00	18.2	1.4	2.4	3.7	1.4	5.7
29-lug	12:00:00	13.5	1.2	1.5	3.7	1.3	5.7
29-lug	13:00:00	67.6	3.1	3.3	6.1	4.3	5.7
29-lug	14:00:00	97.0	5.7	5.6	6.4	6.5	5.7
29-lug	15:00:00	99.8	6.4	6.3	6.6	6.7	5.7
29-lug	16:00:00	99.9	6.6	6.5	6.7	6.7	5.7
29-lug	17:00:00	99.9	6.7	6.4	6.7	7.0	5.7
29-lug	18:00:00	94.3	9.2	6.1	7.1	23.7	5.7
29-lug	19:00:00	95.6	11.1	6.7	7.2	20.5	5.7

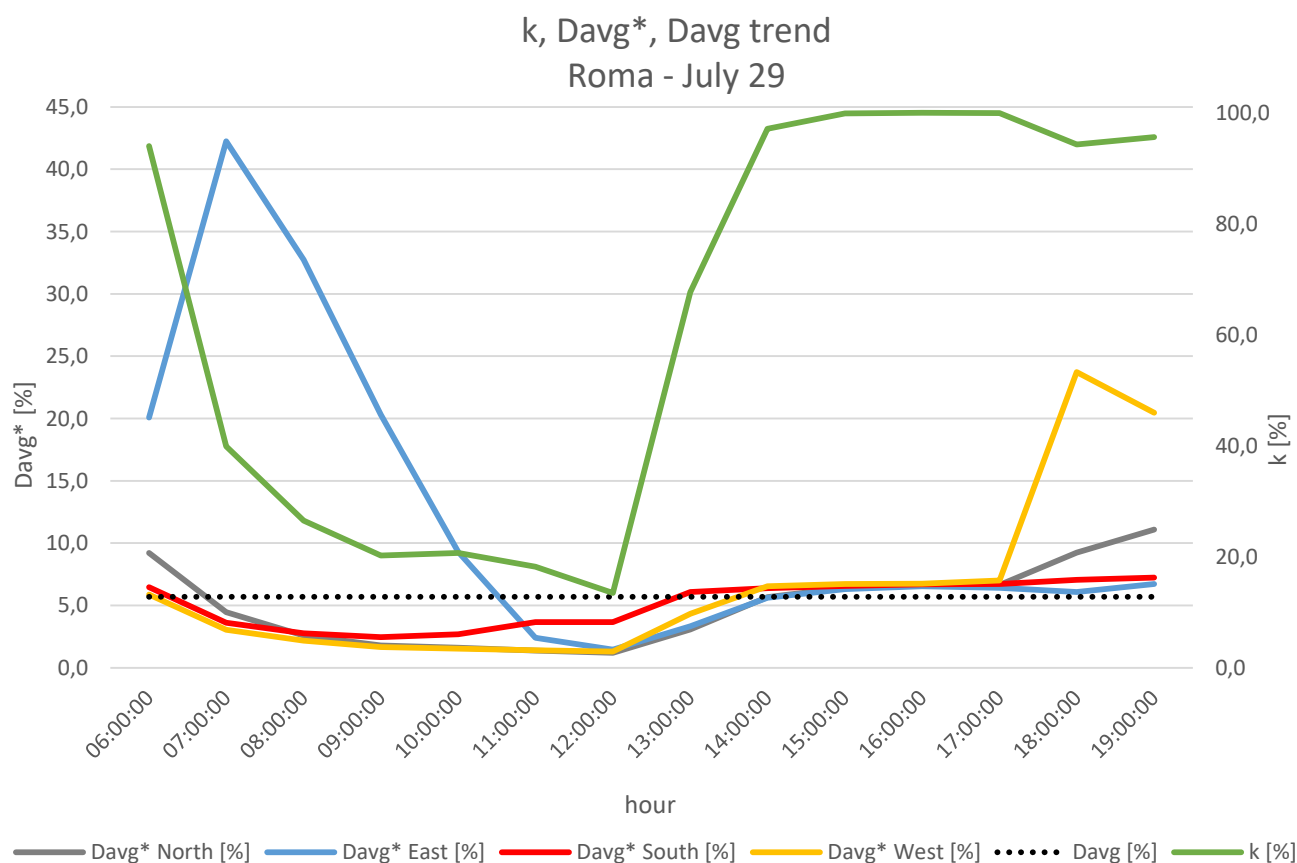


Figura 9 Andamento orario di k , D_{avg}^* e D_{avg} , Roma, giorno mediamente più nuvoloso di luglio, 4 orientamenti.

Tabella 7 Confronto D_{avg}^* e D_{avg} , Palermo, giorno mediamente più nuvoloso di agosto, 4 orientamenti (in rosso le ore in cui D_{avg} non risulta conservativo).

Day	Hour (CET)	k [%]	Davg* North [%]	Davg* East [%]	Davg* South [%]	Davg* West [%]	Davg [%]
9-Aug	06:00:00	93.8	9.2	20.5	6.8	6.1	5.7
9-Aug	07:00:00	43.8	4.5	41.0	3.9	3.2	5.7
9-Aug	08:00:00	30.1	2.7	31.0	3.0	2.3	5.7
9-Aug	09:00:00	22.9	2.0	19.9	2.8	1.8	5.7
9-Aug	10:00:00	18.7	1.5	9.0	2.5	1.4	5.7
9-Aug	11:00:00	18.4	1.4	2.4	3.7	1.4	5.7
9-Aug	12:00:00	33.4	2.0	2.5	4.7	2.3	5.7
9-Aug	13:00:00	53.3	2.3	2.5	5.4	3.7	5.7
9-Aug	14:00:00	93.6	4.3	4.1	7.2	8.4	5.7
9-Aug	15:00:00	92.9	4.8	4.0	6.9	11.9	5.7
9-Aug	16:00:00	55.4	3.6	3.0	4.4	23.1	5.7
9-Aug	17:00:00	70.8	5.0	3.9	4.9	27.4	5.7
9-Aug	18:00:00	71.3	7.4	4.8	5.6	27.2	5.7
9-Aug	19:00:00	96.6	12.9	8.2	8.6	24.0	5.7

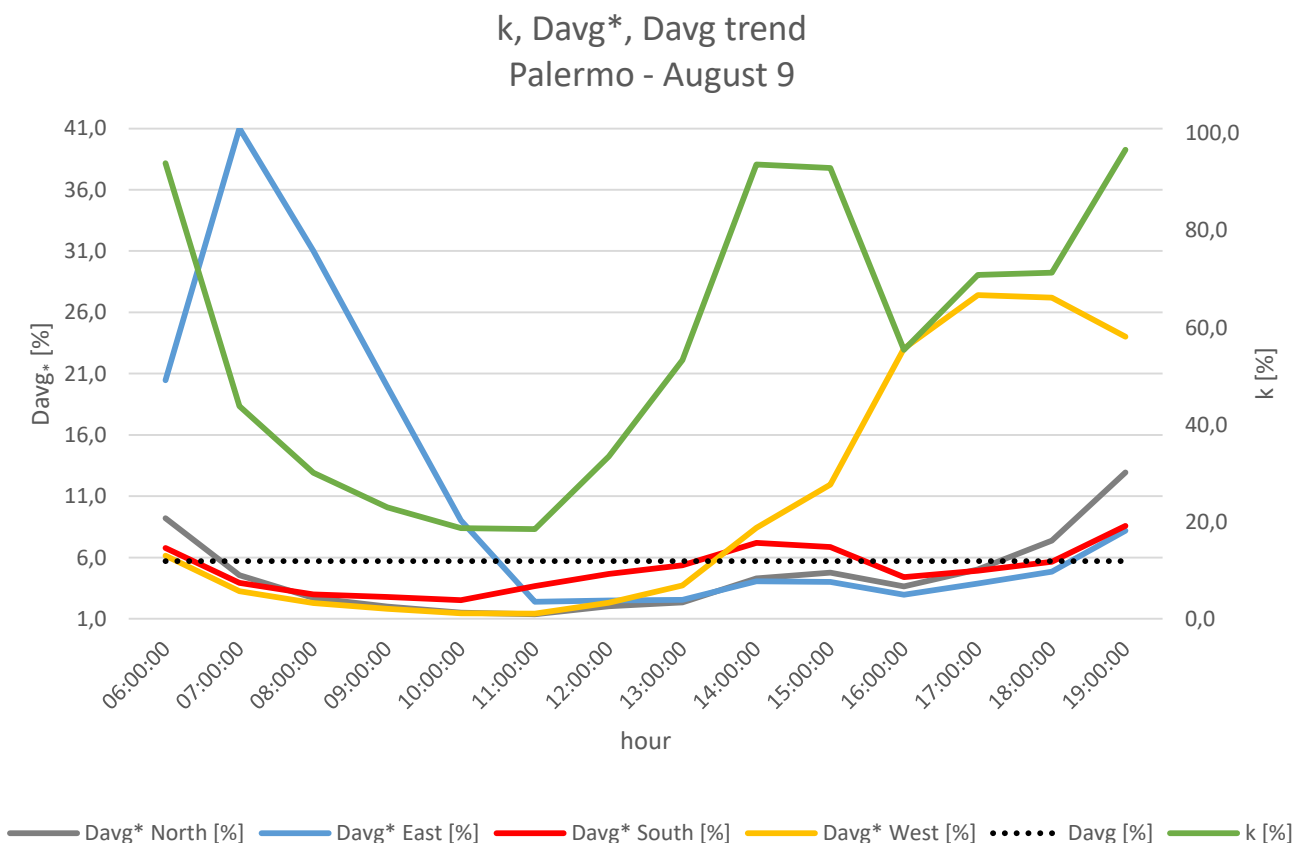


Figura 10 Andamento orario di k , D_{avg}^* e D_{avg} , Palermo, giorno mediamente più nuvoloso di agosto, 4 orientamenti.

Tabella 8 Confronto D_{avg}^* e D_{avg} , Palermo, giorno mediamente più nuvoloso di dicembre, 4 orientamenti.

Day	Hour (CET)	k [%]	Davg* North [%]	Davg* East [%]	Davg* South [%]	Davg* West [%]	Davg [%]
11-Dec	08:00:00	99.9	6.5	6.8	6.8	6.4	5.7
11-Dec	09:00:00	99.9	6.5	6.9	7.0	6.5	5.7
11-Dec	10:00:00	99.9	6.4	6.9	7.1	6.6	5.7
11-Dec	11:00:00	99.9	6.4	6.7	7.0	6.6	5.7
11-Dec	12:00:00	99.9	6.5	6.7	6.9	6.7	5.7
11-Dec	13:00:00	99.9	6.4	6.6	7.0	6.8	5.7
11-Dec	14:00:00	99.9	6.5	6.6	7.0	6.9	5.7
11-Dec	15:00:00	99.9	6.5	6.5	6.9	6.9	5.7
11-Dec	16:00:00	100.0	6.5	6.5	6.8	6.7	5.7

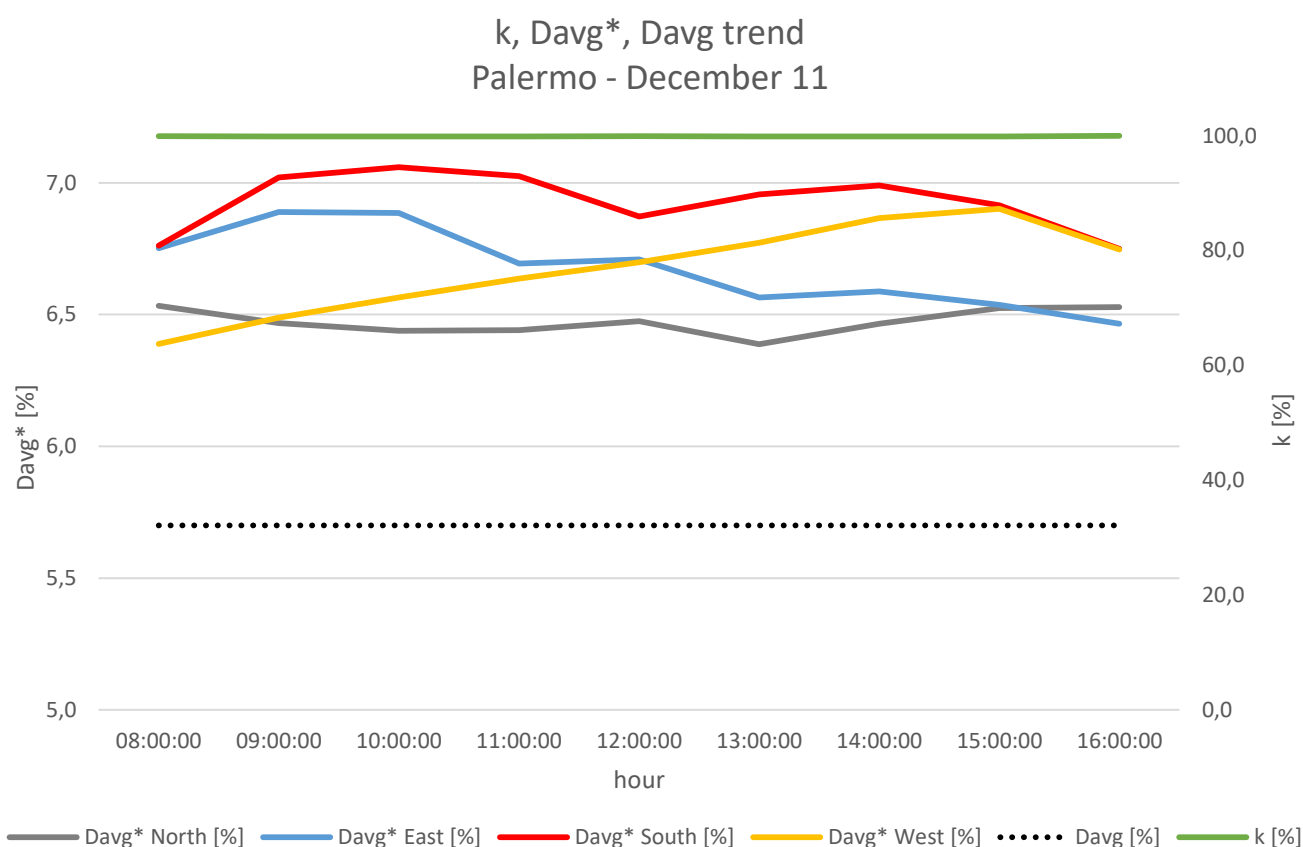


Figura 11 Andamento orario di k , D_{avg}^* e D_{avg} , Palermo, giorno mediamente più nuvoloso di dicembre, 4 orientamenti.

Portando l'analisi dalla scala oraria a quella giornaliera, le considerazioni sulla relazione tra D_{avg}^* e D_{avg} fatte precedentemente non sono più valide. Nella (Figura 12, Figura 13, Figura 14) sono graficizzati i valori medi giornalieri del D_{avg}^* per le varie località e i diversi orientamenti: questi dati sintetizzano l'andamento del Daylight factor calcolato con dati climatici, per l'intero anno tipo caratterizzato da forte nuvolosità. A Milano il D_{avg} risulta non conservativo solamente a luglio, e solamente a Nord e Sud. A Roma il D_{avg} risulta non conservativo a luglio (Nord e Sud), agosto (Nord ed Est) e settembre (Nord). A Palermo il D_{avg} risulta non conservativo a luglio (Nord e Sud), agosto (Nord e Sud) e settembre (Nord).

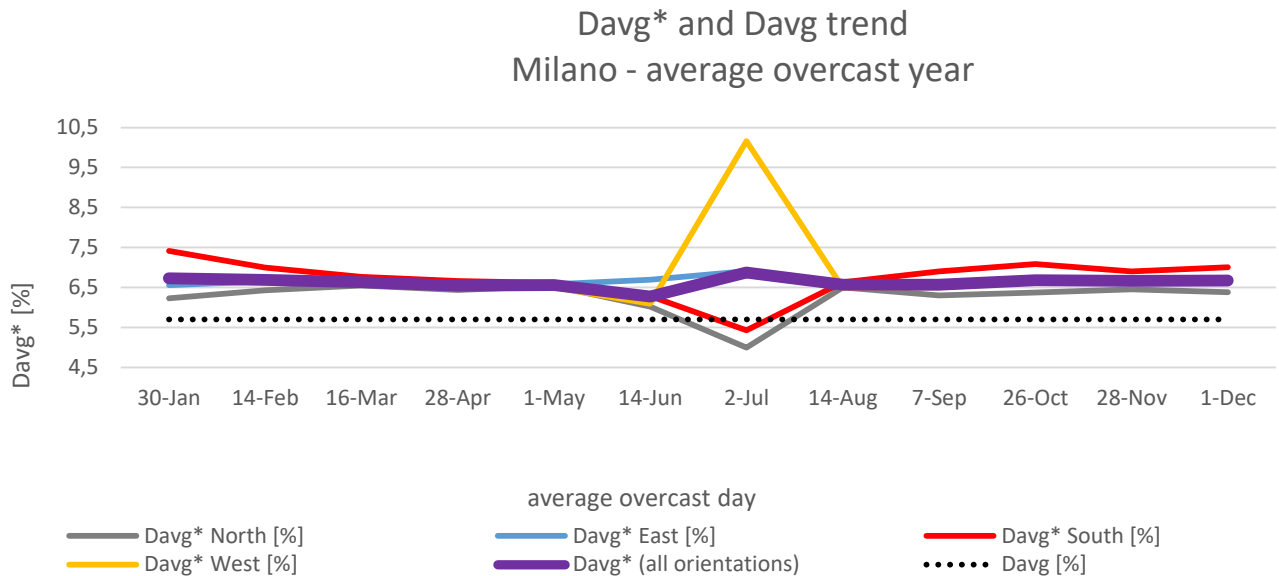


Figura 12 Andamento mensile di D_{avg}^* e D_{avg} nei giorni mediamente più nuvolosi dell'anno tipico, Milano, 4 orientamenti.

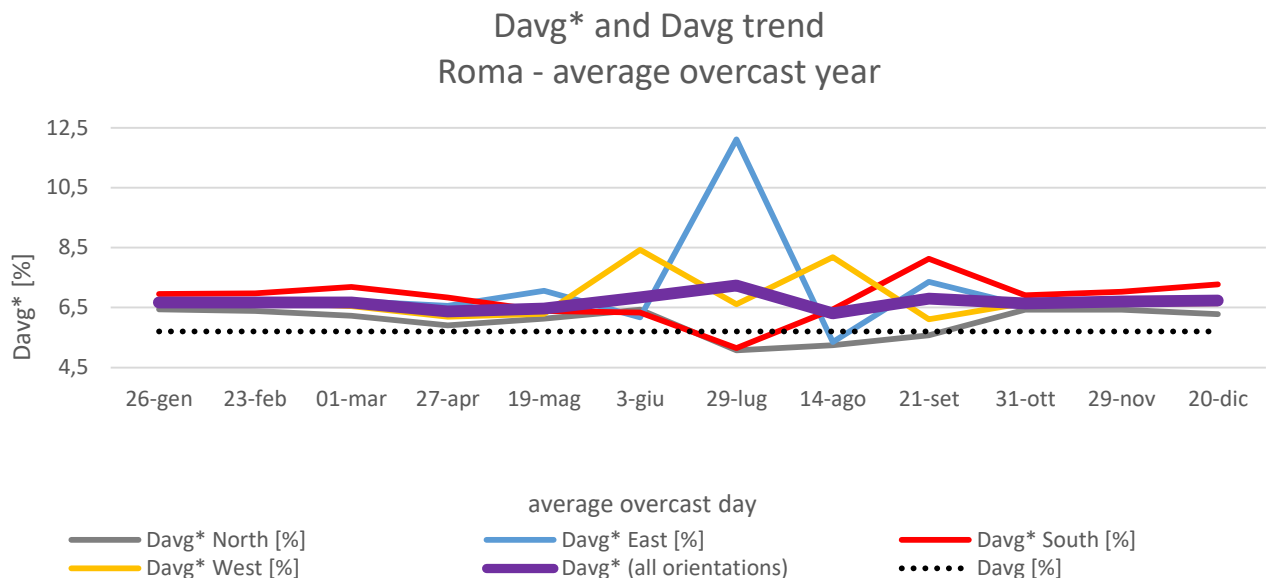


Figura 13 Andamento mensile di D_{avg}^* e D_{avg} nei giorni mediamente più nuvolosi dell'anno tipico, Roma, 4 orientamenti.

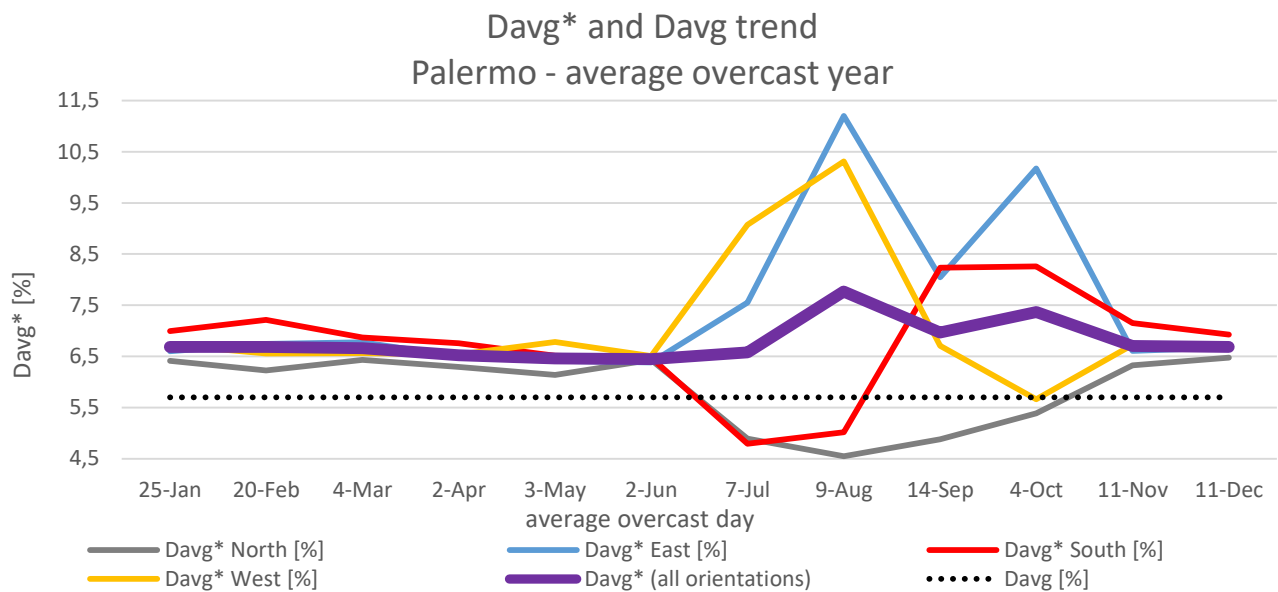


Figura 14 Andamento mensile di D_{avg}^* e D_{avg} nei giorni mediamente più nuvolosi dell'anno tipico, Palermo, 4 orientamenti.

Calcolando il D_{avg}^* medio mensile di tutti e 4 gli orientamenti (Figura 15, Tabella 9), esso risulta essere sempre superiore al D_{avg} che può quindi essere considerato sempre conservativo: le differenze tra le due grandezze che si stanno esaminando, in questo caso si attestano tra 0.6% e 1.2% a Milano, tra 0.6% e 1.5% a Roma, tra 0.7% e 2.1% a Palermo. Se compariamo i valori di D_{avg}^* medio di tutti e 4 gli orientamenti fra le 3 località, notiamo come in alcuni mesi i valori sono sovrapponibili (il D_{avg}^* non cambia al variare della località proprio come il D_{avg}). La massima differenza la troviamo tra Roma e Palermo ad agosto (1.5%). In Tabella 9 sono mostrate le differenze mensili tra D_{avg}^* e D_{avg} per ogni località.

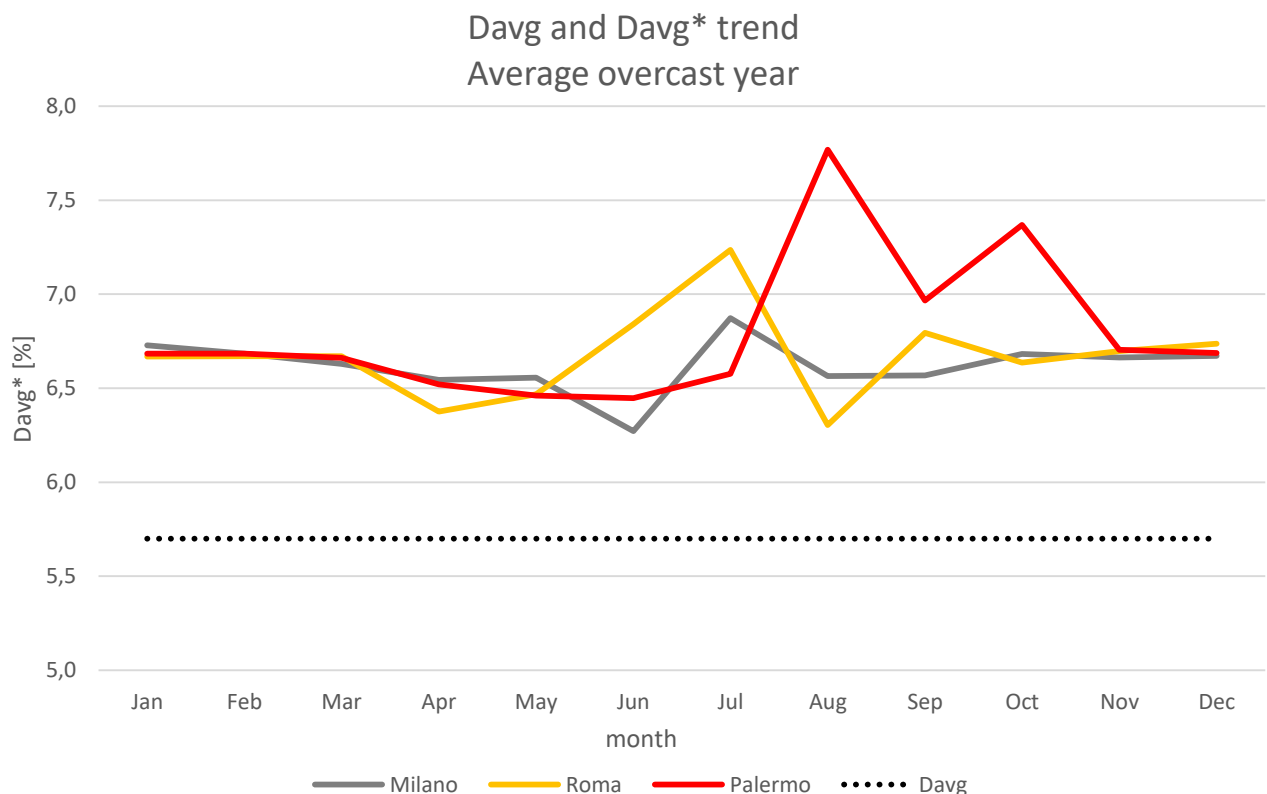


Figura 15 Andamento mensile di D_{avg}^* e D_{avg} . Medie mensili fra tutti e 4 gli orientamenti.

Tabella 9 Confronto D_{avg}^* medio mensile cumulativo dei 4 orientamenti e D_{avg} , Milano, Roma, Palermo.

Month	Milano		Roma		Palermo		CIE Overcast
	$D_{avg}^* [\%]$	$D_{avg}^* - D_{avg}$	$D_{avg}^* [\%]$	$D_{avg}^* - D_{avg}$	$D_{avg}^* [\%]$	$D_{avg}^* - D_{avg}$	$D_{avg} [\%]$
Jan	6.7	1.0	6.7	1.0	6.7	1.0	5.7
Feb	6.7	1.0	6.7	1.0	6.7	1.0	5.7
Mar	6.6	0.9	6.7	1.0	6.7	1.0	5.7
Apr	6.5	0.8	6.4	0.7	6.5	0.8	5.7
May	6.6	0.9	6.5	0.8	6.5	0.8	5.7
Jun	6.3	0.6	6.8	1.1	6.4	0.7	5.7
Jul	6.9	1.2	7.2	1.5	6.6	0.9	5.7
Aug	6.6	0.9	6.3	0.6	7.8	2.1	5.7
Sep	6.6	0.9	6.8	1.1	7.0	1.3	5.7
Oct	6.7	1.0	6.6	0.9	7.4	1.7	5.7
Nov	6.7	1.0	6.7	1.0	6.7	1.0	5.7
Dec	6.7	1.0	6.7	1.0	6.7	1.0	5.7

Se aggregiamo i dati annualmente per ogni località, i valori del D_{avg}^* oltre ad essere sempre superiori al D_{avg} , sono tra loro praticamente uguali (la differenza massima tra Milano e Palermo è di 0.2%) come visibile in Tabella 10.

Questo dimostrerebbe che il D_{avg} è a livello annuale sempre conservativo, non sensibile alla variazione di località e orientamento, e quindi adatto a verifiche di tipo energetico.

Tabella 10 Confronto D_{avg}^* medio annuale cumulativo dei 4 orientamenti e D_{avg} , Milano, Roma, Palermo.

Milano	Roma	Palermo	CIE Overcast
$D_{avg}^* [\%]$	$D_{avg}^* [\%]$	$D_{avg}^* [\%]$	$D_{avg} [\%]$
6,6	6,7	6,8	5,7

Per comprendere quanto possa essere utile prendere in considerazione comunque i valori di D_{avg}^* invece che quelli del Daylight factor standard (ad esempio per caratterizzare gli ambienti a seconda dell'orientamento), è necessario verificare quali siano gli andamenti del $LENI$ al variare di questo parametro. Per poter effettuare questa analisi si è adoperato il Metodo Alternativo [4] per il calcolo del $LENI$.

I dati riportati in Tabella 11 dimostrano come, nel nostro caso studio, i valori del $LENI$ con il D_{avg} di 5.7% e il D_{avg}^* di 6.8% sono differenti, e questa variazione è anche dipendente dalla località. A Palermo nel primo caso il valore di $LENI$ ottenuto è di $2.4 \text{ KWh/m}^2 \text{ anno}$, mentre nel secondo caso $1.3 \text{ KWh/m}^2 \text{ anno}$ rappresentando la differenza massima di $1.1 \text{ KWh/m}^2 \text{ anno}$ (indicato in verde nella Tabella 11).

Questi valori del $LENI$ si otterrebbero considerando 100W di potenza installata per l'illuminazione e 8:00-17:00 come orari operativi. Con potenze inferiori, la differenza tra $LENI$ calcolato con diversi valori di D_{avg}^* risulterebbe ancora inferiore.

In Figura 14 è mostrato il trend di variazione del $LENI$ al variare del D_{avg}^* con 100W di potenza installata, in Figura 15 con 50W di potenza installata. Come visibile l'andamento, è esponenziale e sensibile alla variazione di località.

Tabella 11 Confronto del LENI al variare del D_{avg} . I valori sono stati calcolati tramite il Metodo Alternativo [4] e fanno riferimento al caso studio analizzato, con una potenza installata per l'illuminazione di 100W.

Davg [%]	Milano	Roma	Palermo
	LENI [kWh/m2*y]	LENI [kWh/m2*y]	LENI [kWh/m2*y]
0.5	13.0	13.0	13.0
1.0	12.3	11.8	11.8
1.5	11.9	9.9	10.0
2.0	11.4	9.3	8.1
2.5	10.0	7.9	6.9
3.0	8.9	7.1	5.9
3.5	7.4	6.5	5.1
4.0	6.7	5.4	4.1
4.5	6.2	4.6	3.8
5.0	5.7	3.7	2.8
5.5	4.4	3.3	2.4
6.0	3.9	3.0	1.9
6.5	3.7	2.9	1.4
7.0	3.4	2.6	1.3
7.5	3.3	2.2	1.3
8.0	3.1	2.2	1.3
8.5	2.5	2.0	1.3
9.0	2.2	1.9	1.3
9.5	2.1	1.8	1.2
10.0	2.1	1.7	1.1

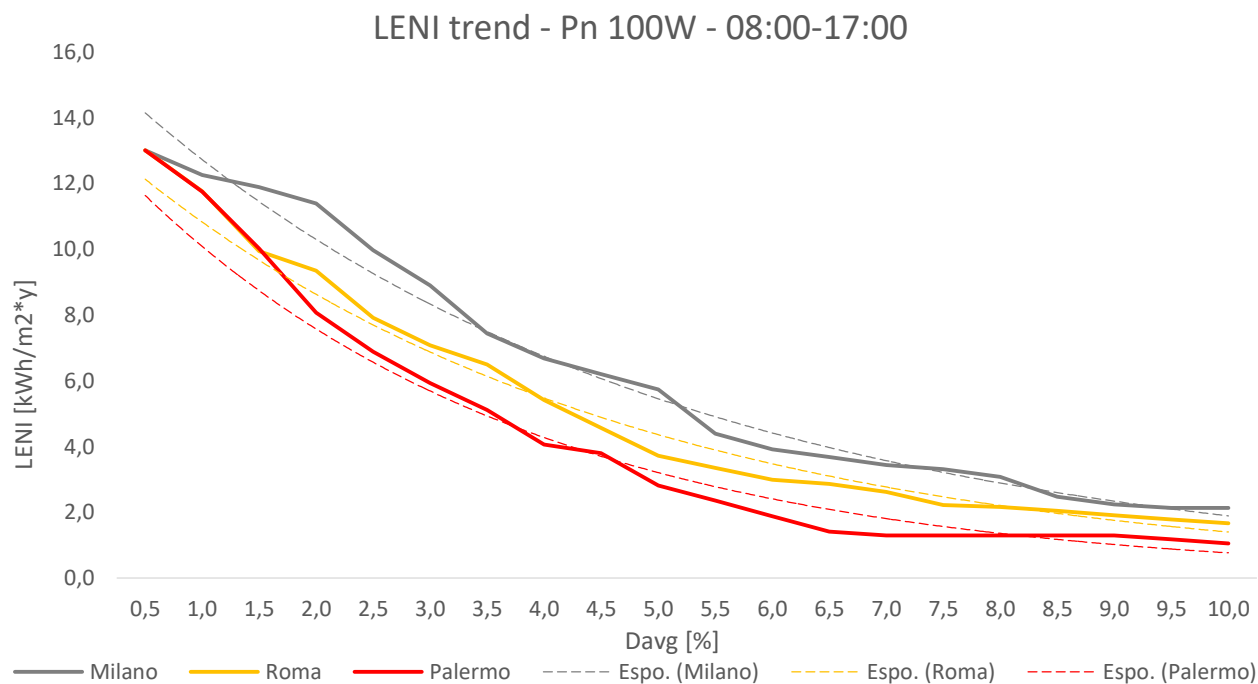


Figura 16 Andamento del LENI al variare del D_{avg} utilizzando il Metodo Alternativo [4] e i dati climatici ENEA nelle tre località analizzate, potenza installata 100W.

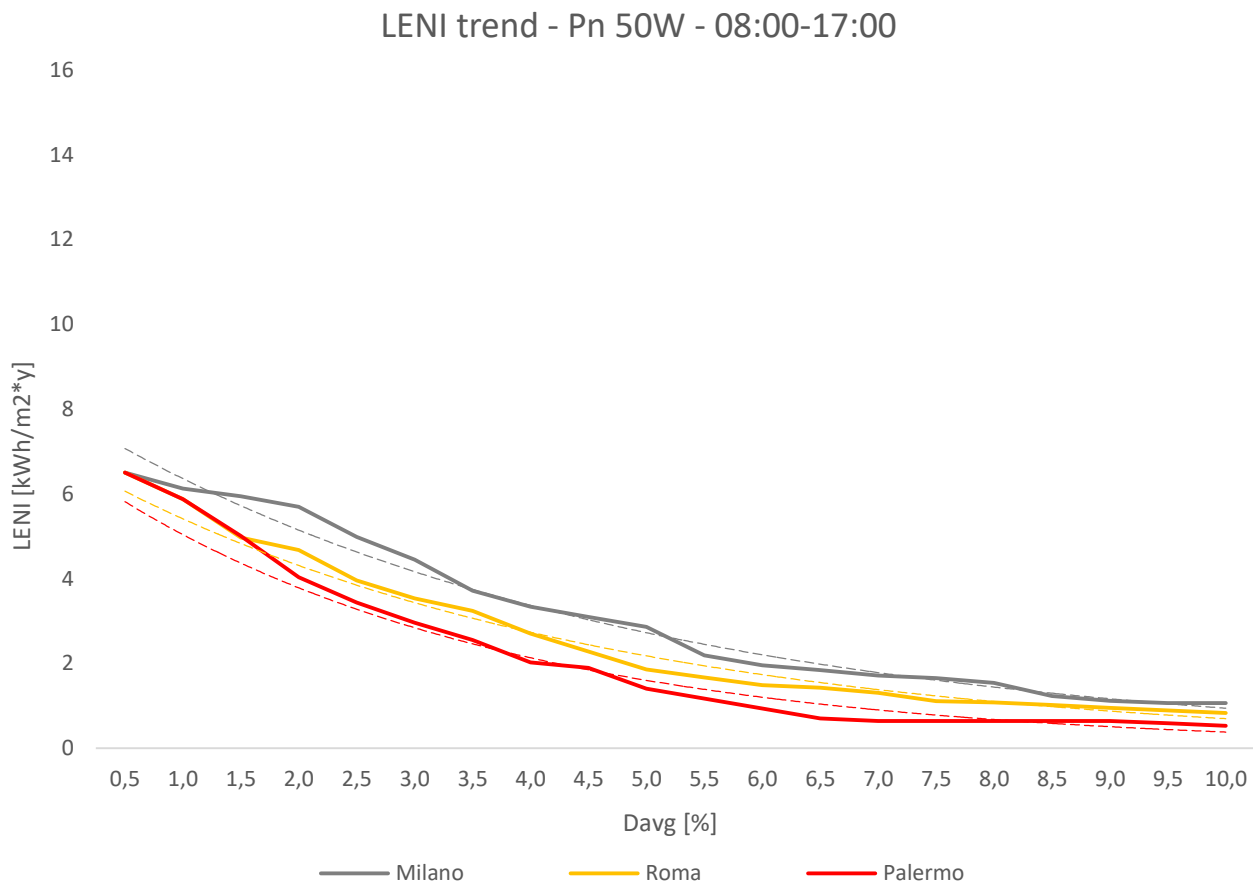


Figura 17 Andamento del LENI al variare del D_{avg} utilizzando il Metodo Alternativo [4] e i dati climatici ENEA nelle tre località analizzate, potenza installata 50W.

Un ulteriore approfondimento effettuato partendo dal D_{avg}^* calcolato con il modello di cielo di Perez, riguarda la verifica delle percentuali orarie di disponibilità di luce naturale che possano garantire determinati livelli di illuminamento interni (E_m). Nelle Tabella 12, Tabella 13, Tabella 14, Tabella 15 sono riportate le percentuali di disponibilità di luce diurna per cui sono garantiti 5 diversi valori di E_m , suddivise per differenti periodi operativi, per la città di Milano al variare degli orientamenti. Risulta immediatamente evidente come variando gli orientamenti, le percentuali non subiscano cambiamenti sostanziali. Prendendo in considerazione il periodo operativo 08:00-17:00 ed E_m di 500 lux, la differenza massima pari a 2% (tra la finestra esposta ad Ovest e quella esposta a Sud ed Est) si traduce in sole 2 ore di disponibilità di luce diurna.

Tabella 12 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m . Calcolo effettuato a Milano utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, finestra esposta a Nord.

Daily operation hour period								Em [lux]
01:00-00:00 [%]	h daylight [%]	06:00-18:00 [%]	07:00-17:00 [%]	08:00-16:00 [%]	07:00-15:00 [%]	09:00-17:00 [%]	08:00-17:00 [%]	
45	88	83	90	96	90	98	94	100
38	74	72	79	86	80	89	84	300
30	59	58	68	75	69	76	72	500
20	39	39	45	53	48	54	50	750
14	28	28	33	39	34	40	36	1000

Tabella 13 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m .
Calcolo effettuato a Milano utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, finestra esposta ad Est.

01:00-00:00 [%]	h daylight [%]	Daily operation hour period						Em [lux]
		06:00-18:00 [%]	07:00-17:00 [%]	08:00-16:00 [%]	07:00-15:00 [%]	09:00-17:00 [%]	08:00-17:00 [%]	
45	88	83	90	96	90	98	94	100
38	73	72	79	86	80	89	84	300
30	59	60	68	76	70	77	73	500
20	40	40	47	54	50	55	51	750
15	29	30	35	42	38	42	39	1000

Tabella 14 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m .
Calcolo effettuato a Milano utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, finestra esposta a Sud.

01:00-00:00 [%]	h daylight [%]	Daily operation hour period						Em [lux]
		06:00-18:00 [%]	07:00-17:00 [%]	08:00-16:00 [%]	07:00-15:00 [%]	09:00-17:00 [%]	08:00-17:00 [%]	
44	87	83	90	96	90	98	94	100
38	74	73	80	86	80	90	85	300
30	59	59	68	76	70	77	73	500
22	42	42	49	57	52	59	55	750
17	33	33	39	47	42	48	44	1000

Tabella 15 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m .
Calcolo effettuato a Milano utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, finestra esposta ad Ovest.

01:00-00:00 [%]	h daylight [%]	Daily operation hour period						Em [lux]
		06:00-18:00 [%]	07:00-17:00 [%]	08:00-16:00 [%]	07:00-15:00 [%]	09:00-17:00 [%]	08:00-17:00 [%]	
44	86	83	90	96	90	98	94	100
38	74	72	80	86	80	90	85	300
30	59	58	67	74	68	76	71	500
21	41	41	47	54	49	56	52	750
15	29	28	33	40	34	42	37	1000

Queste piccolissime differenze che si riscontrano anche a Roma (massimo 3%) e a Palermo (massimo 2%), hanno portato ad effettuare il confronto tra percentuali di disponibilità di luce diurna ottenute utilizzando D_{avg} e quelle utilizzando D_{avg}^* , considerando per quest'ultime il valore medio tra i 4 orientamenti.

Tabella 16 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m .
Calcolo effettuato a Milano utilizzando D_{avg} per differenti periodi operativi.

01:00-00:00 [%]	h daylight [%]	Daily operation hour period (D_{avg})						Em [lux]
		06:00-18:00 [%]	07:00-17:00 [%]	08:00-16:00 [%]	07:00-15:00 [%]	09:00-17:00 [%]	08:00-17:00 [%]	
44	86	82	90	96	90	98	94	100
35	69	68	78	86	79	88	83	300
27	53	53	58	70	63	73	68	500
18	36	36	41	51	46	51	47	750
12	23	23	26	31	28	32	30	1000

Tabella 17 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m . Calcolo effettuato a Milano utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, media dei 4 orientamenti.

Daily operation hour period (D_{avg}^*)								Em [lux]
01:00-00:00	h daylight	06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00	08:00-17:00	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
45	87	83	90	96	90	98	94	100
38	74	72	80	86	80	89	85	300
30	59	59	68	75	69	77	72	500
21	40	41	47	55	50	56	52	750
15	30	30	35	42	37	43	39	1000

Se in Tabella 17 guardiamo le percentuali per E_m di 500 lux (livelli prescritti in locali per uffici sulla base di [19]) a Milano, è subito evidente come ci siano delle differenze per i vari periodi operativi: ad influenzare il dato sono sia l'estensione del periodo operativo (periodo di 12 ore dalle 06:00 alle 18:00 ha la percentuale inferiore, 59%), sia l'ora di inizio dell'orario operativo (il periodo di 8 ore che inizia prima (07:00) ha la percentuale inferiore, 69%). Tra tutte le fasce orarie, quella indicata nella UNI EN 15193 (08:00-17:00), presenta un valore percentuale intermedio (72%).

Il confronto con le percentuali orarie calcolate partendo dal D_{avg} rispetto a quelle calcolate con D_{avg}^* , mostra un allineamento degli andamenti ed una equiparabilità dei risultati. In particolare per la fascia 08:00-17:00 la differenza tra D_{avg} e D_{avg}^* è di 4 punti percentuale.

Tabella 18 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m . Calcolo effettuato a Roma utilizzando D_{avg} per differenti periodi operativi, media dei 4 orientamenti.

Daily operation hour period (D_{avg})								Em [lux]
01:00-00:00	h daylight	06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00	08:00-17:00	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
45	90	85	92	97	91	99	96	100
38	76	73	82	89	83	91	86	300
31	63	62	71	79	73	79	76	500
23	46	45	53	59	53	61	57	750
16	33	33	39	45	43	45	43	1000

Tabella 19 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m . Calcolo effettuato a Roma utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, media dei 4 orientamenti.

Daily operation hour period (D_{avg}^*)								Em [lux]
01:00-00:00	h daylight	06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00	08:00-17:00	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
45	91	85	92	97	91	99	96	100
40	80	76	84	92	86	93	89	300
34	67	65	74	83	76	83	79	500
26	53	52	59	67	61	67	65	750
19	38	38	44	51	45	51	48	1000

Tabella 20 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m . Calcolo effettuato a Palermo utilizzando D_{avg} per differenti periodi operativi, media dei 4 orientamenti.

Daily operation hour period (D_{avg})								Em [lux]
01:00-00:00	h daylight	06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00	08:00-17:00	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
45	90	87	93	98	93	99	97	100
39	77	76	84	93	84	95	91	300
34	67	66	77	85	77	86	82	500
27	54	53	62	70	64	71	68	750
20	40	40	47	53	50	54	51	1000

Tabella 21 Percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di E_m . Calcolo effettuato a Palermo utilizzando D_{avg}^* per differenti periodi operativi, media dei 4 orientamenti.

Daily operation hour period (D_{avg}^*)								Em [lux]
01:00-00:00	h daylight	06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00	08:00-17:00	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
47	93	89	96	100	95	100	100	100
40	80	78	87	94	86	97	93	300
37	73	72	83	91	83	93	89	500
29	57	56	65	73	67	74	71	750
23	45	45	53	60	56	61	57	1000

Tutte le considerazioni fatte per Milano, sono valide anche per Roma (Tabella 18, Tabella 19) e Palermo (Tabella 20, Tabella 21). La differenza tra le percentuali di disponibilità di luce diurna calcolate con D_{avg} e D_{avg}^* è di 3 punti percentuali per Roma, e 7 punti percentuali per Palermo nella fascia operativa 08:00 – 17:00.

Confrontando il D_{avg}^* fra le 3 località sempre per la stessa fascia oraria, le percentuali inferiori sono a Milano (72%), le maggiori a Palermo (89%). Un valore intermedio è quello di Roma (79%).

Come ultima analisi sono state calcolate le percentuali orarie per diversi periodi operativi utilizzando i diagrammi di Dressler, e confrontate con i risultati precedentemente elencati. Per ottenere i livelli di illuminamento esterni E_{gh} necessari alla definizione delle percentuali orarie, è stato utilizzato il D_{avg}^* medio annuale di ogni località (Tabella 10), fissando il valore di E_m a 500 lux nella (Formula 1).

In Figura 18 e nelle Tabella 22, Tabella 23,

Tabella 24 sono riportati i risultati.

Notiamo che le differenze sono piuttosto consistenti: la ragione è probabilmente legata al fatto che mentre le percentuali orarie calcolate con i diagrammi di Dressler sono state ottenute utilizzando un solo dato di E_{gh} a partire dal valore di D_{avg}^* e dal dato fisso di E_m prescritto per il compito, le altre percentuali orarie derivano da un calcolo effettuato valutando direttamente gli E_m orari nei giorni mediamente più nuvolosi dell'anno per ogni località, valutandone la media per i 4 orientamenti.

Tabella 22 Confronto tra percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di 500 lux per E_m , Milano.

Daily operation hour period						Em [lux]
06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00		
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		
DIVA-for-Rhino	59	68	75	69	77	500
Dressler	64	74	94	65	65	
Δ	-5	-6	-19	4	12	

Tabella 23 Confronto tra percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di 500 lux per E_m , Roma.

Daily operation hour period						Em [lux]
06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00		
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		
DIVA-for-Rhino	65	74	83	76	83	500
Dressler	68	81	98	68	68	
Δ	-3	-7	-15	8	15	

Tabella 24 Confronto tra percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna che garantiscono il raggiungimento di 500 lux per E_m , Palermo.

Daily operation hour period						Em [lux]
06:00-18:00	07:00-17:00	08:00-16:00	07:00-15:00	09:00-17:00		
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		
DIVA-for-Rhino	72	83	91	83	93	500
Dressler	79	85	100	70	70	
Δ	-7	-2	-9	13	23	

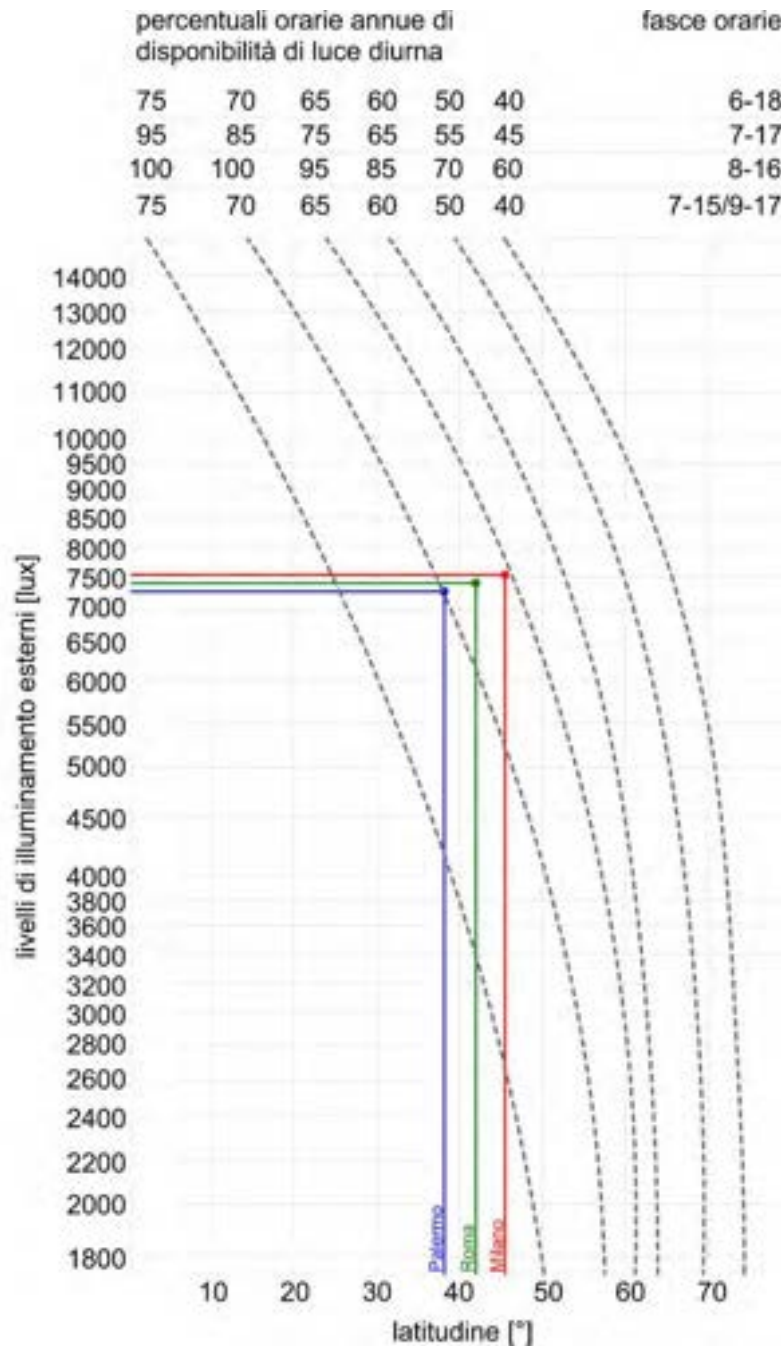


Figura 18 Calcolo delle percentuali orarie annue di disponibilità di luce diurna con i diagrammi di Dressler per le 3 località analizzate.

Questa analisi delle percentuali orarie è il primo step per quello che può essere un metodo grafico (che ricalchi quello dei diagrammi di Dressler) per valutare le percentuali di disponibilità di luce diurna in varie località italiane.

6 Conclusioni

Dall'analisi dei dati raccolti è possibile concludere che:

- il D_{avg}^* calcolato simulando il cielo con il modello di Perez partendo da dati climatici misurati, risulta essere a livello mensile relativamente sensibile alla variazione dell'orientamento e della località ed in alcuni casi anche inferiore al D_{avg} . Effettuando un'analisi cumulativa annuale, il D_{avg}

risulta essere un parametro sempre conservativo adatto alle valutazioni di tipo energetico: in questo caso il D_{avg}^* replica anche il comportamento di D_{avg} in quanto perde la sua sensibilità alla variazione della latitudine e degli orientamenti.

- Le differenze del D_{avg}^* cumulativo annuale tra le varie località (in questo caso molto contenute), portano a valori differenti di $LENI$, soprattutto in funzione della potenza installata: maggiore è la potenza, maggiori sono le variazioni tra le località.
- Se analizziamo la differenza del $LENI$ ottenuto con D_{avg}^* e D_{avg} (differenti per 1 punto percentuale circa), il valore maggiore (misurato a Palermo) è di circa $1.1 \text{ KWh/m}^2 \text{ anno}$, valore non rilevante che farebbe quindi supporre come poco utile la ricerca di fattori correttivi a D_{avg} . Differenze di $LENI$ maggiori le riscontriamo per valori di D_{avg} e D_{avg}^* inferiori: nel caso in cui il nostro edificio si trovasse a Milano e calcolassimo un D_{avg} pari al 2% e un D_{avg}^* pari al 3% (valori prossimi a quelli prescritti dalle norme in caso di edifici per scolastici o per abitazioni [XX]), con la medesima differenza di 1 punto percentuale come nel nostro caso studio), le differenze tra i due $LENI$ salirebbero a $2.5 \text{ KWh/m}^2 \text{ anno}$.

Questo indica quanto sia importante il valore assoluto Daylight factor, grandezza strettamente legato alle caratteristiche fisco-geometriche degli ambienti.

- Le analisi condotte in questa ricerca si sono basate su un anno tipico composto dai giorni mediamente più nuvolosi di ogni mese, caratterizzati quindi da un valore k molto alto.

Nel giorno mediamente più nuvoloso è però evidente come al variare dell'ora, trattandosi di cieli reali, è possibile che la copertura nuvolosa cambi, facendo scendere il valore di k e facendo apprezzare nei calcoli il peso della componente diretta della luce solare. Questa rappresenta sicuramente una criticità, che però potrebbe essere superata creando un giorno tipo composto dai dati orari col k inferiore di tutto il mese. Così ci si porrebbe in una condizione pienamente paragonabile a quella di un cielo CIE Standard Overcast.

Ma la vera problematica è legata al fatto che la condizione di forte nuvolosità ($k > 98\%$) ha una ricorrenza ridotta, nelle località prese in esame, rispetto ad altre condizioni di cielo (Tabella 25 e Figura 19).

La correzione del D_{avg} potrebbe partire proprio da considerazioni sulla ricorrenza di condizioni di cielo per una determinata località, e dalla definizione di un k tipico per una determinata area geografica.

Tabella 25 Percentuali di ore in cui si superano determinate soglie di k (AMTIN ENEA 2006-2016).

threshold [%]	Milano		Roma		Palermo	
	number of hours	percentage of hours [%]	number of hours	percentage of hours [%]	number of hours	percentage of hours [%]
$k > 99$	794	16.7	515	10.8	445	9.4
$k > 98$	963	20.2	661	13.9	604	12.7
$k > 97$	1106	23.2	767	16.1	725	15.2
$k > 96$	1243	26.1	862	18.1	830	17.4
$k > 95$	1341	28.2	941	19.8	914	19.2
$k > 94$	1448	30.4	1006	21.1	983	20.7
$k > 93$	1565	32.9	1058	22.2	1038	21.8
$k > 92$	1638	34.4	1125	23.6	1093	23.0
$k > 91$	1714	36.0	1197	25.1	1139	23.9
$k > 90$	1772	37.2	1232	25.9	1177	24.7
$k > 80$	2204	46.3	1631	34.3	1581	33.2
$k > 70$	2459	51.6	1969	41.4	1873	39.4
$k > 60$	2700	56.7	2247	47.2	2183	45.9
$k > 50$	2899	60.9	2495	52.4	2481	52.1
$k > 40$	3140	66.0	2791	58.6	2820	59.3
$k > 30$	3531	74.2	3200	67.2	3275	68.8
$k > 20$	4210	88.4	3888	81.7	3919	82.3
$k > 10$	4751	99.8	4751	99.8	4748	99.8

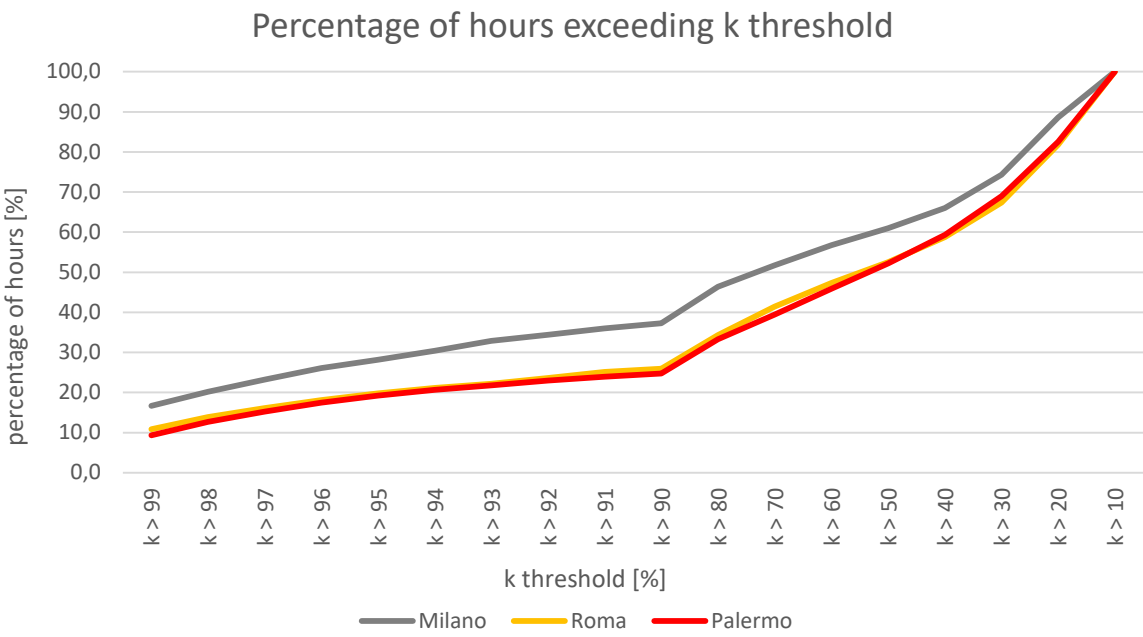


Figura 19 Andamento delle percentuali di ore di superamento delle soglie di *k* per le 3 località (AMTIN ENEA 2006-2016).

7 Bibliografia

1. Jenkins D, Newborough M. An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution. *Applied Energy* 2007; 84 (6): 608-622.
2. EN 15193:2008. Energy performance of buildings. Energy requirements for lighting. Brussels, 2008 (EC-1 2011).
3. D. Iatauro, B. Mattoni, A. Mangione, F. Bisegna, M. Zinzi, Analisi critica per l'individuazione di correlazioni tra il Fattore di luce Diurna e le condizioni di cielo, (2017) Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma MiSE-ENEA 2012-14, Report RdS/PAR2015/125
4. M. Zinzi, A. Mangione, B. Mattoni, F. Bisegna, Analisi critica per l'individuazione di Metodi Semplificati di calcolo del LENI, (2016) Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma MiSE-ENEA 2012-14, Report RdS/PAR2015/087. ISBN: 978-88-8286-331-9..
5. Zinzi M, Mangione A. The daylight contribution in the electric lighting energy uses: EN standard and alternative method comparison, 6th International Building Physics Conference, IPBC 2015, *Energy Procedia* 2015; 78: 2663-2668.
6. Tian M, Yuehong S. An Improvement to Calculation of Lighting Energy Requirement in the European Standard EN 15193:2007, *Journal of Daylighting* 2014;1:16-28.
7. Lo Verso V.R.M, Pellegrino A, Pellerrey F. A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems, *Energy and buildings* 2014; 76: 151-163.
8. Moret S, Noro M, Papamichael K. Daylight harvesting: a multivariate regression linear model for predicting the impact on lighting, cooling and heating. Proceedings of the 1st IBPSA Italy Conference, Bolzano (Italy), January 30 - February 1, 2013, paper 328.
9. R.W. Fonseca, E.L. Didoné, Ruttkay Pereira FO. Using artificial neural networks to predict the impact of daylighting on building final electric energy requirements, *Energy and Buildings*, 61 (2013), pp. 31–38.
10. D.H.W. Li, S.L. Wong, Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings *Applied Energy*, 84 (2007), pp. 1199–1209.
11. R. Perez, K. Webster, R. Seals, R. Stewart, J. Barron. Variations of the luminous efficacy of global and diffuse radiation and zenith luminance with weather conditions-Description of a potential method to generate key daylight availability data from existing solar radiation databases. *Solar Energy*, 1987, 38 (1), pp. 33-44.
12. R. Perez, R. Seals. A. Zelenka, P. Ineichen, Climatic evaluation of a model that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: prospects for performance improvements, *Solar Energy*, 1990, 44(2), pp. 99-108.
13. R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, 1990, 44 (5), 271-289.
14. R. Perez, J. Michalsky, R. Seals, Modeling Sky Luminance Angular Distribution for Real Sky Conditions: Experimental Evaluation of Existing Algorithms, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1992 21(2), pp. 84-92, DOI: 10.1080/00994480.1992.10748005
15. R. Perez, J. Michalsky, R. Seals, All-weather model for sky luminance distribution – Preliminary configuration and validation, *Solar Energy*, 1993, 50 (3), pp. 235-245.
16. Rhinoceros website. Disponibile presso : <https://www.rhino3d.com/it/>. Consultato il 06/06/2017
17. Grasshopper website. Disponibile presso: <http://www.grasshopper3d.com/>. Consultato il 06/06/2017
18. Diva for rhino website. Disponibile presso: <http://diva4rhino.com/>. Consultato il 06/06/2017
19. UNI EN 12464-1:2011, "Light and Lighting – Lighting of workplaces - Part 1: Indoor work places, July 2011