



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi critica per l'individuazione di correlazioni tra il Fattore di luce Diurna e le condizioni di cielo

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

B. Mattoni, A. Mangione, F. Bisegna (DIAEE, U. La Sapienza-Roma)
D. Iatauro, M. Zinzi (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici

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

Responsabile scientifico ENEA: Domenico Iatauro

Responsabile scientifico DIAEE: Fabio Bisegna

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY	4
1 INTRODUZIONE	5
2 NORMATIVA DEI PAESI DELLA UE SULLA LUCE DIURNA NEGLI EDIFICI	6
3 PROTOCOLLI DI CERTIFICAZIONE E LUCE DIURNA	9
3.1 PROTOCOLLO CASACLIMA.....	9
3.2 PROTOCOLLO ITACA	10
3.3 PROTOCOLLO BREEAM	10
3.4 PROTOCOLLO LEED	11
4 IL FATTORE DI LUCE DIURNA (DAYLIGHT FACTOR)	12
4.1 CRITICITÀ DEL DAYLIGHT FACTOR	14
4.2 CONDIZIONI ALTERNATIVE E VARIANTI DI CALCOLO DEL DAYLIGHT FACTOR.....	15
4.3 GRANDEZZE ALTERNATIVE AL DAYLIGHT FACTOR PER LA VALUTAZIONE DEL CONTRIBUTO DELLA LUCE NATURALE ALL'INTERNO DI UN EDIFICIO	16
5 OBIETTIVI ED OGGETTO DELLA RICERCA.....	18
6 METODOLOGIA	19
7 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	19
8 ANALISI NUMERICA.....	22
8.1 STRUMENTI DI CALCOLO DEL DAYLIGHT FACTOR.....	22
8.2 TIPI DI CIELO.....	23
9 RISULTATI	27
10 ANALISI SPERIMENTALE	40
11 DISCUSSIONE.....	43
12 CONCLUSIONI.....	44
13 BIBLIOGRAFIA.....	46
14 APPENDICE A.....	48

Sommario

La luce naturale rappresenta un fattore di grandissima importanza all'interno degli edifici, sia dal punto di vista del comfort che dei potenziali risparmi energetici ed economici garantiti da una adeguata progettazione architettonica ed urbana. Attualmente le norme europee che regolano la disponibilità di luce diurna in ambiente sia dal punto di vista progettuale (comfort visivo e benessere), sia dal punto di vista energetico (fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale), utilizzano il Daylight factor come parametro di riferimento calcolato, come da standard, in condizioni di cielo Overcast. Questa condizione sembrerebbe rappresentare la situazione più ragionevole per il calcolo della disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti in quanto considerata la più svantaggiosa. Molti studi in letteratura hanno messo in luce le criticità sia del Daylight factor che delle condizioni con cui viene calcolato, proponendone la valutazione anche utilizzando altri tipi di cielo (Clear e Uniform). Sulla base di queste considerazioni, poiché nonostante le limitazioni il Daylight factor continua ad essere a livello normativo la grandezza di riferimento per la valutazione della disponibilità della luce diurna, il lavoro svolto ha avuto lo scopo di valutare se la condizione standard di calcolo sia effettivamente la più conservativa. Questa valutazione è stata svolta sostituendo al cielo Overcast, i cieli Intermediate without Sun e Clear withouts Sun sul modello di un ufficio del Centro Ricerche Casaccia - ENEA, effettuando le simulazioni tramite il software DIVA/Radiance. I parametri di variazione del modello, oltre ai cieli, sono i giorni (equinozi e solstizi), l'orario operativo (07:00-17:00) e gli orientamenti. In aggiunta alle simulazioni, sono state effettuate delle campagne di misura che hanno permesso di validare il modello. I risultati hanno dimostrato che il Daylight factor calcolato con cielo Overcast non risulta conservativo a nord nell'80% dei casi e sia ad est che ad ovest nel 40% dei casi. La non conservatività delle condizioni standard di calcolo del Daylight factor rende questo parametro apparentemente inutilizzabile sia in ambito energetico che progettuale e potrebbe implicare la ricerca di un parametro alternativo.

Summary

Daylighting is a key factor for buildings, both in terms of comfort and energy efficiency. Nowadays European standards regulating indoor availability of daylight, from the design (visual comfort and well-being) and energy efficiency points of view (energy requirements for artificial lighting), indicate that the Daylight factor, calculated using the standard Overcast sky, is the reference parameter for daylight evaluations.

This sky condition seems to represent the most reasonable one for daylight availability calculation in building since it is considered the most disadvantageous. In literature, several studies have highlighted the critical issues related both to the Daylight factor and to its calculation condition, proposing the use of other sky types (Clear and Uniform). On the basis of these considerations, despite its intrinsic critical issues, the Daylight Factor is still the reference parameter for the assessment of daylight availability. This work has the purpose to evaluate whether the standard calculation condition (Overcast sky) is actually the most conservative. The 3d model of an office placed in one of the buildings of Centro Ricerche Casaccia - ENEA has been used as case study. The simulations have been carried out using DIVA / Radiance software; the daylight factor has been calculated by using the Overcast sky, the Intermediate sky without Sun and Clear sky without Sun. In addition to the sky model variation, several other parameters have been changed: the day of the year (equinoxes and solstices), the operating hours (7:00-17:00) and orientations. A field campaign of lighting measurement in the office has been also carried out in order to validate the numerical model. The results show that the Daylight factor calculated with the Overcast sky is not conservative for North orientation in 80% of cases, and both for East and West in 40% of cases. Since the standard calculation conditions of the Daylight factor did not result to be the most disadvantageous, the investigation of a more suitable parameter for daylight evaluations in buildings from the design and energy points of view should be carried out.

1 Introduzione

La luce naturale rappresenta da sempre una grande risorsa per l'uomo, soprattutto all'interno dello spazio costruito in cui egli vive, dove risulta essenziale per il raggiungimento di elevati livelli di comfort (anche per mezzo di una connessione interno - esterno attraverso le stesse finestrate), per il contenimento del fabbisogno energetico sia per l'illuminazione, che per il riscaldamento ed il raffrescamento. Negli ambienti di lavoro (che per molte persone potrebbe oggi rappresentare lo spazio nel quale si trascorre la maggior parte della giornata) la cattiva illuminazione può provocare disturbi del sonno, dell'appetito, dell'umore e del comportamento, essere causa di depressione, irritabilità, affaticamento, difficoltà di concentrazione. Se è vero che in questo specifico ambito esistono diverse normative che indicano precisi requisiti prestazionali da raggiungere, queste prescrizioni vengono nella maggior parte dei casi riferite alla sola illuminazione artificiale, trascurando quasi completamente quello che può essere il contributo fornito dalla luce naturale. Questa deve ritornare ad avere un ruolo di primo piano poiché ha importanti ricadute sulla qualità della vita dell'uomo, ampiamente analizzate attraverso osservazioni scientifiche sperimentali [1][2][3]. Lo studio consapevole di tutti i suoi aspetti fin dalle primissime fasi della progettazione architettonica ed urbana risulta essere perciò fondamentale.

Per quel che riguarda le norme in materia di illuminazione naturale, tutti i paesi ne sono provvisti ma esse risultano spesso inadeguate, fornendo peraltro principalmente strumenti per l'analisi di edifici residenziali. Solo in pochissimi casi vengono riportate indicazioni per edifici del terziario (come in Italia per quel che riguarda scuole e ospedali), mentre più di frequente si adottano per questo settore i requisiti per il residenziale, o si fa riferimento a pubblicazioni di carattere tecnico - progettuale. Se guardiamo all'Europa, le norme che regolano il contributo della luce naturale sotto il profilo del benessere degli utenti, forniscono ai progettisti le grandezze di riferimento ed i rispettivi valori limite da rispettare. L'analisi condotta in questa ricerca ha riguardato alcuni stati dell'Unione Europea dove risulta che i criteri presi in considerazione per la valutazione della luce naturale, passano fondamentalmente attraverso il calcolo del Fattore di luce diurna (Daylight factor) ed i Rapporti aeroilluminanti (*RAI*), grandezze piuttosto datate (il Fattore di luce diurna è presente nelle norme italiane fin dal 1967) e molto poco accurate nel descrivere la reale interazione edificio-luce naturale. Molti studi presenti in letteratura evidenziano le criticità sia del Daylight factor stesso che delle condizioni in cui viene calcolato. È stato dimostrato come esso sia solamente un indicatore statico che non tiene conto della variabilità della luce diurna (cosa che accade normalmente in natura), essendo legato ad una condizione di calcolo che prevede che il cielo sia caratterizzato da una forte nuvolosità (cielo Overcast), condizione che non sembra descrivere efficacemente neanche realtà come quelle dei paesi del nord Europa. In letteratura si trovano anche numerose proposte che suggeriscono di modificare le condizioni del cielo per il calcolo del Daylight factor, e altre che invece indicano nuovi parametri di riferimento che stanno prendendo sempre più piede nella prassi progettuale.

Qualcosa a questo proposito si sta muovendo nei protocolli di certificazione ambientale, spesso all'avanguardia rispetto alle normative. Benché non vincolanti, possono comunque rappresentare un valido riferimento per il progettista. Nel protocollo britannico BREEAM e ancor di più nel protocollo statunitense LEED v.4, si va verso il superamento del Daylight factor come unico parametro per la misurazione della luce naturale, affiancandolo ad altre grandezze o sostituendolo completamente. Quello che si osserva in generale è che il nuovo orientamento è nettamente verso una analisi di tipo dinamico (Climate Based Daylight Modelling) che può descrivere in maniera più precisa il reale andamento della luce naturale nel corso del tempo, sia dal punto di vista quantitativo che da quello qualitativo. Un calcolo di tipo dinamico è certamente più complesso di quelli prescritti oggi: esso richiede dati di input precisi e strumenti di elaborazione potenti ed accuratamente validati. L'introduzione a livello normativo del CBDM renderebbe necessario un approccio parallelo di tipo semplificativo.

Le considerazioni fatte fin qui hanno riguardato principalmente valutazioni riguardanti la luce naturale dal punto di vista progettuale e del comfort. Tutte le implicazioni di tipo energetico - economico trovano nella normativa odierna non molto spazio.

Nonostante in Italia il fabbisogno di energia elettrica abbia registrato negli ultimi anni una leggera flessione tornando ad allinearsi a quello del 2002 (Figura 1), continua a rimanere una voce di bilancio (pubblico e privato) di grande importanza.

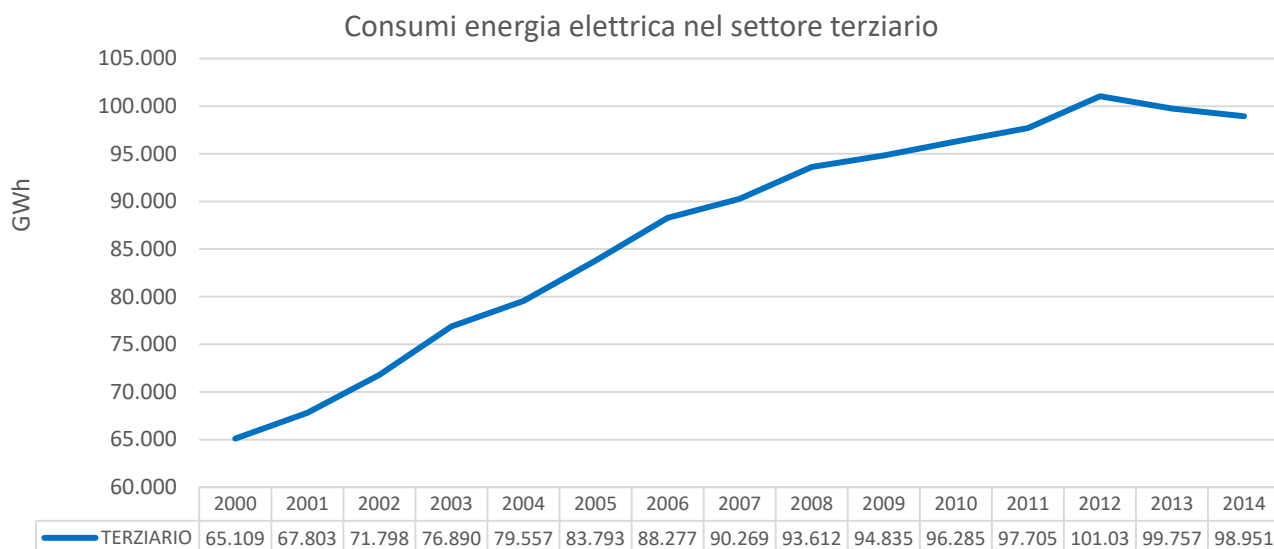


Figura 1 Andamento dei consumi di energia elettrica per settore merceologico in Italia - fonte Terna S.p.A.

Dei quasi 290'000 GWh assorbiti nel 2014, il 19% è ascrivibile all'illuminazione degli edifici, soprattutto di quelli nel settore terziario [4], un dato significativo che indica quali possano essere gli ambiti in cui intervenire per una riduzione sensibile del fabbisogno di energia elettrica.

Essendosi nel recente periodo registrata una riduzione della realizzazione di nuove costruzioni, l'efficientamento degli edifici risulta essere la strada da seguire. Gli impianti di illuminazione presenti nel patrimonio edilizio hanno nel 75% dei casi un'età superiore ai 25 anni. Installare nuovi impianti è una operazione che rende notevoli benefici, con costi di ammortamento interessanti, ma le ristrutturazioni in questo ambito sono ancora molto poche [5]. Operazioni di retrofitting possono però riguardare non soltanto gli impianti di illuminazione ma anche l'involucro dell'edificio per renderlo maggiormente responsivo alla luce naturale. Ma l'unica norma a livello europeo che considera la luce naturale nel bilancio energetico globale dell'edificio (unicamente nel settore terziario) è la EN 15193 del 2007 (oggi in fase di revisione) che, come tutte le altre norme in questo ambito, indica come grandezza di riferimento il Daylight factor. La sua presunta conservatività lo renderebbe il parametro ideale per valutazioni energetiche semplificate. Uno studio precedente [6] ha dimostrato come le criticità di questa grandezza (per altro definita in maniera non standard nella norma sopra citata) incidano negativamente sull'attendibilità del calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione dell'edificio.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di investigare quanto le condizioni che oggi rappresentano lo standard per la valutazione del contributo della luce naturale all'interno di un edificio, rappresentino in maniera efficace quello che accade nella realtà. Poiché infatti il Daylight factor continua ad essere a livello normativo la grandezza di riferimento in questo ambito, sono state studiate le condizioni standard di calcolo per valutare se rappresentino realmente la situazione più conservativa. La ricerca si è sviluppata attraverso uno studio teorico ed una campagna di misurazioni.

2 Normativa dei paesi della UE sulla luce diurna negli edifici

A livello normativo in Europa ogni paese è dotato di leggi che impongono standard da rispettare per quel che riguarda l'apporto di luce naturale negli edifici (Figura 2).

La maggior parte dei paesi fornisce prescrizioni principalmente per gli spazi residenziali, prescrizioni che diventano alla fine riferimenti anche per tutti gli altri ambienti costruiti. Non sono infatti di semplice reperimento i riferimenti normativi riguardanti gli ambienti non residenziali, che spesso sono presenti solo in manuali di progettazione o buone pratiche. Nella (Tabella 1) sono stati riassunti per alcuni paesi della UE quelle che sono le norme di riferimento nell'ambito della progettazione della luce naturale negli edifici, indicando quali sono le principali grandezze di riferimento per effettuare le verifiche richieste.

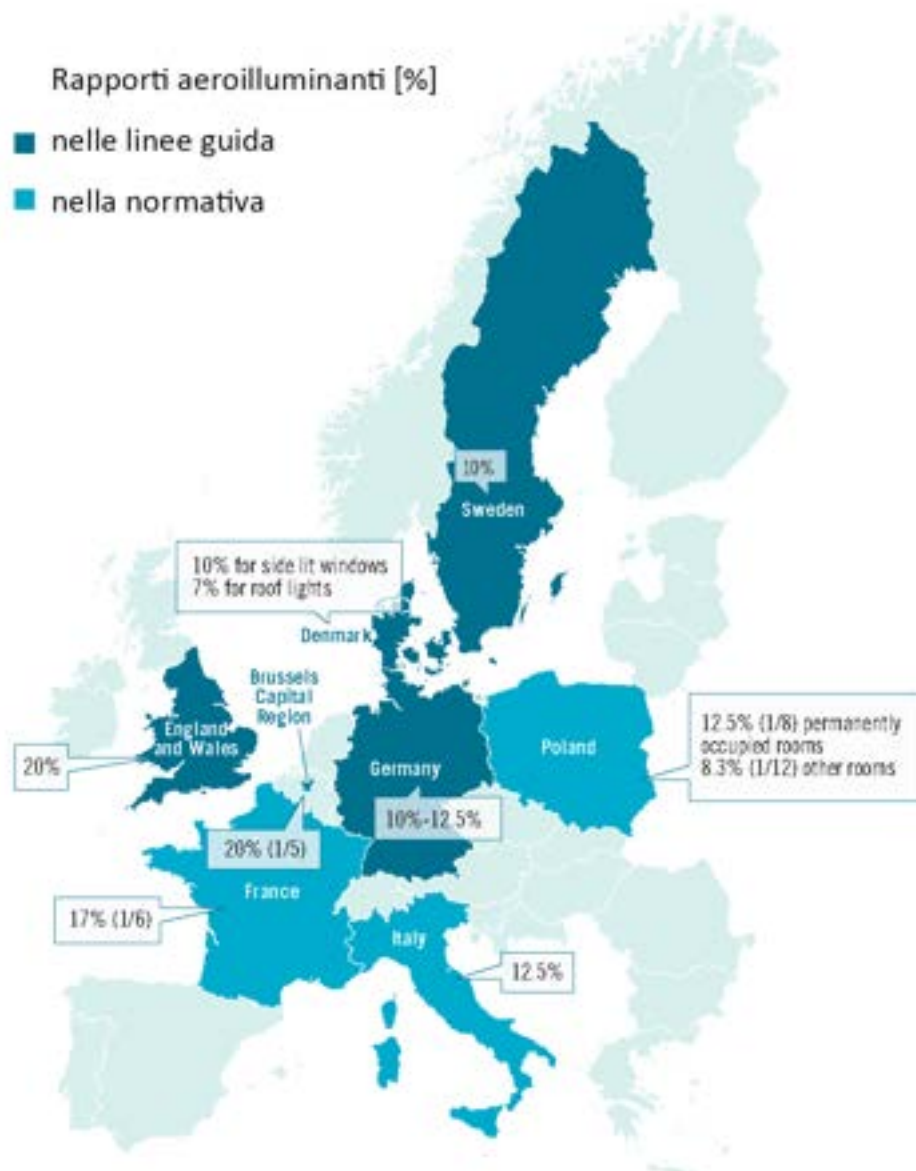


Figura 2 Rapporti aeroilluminanti secondo normativa e linee guida, in alcuni paesi della UE – fonte “Indoor air quality, thermal comfort and daylight”, Buildings Performance Institute Europe (BPIE)

È interessante notare come in alcuni paesi sia presente un “diritto alla luce”: ad esempio in Inghilterra il Right to Light è protetto da un Atto del 1832 (Prescription Act 1832) secondo cui se un edificio ha goduto della luce per 20 anni senza interruzione, il diritto deve essere ritenuto assoluto ed irrinunciabile. In altri paesi si prescrive di garantire una vista degli ambienti interni verso l'esterno o un periodo obbligatorio di esposizione solare diretta.

Come è possibile osservare, il Fattore di luce diurna è, assieme al Rapporto aeroilluminante (*RAI*), l'unica grandezza presente nelle normative dei paesi presi in esame.

Un approfondimento ulteriore è stato svolto per l'Italia dove esistono diverse norme che regolano la progettazione della luce naturale. L'art. 2 del C.M. LL. PP. 22 maggio 1967 n. 3151 [7] indica come parametro per la definizione quantitativa della luce naturale all'interno degli ambienti il Fattore di luce diurna ed il Fattore medio di luce diurna.

L'art. 5 del D.M. 5 luglio 1975 n. 190, [8] dispone che “tutti i locali degli alloggi, eccettuati quelli destinati a servizi igienici, disimpegni, corridoi, vani-scala e ripostigli debbono fruire di illuminazione naturale diretta, adeguata alla destinazione d'uso”. Dal punto di vista prettamente quantitativo il Decreto prevede che debba essere garantito un Fattore di luce diurna non inferiore al 2% e che in ogni locale sia presente una superficie apribile non inferiore ad 1/8 (12.5%) della superficie del pavimento.

Tabella 1 Principali norme riguardanti l'illuminazione naturale negli edifici e grandezze di riferimento, in alcuni paesi della UE

paese	"diritto alla luce"	norme	grandezze di riferimento
Danimarca	sì	Danish Building Regulations (BR15, 2015, capitolo 6.5)	RAI D_{avg}
		DS/EN 12665 Light and lighting – Basic terms and criteria for specifying lighting requirements	
		Code du logement	
		DS/EN 12464-1:2011 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places	
		EN 15193:2007	
Francia		Code de la construction et de l'habitation (2016, Libro I, Titolo I, R. E111-10)	
		Decreto del 26 ottobre 2010 (Titolo III, Capitolo IV, art. 20)	RAI
		EN 12464-1:2011	
		EN 15193:2007	
Germania		DIN 5034-1:2011-07	RAI D_{avg}
		DIN EN 12464-1:2011	
		EN 15193:2007	
Polonia	sì	The Regulation of the Minister of Infrastructure dated 12 April 2002 on the technical conditions to be met by buildings and their location (Journal of Laws 2002 No. 75, item. 690, e successive modifiche)	RAI
		EN 12464-1:2011	
		EN 15193:2007	
Regione di Bruxelles-Capitale	sì	Règlement Régional d'Urbanisme (RRU), 21 novembre 2006, titolo II, artt. 10 – 11	RAI D_{avg}
		NBN 12464-1:2011 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places	
		EN 15193:2007	
Regno Unito (Inghilterra e Galles)	sì	Lighting for buildings. Code of practice for daylighting (BS 8206-2:2008)	RAI D_{avg}
		The Building Regulations 2010 - L1A Conservation of fuel and power in new dwellings	
		The Building Regulations 2010 - L1B Conservation of fuel and power in existing dwellings	
		The Building Regulations 2010 - L2A Conservation of fuel and power in new buildings other than dwellings	
		The Building Regulations 2010 - L2B Conservation of fuel and power in existing buildings other than dwellings	
		EN 12464-1:2011	
		EN 15193:2007	
Svezia	sì	SS 91 42 01	RAI D_{avg}
		BFS 2014:3 BBR 21 e successive modifiche	
		EN 12464-1:2011	
		EN 15193:2007	

Al punto 1.03.3 della C.M. LL. PP. 22 novembre 1974 n. 13011 [9] si determinano i requisiti per l'illuminazione dell'edilizia ospedaliera. Si prescrive che dovranno esserci adeguati livelli di illuminamento con accettabili disuniformità di luminanza, e dovranno essere previste schermature contro fenomeni di abbagliamento. Sono definiti i livelli di illuminamento (naturale e artificiale) da garantire in qualsiasi condizione di cielo, ed in tutti i punti dei piani di lavoro. Il Fattore di luce diurna medio dovrà essere pari al 3% per gli ambienti di degenza e i laboratori, del 2% nelle palestre e nei refettori, del 1% negli uffici, negli spazi di distribuzione e nelle scale. Nell'ambito dell'edilizia scolastica la UNI 10840 del 2007 [10] "specifica i criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale delle aule e di altri locali scolastici". All'interno del Prospetto 2 sono riportati i valori del

Fattore di luce diurna medio (D_{avg}) da garantire negli ambienti a seconda delle destinazioni d'uso. Prescrive inoltre il calcolo dell'indice di abbagliamento che deve rispettare quanto riportato nel Prospetto B.1. La norma rimanda alla UNI EN 12464-1 del 2011 [11] per quanto concerne i livelli di illuminamento.

Al punto 5.2 del D.M. 18 dicembre 1975 n. 26 [12], "Condizioni di illuminazione e del colore" viene richiesto nella progettazione dei locali scolastici che le condizioni di illuminazione adeguate vengano raggiunte tramite l'integrazione di luce naturale e artificiale. Nella Tabella 2 sono esposti i valori di illuminamento prescritti:

Tabella 2 Tabella 5.2.2 D.M. n. 26/1975, livelli di illuminamento negli edifici scolastici

Illuminamento sul piano di lavoro	[lux]
Sul piano dei tavoli negli spazi per il disegno, il cucito, il ricamo, ecc.	300
Sulle lavagne e sui cartelloni	300
Sul piano di lavoro negli spazi per lezione, studio, lettura, laboratori, negli uffici	200
Negli spazi per riunioni, per ginnastica, ecc. misurati su un piano ideale posto a 0.6 m dal pavimento	100
Nei corridoi, scale, servizi igienici, atri, spogliatoi ecc. misurati su un piano ideale posto a 1 m dal pavimento	100

Si indica in 20 il rapporto tra i valori di luminanza massima di oggetti nel campo visivo e il valore medio di luminanza. Al punto 5.2.2. viene richiamato il Fattore medio di luce diurna che dovrà rispettare i valori qui riportati nella Tabella 3:

Tabella 3 Tabella 5.2.5 D.M. n. 26/1975, Fattore medio di luce diurna negli edifici scolastici

Ambiente	D_{avg} [%]
Ambiente ad uso didattico (aule per lezione, studio, lettura, laboratori, disegno, ecc.)	3
Palestre, refettori	2
Uffici, spazi per la distribuzione, scale, servizi igienici	1

Viene prescritta la dotazione di schermature per "attenuare il livello di illuminazione naturale" e la predisposizione di locali completamente oscurabili.

La UNI EN 15193 mette in relazione l'illuminazione naturale al fabbisogno energetico per l'illuminazione per gli edifici non residenziali. Anche in questo caso, il parametro che valuta la quantità di luce naturale è il Fattore di luce diurna, anche se nella norma la formula per il calcolo non risulta essere quella standard.

A livello locale ci sono Regioni e Comuni che hanno legiferato in materia di illuminazione naturale, rendendo le prescrizioni ancor più stringenti di quelle a livello nazionale. Un caso su tutti è il Regolamento Edilizio del Comune di Milano che prevede per le aule scolastiche il raggiungimento di un RAI di 1/5 (20%).

3 Protocolli di certificazione e luce diurna

Altre indicazioni sulla luce naturale all'interno degli edifici le troviamo nei protocolli di certificazione energetica. Abbiamo qui voluto indicarne alcuni tra i più utilizzati a livello nazionale e internazionale. Se i protocolli italiani sono legati sempre al Fattore di luce diurna, un passo avanti è stato certamente fatto dal protocollo di certificazione volontaria LEED, nel quale le grandezze di riferimento sono ora la Spatial Daylight Autonomy (sDA) e Annual Sunlight Exposure (ASE). È certamente il primo passo perché tutti i protocolli e le normative percorrano la strada verso una valutazione in chiave Climate Based.

3.1 Protocollo CasaClima

È un protocollo di certificazione volontario presentato nel 2002 in ottemperanza a quanto già definito dalla Comunità Europea come Direttiva CEE 2002/91/CE a seguito del Protocollo di Kyoto. Con più di 2500 edifici certificati su tutto il territorio italiano, CasaClima è oggi una delle realtà più consolidate e riconosciute nel campo della certificazione energetica degli edifici. In Tabella 4 sono riportati i valori limite della grandezza di riferimento, in questo caso il D_{avg} .

Tabella 4 Valori limite di D_{avg} nel protocollo CasaClima

Protocollo CasaClima	
Edificio residenziale	$D_{avg} \geq 2\%$
Edificio scolastico	$D_{avg} \geq 3\%$

3.2 Protocollo ITACA

Il Protocollo ITACA (Istituto per l'Innovazione e la Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale) è uno strumento adottato dalle Regioni italiane per la valutazione del grado di sostenibilità energetico ambientale delle costruzioni ed è stato approvato il 15 gennaio 2004 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. È utilizzato da UNI (Ente Italiano di Normazione) come strumento tecnico nella prassi di riferimento della sostenibilità ambientale nelle costruzioni. Il protocollo è stato realizzato dal Gruppo di lavoro interregionale per l'Edilizia Sostenibile costituito presso ITACA, con il supporto tecnico-scientifico di ITC-CNR e iiSBE Italia. Il parametro di riferimento è il D_{avg} . In Tabella 5 sono riportati i valori limite.

Tabella 5 Valori limite di D_{avg} nel protocollo ITACA

Protocollo ITACA				
D_{avg} (nuova costruzione ristrutturazione):		D_{avg} (nuova costruzione e ristrutturazione):		
Negativo	< 2.0%	Uffici	2%	
Sufficiente	2.00%	Corridoi, scale, spazi di distribuzione	1%	
Buono	2.30%	Edifici commerciali	2%	
Ottimo	2.50%	Edifici industriali	1%	
		Camere albergo	1%	
		Ristorante	2%	
		Biblioteche, sale lettura	2%	
		Sale espositive, musei	1%	
		Edifici scolastici	Aule scolastiche	3%
			Palestre, mense, refettori	2%
			Uffici, aula magna, sale docenti	2%
			Corridoi, scale, spazi di distribuzione	1%
			Biblioteche, sale riunioni	2%

3.3 Protocollo BREEAM

Il Building Research establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) è il metodo di valutazione e certificazione della sostenibilità degli edifici creato nel 1990 dal Building Research establishment (BRE). L'ultima versione è adottabile per edifici residenziali, commerciali, industriali e per uffici, esistenti o da realizzare. È prevista una scala di punteggi che va da Pass ad Outstanding. Ad oggi sono stati certificati secondo questo protocollo circa 250'000 edifici in tutto il mondo [13]. In Tabella 6 sono riportati i valori limite della grandezza di riferimento (D_{avg}).

Tabella 6 Valori limite di D_{avg} nel protocollo BREEAM

BREEAM				
Ambiente	Crediti	D_{avg}	area con requisito verificato [m^2]	altri requisiti
Edifici scolastici - spazi occupati	1	2%	80%	
Edifici scolastici di grado superiore - spazi occupati	1	2%	60%	
Edifici per la sanità - spazi pubblici e per il personale	2	2%	80%	
Edifici per la sanità - spazi occupati da pazienti (reparti e ambulatori)		3%	80%	
Edifici multi-residenziali - cucina	1	2%	80%	
Edifici multi-residenziali - soggiorno, sala da pranzo, studio (home office)		1.5%	80%	
Edifici multi-residenziali - spazi con residenziali / comuni		2%	80%	
		L'80% del piano di lavoro in ogni cucina, soggiorno, sala da pranzo e studio (home office compresi) devono godere di una vista verso il cielo.		
Edifici commerciali - aree di vendita	1		35%	$D \geq 2\%$
Edifici commerciali - altre aree occupate		2%	80%	
Tribunali, edifici industriali, edifici per uffici, prigioni e tutti gli altri tipi di edifici				
Tutti gli spazi occupati non indicati di seguito	1	2%	80%	
Celle e spazi di custodia		1.5%	80%	
Atrii delle carceri		3%	80%	Uniformità ≥ 0.7 o $D \geq 2.1\%$
Spazi di cura del paziente		3%	80%	
Spazi per insegnamento, lettura, seminari		2%	80%	
Spazi di vendita			35%	$D \geq 2\%$

3.4 Protocollo LEED

Il protocollo LEED (Leadership in Energy and Environment Design) è un sistema di certificazione volontario usato in tutto il mondo sviluppato dall'U.S. Green Building Council (USGBC). Prevede l'assegnazione di un punteggio al raggiungimento di determinati obiettivi. È stato elaborato nella sua prima stesura nel 1998. Giunto alla versione LEED v4, integra il calcolo della luce naturale e la valutazione del comfort visivo con l'intento di creare connessioni tra gli occupanti e gli esterni dell'edificio, rafforzare i cicli circadiani e ridurre l'uso dell'energia elettrica per l'illuminazione. È possibile effettuare i calcoli secondo tre diverse opzioni. Ad oggi sono stati certificati secondo questo protocollo 99600 edifici in tutto il mondo [14]. In Tabella 7 i valori limite delle grandezze di riferimento, in questo caso Spatial Daylight Autonomy (sDA), Annual Sunlight Exposure (ASE) e valori interni di illuminamento medio mantenuto (E_m).

Tabella 7 Valori limite di sDA , ASE , E_m nel protocollo LEED

Protocollo LEED v4			
Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data centers, magazzini e centri di distribuzione, strutture ricettive, strutture sanitarie.			

Opzione 1: Spatial Daylight Autonomy (sDA 300/50%) e Annual Sunlight Exposure (ASE 1000/250)			
Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data center, magazzini e centri di distribuzione, attività ricettive		Strutture sanitarie	
sDA (area del piano regolarmente occupata)		sDA (area perimetrale del piano)	
55%	1 pto	75%	1 pto
75%	2 pti	90%	2 pti
ASE 1000,250 per non più del 10% dell'area del piano occupata con sDA 300/50%			

Opzione 2: Simulazione per verificare $300 \text{ lux} < E_m < 3000 \text{ lux}$			
Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data center, magazzini e centri di distribuzione, attività ricettive		Strutture sanitarie	
Percentuale di area regolarmente occupata		Percentuale dell'area perimetrale del piano	
75%	1 pto	75%	1 pto
90%	2 pti	90%	2 pti

Opzione 3: Misurazione per verificare $300 \text{ lux} < E_m < 3000 \text{ lx}$			
Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data center, magazzini e centri di distribuzione, attività ricettive		Strutture sanitarie	
Percentuale di area regolarmente occupata		Percentuale dell'area perimetrale del piano	
75%	2 pti	75%	1 pto
90%	3 pti	90%	2 pti

4 Il Fattore di luce diurna (Daylight factor)

Le prestazioni energetiche ed il confort visivo di un edificio legati all'illuminazione naturale richiedono la stima di questo contributo all'interno degli ambienti. In quasi tutte le norme, i regolamenti ed i protocolli di certificazione, la valutazione del contributo della luce naturale avviene attraverso la determinazione del Fattore di luce diurna (D) o il Fattore di luce diurna medio (D_{avg}).

Questa grandezza è stata introdotta per la prima volta nel 1895 da Alexander Pelham Trotter. Questa attribuzione non è però mai stata dimostrata e resta perlopiù aneddotica [15].

Il Fattore di luce diurna è una grandezza sintetica adimensionale che indica il rapporto tra l'illuminamento di una superficie posta all'interno di un ambiente comunicante con l'esterno tramite un'apertura, ed una superficie posta all'esterno, nello stesso istante, considerando un cielo coperto (CIE Standard Overcast Sky), esclusa quindi la componente diretta della luce solare. La scelta di utilizzare la condizione di cielo coperto, dovrebbe rappresentare la situazione con la peggiore condizione di luce naturale e quindi la situazione più cautelativa.

Il Fattore di luce diurna è definito da tre componenti:

$$D = SC + ERC + IRC \quad [1]$$

dove

SC è la componente dovuta alla luce naturale diffusa che raggiunge direttamente il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato;

ERC è la componente dovuta alla luce naturale diffusa riflessa dalle superfici esterne che raggiunge il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato;

IRC è la componente dovuta alle riflessioni multiple della luce naturale diffusa sulle superfici interne che raggiunge il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato.

Il Fattore di luce diurna può essere misurato con la formula seguente:

$$D = E_i / E_e \cdot 100 [\%] \quad [2]$$

dove

E_i è il livello di illuminamento misurato in un punto su un piano orizzontale all'interno dell'ambiente, dovuto alla luce naturale diffusa dalla sola volta celeste;

E_e è il livello di illuminamento misurato simultaneamente ad E_i in un punto su un piano orizzontale all'esterno, dovuto alla luce diffusa della sola volta celeste ed in assenza di ostruzioni.

È importante che le condizioni del cielo siano però definite, in quanto la variazione della distribuzione della luminanza influenza il rapporto tra E_e ed E_i . Nei primi studi le condizioni di cielo proposte erano quelle con una forte copertura nuvolosa, con conseguenti deboli variazioni della luminosità. Questo cielo è assimilabile ad una distribuzione costante delle luminanze. Nel 1901 fu sperimentato come un cielo fortemente coperto presenta comunque un orizzonte più scuro ed uno zenit più chiaro. Successivamente, attraverso misurazioni con strumentazioni sempre più precise, è stato possibile verificare come in un cielo coperto la luminanza allo zenit sia anche 3 volte maggiore di quella all'orizzonte. Questo ha portato alla formulazione di una nuova distribuzione di luminanze definita nel 1942 da Moon e Spencer, divenuta lo standard per la CIE nel 1955.

Nel 1975 Longmore [16] propose il concetto di Fattore di luce diurna medio (D_{avg}) che considera globalmente la luce diurna in un ambiente e non in maniera puntuale. D_{avg} può risultare di grande utilità nelle prime fasi della progettazione potendo essere legato direttamente alla dimensione e posizione delle superfici vetrate.

Il Fattore di luce diurna medio (D_{avg}) può essere calcolato su tutta la superficie presa in esame all'interno dell'ambiente considerato (può essere la totalità della superficie o parte di essa, sulla quale si ipotizza sia concentrata l'attività lavorativa).

Un tipico profilo di distribuzione del Daylight factor in funzione della distanza dalla finestra è mostrato in (Figura 3) [17].

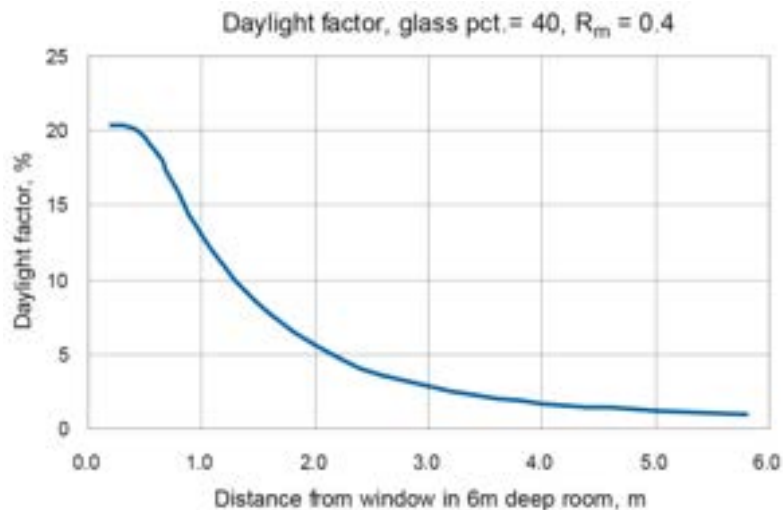


Figura 3 Tipico andamento del Daylight factor in un ambiente in cui la superficie vetrata è il 40% della facciata e il coefficiente di riflessione medio della stanza è 0.4. - fonte "SBI Guidelines 219" (Johnsen & Christoffersen, 2008)

4.1 Criticità del Daylight factor

Per le sue caratteristiche intrinseche, il Fattore di luce diurna presenta molte criticità e limitazioni sotto differenti punti di vista. Esso non permette di valutare l'adeguatezza dei livelli di illuminamento interno dovuto alla luce naturale ma costituisce solo una misura di illuminamento interno relativo rispetto ad una condizione di cielo esterno standardizzato Overcast. È un indicatore statico che non tiene conto della variazione delle condizioni esterne; è insensibile sia all'orientamento, in quanto la luminanza del cielo Overcast è simmetrica rispetto all'asse verticale, sia alla località, essendo un rapporto tra due quantità. Poiché la posizione e il contributo della radiazione solare diretta non sono presi in considerazione nel calcolo del D , qualsiasi strategia progettuale finalizzata a variare l'angolo di incidenza solare o l'intensità della radiazione non hanno alcuna influenza su tale parametro [18].

A dispetto di quanto creduto inizialmente, anche nel nord Europa la condizione di cielo Overcast non rappresenta la situazione più frequente in quanto condizioni climatiche simili a quelle rappresentate dal cielo coperto si verificano solo per il 50% dell'anno[19]. Per climi più soleggiati l'approssimazione è ancor più evidente [20]. La mancata corrispondenza tra valori di Daylight factor e livelli di illuminamento interno, sia in termini di sovrastime che di sottostime della quantità di luce naturale all'interno degli ambienti, può causare dal punto di vista progettuale un sovradimensionamento delle pareti vetrate degli edifici, e conseguentemente eccessivi guadagni solari e/o dispersioni. Dal punto di vista normativo e prestazionale, può determinare una errata valutazione della qualità dell'edificio in termini di efficienza energetica e sostenibilità. Uno degli esempi della mancata corrispondenza tra livello di illuminamento e valori di Daylight factor è rappresentato dallo studio dell'Heschong Mahone Group [21]. Gli edifici analizzati localizzati in California, per quanto ragionevolmente ben illuminati e sottoposti a controllo e monitoraggio costante del livello di luce naturale, sono risultati in grado di soddisfare i requisiti minimi di illuminamento ma non hanno raggiunto il 2% prescritto in termini di Daylight factor.

Nonostante le sue limitazioni il cielo Overcast sembrerebbe rappresentare la condizione più ragionevole per il calcolo della disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti in quanto considerata la più svantaggiosa e conservativa. Laddove la situazione più svantaggiosa fosse infatti verificata, questo automaticamente porterebbe a considerare tali anche tutte le altre condizioni di cielo. Come osservato da Mardaljevic in [22], è difficile però definire cosa si intenda per situazione più svantaggiosa. In aggiunta nei climi in cui la condizione di cielo Overcast non è mai o quasi mai verificata, l'utilizzo del Daylight factor calcolato con cielo Overcast come strumento di verifica della condizione più svantaggiata risulta poco rilevante e realistico.

4.2 Condizioni alternative e varianti di calcolo del Daylight factor

Al fine di apportare miglioramenti al Daylight factor e superare i limiti che esso comporta, sono state proposte in letteratura alcune soluzioni alternative:

- la valutazione del Daylight factor mediano orizzontale e del Daylight factor verticale in aggiunta/sostituzione al Daylight factor medio orizzontale
- il calcolo del Daylight factor utilizzando tipi di cielo alternativi al cielo Overcast (cielo Uniforme e cielo Clear).

Il valore mediano, a differenza del medio, è un indicatore di posizione e fornisce indicazioni sulla distribuzione del Daylight factor nell'ambiente. Specialmente in ambienti molto allungati ed illuminati dalla presenza di finestre solo su un lato della stanza, il Daylight factor medio è fortemente influenzato dalla disparità di valori registrati in prossimità della finestra e nel fondo della stanza e quindi non rappresentativo della condizione di illuminazione reale. In questi casi infatti, in cui tendenzialmente il Daylight factor medio è più alto del mediano, la distribuzione dei dati risulta asimmetrica e la gran parte dei punti della stanza presenta valori di Daylight factor inferiori al valor medio [22]. La riduzione dell'area di calcolo del D attraverso la creazione di una zona perimetrale di 0.5 m a ridosso delle pareti, limita le discrepanze tra il D_{avg} e la sua reale distribuzione nella stanza ma non le elimina del tutto.

Il Daylight factor verticale (VDF) è definito come il rapporto tra l'illuminamento naturale diretto o indiretto di un punto su una facciata verticale e l'illuminamento che si avrebbe su un piano orizzontale sotto lo stesso emisfero celeste in assenza di ostruzioni. L'irraggiamento solare diretto è escluso nel calcolo di entrambi gli illuminamenti; vengono presi in considerazione sia la luce diretta proveniente dal cielo che quella riflessa proveniente dagli edifici vicini e dal terreno. Il tipo di cielo maggiormente utilizzato anche in questo caso è il cielo Overcast. Questo parametro, introdotto nella normativa edilizia di Hong Kong come criterio per valutare la disponibilità di luce diurna negli ambienti [23], è particolarmente adatto ad individuare il contributo della luce naturale o in ambienti urbani con alta densità edilizia (in cui il contributo sulla facciate della luce naturale riflessa dalle ostruzioni esterne e dal terreno è preponderante rispetto alla luce proveniente direttamente dal cielo) oppure in quei casi in cui non è possibile calcolare i fattori di luce diurna orizzontale all'interno dell'ambiente [24].

Sin da quando fu definito per la prima volta il Daylight factor sono stati condotti molti studi, sia analitici che numerici, volti all'applicazione di questo parametro in condizioni di cielo sereno [25]. Tra questi, Alshaibani [26] ha proposto un metodo analitico per la valutazione del Daylight factor con cielo sereno, tenendo in considerazione l'effetto combinato della luce solare riflessa dal terreno e dalle ostruzioni esterne e della componente del cielo ma escludendo, come nel caso del cielo Overcast, la radiazione diretta del Sole. Il Daylight factor è quindi definito come il rapporto tra l'illuminamento sul piano di lavoro all'interno di un ambiente dovuto al contributo diretto e indiretto della luce naturale e l'illuminamento verticale esterno registrato simultaneamente sul piano della finestra. L'illuminamento interno orizzontale è derivato direttamente dall'illuminamento verticale esterno attraverso un fattore di configurazione (configuration factor). Allo stesso modo, attraverso una riformulazione analitica delle tre componenti del Daylight factor (SC , ERC e IRC), Sudan et al. [27] hanno definito un modello per il calcolo del D con cielo sereno all'interno di qualsiasi punto della stanza (le cui coordinate e livelli di illuminamento sono valutati in rapporto alla posizione e inclinazione della finestra) tenendo in considerazione parametri quali l'inclinazione, posizione e orientamento della finestra rispetto al Sole. Il modello è stato validato sperimentalmente attraverso misurazioni in condizioni di cielo sereno (radiazione diretta e diffusa) su un caso studio e i risultati ottenuti con il modello analitico sono in sostanziale accordo con i dati sperimentali misurati.

Il cielo Uniform è invece utilizzato in Australia e Nuova Zelanda come condizione alternativa al cielo Overcast. Dall'analisi effettuata da Mardaljevic in [22], in una stanza illuminata attraverso una finestra posta su un lato solo, i livelli di D ottenuti con il cielo Uniform (sia in termini di valore medio, mediano, massimo e minimo) sul piano di lavoro sono più alti rispetto a quelli ottenuti con cielo Overcast in quanto la luminanza della volta celeste nel caso di quest'ultimo è concentrata attorno allo zenit. Come confermato da [28], la frequenza di occorrenza del cielo Overcast nella realtà è piuttosto rara ed è molto più frequente la presenza di un cielo definibile quasi coperto. Quest'ultimo possiede un andamento delle luminanze molto più graduale tra l'orizzonte e lo zenit rispetto al cielo standard Overcast. Partendo da questo presupposto, per quanto il cielo Uniform sia caratterizzato da una distribuzione di luminanza di per sé molto omogenea e lontana da quella di

un cielo reale, possiede un rapporto tra le luminanze all'orizzonte e allo zenit costante e quindi più vicino alla condizione di un cielo reale "quasi coperto" rispetto al cielo Overcast. Questo aspetto fa sì che il primo si avvicini di più ad una media del cielo "quasi coperto" rispetto al cielo Overcast standard.

Li e Cheung [29] hanno infine calcolato il valore del D_{avg} per tutti i 15 cieli CIE applicando l'equazione di Longmore [30] e validando il modello attraverso il software di simulazione Radiance. I parametri di variazione nei diversi tipi di cielo sono legati ai parametri C e D che quantificano rispettivamente la componente diffusa del cielo e la componente riflessa del terreno. Il modello analitico e quello numerico sono risultati essere in sostanziale accordo e la differenza più netta tra i due è dell'0.4%.

Oltre che dal punto di vista della ricerca scientifica, l'opzione "cielo sereno" per il calcolo della disponibilità di luce diurna è stata introdotta anche nel LEED versione 2.2 del 2008 in cui si richiedeva di dimostrare in aggiunta al Daylight factor la presenza di 250 lux nel 75% dell'area occupata, in condizioni di cielo sereno a mezzogiorno nel giorno dell'equinozio. Allo stesso modo lo standard ASHRAE 189.1 del 2009, prescrive di dimostrare che siano raggiunti i 300 lux nella stanza allo stesso modo del LEED, richiedendo che la simulazione venga effettuata attraverso software basati su metodi raytracing o radiosity e permettendo di utilizzare alternativamente il cielo Clear od Overcast. Come sottolineato in [22], in entrambi i documenti non viene definito il valore di illuminamento diffuso orizzontale con cui normalizzare il cielo (che di default consiste in una approssimazione che dipende dalla latitudine, dall'ora e dal giorno ma non è basata su reali e prevalenti condizioni climatiche). L'assenza di normalizzazione dei valori di illuminamento diffuso orizzontale non permette la comparazione e quindi l'utilizzo alternativo di due tipi di cielo così diversi come quello Clear e quello Overcast. Infatti le analisi dimostrano che a causa della diversa ripartizione della radiazione solare extraterrestre incidente nei due tipi di cielo (tutta tramutata in diffusa nel caso Overcast e parzialmente ripartita tra diretta e diffusa nel caso Clear) l'illuminamento diffuso esterno al suolo (Ed_h) è quasi doppio nel caso Overcast rispetto al Clear, comportando un evidente disparità nei valori di Daylight factor. Anche laddove si potesse normalizzare il valore dell'illuminamento esterno diffuso tra i due tipi di cielo (valore che ad oggi risulta ancora non definito), comunque una estensione del Daylight factor con cielo sereno comparandolo all'Overcast è difficile per via della posizione del Sole che nel cielo Clear determina valori di radiazione verticale incidente sempre differenti al variare dell'ora, del giorno e dell'orientamento, rendendo difficile una standardizzazione del parametro.

Inoltre non vengono fornite direttive in merito alla tipologia di cielo Clear CIE da usare né sui valori di luminanza del Sole: essendo piuttosto bassi i livelli di illuminamento interni richiesti dall'ASHRAE e dal LEED, il contributo del Sole sembrerebbe essere escluso dalla valutazione, presupponendo l'utilizzo quindi di un cielo Clear senza Sole, fisicamente impossibile e irrealistico.

Nel 2011 il protocollo LEED è stato modificato e sono state aggiunte indicazioni in merito ai livelli di illuminamento diretti e diffusi del cielo Clear ed Overcast da utilizzare nella simulazione: i dati devono essere derivati dai dati climatici annuali selezionando i due giorni di equinozio più sereno e più coperto in degli ultimi 15 anni. Nonostante possa sembrare un miglioramento ed un chiarimento normativo, anche questa proposta non sembra dipanare i dubbi in merito all'utilizzo estensivo del cielo Clear per il calcolo del contributo della luce naturale negli ambienti confinati, a causa della variabilità del clima che non permette una standardizzazione e normalizzazione dei dati di input per le simulazioni.

Sulla base di queste considerazioni, come sottolineato in [22], Mardaljevic riconosce la difficoltà se non addirittura l'impossibilità nel raffinare il calcolo del D introducendo il cielo Clear in alternativa all'Overcast. L'unica strada percorribile per migliorare ed implementare l'analisi della luce naturale negli ambienti sembrerebbe essere il Climate Based Daylighting Modeling.

In linea con le osservazioni sovra citate, il nuovo protocollo LEED v.4, come descritto nel paragrafo 3.4, ha introdotto una nuova opzione di calcolo del contributo di luce diurna in ambiente in aggiunta alla modifica effettuata nel 2011, basata sull'utilizzo di due indici dinamici: Spatial Daylight autonomy (sDA) e Annual Sunlight exposure (ASE).

4.3 *Grandezze alternative al Daylight factor per la valutazione del contributo della luce naturale all'interno di un edificio*

Visti i macroscopici limiti del Daylight factor, da diversi anni la comunità scientifica sta studiando parametri alternativi che meglio possano rappresentare il reale contributo della luce naturale per l'illuminazione degli

ambienti interni agli edifici. I nuovi parametri che vengono proposti si pongono al servizio del Climate Based Daylight Modeling, ovvero lo studio dell'interazione dell'edificio con la luce del Sole (in tutte le sue componenti) partendo dal reale comportamento di quest'ultima descritto da file climatici, veri e propri database dove sono raccolti ad intervalli prefissati, i cambiamenti che avvengono nell'ambiente esterno (non solo le variazioni della luce naturale ma anche quelle di temperatura, umidità, velocità del vento, ecc.) durante tutto l'arco della giornata. La registrazione di questi dati viene svolta ormai in diverse parti del globo e permette, grazie all'uso di nuovi software, simulazioni sempre più accurate e attendibili.

Nella (Figura 4) è mostrata la mappa con la posizione delle stazioni meteo dove vengono effettuate le registrazioni dei dati climatici nel continente europeo.



Figura 4 Mappa delle stazioni meteo in Europa dove vengono effettuate le registrazioni dei dati climatici - fonte <http://www.ladybug.tools/epwmap/>

Di seguito riportiamo le principali grandezze alternative al Daylight factor attualmente oggetto di studio a livello internazionale:

- Daylight Autonomy (DA) [31][32][33]
La prima proposta di questo parametro è stata fatta dall'Association Suisse des Electriciens nel 1989. Successivamente è stato rielaborato da Reinhart e Walkenhorst dal 2000 al 2004. Preso un punto di riferimento, la DA è definita come la percentuale di tempo in un anno in cui in quel determinato punto si registra il raggiungimento del livello di illuminamento minimo richiesto per il compito, grazie alla sola luce naturale. L'innovazione di questo parametro sta nel considerare la posizione geografica del sito in cui l'edificio preso in esame è ubicato, e le reali condizioni del cielo su base annuale.
- Continuous Daylight Autonomy (DA_{con}) [31] [34]
È un parametro basato sul valore di DA e considera la condizione per cui il livello di illuminamento prescritto per il compito, non sia interamente raggiunto con la sola luce naturale, e sia quindi necessaria una quantità di luce artificiale debitamente dimmerata. Ovviamente questo parametro può essere considerato solamente nel caso in cui sia presente un sistema di controllo sull'impianto di illuminazione.
- Maximum Daylight Autonomy (DA_{max}) [31]
È definita come la percentuale di tempo in un anno in cui il livello di illuminamento dovuto alla sola luce naturale supera di 10 volte quello prescritto per un determinato compito. Questo parametro

serve ad indicare la possibilità che si verifichi una situazione di abbagliamento all'interno dello spazio considerato.

- Useful Daylight Illuminance (*UDI*) [35] [36][37]

L' *UDI* è composto da tre indici che assieme rappresentano la distribuzione complessiva dell'illuminamento in un anno. Fa sempre riferimento al livello di illuminamento da raggiungere sul piano di lavoro, ma stabilisce delle soglie:

- *UDI_{fell-short}* indica la percentuale di tempo in cui i valori di illuminamento forniti dalla luce naturale sono carenti. Proposto per la prima volta nel 2005, ha imposto 100 lux come limite massimo;
 - *UDI_{achived}* indica la percentuale di tempo in cui i valori di illuminamento soddisfano le richieste del compito visivo. Può essere suddiviso in due ulteriori intervalli:
 - *UDI_{supplementary}* che ha come limite inferiore 100 lux e superiore 300 lux. Indica la frequenza con cui la luce naturale deve essere compensata dalla luce artificiale;
 - *UDI_{autonomous}* che ha come limite inferiore 300 lux e superiore 2000 lux. Indica la frequenza con cui la luce naturale non deve essere compensata da quella artificiale;
 - *UDI_{exceeded}* indica la percentuale di tempo in cui i valori di illuminamento forniti dalla luce naturale sono superiori ai 2000 lux, valore per cui possono determinarsi fenomeni di discomfort visivo e/o termico.
- Daylight Saturation Percentage (*DSP*)
È un parametro derivante dall'*UDI*, dove il limite minimo è imposto a 430 lux ed il massimo a 4300 lux. Viene così indicata la percentuale di area entro cui è si raggiungono un livello all'interno dell'intervallo sopra indicato, per almeno il 50% del tempo.
 - Cumulative Illuminance (*CI*)
Questo parametro combina alcune semplificazioni del Daylight factor al Climate Based Daylight Modeling. Definisce la percentuale di tempo in cui è raggiunto il livello di illuminamento prescritto su tutto l'arco dell'anno. Questo calcolo deve essere però svolto adoperando file climatici standardizzati e per la sola componente diffusa della luce naturale.
 - Annual Light Exposure (*ALE*)
Rappresenta la quantità cumulata di flusso luminoso incidente su una superficie nell'arco di un anno e misurata in lux h/anno.
 - Spatial Daylight Autonomy (*sDA*)
Questo parametro è definito come la percentuale di area presa in esame che raggiunge un livello di illuminamento minimo di 300 lux per il 50% del periodo operativo nell'arco di un anno.
 - Annual Sunlight Exposure (*ASE*)
Questo parametro esprime l'abbagliamento potenziale annuale, in percentuale di area analizzata che supera i 1000 lux (ottenuti attraverso la componente diretta della luce diurna) per più di 250 ore nell'arco di un anno.

5 Obiettivi ed oggetto della ricerca

Alla luce delle precedenti considerazioni legate da un lato all'importanza del Daylight factor in Italia (sia dal punto di vista delle norme che dei protocolli di certificazione) e dall'altro alle evidenti limitazioni intrinseche a questo parametro, nel presente report verrà effettuata una comparazione tra le condizioni di cielo standard per il calcolo del *D* (Overcast) e alcune condizioni di cielo alternative valutando se e in che misura le eventuali differenze siano legate all'orientamento, alla latitudine e alla distribuzione di luminanza. Tale studio ha infatti l'obiettivo di verificare se il *D* valutato nella condizione standard risulti essere il più conservativo e quale sia l'entità delle differenze nel valore di *D* al variare delle condizioni di cielo, pur tenendo in considerazione i limiti nella comparazione dovuti alla variabilità della distribuzione di luminanza della volta celeste, alla dipendenza dagli angoli di incidenza del Sole nei cieli non-Overcast e ai diversi livelli di illuminamento diffuso orizzontale (livelli che il software Radiance utilizza per la costruzione dei cieli per le simulazioni).

L'analisi verrà effettuata utilizzando D_{avg} il quale, nonostante come citato nel paragrafo precedente, non sia in grado di descrivere opportunamente la distribuzione della luce naturale nell'ambiente (come invece risulta riuscire a fare il D_{med}), è la grandezza indicata in tutte le normative.

I tipi di cielo scelti per la valutazione sono caratterizzati come il cielo coperto dalla sola componente diffusa della radiazione ma presentano una differente distribuzione di luminanza, che include la posizione del Sole come variabile determinante nel calcolo. In tal modo, a differenza della condizione di Daylight factor standard, l'orientamento, la località, la data e l'ora della valutazione possono risultare fattori fondamentali nel calcolo.

6 Metodologia

L'approccio utilizzato per la valutazione del D in condizioni di cieli alternativi è sia di tipo numerico che sperimentale. In seguito alla scelta del caso studio (un ufficio del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA a Cesano di Roma) si è proceduto con l'analisi dei parametri fisico/geometrici della stanza al fine di caratterizzare l'ambiente per la costruzione del modello numerico. Contemporaneamente alla realizzazione di quest'ultimo, è stato allestito il set di sensori per le misurazioni sul campo. Il modello numerico è stato sviluppato tramite il software Rhinoceros 3D e la plug-in DIVA, che funge anche da interfaccia tra il software di modellazione tridimensionale e il software di calcolo illuminotecnico Radiance. Tramite il modello numerico sono state effettuate molteplici simulazioni ed è stato calcolato D al variare della tipologia di cielo, orientamento data e ora del giorno. Fra i tipi di cielo disponibili nel software per l'analisi, sono scelti il cielo Intermediate, il cielo Clear, il cielo Uniform e il cielo Overcast. D è stato calcolato come rapporto tra i livelli di illuminamento medi mantenuti E_m misurati all'interno dell'ambiente tipo simulato, e i livelli di illuminamento esterni diffusi orizzontali E_{dh} secondo (Formula 2).

Le misure di illuminamento interno ed esterno raccolte attraverso i sensori sono state invece utilizzate per il calcolo del D sperimentale. I risultati sia numerici che sperimentali poi sono stati analizzati e confrontati tra loro per validare il modello

7 Descrizione del caso studio

Il calcolo dei valori di Daylight factor con diversi tipi di cielo è stato condotto in uno degli uffici sull'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, che oggi ospita gli uffici dell'Unità Tecnica per l'Efficienza Energetica (Figura 5) L'edificio è esposto secondo l'asse nord/sud e non presenta ostruzioni esterne; ha una pianta rettangolare di 48 x 12 m ed è composto da due piani entrambi alti 2,7 m.



Figura 5 Edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA – fonte Google Maps

Gli uffici, mono-affaccio, sono posti a nord e a sud dell'edificio e sono separati da un corridoio interno. Nel presente report è stato preso in esame l'ambiente 108 (Figura 6) le cui dimensioni e caratteristiche principali sono mostrate in (Tabella 8).



Figura 6 Planimetria dell'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA

I coefficienti di riflessione sono stati calcolati per mezzo dello Spettroradiometro-colorimetro Minolta CS-1000-A (Figura 7) 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 7 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 8).

Tabella 8 Caratteristiche fisico/geometriche dell'ufficio n. 108

Dimensioni dell'ambiente	Larghezza (m)	3.6
	Profondità (m)	4.3
	Altezza (m)	2.7
Caratteristiche della finestra	Altezza (m)	1.25
	Larghezza (m)	3.26
	Distanza dal pavimento (m)	1.05
	Distanza dal soffitto (m)	0.6
Coefficienti di riflessione	Coefficiente di trasmissione del vetro τ	0.80
	Pareti	0.80
	Soffitto	0.86
	Pavimento	0.18

L'orario operativo dell'ufficio preso in esame è 7:00-17:00. Il caso studio è stato analizzato sia sperimentalmente, attraverso una campagna di misura degli illuminamenti interni ed esterni che verrà descritta più approfonditamente nel (capitolo 0.

Analisi sperimentale)8, sia numericamente attraverso la modellazione dell'ambiente mediante il software Rhinoceros e l'analisi illuminotecnica tramite il software DIVA e il motore di calcolo Radiance. I parametri della simulazione sono raccolti nella Tabella 9.

Tabella 9.

Tabella 9 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	0.86
		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
		Coefficiente di riflessione	0.1
		Specularity	0
	Piano esterno	Coefficiente di riflessione	0.1
		Specularity	0
		Roughness	0

I materiali in Radiance sono descritti tramite i tre valori di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda del rosso, del verde e del blu, la componente speculare e il fattore di ruvidità. Per quanto riguarda i materiali plastici, la componente speculare maggiore di 0.1 non è realistica; per i metalli invece i valori tipici di specularità sono superiori a 0.9. Per quanto riguarda il fattore di ruvidità, che è compreso in un range variabile tra 0 e 0.5, valori maggiori di 0.4 non sono realistici per i materiali plastici e per i materiali metallici il valore massimo di riferimento è 0.2.

I parametri di variazione delle simulazioni sono:

- i tipi di cielo (Overcast, Uniform, Intermediate without Sun, Clear without Sun)
- i giorni (equinozi e solstizi)
- l'orario operativo (7:00-17:00)
- gli orientamenti.

8 Analisi Numerica

8.1 Strumenti di calcolo del Daylight factor

Nel corso degli ultimi anni i software per il calcolo della luce naturale negli ambienti hanno subito una rapida evoluzione. Quelli presenti in commercio possono essere piuttosto differenti tra loro in termini di metodi di analisi, caratteristiche dei tipi di cielo utilizzati, parametri di calcolo, modalità di rappresentare e modellare la luminanza del cielo e del Sole. Queste differenze comportano una non omogeneità sia tra i dati simulati utilizzando diversi software, sia tra i dati simulati e la realtà. Alcuni studi svolti per attestare la validità dei software hanno infatti dimostrato che la deviazione standard tra i dati reali misurati e quelli simulati si attesta mediamente intorno al 10% [38][32][33].

Per quanto concerne i diversi metodi di calcolo, è possibile raggruppare i software in quattro gruppi: Split flux, Radiosity, Raytracing e Photon Mapping :

- La formula Split Flux deriva dal calcolo manuale del contributo di luce diurna stabilito dal BRE (English Building Research Establishment), basato sul principio per cui l'illuminazione in un certo punto della stanza è il risultato della somma delle tre componenti: *SC*, *ERC*, *IRC*. Questo metodo, essendo molto approssimato, può determinare generalmente una sovrastima o una sottostima del contributo di luce diurna ed è raccomandabile solamente per ambienti con finestre parallele alle pareti.
- Radiosity è un algoritmo che applica il metodo degli elementi finiti per risolvere l'equazione di rendering di scene composte da superfici perfettamente diffusive. Le superfici della scena sono suddivise in mesh e, una volta identificati i fattori di vista di ogni coppia di elementi della mesh, i livelli di illuminamento sono ottenuti dalla somma dei contributi delle sorgenti di tutte le superfici vicine.
- L'algoritmo Raytracing è basato sul calcolo della del percorso dei raggi di luce emessi da una sorgente e riflessi dalle varie superfici dell'ambiente. Questo metodo di calcolo tiene in considerazione sia le proprietà di riflessione che quelle di trasmissione e rifrazione delle superfici, permettendo così di utilizzare anche materiali complessi nelle simulazioni e modellare la scena in maniera quanto più possibile aderente alla realtà.
- La tecnica Photon Mapping infine simula l'emissione di fotoni dalle sorgenti di luce (naturali o artificiali) presenti in ambiente, tracciando il percorso dei raggi, costruendo una mappa in 3d di fotoni virtuali e renderizzando infine la scena sulla base delle informazioni contenute nella mappa per stimare la radianza riflessa sulle superfici.

Oltre agli algoritmi di calcolo, un altro significativo fattore che può determinare delle differenze tra i risultati ottenuti con i vari software è legato alla tipologia di cielo. Ad esempio per il calcolo del *D*, il software Radiance utilizza il cielo CIE Standard Overcast Sky type 16, mentre VELUX Daylight Visualizer si avvale del Cielo CIE General Sky type 1 frutto della definizione dei 15 cieli operata dalla CIE nel 2013 e poi revisionata nel 2014 [39]. Il primo dei due presenta valori di luminanza relativa più alti di circa il 25% vicino all'orizzonte facendo sì che i valori di *D* ottenuti con Radiance risultino mediamente più alti di circa il 10% rispetto a quelli ottenuti con VELUX Daylight Visualizer.

La (Figura 8) mostra le differenze relative di luminanza per differenti distanze angolari tra un elemento del cielo e lo zenit, calcolate con i cieli 1 e 16.

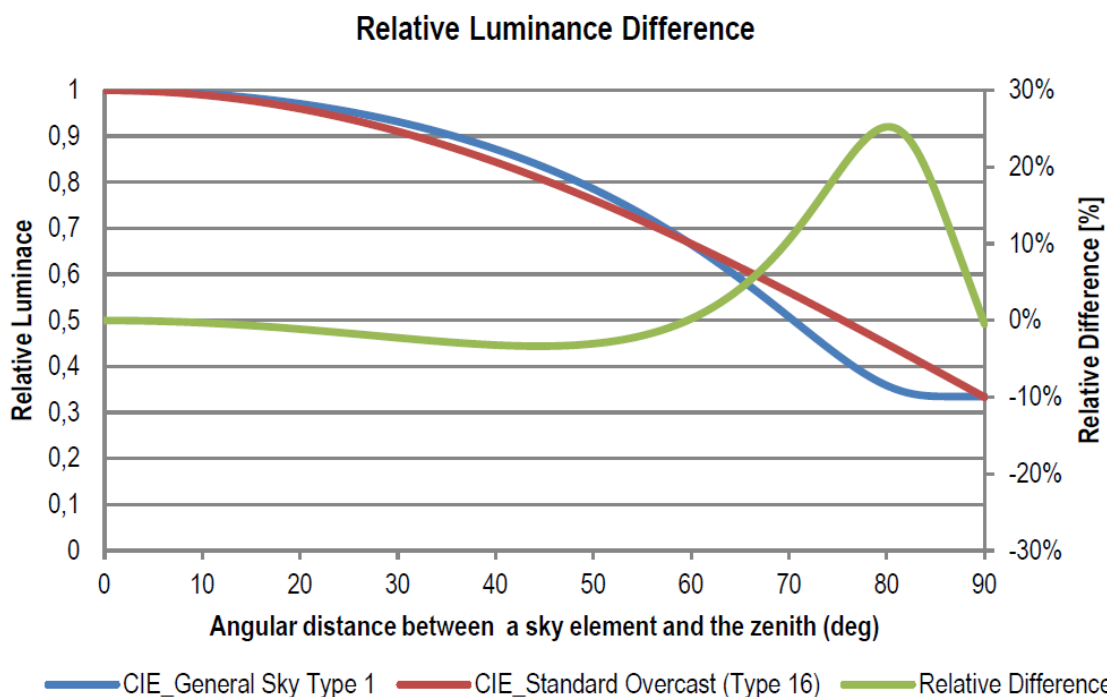


Figura 8 Differenza relativa tra le luminanze calcolate con cieli Overcast type 1 e 16 – fonte “Danish Building Research Institute, «Daylight calculations in practice: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms» Aalborg University, 2013

In aggiunta, per operare una attenta comparazione tra i vari software, occorre verificare che fattori quali ad esempio i coefficienti di riflessione e trasmissione dei materiali e i parametri di simulazione quali ad esempio il numero di riflessioni in ambiente, l'accuratezza e la risoluzione del calcolo siano coerenti.

Tra i software più utilizzati possiamo citare: Radiance, Daysim, Dialux, Relux, VELUX Daylight Visualizer.

seguito di accurate analisi dei vari software disponibili sul mercato, si è quindi deciso nella presente ricerca di utilizzare il motore di calcolo Radiance con interfaccia DIVA.

Radiance è un software sviluppato da Greg Ward presso il Lawrence Berkeley National Laboratory nel 1985 che permette di simulare i livelli e la distribuzione di illuminamento e luminanza interni dovuti a luce naturale anche in edifici particolarmente complessi dal punto di vista geometrico o delle caratteristiche dei materiali. I valori calcolati includono anche la radianza spettrale, l'irradianza e gli indici di abbagliamento. Radiance fornisce calcoli accurati e previsioni affidabili degli effetti della luce, e usa principalmente tecniche di Monte Carlo Backward Raytracing. Permette di ottenere sia render fotorealistici che risultati numerici affidabili, essendo stato oggetto di estese campagne di validazione. In maniera del tutto innovativa, Radiance opera anche il calcolo delle interriflessioni tramite Raytracing stocastico. È disponibile gratuitamente ed ha la possibilità di essere integrato in altri software (Autocad, Ecotect, DIVA, Grasshopper) o di essere utilizzato indipendentemente.

La scelta dell'algoritmo di Radiance è stata dettata dal fatto che permette di descrivere in maniera accurata il comportamento fisico dei materiali e di personalizzare i parametri di simulazione sulla base delle esigenze dell'utente. È stato validato ed è apprezzato da parte della comunità scientifica, ha subito evoluzioni e correzione nel corso degli anni ed è infine caratterizzato da un buon compromesso tra velocità di calcolo e precisione del risultato. Il software di interfaccia DIVA è stato invece scelto per la sua facilità di utilizzo e rapidità di calcolo, per la possibilità di visualizzare tutti i risultati sia in forma grafica che numerica, perché si appoggia ad un semplice ed efficiente software di modellazione 3D quale Rhinoceros.

8.2 Tipi di cielo

Nel 1955 è stato per la prima volta raccomandato dalla commissione CIE [40], l'utilizzo del cielo CIE Overcast come riferimento standard per i calcoli con luce naturale. Precedentemente a questa standardizzazione, il cielo Uniform era utilizzato per i calcoli. Nel 1973 è stato definito per standardizzazione il cielo CIE standard

Clear[41], e l'evoluzione normativa nella caratterizzazione dei cieli Clear e Overcast Standard si è protratta fino al 1996 [42]. Già da tempo tuttavia, nell'ambito della ricerca stava emergendo la necessità di definire e standardizzare le distribuzioni di luminanza di altre tipologie di cielo, quali ad esempio l'Intermediate [43]. Nel 1998, Kittler et al [44] hanno proposto una nuova serie di 15 cieli sulla base di una complessa analisi di dati di luminanza misurati. All'interno di questo nuovo set di cieli erano inclusi anche i cieli Overcast e Clear definiti dalla CIE. Tregenza nel 1999 [45] ha studiato ed approfondito la luminanza dei 15 cieli individuati da Kittler, al fine di verificare se fossero adatti a climi marittimi, tropicali e temperati. I risultati di questa ricerca hanno portato alla validazione dei 15 cieli, in accordo anche con quanto riscontrato nel 2003 da DHW et al. [46] che hanno confermato la corrispondenza dei cieli con i dati misurati ad Hong Kong. Queste validazioni hanno comportato che nel 2003, la commissione CIE ha adottato i 15 cieli come cieli Standard CIE [47]. La guida più aggiornata della commissione CIE in merito alla modalità di calcolo ed utilizzo dei 15 cieli CIE risale al 2014 [48]. Questo documento include una lunga lista di riferimenti e studi che dal 2004 al 2013 hanno portato a raffinare il calcolo delle luminanze dei cieli e fornisce raccomandazioni per l'applicazione di metodi numerici, tools e software.

I 15 cieli sono suddivisibili per tipologia in 3 macrogruppi ognuno dei quali ne contiene 5. I tre macrogruppi sono Overcast (in cui è incluso il cielo Uniform), Partly Cloudy e Clear. La caratterizzazione dei cieli è espressa attraverso funzioni matematiche che descrivono la luminanza relativa del cielo come rapporto tra la luminanza di ogni punto del cielo e quella allo zenit. La formula standard mostra quindi la luminanza relativa come combinazione tra funzione Gradation e funzione Indicatrix. La prima funzione rappresenta la graduale progressione tra la luminanza allo zenit e quella all'orizzonte; La seconda mette in relazione invece la luminanza di un elemento del cielo con la distanza dello stesso dal Sole.

La formula della luminanza relativa l_v è:

$$l_v = \frac{L}{L_z} = \frac{f(\chi)\varphi(Z)}{f(Z_s)\varphi_s(0^\circ)} \quad [3]$$

dove

L è la luminanza in un punto arbitrario del cielo [cd/m^2]

L_z è la luminanza del cielo allo zenit [cd/m^2]

Z è l'angolo zenitale dell'elemento del cielo [rad]

Z_s è l'angolo zenitale del cielo [rad]

χ è l'angolo di scattering, la minor distanza angolare tra il Sole e l'elemento del cielo [rad]

φ_s è l'angolo di azimut del Sole [rad]

φ è l'angolo di azimut dell'elemento del cielo [rad]

La funzione di standard gradation, mettendo in relazione la luminanza del cielo con la distanza dallo zenit, è espressa come segue:

$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi_s(0^\circ)} = \frac{1+a \exp(b/\cos Z)}{1+a \exp b} \quad [4]$$

dove a e b , come visibile in (Tabella 10), sono parametri tabellati.

La funzione di Indicatrix modella la luminanza del cielo sulla base della distanza angolare dal Sole, ed è espressa come:

$$\frac{f(\chi)}{f(Z_s)} = \frac{1+c \left[\exp(d\chi) - \exp\left(\frac{d\pi}{2}\right) \right] + e \cos^2 \chi}{1+c \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(\frac{d\pi}{2}\right) \right] + e \cos^2 Z_s} \quad [5]$$

Queste due funzioni permettono di raggruppare i cieli in due gruppi Gradation Group ed Indicatrix Group, come evidenziato in (Tabella 10).

Tabella 10 Dati di riferimento dei cieli CIE – fonte (CIE 215:2014 “CIE Standard General Sky Guide”)

Type	Gradiation	Indicatrix	a	b	c	d	e	Description of luminance distributions
1	I	1	4.0	-0.70	0	-1.0	0.0	CIE Standard Overcast Sky, alternative form Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal uniformity
2	I	2	4.0	-0.70	2	-1.5	0.15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the Sun
3	II	1	1.1	-0.80	0	-1.0	0.0	Overcast, moderately graded with azimuthal uniformity
4	II	2	1.1	-0.80	2	-1.5	0.15	Overcast, moderately graded and slight brightening towards the Sun
5	III	1	0.0	-1.0	0	-1.0	0.0	Sky of uniform luminance
6	III	2	0.0	-1.0	2	-1.5	0.15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the Sun
7	III	3	0.0	-1.0	5	-2.5	0.3	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region
8	III	4	0.0	-1.0	10	-3.0	0.45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9	IV	2	-1.0	-0.55	2	-1.5	0.15	Partly cloudy, with the obscured Sun
10	IV	3	-1.0	-0.55	5	-2.5	0.3	Partly cloudy, with brighter circumsolar region
11	IV	4	-1.0	-0.55	10	-3.0	0.45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1.0	-0.32	10	-3.0	0.45	CIE Standard Clear Sky, low illuminance turbidity
13	V	5	-1.0	-0.32	16	-3.0	0.3	CIE Standard Clear Sky, polluted atmosphere
14	VI	5	-1.0	-0.15	16	-3.0	0.3	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15	VI	6	-1.0	-0.15	24	-2.8	0.15	White-blue turbid sky with broad solar corona

Dato il valore di luminanza relativa l_v , è possibile calcolare il valore della luminanza dell'elemento di cielo preso in esame a partire dal valore di luminanza assoluta del cielo allo zenit attraverso la seguente formula:

$$L_Z = \frac{E_{VD}}{E_{VOH}} = \left[B \frac{(\sin \gamma_S)^C}{(\cos \gamma_S)^D} + E \sin \gamma_S \right] \quad [6]$$

dove

E_{VD} è l'illuminamento diffuso orizzontale

E_{VOH} è l'illuminamento orizzontale extraterrestre

γ_S è l'altezza solare

Sia il rapporto $\frac{E_{VD}}{E_{VOH}}$ che i parametri B , C , D , E , raccomandati sono presenti all'interno del documento CIE [48].

L'integrale della luminanza di ogni punto della volta celeste permette infine di ottenere il valore di illuminamento diffuso del cielo E_{VD} .

Nel software Radiance è possibile generare i tipi di cielo attraverso due comandi: gensky e gendaylit. Il primo offre una selezione di modelli di cielo basati sui cieli standard CIE per uno specifico mese, giorno e ora, il secondo genera una descrizione del cielo basato su una distribuzione angolare della luce naturale (diretta e diffusa) specifica per ogni condizione atmosferica, data e ora e calcolata usando il modello di cielo Perez.

In questo report è stato utilizzato il comando gensky in quanto l'obiettivo è comparare il Fattore di luce diurna calcolato con cielo Overcast con quello ottenuto utilizzando altri cieli standard CIE. Un successivo approfondimento di questo studio potrebbe essere basato sull'uso di cieli creati tramite gendaylit, al fine di comparare i risultati di Daylight factor generati con cieli standard con quelli generati a partire da dati reali.

I tipi di cielo creati da gensky sono:

- Uniform, corrispondente al cielo Uniform standard CIE.
- Overcast, corrispondente al cielo Overcast standard CIE
- Clear without Sun, corrispondente al cielo Clear standard CIE.
- Clear with Sun, in aggiunta alla luminanza del Clear without Sun, in questo tipo di cielo è stato aggiunto il contributo di radiazione diretta proveniente dal Sole.
- Intermediate without Sun, corrispondente al cielo Partly Cloudy CIE.
- Intermediate with Sun, in aggiunta alla luminanza dell'Intermediate without Sun, in questo tipo di cielo è stato inserito, in modo attenuato dalla presenza di nuvolosità, il contributo di radiazione diretta proveniente dal Sole.

I valori di luminanza del cielo in gensky possono essere alternativamente calcolati o a partire dal valore di radianza allo zenit o a partire dal valore di irradianza orizzontale diffusa. È possibile inserire valori di irradianza orizzontale diffusa misurati, oppure avvalersi di valori di default forniti dal programma. L'irradianza è trasformata in valori di illuminamento attraverso il parametro dell'efficacia luminosa, che in Radiance equivale a 179 lumen/W [49].

Nel presente report sono stati utilizzati i cieli Overcast, Uniform, Intermediate without Sun e Clear without Sun. Questi ultimi due infatti, a differenza dei corrispettivi "with Sun", sono caratterizzati dalla sola componente diffusa della radiazione e permettono di valutare e comparare i Daylight factor ottenuti con quello generato dal cielo standard Overcast.

Al fine di comprendere esattamente a quale tipo di cielo CIE facciano riferimento i cieli Intermediate e Clear without Sun calcolati da Radiance, si è deciso di confrontare la distribuzione di luminanza di questi ultimi con quella dei 5 cieli Partly Cloudy e dei 5 cieli Clear.

Il profilo di luminanza dei cieli di Radiance (Figura 9) è stato preso dal documento di Mardaljevic [49]. I cieli sono stati normalizzati utilizzando lo stesso valore di illuminamento diffuso orizzontale (30.000 lux) e l'altezza solare e azimut sono rispettivamente 45° e 180°. La volta celeste è stata sezionata con un arco da sud a nord passante per lo zenith.

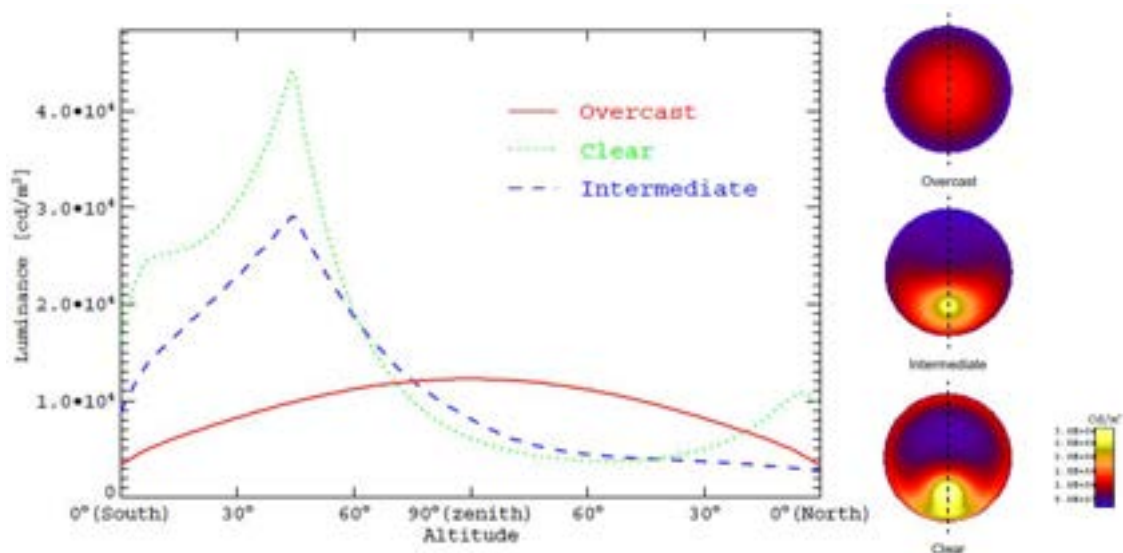


Figura 9 Profilo di luminanza dei cieli Overcast, Intermediate e Clear generati da Radiance, con valore di illuminamento orizzontale diffuso normalizzato (30.000 lux). Azimut del Sole 180° e altezza solare 45°

Utilizzando lo stesso azimut e altezza solare usati da Mardaljevic, attraverso la (Formola 3), (Formola 4), (Formola 5) e (Formola 6), sono state calcolate le luminanze di tutti e 10 i cieli CIE Partly cloudy e Clear (dal tipo 6 al tipo 15) lungo un arco a partire da una altezza solare di 0° (nord) fino ad una altezza di 180° (sud) passante per lo zenith. Si è notato che i cieli che meglio approssimano l'andamento di quelli di Radiance sono il tipo 7 (Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region) e il tipo 12 (CIE Standard Clear Sky, low illuminance turbidity).

Gli andamenti calcolati sono visibili in (Figura 10). Nel paragone tra le distribuzioni di luminanze di (Figura 9) e (Figura 10) non è possibile comparare i valori in quanto nel documento di Mardaljevic i livelli di illuminamento diffuso orizzontale prodotti dai cieli sono stati normalizzati, mentre nelle distribuzioni da noi calcolate non risultano coerenti i valori ma solo gli andamenti dei cieli.

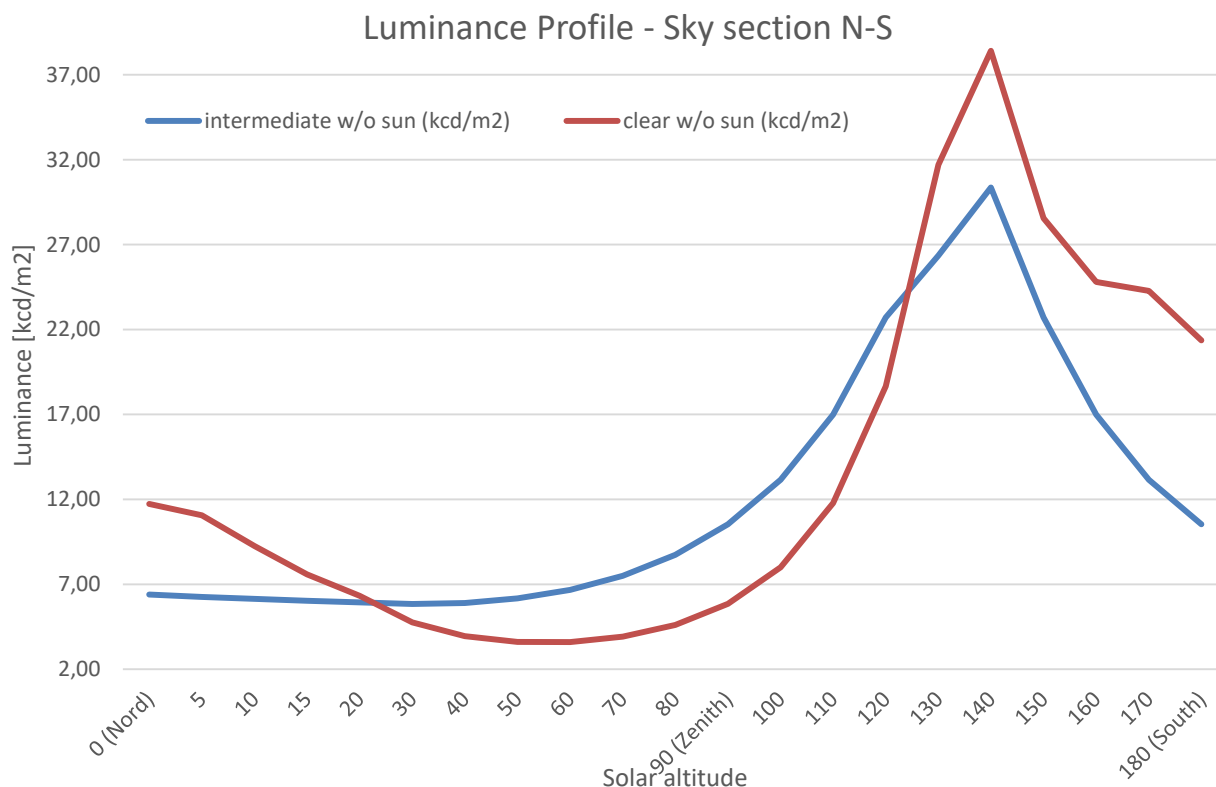


Figura 10 Profilo di luminanza dei cieli Intermediate calcolati sulla base delle formule CIE. Azimut del Sole 180° e altezza solare 45°.

9 Risultati

Al fine di verificare se il Daylight factor calcolato con il cielo Overcast risulti conservativo e inferiore rispetto a quello calcolato con i cieli Clear without Sun, Intermediate without Sun e Uniform, sono state effettuate delle simulazioni sul modello in diversi giorni dell'anno (equinozi e solstizi), per un orario operativo compreso tra le ore 7:00 e le 17:00, variando oltre alle condizioni di cielo anche gli orientamenti del modello stesso.

Raccolti i primi dati, ci si è resi conto che per porre condizioni di confronto analoghe, era necessario ridurre il range degli orari analizzati in quanto alle ore 7:00 e alle ore 17:00 nel solstizio d'inverno il Sole non era presente e quindi i livelli di illuminamento erano pari a zero. Data la sovrapposibilità dei dati di illuminamento esterno ed interno agli equinozi, si è scelto di effettuare le valutazioni solo per la data del 21 settembre; allo stesso modo, risultando speculari i vari dati ottenuti dalle simulazioni ad est e ad ovest, si è deciso di analizzare solamente l'orientamento est.

Dagli studi condotti da Mardaljevic sulle possibili variazioni ed evoluzioni del Daylight factor (vedi paragrafo 6), si evince che valutare e paragonare i valori di D calcolato con tipi di cielo alternativi all'Overcast è una operazione complessa a causa della ripartizione nei vari tipi di cielo della radiazione solare extraterrestre incidente e dei fattori quali l'orientamento del modello, la posizione del Sole (azimut e altezza solare) e la distribuzione di luminanze.

Nel calcolo con il software Radiance la componente solare extraterrestre ha un notevole peso nella determinazione dei valori di illuminamento orizzontale diffuso, in quanto questi valori vengono utilizzati per la determinazione della luminanza dei cieli (vedi paragrafo 10.2). Ad esempio il valore di default dell'illuminamento diffuso orizzontale esterno per definire la distribuzione delle luminanze nel cielo Overcast è quasi il doppio di quello utilizzato per il cielo Clear.

Mardaljevic suggerisce a tal proposito una normalizzazione dei livelli di illuminamento diffuso orizzontale al suolo al fine di poter ottenere risultati comparabili effettuando calcoli con i diversi tipi di cielo (ferme restando le problematiche e limitazioni descritte nel paragrafo 6). Nonostante ciò, non è ancora stato definito in letteratura un univoco valore di normalizzazione utilizzabile.

Al fine di verificare la conservatività del D calcolato con cielo Overcast, sulla base delle precedenti considerazioni si è ritenuto opportuno confrontare i dati ottenuti con gli altri cieli solamente nei casi in cui i livelli di illuminamento esterno diffuso orizzontale risultino avere scostati di $\pm 15\%$.

Imposto questo vincolo, le differenze di D tra i vari cieli possono essere valutate considerando come variabile il solo livello di illuminamento medio mantenuto E_m che, nel caso delle simulazioni con i cieli Clear ed Intermediate, è legato alla posizione del Sole, alla distribuzione delle luminanze e all'orientamento del modello. Quando invece le differenze tra i livelli di illuminamento esterno orizzontale sono più marcate, non è possibile paragonare i D , perché non è più determinabile quanto la mancata normalizzazione di E_{dh} pesi sulla variazione di E_m (ottenuti con gli altri cieli).

Dalle analisi effettuate emerge che il cielo Uniform non è mai confrontabile con il cielo Overcast in quanto caratterizzato da valori di E_{dh} sempre notevolmente maggiori come si vede in (Figura 11), (Figura 12) e (Figura 13).

Il cielo Intermediate risulta essere paragonabile negli equinozi e nel solstizio di inverno per tutto l'orario operativo definito, nel solstizio d'estate per le sole ore 8:00, 9:00 e 16:00 in quanto nelle ore centrali della giornata, per via della conformazione del cielo i livelli di illuminamento esterno subiscono un drastico calo come si vede in (Figura 11), (Figura 12) e (Figura 13).

Il cielo Clear è invece comparabile solamente in pochi casi, essendo sostanzialmente di gran lunga inferiori i livelli di E_{dh} di quest'ultimo rispetto a quelli del cielo Overcast come confermato da [22]: alle ore 8:00 agli equinozi e alle ore 9:00, 10:00, 14:00 e 15:00 al solstizio d'inverno come si vede in (Figura 11), (Figura 12) e (Figura 13).

Il confronto infine tra cielo Clear ed Intermediate risulta possibile solamente nelle ore centrali del solstizio d'estate (12:00, 13:00) e alle ore 9:00, 10:00 e 15:00 del solstizio d'inverno come si vede in (Figura 11), (Figura 12) e (Figura 13); la presenza di nuvolosità, per quanto ridotta e meno compatta di quella riprodotta dal cielo Overcast, fa sì che anche nella caratterizzazione del cielo Intermediate, la radiazione solare extraterrestre sia tramutata in gran parte in radiazione diffusa determinando ben più alti valori di illuminamento diffuso orizzontale rispetto al cielo Clear.

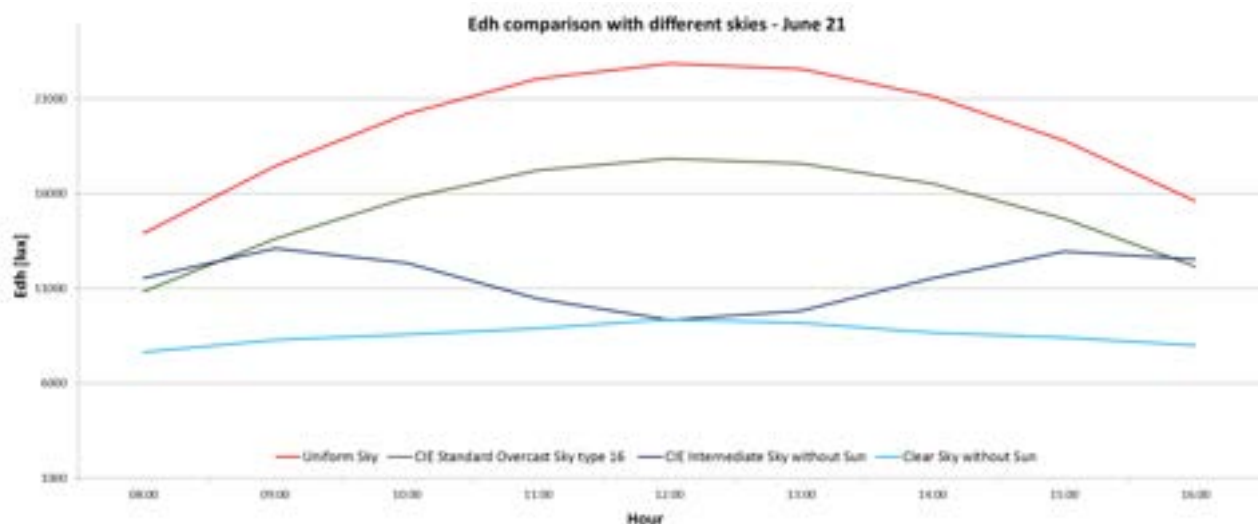


Figura 11 Andamento degli illuminamenti esterni (E_{dh}) al variare del tipo di cielo al solstizio d'estate

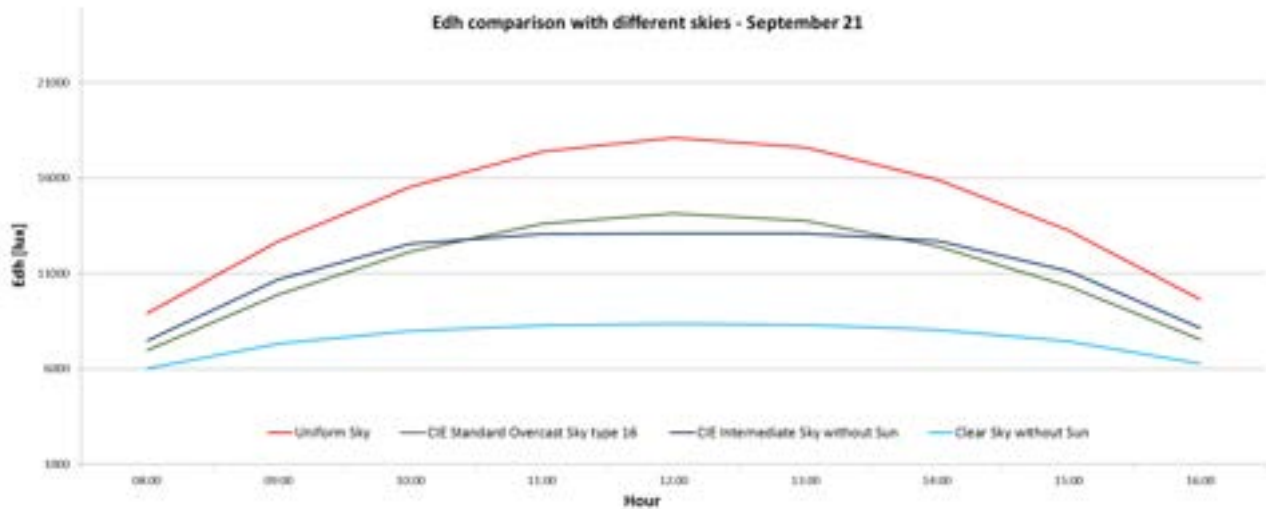


Figura 12 Andamento degli illuminamenti esterni (Ed_h) al variare del tipo di cielo agli equinozi

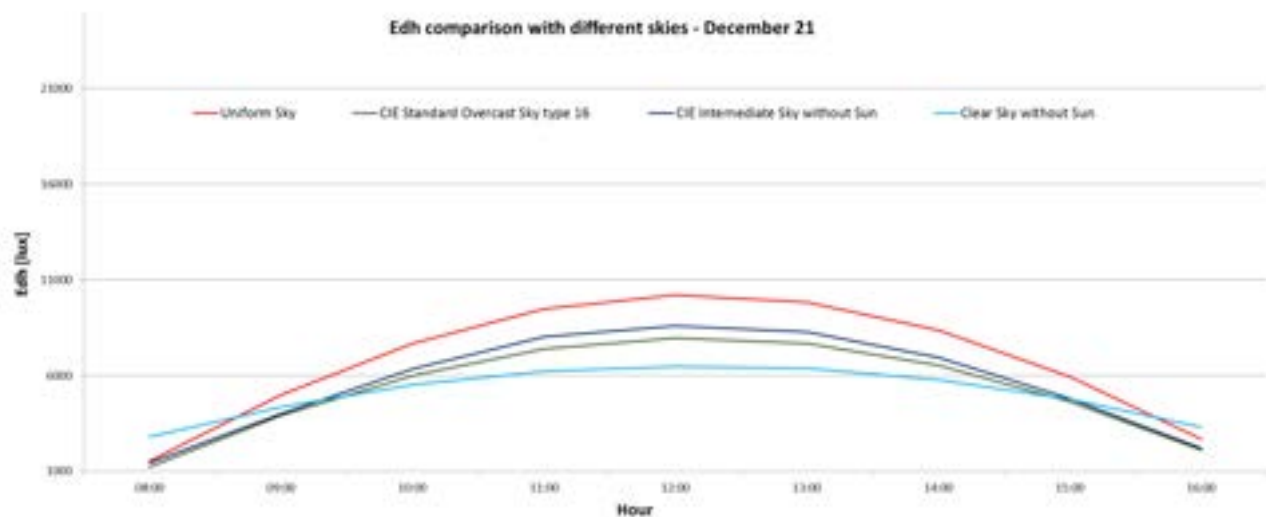


Figura 13 Andamento degli illuminamenti esterni (Ed_h) al variare del tipo di cielo al solstizio d'inverno

Nei casi paragonabili sono state effettuate differenti valutazioni sul valore di D al variare del tipo di cielo cambiando l'orientamento dell'edificio. Le differenze di E_m tra i vari tipi di cielo sono molto variabili in funzione dell'orario, della data e dell'esposizione della finestra. Questa variabilità, che da un lato non permette la standardizzazione del parametro D laddove calcolato con cieli alternativi al cielo Overcast, permette tuttavia di comparare e verificare se e in quali casi il cielo Overcast rispecchi la condizione più conservativa per la valutazione della disponibilità di luce diurna. La conservatività del cielo Overcast rispetto all'Intermediate ed al Clear aumenta all'aumentare dell'esposizione della finestra al Sole in quanto i cieli Intermediate e Clear sono legati all'orientamento, all'ora e alla distribuzione di luminanze.

Nelle tabelle che seguono, le celle evidenziate in rosso rappresentano le ore in cui valori di Illuminamento esterno dei vari cieli paragonati al cielo Overcast sono paragonabili a meno dello scarto di $\pm 15\%$. In verde sono evidenziate le ore in cui il Daylight factor calcolato con cielo Overcast risulta essere conservativo.

Analizzando più dettagliatamente i risultati di E_m e D ottenuti per i diversi orientamenti è possibile notare che:

- A nord il cielo Overcast non risulta mai essere la condizione di calcolo più conservativa rispetto al cielo Intermediate, fatta eccezione per le ore 8:00 e le ore 16:00 degli equinozi e del solstizio d'estate in cui, come visibile nelle (Tabella 11) e (Tabella 12), i livelli di illuminamento E_m calcolati con cielo Intermediate, sono superiori a quelli del cielo Overcast, raggiungendo un massimo di 27.3% di differenza percentuale alle ore 8:00 del solstizio d'estate, e la differenza tra i valori di D è pari all' 1.1%. Nel resto dei casi il cielo Intermediate produce livelli di E_m e quindi di D inferiori all'Overcast: la massima differenza percentuale si verifica alle ore 12:00 agli equinozi in cui la percentuale tra gli E_m è

il -48.4% e il Δ tra i valori di D corrispondenti è -2.5% (Tabella 12). Questo aspetto mette in luce come a nord nel cielo Intermediate, nei casi paragonabili agli equinozi e nel solstizio di inverno, il fatto che la finestra non sia mai esposta alla porzione di cielo in cui il Sole è presente comporta una riduzione sia dell' E_m che del D calcolati con questo cielo rispetto a quelli determinati con il cielo standard Overcast, che non risulta più evidentemente la condizione più svantaggiata.

Per quanto riguarda la comparazione tra cielo Clear e cielo Overcast, negli unici 5 casi evidenziati in rosso in cui c'è corrispondenza tra i valori di E_{dh} (Tabella 14, Tabella 15 e Tabella 16).

), si evince come il Daylight factor sia sempre conservativo ed i valori di E_m e D calcolati con il cielo Clear siano superiori a quelli calcolati con cielo Overcast. La massima variazione positiva si registra alle ore 9:00 del solstizio d'inverno in cui la differenza percentuale tra gli E_m è del 32% e il Δ tra i D è 1.1% (Tabella 16).

I cieli Clear ed Intermediate, anche essi paragonabili solo in un numero ridotto di casi, sono molto differenti tra loro ed il cielo Clear presenta sempre valori maggiori di D e di E_m . I risultati sono mostrati in Appendice A (Tabella 36, Tabella 37, Tabella 38) raggiungendo la massima differenza percentuale alle ore 12:00 del solstizio d'estate in cui la differenza percentuale tra gli illuminamenti interni è -45% (Tabella 36). Interessante notare come questa discrepanza si verifichi precisamente quando i valori esterni E_{dh} dei due cieli coincidano quasi perfettamente (17 lux di differenza) ed è dovuta sostanzialmente alla posizione e presenza del Sole e alla distribuzione di luminanza dei cieli.

Nelle (Figura 14) e (Figura 15) sono mostrati gli andamenti giornalieri di E_{dh} e D_{avg} per i cieli Overcast /Intermediate e Clear /Intermediate negli equinozi.

Tabella 11 Confronto cielo Overcast e Intermediate, solstizio d'estate, finestra a nord

NORTH									
June 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	11.6	10.9	107	6.8	5.7	1.1	788	619	27.3
09:00	13.1	13.6	96	5.6	5.7	-0.1	732	772	-5.2
10:00	12.3	15.8	78	4.3	5.7	-1.4	534	897	-40.5
11:00	10.5	17.2	61	3.5	5.8	-2.3	368	1006	-63.4
12:00	9.4	17.8	52	3.0	5.7	-2.6	284	1014	-72.0
13:00	9.8	17.6	56	3.2	5.7	-2.5	313	1006	-68.9
14:00	11.5	16.5	70	3.9	5.7	-1.8	450	947	-52.5
15:00	13.0	14.7	88	4.8	5.7	-0.9	624	837	-25.4
16:00	12.5	12.2	103	6.1	5.7	0.3	760	696	9.2

Tabella 12 Confronto cielo Overcast e Intermediate, equinozi, finestra a nord

NORTH									
March 21 September 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	74.9	7.0	108	6.0	5.7	0.3	451	398	13.4
09:00	106.8	9.9	108	4.9	5.7	-0.8	524	562	-6.8
10:00	125.5	12.1	103	4.1	5.6	-1.6	509	685	-25.7
11:00	130.6	13.6	96	3.5	5.7	-2.2	462	775	-40.4
12:00	131.0	14.2	93	3.2	5.7	-2.5	419	812	-48.4
13:00	131.0	13.8	95	3.4	5.7	-2.2	449	780	-42.4
14:00	127.2	12.4	102	3.9	5.7	-1.7	501	704	-28.8
15:00	111.3	10.3	108	4.7	5.7	-1.0	523	593	-11.8
16:00	81.3	7.5	108	5.7	5.6	0.0	460	425	8.2

Tabella 13 Confronto cielo Overcast e Intermediate, solstizio d'inverno, finestra a nord

NORTH									
December 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	1.43	1.20	118	5.5	5.6	-0.1	79	68	16.2
09:00	4.02	3.90	103	5.0	5.7	-0.7	202	223	-9.4
10:00	6.36	6.00	106	4.5	5.7	-1.2	288	341	-15.5
11:00	8.01	7.40	108	4.1	5.6	-1.5	326	414	-21.3
12:00	8.59	7.97	108	3.8	5.7	-1.9	327	452	-27.7
13:00	8.27	7.67	108	3.9	5.8	-1.8	325	443	-26.6
14:00	6.94	6.53	106	4.2	5.7	-1.4	293	369	-20.6
15:00	4.81	4.64	104	4.8	5.7	-0.9	232	264	-12.1
16:00	2.21	2.09	106	5.4	5.8	-0.4	119	121	-1.7

Tabella 14 Confronto cielo Overcast e Clear, solstizio d'estate, finestra a nord

NORTH									
June 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	7.6	10.9	-3212.00	7.4	5.7	1.7	568	619	-8.2
09:00	8.3	13.6	-5330.00	6.6	5.7	1.0	551	772	-28.6
10:00	8.6	15.8	-7167.00	6.1	5.7	0.4	522	897	-41.8
11:00	8.9	17.2	-8330.00	5.8	5.8	0.0	519	1006	-48.4
12:00	9.4	17.8	-8456.00	5.5	5.7	-0.2	518	1014	-48.9
13:00	9.2	17.6	-8415.00	5.8	5.7	0.1	536	1006	-46.7
14:00	8.7	16.5	-7849.00	5.8	5.7	0.0	499	947	-47.3
15:00	8.4	14.7	-6246.00	6.5	5.7	0.8	544	837	-35.0
16:00	8.0	12.2	-4173.00	6.9	5.7	1.2	556	696	-20.1

Tabella 15 Confronto cielo Overcast e Clear, equinozi, finestra a nord

NORTH									
March 21 September 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	6.0	7.0	86	6.7	5.7	1.0	402	398	1.0
09:00	7.3	9.9	74	6.2	5.7	0.5	454	562	-19.2
10:00	8.0	12.1	66	5.7	5.6	0.1	459	685	-33.0
11:00	8.3	13.6	61	5.6	5.7	-0.2	460	775	-40.6
12:00	8.4	14.2	59	5.5	5.7	-0.3	458	812	-43.6
13:00	8.3	13.8	60	5.5	5.7	-0.1	459	780	-41.2
14:00	8.1	12.4	65	5.8	5.7	0.1	468	704	-33.5
15:00	7.4	10.3	72	6.0	5.7	0.3	448	593	-24.5
16:00	6.3	7.5	83	6.4	5.6	0.8	405	425	-4.7

Tabella 16 Confronto cielo Overcast e Clear, solstizio d'inverno, finestra a nord

NORTH									
December 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	2.8	1.2	233	7.5	5.6	1.8	210	68	208.8
09:00	4.3	3.9	111	6.8	5.7	1.1	295	223	32.3
10:00	5.5	6.0	92	6.6	5.7	1.0	367	341	7.6
11:00	6.2	7.4	84	6.3	5.6	0.7	395	414	-4.6
12:00	6.5	8.0	81	6.3	5.7	0.7	410	452	-9.3
13:00	6.4	7.7	83	6.4	5.8	0.6	406	443	-8.4
14:00	5.8	6.5	89	6.4	5.7	0.8	373	369	1.1
15:00	4.8	4.6	103	6.7	5.7	1.0	318	264	20.5
16:00	3.3	2.1	158	7.4	5.8	1.6	245	121	102.5

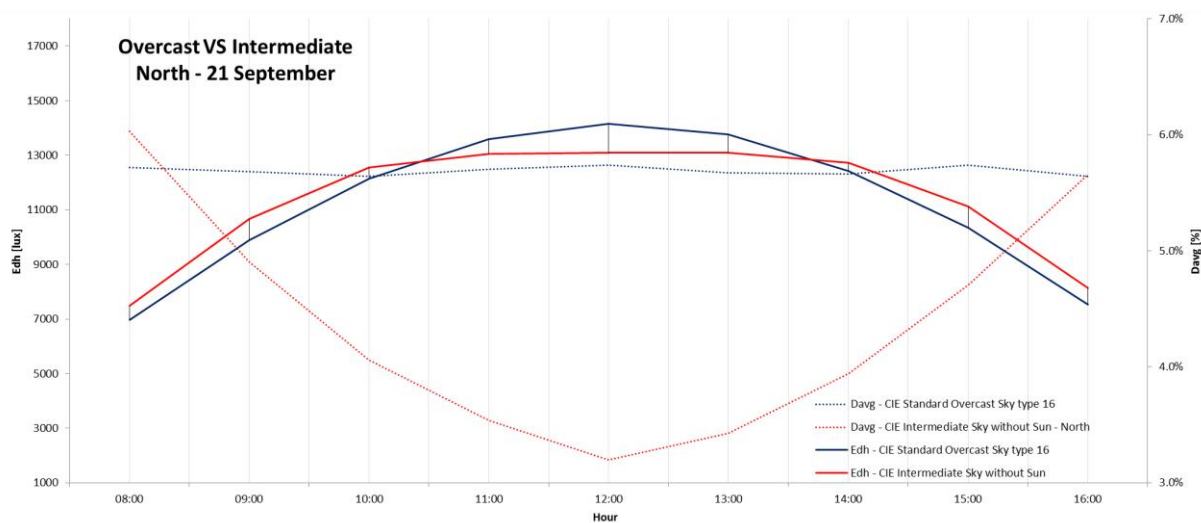


Figura 14 Confronto tra cielo Overcast e Intermediate, andamenti di D_{avg} e Edh , equinozi, finestra a nord

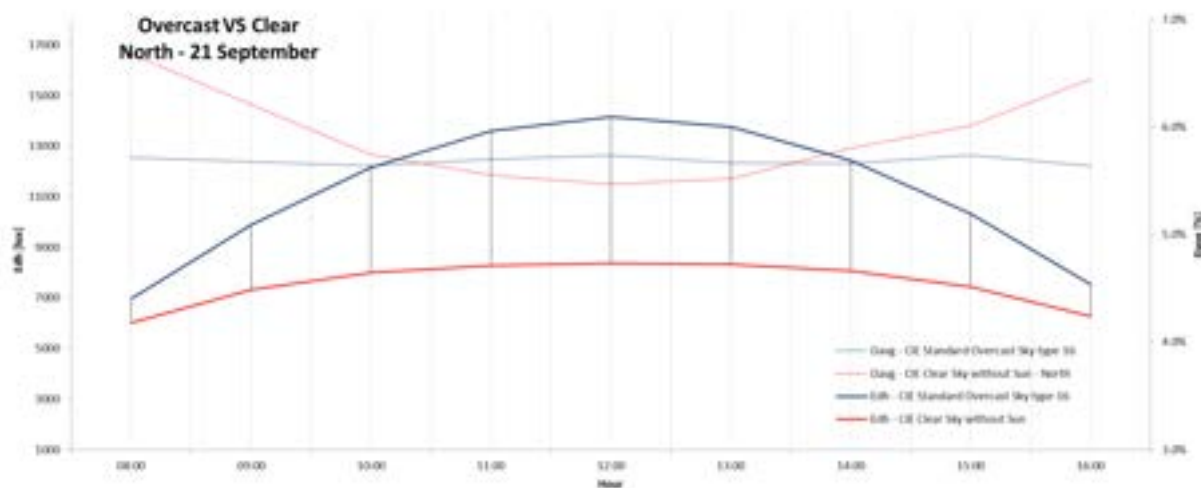


Figura 15 Confronto tra cielo Overcast e Clear, andamenti di D_{avg} e Edh , equinozi, finestra a nord

- Ad est, confrontando il cielo Intermediate con il cielo Overcast si può notare che quest'ultimo risulta conservativo nella maggior parte dei casi (Tabella 18, Tabella 19). Come visibile in (Tabella 18), negli equinozi la presenza del Sole alle prime ore della mattina (fino alle ore 12:00) fa sì che sia il livello di illuminamento interno E_m che il Fattore di luce diurna siano più alti con cielo Intermediate rispetto a quelli calcolati con il cielo Overcast raggiungendo le massime differenze percentuali alle ore 8:00

(differenza di E_m pari al 136.7% e differenza di D pari al 6.9%). Al contrario dalle 13:00 alle 16:00, sia D che E_m con cielo Intermediate sono minori di quelli con cielo Overcast a causa della assenza di radiazione solare e l'Overcast non risulta più conservativo: alle ore 15:00 l' E_m con cielo Intermediate è inferiore al cielo Overcast di circa del 24.3 % e la differenza tra i D è -1.7%.

Simmetricamente ad ovest, il cielo Overcast è conservativo solo dalle ore 13:00 alle ore 16:00 mentre la mattina sia i valori di E_m che di D calcolati con questo cielo sono superiori a quelli calcolati con cielo Intermediate.

A dicembre il cielo Overcast è conservativo fino alle ore 14:00 (Tabella 19). L'incremento dei valori di E_m e D con il cielo Intermediate rispetto agli equinozi, comparati con cielo Overcast, è probabilmente legata alla diversa distribuzione di luminanza per via della altezza solare più bassa che comporta un aumento della quantità di radiazione entrante direttamente in ambiente. Ad ovest al contrario D calcolato con cielo Overcast è conservativo dalle ore 10:00 alle ore 16:00, ad esclusione quindi delle prime ore del mattino.

Per quanto riguarda la comparazione tra cielo Overcast e Clear, anche ad est si mantiene verificata la condizione di conservatività del Daylight factor standard calcolato con cielo Overcast nei cinque casi evidenziati. La massima variazione positiva si registra alle ore 8:00 degli equinozi in cui la differenza percentuale tra gli E_m è del 215.6% e la differenza tra i Daylight factor è del 15.1% (Tabella 21).

Il confronto tra cieli Clear ed Intermediate anche a questo orientamento mostra che il cielo Clear determina sempre D ed E_m maggiori dell'Intermediate raggiungendo la massima differenza percentuale alle ore 9:00 del solstizio d'inverno in cui la variazione percentuale tra E_m con il cielo Intermediate e quello Clear è -40.8% e tra i valori di D c'è una differenza percentuale di -5.7% (vedi Tabella 41 in Appendice A).

Tabella 17 Confronto cielo Overcast e Intermediate, solstizio d'estate, finestra ad est

EAST									
June 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	11.6	10.9	107	13.2	5.7	7.5	1532	619	147.5
09:00	13.1	13.6	96	12.0	5.7	6.3	1576	772	104.1
10:00	12.4	15.8	78	9.5	5.7	3.8	1178	897	31.3
11:00	10.5	17.2	61	6.6	5.8	0.8	691	1006	-31.3
12:00	9.4	17.8	53	4.6	5.7	-1.1	431	1014	-57.5
13:00	9.8	17.6	56	3.7	5.7	-2.1	360	1006	-64.2
14:00	11.6	16.5	70	3.3	5.7	-2.4	384	947	-59.5
15:00	13.0	14.7	89	3.3	5.7	-2.4	430	837	-48.6
16:00	12.6	12.2	103	3.4	5.7	-2.3	429	696	-38.4

Tabella 18 Confronto cielo Overcast e Intermediate, equinozi, finestra ad est

EAST									
March 21 September 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	7.5	7.0	107	12.6	5.7	6.9	942	398	136.7
09:00	10.7	9.9	108	12.2	5.7	6.5	1301	562	131.5
10:00	12.6	12.1	103	10.3	5.6	4.7	1296	685	89.2
11:00	13.1	13.6	96	8.0	5.7	2.3	1046	775	35.0
12:00	13.1	14.2	93	6.1	5.7	0.4	799	812	-1.6
13:00	13.1	13.8	95	4.9	5.7	-0.8	643	780	-17.6
14:00	12.7	12.4	102	4.3	5.7	-1.4	547	704	-22.3
15:00	11.1	10.3	108	4.0	5.7	-1.7	449	593	-24.3
16:00	8.1	7.5	108	4.1	5.6	-1.6	330	425	-22.4

Tabella 19 Confronto cielo Overcast e Intermediate, solstizio d'inverno, finestra ad est

EAST									
December 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	1.4	1.2	118	9.8	5.6	4.1	139	68	104.4
09:00	4.0	3.9	103	10.2	5.7	4.5	411	223	84.3
10:00	6.4	6.0	106	9.7	5.7	4.0	615	341	80.4
11:00	8.0	7.4	108	8.5	5.6	2.9	683	414	65.0
12:00	8.6	8.0	108	7.2	5.7	1.6	621	452	37.4
13:00	8.3	7.7	108	6.2	5.8	0.4	512	443	15.6
14:00	6.9	6.5	106	5.7	5.7	0.0	393	369	6.5
15:00	4.8	4.6	104	5.2	5.7	-0.5	251	264	-4.9
16:00	2.2	2.1	106	5.1	5.8	-0.7	113	121	-6.6

Tabella 20 Confronto cielo Overcast e Clear, solstizio d'estate, finestra ad est

EAST									
June 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	7.6	10.9	70	19.0	5.7	13.3	1453	619	134.7
09:00	8.3	13.6	61	15.3	5.7	9.6	1270	772	64.5
10:00	8.6	15.8	55	11.8	5.7	6.1	1011	897	12.7
11:00	8.9	17.2	52	8.9	5.8	3.1	792	1006	-21.3
12:00	9.4	17.8	52	7.2	5.7	1.5	672	1014	-33.7
13:00	9.2	17.6	52	6.1	5.7	0.4	561	1006	-44.2
14:00	8.7	16.5	53	5.6	5.7	-0.2	484	947	-48.9
15:00	8.4	14.7	57	5.5	5.7	-0.2	467	837	-44.2
16:00	8.0	12.2	66	5.7	5.7	0.0	456	696	-34.5

Tabella 21 Confronto cielo Overcast e Clear, equinozi, finestra ad est

EAST									
March 21 September 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	6.0	7.0	87	20.8	5.7	15.1	1256	398	215.6
09:00	7.3	9.9	74	16.9	5.7	11.2	1238	562	120.3
10:00	8.0	12.1	66	12.7	5.6	7.0	1015	685	48.2
11:00	8.3	13.6	61	9.4	5.7	3.7	778	775	0.4
12:00	8.4	14.2	59	7.3	5.7	1.6	613	812	-24.5
13:00	8.3	13.8	60	6.3	5.7	0.6	524	780	-32.8
14:00	8.1	12.4	65	5.8	5.7	0.1	469	704	-33.4
15:00	7.4	10.3	72	5.8	5.7	0.1	435	593	-26.6
16:00	6.3	7.5	83	6.3	5.6	0.6	393	425	-7.5

Tabella 22 Confronto cielo Overcast e Clear, solstizio d'inverno, finestra ad est

EAST									
December 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	2.8	1.2	234	18.3	5.6	12.7	516	68	658.8
09:00	4.4	3.9	112	15.9	5.7	10.2	694	223	211.2
10:00	5.5	6.0	92	13.3	5.7	7.6	735	341	115.5
11:00	6.3	7.4	85	9.8	5.6	4.2	616	414	48.8
12:00	6.5	8.0	81	8.0	5.7	2.3	519	452	14.8
13:00	6.4	7.7	83	6.9	5.8	1.1	438	443	-1.1
14:00	5.8	6.5	89	6.6	5.7	0.9	380	369	3.0
15:00	4.8	4.6	103	6.7	5.7	1.0	318	264	20.5
16:00	3.3	2.1	158	7.2	5.8	1.4	239	121	97.5

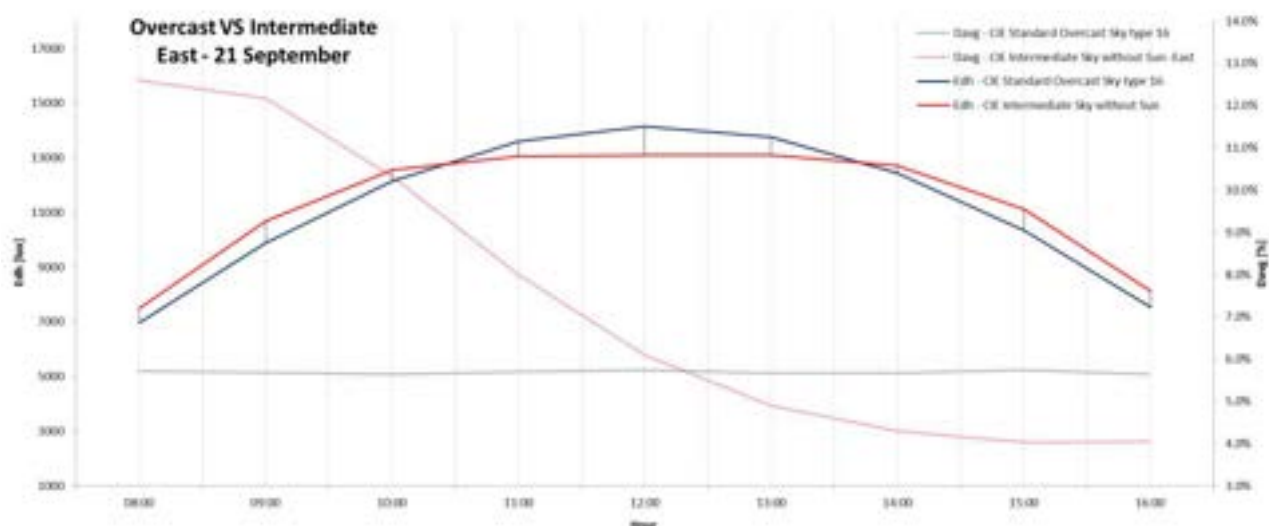


Figura 16 Confronto tra cielo Overcast e Intermediate, andamenti di D_{avg} e Edh , equinozi, finestra ad est

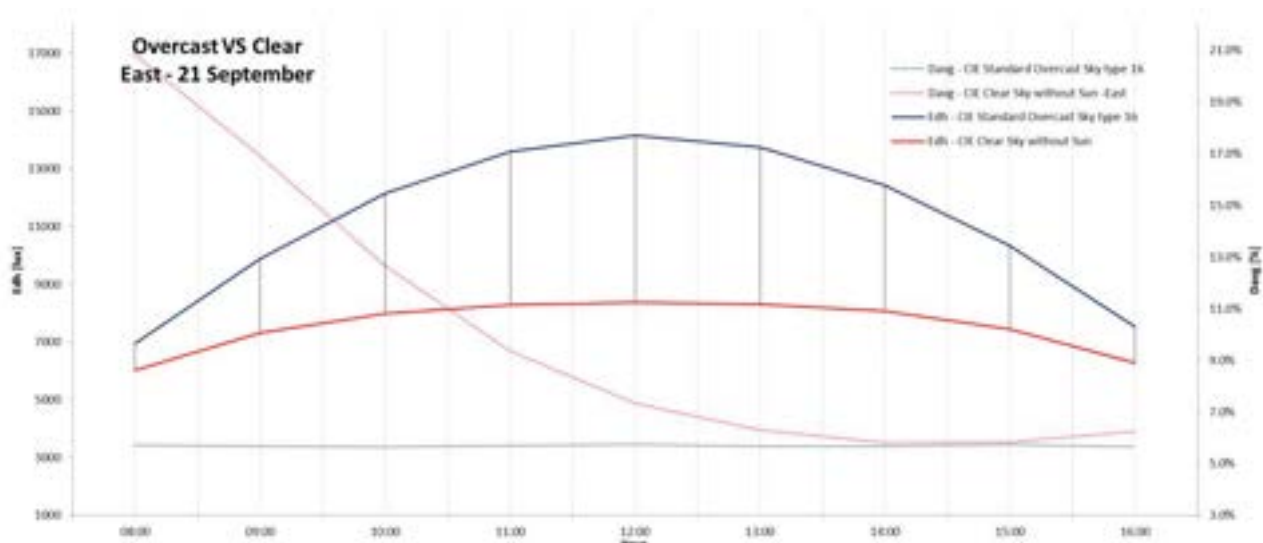


Figura 17 Confronto tra cielo Overcast e Clear, andamenti di D_{avg} e Edh , equinozi, finestra ad est

- A sud, dal confronto tra Cielo Intermediate e Overcast si evince che il cielo Overcast è sempre conservativo nei casi evidenziati: ciò è dovuto alla presenza di radiazione solare entrante direttamente dalla finestra per tutto l'arco della giornata (Tabella 24, Tabella 25). Nel solstizio d'inverno alle ore 12:00, in cui l'altezza solare è inferiore rispetto alle altre date, si registra la massima differenza percentuale tra i valori di E_m e D dei due cieli: la variazione tra i livelli di illuminamento interno con è del 157.5% ed il Δ tra valori di D è il 7.9% (Tabella 25).

A maggior ragione ed in modo ancor più evidente dal punto di vista numerico, anche la comparazione tra cielo Clear ed Overcast e tra cielo Clear ed Intermediate conferma quanto descritto per gli altri orientamenti: i cieli Overcast ed Intermediate risultano avere valori di E_m e D nettamente inferiori rispetto a quelli del cielo Clear. Dal confronto fra i primi due cieli si evince che la differenza massima percentuale di E_m si ha alle ore 15:00 del solstizio d'inverno ed è pari al 222% e la variazione di D risulta essere il 12.1% (Tabella 28).

Paragonando il cielo Intermediate con il cielo Clear invece si può notare che la massima differenza percentuale si ha alle ore 09:00 del solstizio d'inverno: l' E_m calcolato con cielo Intermediate è inferiore del -40.6% di quello Clear e la differenza di D è di -5.9% (Appendice A Tabella 44 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'inverno, finestra a sud).

Tabella 23 Confronto cielo Overcast e Intermediate, solstizio d'estate, finestra a sud

SOUTH									
June 21	Edh Internediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminanc e percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Internediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Internediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminanc e difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	11.6	10.9	107	6.5	5.7	0.8	755	619	22.0
09:00	13.1	13.6	96	6.7	5.7	1.0	875	772	13.3
10:00	12.3	15.8	78	6.7	5.7	1.0	826	897	-7.9
11:00	10.5	17.2	61	6.7	5.8	0.8	696	1006	-30.8
12:00	9.4	17.8	52	6.3	5.7	0.6	589	1014	-41.9
13:00	9.8	17.6	56	6.5	5.7	0.8	639	1006	-36.5
14:00	11.5	16.5	70	6.8	5.7	1.1	788	947	-16.8
15:00	13.0	14.7	89	6.9	5.7	1.2	892	837	6.6
16:00	12.6	12.2	103	6.7	5.7	1.0	843	696	21.1

Tabella 24 Confronto cielo Overcast e Intermediate, equinozi, finestra a sud

SOUTH									
March 21 September 21	Edh Internediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminanc e percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Internediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Internediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminanc e difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	7.5	7.0	107	8.5	5.7	2.8	637	398	60.1
09:00	10.7	9.9	108	9.4	5.7	3.8	1007	562	79.2
10:00	12.6	12.1	103	10.5	5.6	4.9	1322	685	93.0
11:00	13.1	13.6	96	11.3	5.7	5.6	1483	775	91.4
12:00	13.1	14.2	92	11.6	5.7	5.9	1516	812	86.7
13:00	13.1	13.8	95	11.5	5.7	5.9	1511	780	93.7
14:00	12.7	12.4	102	11.0	5.7	5.3	1395	704	98.2
15:00	11.1	10.3	108	10.0	5.7	4.3	1117	593	88.4
16:00	8.1	7.5	108	8.9	5.6	3.2	723	425	70.1

Tabella 25 Confronto cielo Overcast e Intermediate, solstizio d'inverno, finestra a sud

SOUTH									
December 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Ove) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Int - Ove) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Int - Ove) [%]
08:00	1.4	1.2	118	8.8	5.6	3.1	125	68	83.8
09:00	4.0	3.9	103	10.5	5.7	4.7	420	223	88.3
10:00	6.4	6.0	106	11.7	5.7	6.0	743	341	117.9
11:00	8.0	7.4	108	12.9	5.6	7.3	1030	414	148.8
12:00	8.6	8.0	108	13.6	5.7	7.9	1164	452	157.5
13:00	8.3	7.7	108	13.1	5.8	7.4	1087	443	145.4
14:00	6.9	6.5	106	12.5	5.7	6.8	866	369	134.7
15:00	4.8	4.6	104	10.9	5.7	5.3	526	264	99.2
16:00	2.2	2.1	106	9.3	5.8	3.6	207	121	71.1

Tabella 26 Confronto cielo Overcast e Clear, solstizio d'estate, finestra a sud

SOUTH									
June 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	7.6	10.9	70	7.3	5.7	1.6	560	619	-9.5
09:00	8.3	13.6	61	7.8	5.7	2.1	647	772	-16.2
10:00	8.6	15.8	54	8.3	5.7	2.6	712	897	-20.6
11:00	8.9	17.2	52	8.8	5.8	3.0	787	1006	-21.8
12:00	9.3	17.8	52	9.3	5.7	3.7	874	1014	-13.8
13:00	9.2	17.6	52	9.0	5.7	3.3	827	1006	-17.8
14:00	8.7	16.5	52	8.7	5.7	3.0	756	947	-20.2
15:00	8.4	14.7	57	8.2	5.7	2.5	691	837	-17.4
16:00	8.0	12.2	66	7.5	5.7	1.8	602	696	-13.5

Tabella 27 Confronto cielo Overcast e Clear, equinozi, finestra a sud

SOUTH									
March 21 September 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	6.0	7.0	86	10.4	5.7	4.6	622	398	56.3
09:00	7.3	9.9	74	11.7	5.7	6.1	856	562	52.3
10:00	8.0	12.1	66	13.1	5.6	7.5	1049	685	53.1
11:00	8.3	13.6	61	14.2	5.7	8.5	1176	775	51.7
12:00	8.4	14.2	59	14.7	5.7	9.0	1234	812	52.0
13:00	8.3	13.8	61	14.4	5.7	8.8	1206	780	54.6
14:00	8.1	12.4	65	13.7	5.7	8.0	1105	704	57.0
15:00	7.5	10.3	72	12.5	5.7	6.7	931	593	57.0
16:00	6.3	7.5	84	10.8	5.6	5.2	681	425	60.2

Tabella 28 Confronto cielo Overcast e Clear, solstizio d’inverno, finestra a sud

SOUTH									
December 21	Edh Clear [klux]	Edh Overcast [klux]	Illuminance percentage ratio (Cle/Ove) [%]	Davg Clear [%]	Davg Overcast [%]	Davg Δ (Cle - Ove) [%]	Em Clear [lux]	Em Overcast [lux]	Illuminance difference Em (Cle - Ove) [%]
08:00	2.8	1.2	233	14.0	5.6	8.3	392	68	476.5
09:00	4.3	3.9	111	16.4	5.7	10.6	707	223	217.0
10:00	5.5	6.0	92	18.9	5.7	13.2	1040	341	205.0
11:00	6.2	7.4	84	20.6	5.6	15.1	1290	414	211.6
12:00	6.5	8.0	82	21.7	5.7	16.0	1411	452	212.2
13:00	6.4	7.7	83	21.6	5.8	15.9	1376	443	210.6
14:00	5.8	6.5	89	20.0	5.7	14.4	1160	369	214.4
15:00	4.8	4.6	103	17.8	5.7	12.1	850	264	222.0
16:00	3.3	2.1	158	14.9	5.8	9.1	494	121	308.3

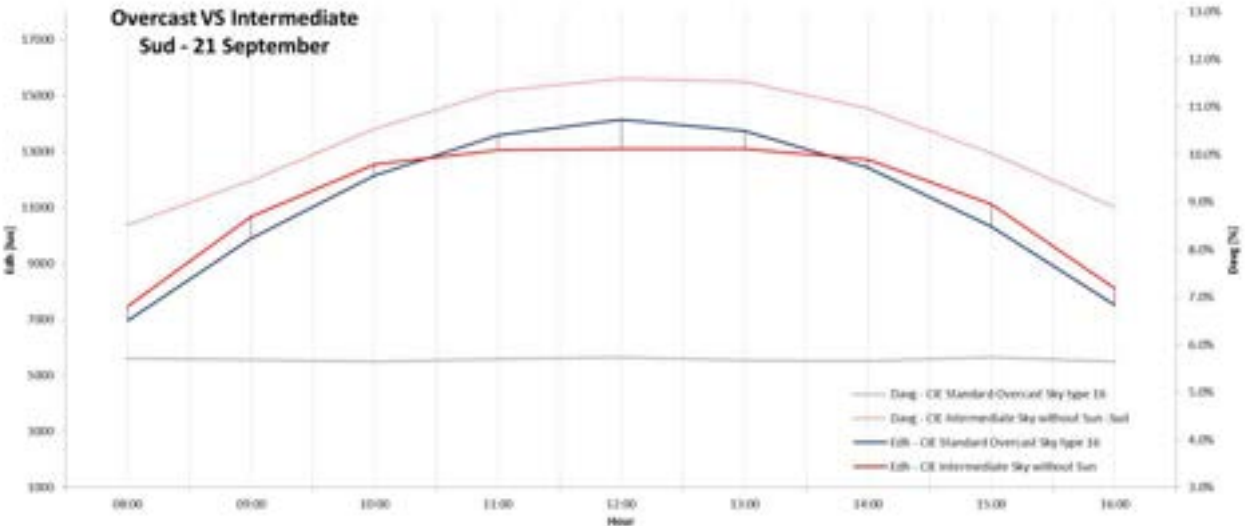


Figura 18 Confronto tra cielo Overcast e Intermediate, andamenti di D_{avg} e Edh , equinozi, finestra a sud

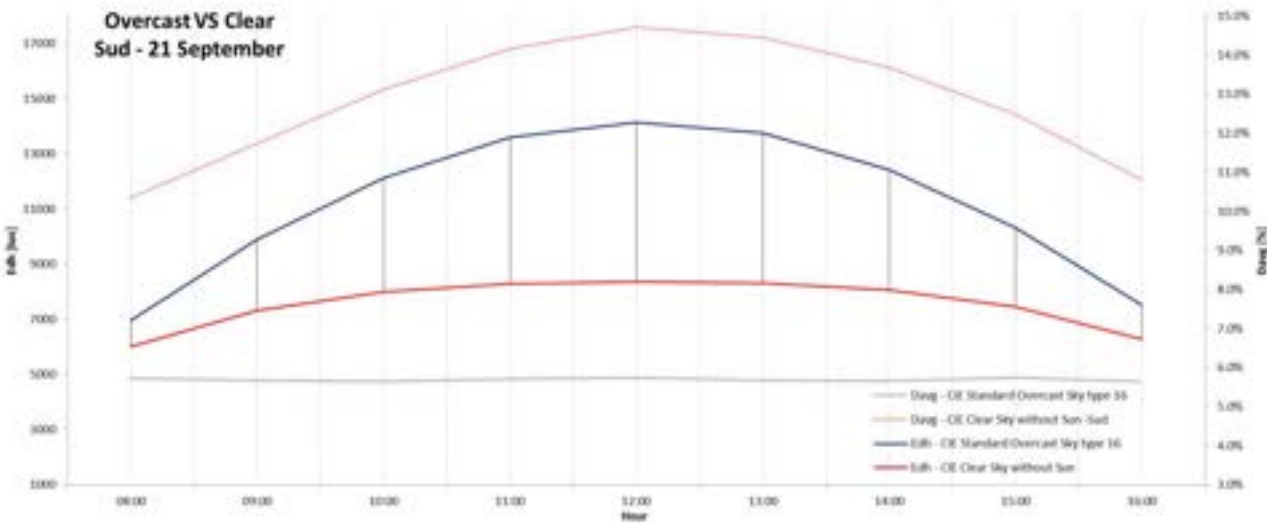


Figura 19 Confronto tra cielo Overcast e Clear, andamenti di D_{avg} e Edh , equinozi, finestra a sud

Estendendo la valutazione anche ai casi giudicati non comparabili, in cui quindi vi sono sostanziali differenze tra gli E_{dh} dei vari cieli, si può notare che nella comparazione tra il cielo Clear ed il cielo Overcast non è possibile legare proporzionalmente le differenze di E_m con quelle di D .

Infatti ad esempio a nord, per quanto il D calcolato con il cielo Overcast risulti inferiore a quello calcolato con cielo Clear nella maggior parte dei casi (evidenziazioni in verde), le differenze percentuali di E_m mostrano come valori molto più alti nel cielo Overcast rispetto a quello del Clear. Esempio più evidente si riscontra alle ore 15:00 del solstizio d'estate in cui la variazione di E_m con cielo Clear è -35% ma il Daylight factor risulta maggiore rispetto a quello con cielo Clear, mostrando una variazione percentuale del 13,2% (

Tabella 14). Come evidente quindi le differenze di E_{dh} annullano e limitano le variazioni dettate dall'orientamento e dalla luminanza del cielo, rendendo difficili le valutazioni comparative.

Questo aspetto si nota anche nella comparazione tra cielo Intermediate e Clear ad esempio negli equinozi alle ore 11:00 in cui i livelli di illuminamento interno E_m dei due cieli sono praticamente allineati (differenza percentuale pari allo 0,4%) ma i valori di Daylight factor si scostano molto, essendo quello del Cielo Intermediate inferiore a quello Clear, con una differenza percentuale di -36,3% (Tabella 37).

Inoltre ad est nel solstizio d'estate, come visibile in (Tabella 39), la differenza tra i valori di E_{dh} esterni tra i cieli Intermediate e Clear alle ore 9:00 e 16:00 è sostanzialmente comparabile (158% circa ad entrambi gli orari), tuttavia le differenze di E_m , a causa della diversa distribuzione di luminanza e del diverso apporto della radiazione solare, sono tra loro molto differenti: nel primo caso l'Intermediate è superiore (24% di differenza percentuale) mentre nel secondo caso è inferiore (-5,9%). Queste diversità comportano tuttavia per entrambi gli orari che il D calcolato con il cielo Intermediate sia inferiore a quello calcolato con cielo Clear (variazione percentuale alle ore 9:00 pari a -21,4% e alle ore 16:00 pari al 40,1%).

Dall'analisi dei risultati emerge anche che, come sottolineato in precedenti studi[18] [22], quand'anche il D standard risultasse verificato (secondo le norme e/o i protocolli di certificazione), con uno stesso valore di D i livelli di illuminamento interno presentano una grande variabilità, raggiungendo anche differenze dell'85% (Tabella 29).

Tabella 29 Due casi con cielo Overcast D_{avg} verificato (secondo protocolli di certificazione ambientale) ed E_m non verificato (ambiente ufficio secondo UNI EN 12464-1)

21 dec O	Overcast		
Hour	Edh [lux]	Em [lux]	Davg [%]
08:00	1204	68	5.6
09:00	3901	223	5.7
10:00	6001	341	5.7
11:00	7397	414	5.6
12:00	7971	452	5.7
13:00	7667	443	5.8
14:00	6525	369	5.7
15:00	4641	264	5.7
16:00	2091	121	5.8

Le variazioni di E_m sono esclusivamente dipendenti da quelle di E_{dh} in quanto la distribuzione di luminanze del cielo Overcast non tiene conto degli orientamenti.

Nel caso di D calcolato con cielo Intermediate e Clear, le variazioni di E_m sono dipendenti non solo da quelle E_{dh} ma anche dall'orientamento del modello e dalla posizione del Sole. Questo comporta che differenti valori di illuminamento E_m (nel caso indicato in (

Tabella 30) con un incremento pari al 624%) producano risultati di D molto simili per orari, giorni e orientamenti diversi, in virtù della posizione del Sole.

Tabella 30 Due casi con cielo Intermediate in cui a parità di D_{avg} si ottengono E_m molto diversi

21 dec I	Intermediate without Sun(EAST)			21 set I	Intermediate without Sun(SUD)		
Hour	Edh [lux]	Em [lux]	Davg [%]	Hour	Edh [lux]	Em [lux]	Davg [%]
08:00	1425	139	9.8	08:00	7475	637	8.5
09:00	4019	411	10.2	09:00	10657	1007	9.4
10:00	6359	615	9.7	10:00	12550	1322	10.5
11:00	8022	683	8.5	11:00	13076	1483	11.3
12:00	8595	621	7.2	12:00	13078	1516	11.6
13:00	8278	512	6.2	13:00	13104	1511	11.5
14:00	6948	393	5.7	14:00	12720	1395	11.0
15:00	4810	251	5.2	15:00	11133	1117	10.0
16:00	2215	113	5.1	16:00	8138	723	8.9

Allo stesso modo, per valori di illuminamento simili, si possono verificare valori di D molto diversi (nel caso indicato in (Tabella 31) si evidenzia un incremento del 60%)

Tabella 31 Due casi con cielo Clear in cui a parità di E_m si ottengono D_{avg} molto diversi

21 jun C	Clear without Sun(EAST)			21 dec C	Clear without Sun(SUD)		
Hour	Edh [lux]	Em [lux]	Davg [%]	Hour	Edh [lux]	Em [lux]	Davg [%]
08:00	7646	1453	19.0	08:00	2801	392	14.0
09:00	8313	1270	15.3	09:00	4322	707	16.4
10:00	8601	1011	11.8	10:00	5515	1040	18.9
11:00	8887	792	8.9	11:00	6247	1290	20.6
12:00	9359	672	7.2	12:00	6507	1411	21.7
13:00	9175	561	6.1	13:00	6357	1376	21.6
14:00	8682	484	5.6	14:00	5798	1160	20.0
15:00	8426	467	5.5	15:00	4781	850	17.8

10 Analisi sperimentale

I dati sperimentali sono stati ottenuti attraverso una campagna di misura effettuata nel mese di giugno presso il Centro Ricerche casaccia dell'ENEA. Questi dati sono stati utilizzati per validare i dati simulati ottenuti attraverso il calcolo di D come rapporto tra i valori di illuminamento interno ed esterno. I valori di illuminamento esterno sono stati misurati sulla copertura dell'edificio sia in termini di componente diffusa che globale, mentre gli illuminamenti interni sono stati registrati attraverso sensori disposti all'interno dell'ambiente caso studio (l'ufficio numero 108).

I 5 luxmetri interni, posti su cavalletti ad una altezza di 0.75 m dal pavimento, sono stati collocati a varie distanze dalla finestra come mostrato nella (Tabella 32).

Tabella 32 Numero del sensore e distanza dalla finestra

Sensori	Distanza dalla finestra (m)
1	0.5
2	1
3	1.5
4	2
5	3

Al fine di confrontare i dati simulati con quelli misurati è stata necessaria una suddivisione sulla base del rapporto E_{dh}/E_{gh} . Questo rapporto, calcolato con i dati simulati, è servito a identificare il range di “nuvolosità” per il cielo Clear without Sun.

I valori di E_{gh} sono stati calcolati utilizzando il cielo Clear with Sun (con componente diretta) mentre i valori di E_{dh} sono stati ottenuti attraverso il corrispettivo cielo “without Sun”. È stata valutata quindi la media giornaliera dei rapporti E_{dh}/E_{gh} per tutte le date in esame e nel solstizio d’estate, giorno per cui disponevamo anche dei dati misurati, si è ottenuto con il cielo Clear un valore di 0.125.

I dati misurati nel mese di giugno sono stati quindi classificati e catalogati e anche in questo caso è stata calcolata la media giornaliera dei rapporti E_{dh}/E_{gh} . A questo punto, è stato individuato il giorno in cui i rapporti diffuso/globale nei dati misurati corrispondessero maggiormente a quello del cielo Clear simulato. Tale valutazione ha portato a scegliere come Clear il giorno 21 giugno, il cui rapporto E_{dh}/E_{gh} medio giornaliero è risultato essere 0.17.

Sul modello esistente, sono stati allora calcolati i valori di illuminamento interno nei punti corrispondenti alle posizioni dei sensori (Tabella 32) nei due giorni presi in esame e con i due tipi di cielo, ed è stato ottenuto il valore di D puntuale alle varie ore del giorno. È stato infine calcolato anche il valore di D puntuale orario con i dati misurati, ottenuto come media di 60 valori (uno per ogni minuto).

Il confronto tra i dati di D puntuali simulati e misurati e le medie giornaliere ottenute è mostrato nella (Tabella 33) riferita al 21 giugno.

Dal confronto con cielo Clear, si evince che i valori di D puntuali sono piuttosto coerenti a meno di contenute differenza (comprese tra 0% ed -1.1 %) che aumentano via via che ci si allontana dalla finestra. I valori di D puntuali medi giornalieri misurati risultano inoltre sempre superiori rispetto a quelli simulati (Tabella 33).

Tabella 33 Differenze di D medio giornaliero (per ogni sensore) tra dati simulati e dati misurati il 21 giugno

		June 21				D (average daily) difference [%]
		simulation		mesaurement		
		D [%]	D (average daily) [%]	D [%]	D (average daily) [%]	
Distance from window [m]	hour					
0.5	08:30	14.5	12.1	18	12.1	0
	09:30	12.8		14		
	10:30	11.4		9		
	11:30	11.2		9		
	12:30	10.9		9		
	13:30	11.0		10		
	14:30	11.7		12		
	15:30	13.3		16		
1.0	08:30	11.5	9.5	15	10.0	-0.5
	09:30	10.4		11		
	10:30	9.1		8		
	11:30	8.8		8		
	12:30	8.6		8		
	13:30	8.7		9		
	14:30	9.1		10		
	15:30	9.7		11		
1.5	08:30	8.7	7.0	12	8.1	-1.1
	09:30	7.1		9		
	10:30	6.7		7		
	11:30	6.5		7		
	12:30	6.3		7		
	13:30	6.5		7		
	14:30	6.9		8		
	15:30	7.1		8		

2.0	08:30	6.3	5.5	9	6.5	-1
	09:30	5.7		7		
	10:30	5.2		6		
	11:30	5.1		6		
	12:30	5.2		6		
	13:30	5.1		6		
	14:30	5.7		6		
	15:30	5.7		6		
3.0	08:30	4.5	4.2	7	5.3	-1.1
	09:30	4.3		6		
	10:30	4.2		5		
	11:30	4.1		5		
	12:30	4.1		5		
	13:30	4.0		5		
	14:30	4.2		5		
	15:30	4.5		4		

Non è stato possibile fare un confronto tra dati simulati e reali in presenza di cielo Intermediate per due motivi. Il primo è che in questo caso il valore medio giornaliero del rapporto E_{dh}/E_{gh} potrebbe non rappresentare le variazioni di “nuvolosità” che avvengono durante la giornata. Infatti come visibile nelle (Tabella 34, Tabella 35), le differenze dei rapporti E_{dh}/E_{gh} ora per ora tra il cielo Clear misurato e simulato variano tra -4% e +14%, facendo sì che i valori medi giornalieri di E_{dh}/E_{gh} considerati (0.125 per il cielo simulato e 0.17 per il cielo misurato) siano esplicativi della condizione di cielo per tutto il giorno. Al contrario, con il cielo Intermediate, in un caso preso ad esempio in cui i rapporti diffuso/globale nei dati misurati corrispondevano molto a quelli del cielo Intermediate simulato, si è registrata una variabilità molto forte nei dati misurati ora per ora portando a differenze rispetto ai rapporti E_{dh}/E_{gh} con il cielo simulato comprese tra -28% e +18%.

Tabella 34 Confronto E_{dh}/E_{gh} tra dati simulati e misurati il 21 giugno

	June 21									
	08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30		
Edh/Egh (measurement)[%]	27.8	17.2	11.5	7.6	8.9	9.6	12.2	27.5	avg value [%]	15.3
Edh/Egh (simulation) [%]	15.4	13.1	11.7	11.3	11.5	11.4	11.9	13.4	avg value [%]	12.5
Δ	12	4	0	-4	-3	-2	0	14		

Tabella 35 Confronto E_{dh}/E_{gh} tra dati simulati e misurati il 16 giugno

	June 16									
	08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30		
Edh/Egh (measurement)[%]	77.8	33.0	73.0	43.3	50.0	65.8	35.4	49.2	avg value [%]	53.4
Edh/Egh (simulation) [%]	65.4	60.9	54.6	48.5	46.3	49.4	56.0	62.0	avg value [%]	55.4
Δ	12	-28	18	-5	4	16	-21	-13		

Il secondo aspetto da considerare è che con cielo Intermediate non si può conoscere la disposizione della copertura nuvolosa: prendendo in esame la finestra a nord, la porzione di cielo vista dalla finestra potrebbe comportarsi come un cielo Clear o come un cielo Overcast, ma complessivamente il rapporto tra componente diffusa e globale dell’intera volta celeste potrebbe risultare comparabile a quella di un cielo Intermediate.

Fra i dati misurati in nostro possesso non è stato riscontrato un giorno in cui il valore di E_{dh}/E_{gh} fosse prossimo ad 1 (condizione di cielo Overcast). Questo non ha permesso di fare un confronto tra dati misurati e simulati per cielo Overcast.

11 Discussione

Come descritto nei paragrafi precedenti, l'obiettivo del presente report è di verificare la conservatività di valori di D calcolato con cielo Overcast rispetto a quelli calcolati con altri tipi di cielo.

Sulla base di studi precedenti, si è osservato come la paragonabilità dei diversi tipi di cielo è limitata ai casi in cui i valori di E_{dh} siano tra loro coerenti (normalizzati), rendendo quindi possibile il confronto sopra descritto solamente nei casi in cui questa coerenza sia verificata. Con valori di E_{dh} allineati si possono infatti eseguire delle comparazioni tra i valori di D al variare del cielo esclusivamente dipendenti dalle differenze di distribuzione di luminanza, posizione del Sole e orientamento del modello.

Preso in esame il caso studio, confrontando i valori di E_{dh} è possibile notare che gli andamenti sono tendenzialmente gli stessi, con livelli più bassi la mattina presto ed il tardo pomeriggio e più alti nella parte centrale della giornata. L'unica eccezione riguarda il cielo Intermediate nel mese di giugno, in cui i valori sono più bassi nella parte centrale della giornata e più alti verso le 9:00 e le 15:00.

È possibile verificare inoltre che agli equinozi e al solstizio d'inverno, i valori di illuminamento diffuso orizzontale ottenuti con i cieli Overcast e Intermediate sono quasi sovrapponibili in quanto la componente di luce solare extraterrestre incidente è in entrambi i casi tutta (o quasi) trasformata in radiazione diffusa. I valori di illuminamento diffuso generato dal cielo Clear sono invece generalmente di molto inferiori a quelli ottenuti con i cieli Intermediate e Overcast (con una discrepanza massima registrata nelle ore centrali del giorno) in quanto la componente di luce solare extraterrestre incidente è in questo caso ripartita tra radiazione diretta e diffusa. Il 21 dicembre i livelli di illuminamento di tutti e tre i cieli sono più bassi rispetto alle altre date e le differenze relative di conseguenza molto attenuate.

Una volta definite sulla base delle considerazioni precedenti le ore del giorno in cui i dati ottenuti dalle simulazioni sono paragonabili (dove le differenze di E_{dh} sono comprese tra $\pm 15\%$), si è verificato che il cielo Overcast ed il Cielo Clear sono confrontabili nel 18,5% dei casi, mentre l'Overcast e l'Intermediate sono confrontabili per il 74%. I cieli Clear ed Intermediate sono invece confrontabili per il 18,5% dei casi. Il cielo Uniform non è risultato mai confrontabile con gli altri tipi di cielo in quanto genera valori di illuminamento esterno diffuso di gran lunga maggiori.

Dall'analisi di questi casi per i vari orientamenti, è emerso che D calcolato con cielo Overcast è sempre conservativo rispetto al cielo Clear; mentre rispetto al cielo Intermediate, esso risulta conservativo a nord solamente nel 20% dei casi, ad est e ovest nel 60% dei casi, mentre a sud è sempre conservativo. Infine dal confronto tra i cieli Intermediate e Clear, nei pochi casi paragonabili, è emerso che il D calcolato con cielo Clear è sempre superiore.

Per valutare e motivare la non conservatività di D calcolato con cielo Overcast rispetto a quello calcolato con cielo Intermediate, è possibile far riferimento alle differenti distribuzioni di luminanza che caratterizzano i cieli. Come visibile nel diagramma (Figura 10 Profilo di luminanza dei cieli Intermediate calcolati sulla base delle formule CIE. Azimut del Sole 180° e altezza solare 45° Figura 10) degli andamenti della luminanza lungo una sezione della volta celeste, generato a partire da valori di E_{dh} normalizzati, la luminanza del cielo Intermediate è maggiore a quella del cielo Overcast in prossimità del Sole (pur non considerando la componente diretta della luce diurna) mentre è inferiore negli altri angoli di azimut. Questo comporta che, a parità di E_{dh} , gli E_{dm} , e di conseguenza i D , siano inferiori con cielo Overcast quando la finestra è esposta al Sole e viceversa siano superiori in tutti gli altri casi.

A conferma di quanto detto, possiamo notare che a nord la finestra non è quasi mai esposta direttamente al Sole, ad eccezione delle prime ed ultime ore del solstizio d'estate e degli equinozi; in quest'ultimo caso per quanto il Sole non sia direttamente presente, la finestra è esposta alla corona circumsolare. Questo fa sì che, come visibile in (Tabella 12), gli E_m con cielo Intermediate alle ore 8:00 e alle ore 16:00 sia rispettivamente superiori del 27,3% e 9,2% e i D del 19,5% e 5,9%.

Allo stesso modo, quando ad est e ad ovest la finestra non è esposta al Sole si verificano le condizioni sopra descritte.

Dai risultati emerge inoltre che per tutti i tipi di cielo analizzati, quando in casi diversi (orari, orientamenti e giorni) dovessero verificarsi uguaglianze nei valori di D , potrebbero registrarsi grandi differenze nei valori di E_m . Il discorso vale anche a parti inverse.

Al fine di confrontare i dati simulati con quelli misurati è stata necessaria una suddivisione sulla base del rapporto E_{dh}/E_{gh} . Comparando i valori di D ottenuti sperimentalmente e numericamente, abbiamo potuto verificare come i risultati con un cielo Clear siano sostanzialmente paragonabili a meno di scostamenti contenuti. Questi scostamenti crescono proporzionalmente all'aumentare della distanza del punto di misura dalla finestra a causa delle approssimazioni che il software applica nel calcolo delle interriflessioni (componente *IRC*).

Per quanto riguarda il cielo Intermediate, i dati simulati e misurati sono risultati molto diversi, perché, benché i valori giornalieri del rapporto E_{dh}/E_{gh} nei dati misurati e simulati fossero sovrapponibili, si registrava una variazione oraria molto marcata. In aggiunta, qualora si registrassero valori orari simili, per via della variabilità della posizione delle nuvole non sarebbe stato comunque possibile l'effettiva condizione della porzione di cielo vista dalla vista (Sky Factor). I dati misurati inoltre non presentavano una condizione di cielo Overcast, paragonabile ad un valore di E_{dh}/E_{gh} prossimo ad 1, e questo di conseguenza non ha permesso un confronto tra i dati misurati e simulati per questo tipo di cielo.

La non conservatività delle condizioni standard di calcolo del Daylight factor rende questo parametro apparentemente inutilizzabile sia in ambito energetico che progettuale. Dal punto di vista energetico, qualora fosse stata verificata la conservatività del cielo Overcast, le limitazioni riguardanti la staticità di questo parametro si sarebbero potute superare attraverso coefficienti correttivi. Tuttavia, la mancata conferma che questa condizione di calcolo sia sempre effettivamente la più svantaggiosa, comporta necessariamente la ricerca di un parametro alternativo.

12 Conclusioni

La luce naturale rappresenta un elemento di grandissima importanza all'interno degli edifici, sia dal punto di vista del comfort che dei potenziali risparmi energetici ed economici garantiti da una adeguata progettazione architettonica ed urbana.

Dal punto di vista delle norme europee che regolano il contributo della luce naturale sotto il profilo del benessere degli utenti, la grandezza di riferimento è ad oggi il Daylight factor, che in Italia è stata adottata a partire dal 1967. Questo parametro è valido principalmente per edifici residenziali e solo in pochissimi casi come in quello italiano viene adottato anche in ambito degli edifici per il terziario. La condizione di calcolo del Daylight factor prevede che il cielo sia caratterizzato da forte nuvolosità (definito nel 1942 dopo studi sperimentali come cielo standard Overcast) che sembrerebbe rappresentare la situazione più ragionevole per il calcolo della disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti in quanto considerata la più svantaggiosa. Infatti, basare la valutazione sulla situazione più svantaggiosa garantisce che in tutti gli altri casi la luce naturale all'interno dell'edificio sia sufficiente ad assicurare il benessere.

Molti studi in letteratura hanno messo in luce le criticità sia del Daylight factor che delle condizioni con cui viene calcolato. Esso non permette di valutare l'adeguatezza dei livelli di illuminamento interno dovuto alla luce naturale ma costituisce solo una misura di illuminamento interno relativo rispetto ad una condizione di cielo esterno standardizzato Overcast. È un indicatore statico che non tiene conto della variazione delle condizioni esterne: è insensibile sia all'orientamento, in quanto la luminanza del cielo Overcast è simmetrica rispetto all'asse verticale, sia alla località, essendo un rapporto tra due quantità.

Una delle limitazioni più importanti è rappresentata dal fatto che le caratteristiche di cielo Overcast non sembrano corrispondere alla condizione più frequente nella realtà (anche in nord Europa).

Al fine di superare queste criticità, vari studi in letteratura hanno proposto sia di variare le condizioni di cielo (uso del cielo Clear e Uniform) sia di raffinare la valutazione di questo parametro attraverso l'introduzione di varianti di calcolo (D_{med} , D_V).

Anche i protocolli di sostenibilità fanno riferimento al Daylight factor, fatta eccezione per la versione V4 del LEED che viste le numerose limitazioni di questo parametro, introduce anche la possibilità di usare grandezze di tipo dinamico (Climate Based) per la valutazione della luce naturale.

In ambito energetico, a livello europeo l'unica norma che considera il contributo della luce naturale sul bilancio globale, è la EN 15193 del 2007. Anche in questa norma compare come parametro di riferimento il Daylight factor, le cui condizioni di calcolo apparentemente conservative risulterebbero essere ideali per una

valutazione di tipo energetico. Le limitazioni di questo parametro evidenziate precedentemente tuttavia incidono pesantemente nella definizione del fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale [6].

Sulla base di queste considerazioni, poiché nonostante le limitazioni il Daylight factor continua ad essere a livello normativo la grandezza di riferimento per la valutazione della disponibilità della luce diurna, il lavoro svolto ha avuto lo scopo di valutare se la condizione Standard di calcolo sia effettivamente la più conservativa. Questa valutazione è stata svolta sostituendo al cielo Overcast, i cieli Intermediate without Sun e Clear without Sun sul modello di un ufficio del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, effettuando le simulazioni tramite il software DIVA/Radiance. I parametri di variazione del modello, oltre ai cieli, sono i giorni (equinozi e solstizi), l'orario operativo (7:00-17:00) e gli orientamenti.

Oltre alle simulazioni, sono state effettuate delle campagne di misura che hanno permesso di validare il modello.

I risultati numerici hanno dimostrato che non tutte le combinazioni analizzate al variare del cielo sono coerenti in termini di illuminamento diffuso orizzontale; questo ha determinato una riduzione dei casi comparabili.

Dall'analisi di questi ultimi si evince 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, sia ad est che ad ovest nel 60% dei casi, 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 .

Dal confronto tra dati sperimentali e numerici risulta che c'è una attendibilità tra i valori di D nel caso di cielo Clear mentre non è stato possibile paragonare i cieli Intermediate a causa dell'assenza di un parametro di distribuzione della nuvolosità nel cielo reale.

La non conservatività delle condizioni standard di calcolo del Daylight factor rende questo parametro apparentemente inutilizzabile sia in ambito energetico che progettuale.

È stato possibile evidenziare alcuni aspetti critici della ricerca che hanno portato a delle proposte per miglioramenti e futuri sviluppi:

- La riduzione del numero di casi simulati comparabile è dovuta alla assenza di una normalizzazione del valore di illuminamento esterno orizzontale per i vari cieli. Ad oggi in letteratura un valore di normalizzazione condiviso è assente; questa limitazione potrebbe essere superata proponendo e sperimentando una grandezza di normalizzazione.
- la mancata conferma che la condizione di calcolo Overcast sia sempre effettivamente la più svantaggiosa, comporta necessariamente la ricerca di un parametro alternativo al Daylight factor.
- I dati misurati raccolti non ci permettono di conoscere la distribuzione della copertura nuvolosa. Miglioramenti in questa direzione permetterebbero la comparazione tra dati sperimentali e numerici per un maggior numero di casi.
- Dal punto di vista delle caratteristiche degli ambienti simulati, potrebbe essere analizzato un set più ampio di casi studio (latitudine, riflettanza materiali, variazione della dimensione e posizione delle aperture)
- La mancata conferma che la condizione di calcolo Overcast sia sempre effettivamente la più svantaggiosa comporta necessariamente la ricerca di un parametro alternativo al Daylight factor che possa tenere in considerazione anche la componente diretta della luce naturale.
- Si ritiene necessario uno studio analitico delle nuove grandezze alternative al Daylight factor, che possano indirizzare verso la scelta di un parametro più adatto, ovvero verso la definizione di una nuova grandezza che possa avere significatività in termini di comportamento energetico dell'edificio.

13 Bibliografia

- [1] C. Cajochen, «Alerting effects of light,» *Sleep Medicine Reviews*, vol. 11, n. 453-464, 2007.
- [2] G. Vandewalle, P. Maquet e D. Dijk, «Light as a modulator of cognitive brain function,» *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 13, n. 10, pp. 429-438, 2009.
- [3] G. Curcio, L. Piccardi, F. Ferlazzo, A. Giannini, C. Burattini e F. Bisegna, «LED lighting effect on sleep, sleepiness, mood and vigor,» in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Florence, Italy, 2016.
- [4] M. Zinzi, A. Mangione e G. Fasano, «Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici,» ENEA, 2013.
- [5] I. E. Agency, «IEA Solar Heating & Cooling Programme - Task 50 Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings,» 2016. [Online]. Available: <http://www.iea-shc.org/>. [Consultato il giorno settembre 2016].
- [6] M. Zinzi, A. Mangione, B. Mattoni e F. Bisegna, «Analisi critica per l'individuazione di Metodi Semplificati di calcolo del LENI,» ENEA, 2015.
- [7] Ministero dei Lavori Pubblici, *Circolare Ministeriale n. 3151*, 1967.
- [8] Ministero della Salute, *Decreto Ministeriale n. 190*, 1975.
- [9] Ministero dei Lavori Pubblici, *Circolare Ministeriale n. 13011*, 1975.
- [10] *UNI 10840:2007*, 2007.
- [11] *UNI EN 12464-1:2011*, 2011.
- [12] Ministero per i Lavori Pubblici di concerto con Ministero per la Pubblica Istruzione, *Decreto Ministeriale n. 29*, 1975.
- [13] Building Research Establishment, «The Digest of BREEAM Assessment Statistics, Volume 01,» BRE Global Ltd, 2014.
- [14] U. G. B. Council, «Registered and certified LEED project directory,» [Online]. Available: <http://www.usgbc.org/projects>. [Consultato il giorno settembre 2016].
- [15] J. Mardaljevic, J. Christoffersen e P. Raynham, «A proposal for European Standard for Daylight in buildings,» 2006.
- [16] J. Longmore, «Daylighting: a current view,» *Light and Lighting*, vol. 68, n. 3, pp. 113-119, 1975.
- [17] K. Johnsen e J. Christoffersen, «Dagslys i rum og bygninger. (SBianvisning 219),» Statens byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.København., 2008.
- [18] J. Mardaljevic, L. Heschong e E. Lee, «Daylight metrics and energy savings,» *Lighting Res. Technol*, vol. 41, p. 261–283, 2009.
- [19] J. Mardaljevic, «Taking daylight modelling out of the dark ages,» [Online]. Available: <http://thedaylightsite.com/wp-content/uploads/papers/Taking%20daylight%20modelling%20out%20of%20the%20dark%20ages.pdf>. [Consultato il giorno 29 September 2016].
- [20] P. Littlefair, «Predicting lighting energy use under daylight linked lighting controls,» *Building Research & Information*, vol. 26, n. 4, p. 208–222, 1998.
- [21] H. M. Group, «Sidelighting photocontrols field study,» Final Report to Southern California Edison Co, Pacific Gas & Electric Company and Northwest Energy Efficiency Alliance, 2006.
- [22] J. Mardaljevic, «Rethinking daylighting and compliance,» in *SLL/CIBSE International Lighting Conference*, Dublin, Ireland, 2013.
- [23] T. T. Tung, *Quantification of Solar Availability in the Urban Fabric by Irradiation Mapping*, Hong Kong: Pao Yue-kong Library, The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [24] H. Cheung e T. M. Chung, «Calculation of the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment,» *Architectural Science Review*, vol. 48, n. 1, pp. 81-91, 2005.

- [25] C. Robbins, *Daylighting: design and analysis*, Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- [26] K. Alshaibani, «A Daylight Factor for Clear Sky Conditions,» *Architectural Science Review*, vol. 42, n. 4, pp. 293-296, 1999.
- [27] M. Sudan, G. Tiwari e I. Al-Helal, «A daylight factor model under clear sky conditions for building: An experimental validation,» *Solar Energy*, vol. 115, p. 379–389, 2015.
- [28] D. Eranun e P. Littlefair, «Luminance models for overcast skies: Assessment using measured data,» *Lighting Research and Technology*, vol. 27, n. 1, pp. 53-58, 1995.
- [29] D. Li e G. Cheung, «Average daylight factor for the 15 CIE standard skies,» *Lighting Res. Technol.*, vol. 38, n. 2, pp. 137-152, 2006.
- [30] J. Longmore, «Daylighting: a current view.,» *Light and Lighting*, vol. 68, pp. 113-119, 1975.
- [31] C. Reinhart, J. Mardaljevic e Z. Rogers, «Dynamic daylight performance metrics for sustainable building,» *LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, vol. 3, n. 1, pp. 1-25, 2006.
- [32] C. Reinhart e O. Walkenhorst, «Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulation for a test office with external blinds,» *Energy and Buildings*, vol. 33, n. 7, pp. 683-697, 2001.
- [33] C. Reinhart e M. Andersen, «Development and validation of a RADIANCE model for translucent panel,» *Energy and Buildings*, vol. 38, n. 7, pp. 890-904, 2006.
- [34] Z. Rogers, «Daylighting metric development using Daylight Autonomy calculations in the sensor placement optimization tool,» Architectural Energy Corporation, Boulder, Colorado, 2006.
- [35] N. Azza e J. Mardaljevic, «Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings,» *Lighting Research and Technology*, vol. 37, n. 1, pp. 41-59, 2005.
- [36] A. Nabil e J. Mardaljevic, «Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors,» *Energy and Buildings*, vol. 38, n. 7, pp. 905-913, 2006.
- [37] J. Mardaljevic, «Climate-Based daylight analysis for residential buildings,» in *Daylight, Energy Efficiency and Human Health - 3rd Daylight Symposium*, Rotterdam, 2009.
- [38] J. Mardaljevic, «Validation of a lighting simulation program under real sky conditions,» *Lighting Research and Technology*, vol. 27, n. 4, pp. 181-188, 1995.
- [39] Danish Building Research Institute, «Daylight calculations in practice: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms,» Aalborg University, 2013, SBI 2013:26.
- [40] *CIE Proc. Vol. 2 Secretariat committee 3.2*, Zurich (1955).
- [41] *CIE Publ. No. 22 (TC-4.2) Standardization of luminance Distribution on clear Skies*, 1973.
- [42] *CIE S003 - 1996 "Spatial distribution of daylight - CIE standard Overcast sky and Clear sky" and ISO 15469:1997*, 1997.
- [43] H. Nakamura, M. Oki e Y. Hayashi, «Luminance distribution of Intermediate Sky,» *J. Light & Vis. Env.*, vol. 9, n. 1, 1985.
- [44] R. Kittler, S. Darula e R. Perez, «A set of standard skies characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design,» Bratislava, Slovakia, 1998.
- [45] P. Tregenza, «Standard skies for maritime climates,» *Lighting Res. Technol.*, vol. 31, pp. 97-106, 1999.
- [46] L. DHW, L. CCS e J. Lam, «Study of 15 sky luminance patterns against Hong Kong data,» *Arch. Sci. Rev.*, vol. 46, pp. 61-68, 2003.
- [47] *ISO 15469:2004 (E) / CIE S 011/E:2003 "Spatial distribution of Daylight- CIE Standard General sky"*, 2004.
- [48] *CIE 215:2014 "CIE Standard General Sky Guide"*, 2014.
- [49] J. Mardaljevic, *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*, Leicester: PhD Thesis, Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University Leicester, 1999, December.

14 Appendice A

Tabella 36 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'estate, finestra a nord

NORTH									
June 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminance difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	11.6	7.6	151	6.8	7.4	-0.6	788	568	38.7
09:00	13.1	8.3	158	5.6	6.6	-1.1	732	551	32.9
10:00	12.3	8.6	144	4.3	6.1	-1.8	534	522	2.3
11:00	10.5	8.9	118	3.5	5.8	-2.3	368	519	-29.1
12:00	9.4	9.4	100	3.0	5.5	-2.5	284	518	-45.1
13:00	9.8	9.2	107	3.2	5.8	-2.7	313	536	-41.6
14:00	11.5	8.7	133	3.9	5.8	-1.9	450	499	-9.8
15:00	13.0	8.4	154	4.8	6.5	-1.6	624	544	14.8
16:00	12.5	8.0	157	6.1	6.9	-0.9	760	556	36.7

Tabella 37 Confronto cielo Intermediate e Clear, equinozi, finestra a nord

NORTH									
March 21 September 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminance difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	7.5	6.0	124	6.0	6.7	-0.7	451	402	12.3
09:00	10.7	7.3	146	4.9	6.2	-1.3	524	454	15.4
10:00	12.6	8.0	157	4.1	5.7	-1.7	509	459	10.9
11:00	13.1	8.3	158	3.5	5.6	-2.0	462	460	0.4
12:00	13.1	8.4	156	3.2	5.5	-2.3	419	458	-8.6
13:00	13.1	8.3	158	3.4	5.5	-2.1	449	459	-2.2
14:00	12.7	8.1	158	3.9	5.8	-1.9	501	468	7.1
15:00	11.1	7.4	149	4.7	6.0	-1.3	523	448	16.8
16:00	8.1	6.3	129	5.7	6.4	-0.8	460	405	13.6

Tabella 38 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'inverno, finestra a nord

NORTH									
December 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminance difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	1.4	2.8	51	5.5	7.5	-1.9	79	210	-62.4
09:00	4.0	4.3	93	5.0	6.8	-1.8	202	295	-31.5
10:00	6.4	5.5	115	4.5	6.6	-2.1	288	367	-21.5
11:00	8.0	6.2	129	4.1	6.3	-2.3	326	395	-17.5
12:00	8.6	6.5	132	3.8	6.3	-2.5	327	410	-20.2
13:00	8.3	6.4	130	3.9	6.4	-2.4	325	406	-20.0
14:00	6.9	5.8	120	4.2	6.4	-2.2	293	373	-21.4
15:00	4.8	4.8	101	4.8	6.7	-1.8	232	318	-27.0
16:00	2.2	3.3	67	5.4	7.4	-2.0	119	245	-51.4

Tabella 39 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'estate, finestra ad est

EAST									
June 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminance difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	11.6	7.6	152	13.2	19.0	-5.8	1532	1453	5.4
09:00	13.1	8.3	158	12.0	15.3	-3.3	1576	1270	24.1
10:00	12.4	8.6	144	9.5	11.8	-2.2	1178	1011	16.5
11:00	10.5	8.9	118	6.6	8.9	-2.3	691	792	-12.8
12:00	9.4	9.4	100	4.6	7.2	-2.6	431	672	-35.9
13:00	9.8	9.2	107	3.7	6.1	-2.5	360	561	-35.8
14:00	11.6	8.7	133	3.3	5.6	-2.3	384	484	-20.7
15:00	13.0	8.4	154	3.3	5.5	-2.2	430	467	-7.9
16:00	12.6	8.0	157	3.4	5.7	-2.3	429	456	-5.9

Tabella 40 Confronto cielo Intermediate e Clear, equinozi, finestra ad est

EAST									
March 21 September 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminance difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	7.5	6.0	124	12.6	20.8	-8.2	942	1256	-25.0
09:00	10.7	7.3	146	12.2	16.9	-4.7	1301	1238	5.1
10:00	12.6	8.0	157	10.3	12.7	-2.3	1296	1015	27.7
11:00	13.1	8.3	157	8.0	9.4	-1.4	1046	778	34.4
12:00	13.1	8.4	157	6.1	7.3	-1.2	799	613	30.3
13:00	13.1	8.3	158	4.9	6.3	-1.4	643	524	22.7
14:00	12.7	8.1	158	4.3	5.8	-1.5	547	469	16.6
15:00	11.1	7.4	150	4.0	5.8	-1.8	449	435	3.2
16:00	8.1	6.3	130	4.1	6.3	-2.2	330	393	-16.0

Tabella 41 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'inverno, finestra ad est

EAST									
December 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminance percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminance difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	1.4	2.8	51	9.8	18.3	-8.6	139	516	-73.1
09:00	4.0	4.4	92	10.2	15.9	-5.7	411	694	-40.8
10:00	6.4	5.5	115	9.7	13.3	-3.6	615	735	-16.3
11:00	8.0	6.3	128	8.5	9.8	-1.3	683	616	10.9
12:00	8.6	6.5	132	7.2	8.0	-0.8	621	519	19.7
13:00	8.3	6.4	130	6.2	6.9	-0.7	512	438	16.9
14:00	6.9	5.8	120	5.7	6.6	-0.9	393	380	3.4
15:00	4.8	4.8	101	5.2	6.7	-1.5	251	318	-21.1
16:00	2.2	3.3	67	5.1	7.2	-2.1	113	239	-52.7

Tabella 42 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'estate, finestra a sud

SOUTH									
June 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminanc e percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminanc e difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	11.6	7.6	152	6.5	7.3	-0.8	755	560	34.8
09:00	13.1	8.3	158	6.7	7.8	-1.1	875	647	35.2
10:00	12.3	8.6	144	6.7	8.3	-1.6	826	712	16.0
11:00	10.5	8.9	118	6.7	8.8	-2.2	696	787	-11.6
12:00	9.4	9.3	100	6.3	9.3	-3.1	589	874	-32.6
13:00	9.8	9.2	107	6.5	9.0	-2.5	639	827	-22.7
14:00	11.5	8.7	133	6.8	8.7	-1.9	788	756	4.2
15:00	13.0	8.4	154	6.9	8.2	-1.3	892	691	29.1
16:00	12.6	8.0	157	6.7	7.5	-0.8	843	602	40.0

Tabella 43 Confronto cielo Intermediate e Clear, equinozi, finestra a sud

SOUTH									
March 21 September 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminanc e percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminanc e difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	7.5	6.0	124	8.5	10.4	-1.8	637	622	2.4
09:00	10.7	7.3	146	9.4	11.7	-2.3	1007	856	17.6
10:00	12.6	8.0	157	10.5	13.1	-2.6	1322	1049	26.0
11:00	13.1	8.3	157	11.3	14.2	-2.8	1483	1176	26.1
12:00	13.1	8.4	156	11.6	14.7	-3.1	1516	1234	22.9
13:00	13.1	8.3	157	11.5	14.4	-2.9	1511	1206	25.3
14:00	12.7	8.1	157	11.0	13.7	-2.7	1395	1105	26.2
15:00	11.1	7.5	149	10.0	12.5	-2.5	1117	931	20.0
16:00	8.1	6.3	129	8.9	10.8	-1.9	723	681	6.2

Tabella 44 Confronto cielo Intermediate e Clear, solstizio d'inverno, finestra a sud

SOUTH									
December 21	Edh Intermediate [klux]	Edh Clear [klux]	Illuminanc e percentage ratio (Int/Cle) [%]	Davg Intermediate [%]	Davg Clear [%]	Davg Δ (Int - Cle) [%]	Em Intermediate [lux]	Em Clear [lux]	Illuminanc e difference Em (Int - Cle) [%]
08:00	1.4	2.8	51	8.8	14.0	-5.2	125	392	-68.1
09:00	4.0	4.3	93	10.5	16.4	-5.9	420	707	-40.6
10:00	6.4	5.5	115	11.7	18.9	-7.2	743	1040	-28.6
11:00	8.0	6.2	128	12.9	20.6	-7.8	1030	1290	-20.2
12:00	8.6	6.5	132	13.6	21.7	-8.1	1164	1411	-17.5
13:00	8.3	6.4	130	13.1	21.6	-8.5	1087	1376	-21.0
14:00	6.9	5.8	120	12.5	20.0	-7.5	866	1160	-25.3
15:00	4.8	4.8	101	10.9	17.8	-6.8	526	850	-38.1
16:00	2.2	3.3	67	9.3	14.9	-5.6	207	494	-58.1