



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per
valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l'alto

Paolo Soardo



ASSOCIAZIONE ITALIANA DI ILLUMINAZIONE
LA CULTURA DELLA LUCE - THE CULTURE OF LIGHT

Report RdS/2011/

STUDIO DELLE CARATTERISTICHE DI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE STRADALE PER VALUTARE
I CONSUMI ENERGETICI E LUCE DISPERSA VERSO L'ALTO

Paolo Soardo (AIDI)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico
nell'illuminazione pubblica

Responsabile Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Contratto ENEA AIDI

Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l'alto

Rapporto dell'attività svolta da AIDI al 15 settembre 2011

0 Introduzione

L'attività è stata svolta in collaborazione con ENEA e INRIM come previsto nel contratto.

Il presente rapporto è riferito alle voci di responsabilità di AIDI, totale o condivisa con ENEA e INRIM, come riportato nella tabella 1 allegata al contratto

1 Definizione dettagliata del programma di attività e dei tempi esecutivi

E' stata completata la seconda parte del programma di ricerca con l'analisi, la progettazione e la realizzazione di impianti pilota. La misurazione delle caratteristiche fotometriche degli impianti è stata interrotta per motivi di forza maggiore a causa della variazione improvvisa delle condizioni meteorologiche, che hanno costretto al rientro il piccolo deltaplano con gli strumenti di misura: il completamento di questa attività è in corso. Le valutazioni odierne confermano il raggiungimento degli obiettivi previsti.

3 Stato attuale delle conoscenze e dei vincoli legislativi

3.1 Quadro della situazione attuale

I risultati delle ricerche nel settore della compatibilità energetica ed ambientale degli impianti di illuminazione esterna descritti nella bibliografia degli ultimi 40 anni, sono attualmente in discussione presso la CIE nell'ambito della revisione della pubblicazione 126 "Guidelines for the reduction of sky glow" relativamente agli aspetti che riguardano la riduzione dei consumi energetici ed alla compatibilità ambientale, con particolare riferimento alla luminanza del cielo generata dalla luce emessa e riflessa verso l'alto.

In conformità ai risultati della ricerca scientifica e dell'innovazione tecnologica, sono state emesse direttive europee e norme nazionali ed internazionali con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici, l'emissione e la riflessione di luce verso zone ad esse non destinate, in particolare verso il cielo.

Tabella 1.1 Descrizione delle attività e dei ruoli degli enti interessati							
Fase	Attività parte 1/2 [%]		Argomento	ENEA	INRIM	AIDI	Risultati attesi
	1	2					
3*	70	30	Stato attuale delle conoscenze e dei vincoli legislativi			x	Relazione AIDI
4*	50	50	Individuazione dei risultati attesi	x	x	x	
5	50	50	Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura	x	x	x	Relazione INRIM
7*	50	50	Selezione degli apparecchi			x	Relazione AIDI
8*	50	50	Progettazione degli impianti			x	
9*	50	50	Ricerca degli apparecchi			x	
13	100	0	Analisi preliminare dei risultati	x	x	x	Verbale riunione
14	0	100	Seconda campagna di misura sulle installazioni prototipali (in ambiente urbano)		x		Relazione INRIM
15 AI	50	50	Analisi del sito – Magnitudo limite		x	x	Relazione AIDI/INRIM
16 T	30	70	Attività conclusive: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Analisi dei risultati e prima bozza di relazione finale ▪ Confronto con gli enti interessati ▪ Relazione finale 	x	x	x	
17 T	0	100	Articolo su rivista scientifica	x	x	x	

Le leggi emesse da molte regioni italiane, in particolare quelle che si riferiscono alla LR della Regione Lombardia, non sono conformi ai risultati delle ricerche e non rispettano gli obiettivi energetici ed ambientali rivendicati dalle leggi.

L'esame di questi documenti, e delle ricerche effettuate dall'INRIM, è utile per inquadrare gli obiettivi della presente ricerca.

La maggior parte degli impianti di illuminazione stradale riguarda strade con traffico motorizzato e si trova nelle città. Risulta quindi conveniente iniziare questa analisi dall'ambiente cittadino per valutare consumi energetici e compatibilità ambientale.

3.2 Attività della CIE

Nella recente Sessione in Sud Africa, la CIE ha esaminato le relazioni sulle ricerche italiane e nominato Paolo Soardo presidente del TC 4-21 con il mandato di concludere la revisione della pubblicazione 126. A questo fine saranno molto utili i risultati conclusivi del presente studio.

La bozza della nuova CIE 126 ha ricevuto numerosi riscontri. Gli astronomi non vogliono prendere in considerazione le riflessioni delle superfici illuminate come fonte di aumento della luminanza del cielo. Ciò è dovuto probabilmente al diverso tipo di percezione delle sorgenti di luce piccole, che vengono percepite in base all'illuminamento generato sulla pupilla, e delle sorgenti estese, ove il sistema ottico, occhio compreso, riproduce uno a uno la luminanza sulla superficie sensibile alla luce, la retina, per la visione diretta. In questo modo gli astronomi percepiscono gli apparecchi di illuminazione, che appaiono sulla retina molto più luminosi dello sfondo stradale, come unica fonte di inquinamento, dimenticando che la strada ha un'area più elevata di un apparecchio e che il flusso luminoso riflesso verso l'alto per unità di angolo solido è dato dal prodotto della luminanza della strada per la sua area.

3.3 Sicurezza degli utenti della strada

La sicurezza degli utenti della strada ha priorità assoluta rispetto ai criteri di compatibilità energetica ed ambientale, è garantita dalla conformità alle norme ed in particolare alle norme UNI 11248 e UNI EN 13201-2, -3, -4, nonché alle norme UNI EN 12899 sulla segnaletica verticale, sussidiaria all'illuminazione.

3.4 Luminanza artificiale del cielo

Secondo l'esperienza degli astronomi, la luminanza artificiale del cielo è dovuta al flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione riflesso dalle superfici illuminate con elevazione tra 0° e 20° rispetto al piano orizzontale. Con questa elevazione la luce viene diffusa verso il basso dagli aerosol presenti nei bassi strati dell'atmosfera riducendo il contrasto dei corpi celesti, ad elevazioni superiori la minore diffusione da parte delle molecole dell'atmosfera riduce gli ostacoli per l'astronomia.

Nel seguito l'analisi delle emissioni e delle riflessioni sarà limitata alle elevazioni tra 0° e 20°.

3.5 Emissioni e riflessioni di un impianto di illuminazione stradale

Per maggiore chiarezza si riporta il modello fotometrico previsto nel presente studio, che deriva dalla bozza della revisione in corso della CIE 126. Il modello di calcolo di emissioni e riflessioni con elevazioni 0°-20°, corrispondenti a $90^\circ \leq \gamma \leq 110^\circ$ nel sistema di coordinate (C,γ) della CIE, si rifà alla figura 3.1.

Le grandezze ed i simboli usati nei calcoli sono riportati in tabella 3.1.

Se con UPF si indica il flusso luminoso emesso e riflesso verso l'alto, è facile verificare che vale la:

$$UPF = \Phi_L F_{la} [ULOR + p_1 u + p_2 (DLOR - u)] \quad (3-1)$$

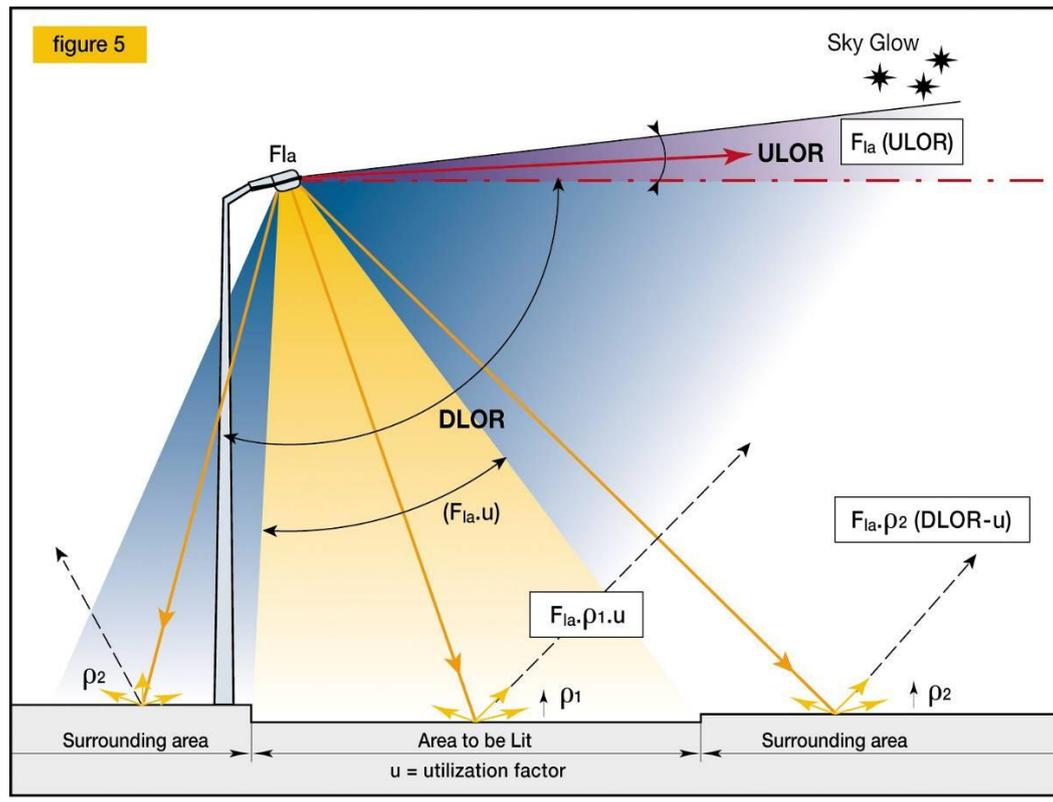


Figura 3.1 Flusso luminoso emesso e riflesso da un impianto stradale

Tabella 3.1 – Grandezze e simboli	
Variabile	Simbolo
Flusso luminoso lampade (flusso installato)	ϕ_L
Flusso luminoso globale emesso	Φ_G
Rapporto di emissione superiore	ULOR [%]
Rapporto di emissione inferiore:	DLOR [%]
Fattore di utilizzazione:	u [%]
Angolo di elevazione sul piano orizzontale	φ
Ripartizione dell'intensità luminosa	$I(\varphi)$
Area delle superfici da illuminare	S [m ²]
Fattore di riflessione di una città diffondente	ρ [%]
Fattore di riflessione medio di aree illuminate	ρ_1 [%]
Fattore di riflessione medio del circondario	ρ_2 [%]
Illuminamento medio	E [lx]
Luminanza media L	L [cd/m ²].

Tenendo conto delle sole emissioni e riflessioni entro una elevazione di 20°, l'equazione precedente diviene:

$$UPF_{20} = \Phi_G [ULOR_{20} + \rho_{1_{20}} u + \rho_{2_{20}} (DLOR - u)] \quad (3.2)$$

In cui le variabili con pedice 20 riguardano l'elevazione 0°-20°.

Ponendo $F_{la} = (E * S) / u$, si ottiene:

$$UPF_{20} = E * S \left[\frac{ULR_{20}}{u} + \rho_{1_{20}} + \rho_{2_{20}} \left(\frac{DLR}{u} - 1 \right) \right] \quad (3.3)$$

Tuttavia, la maggior parte dell'illuminazione esterna è destinata a strade con traffico motorizzato realizzate in base a criteri di luminanza secondo le categorie illuminotecniche ME della norma UNI EN 13201-2. In questo caso, per minimizzare i consumi energetici è condizione essenziale che la luminanza stradale sia ottenuta con l'illuminamento minimo.

3.6 Fattore di luminanza stradale q_R – prEN 13201-6

Dato che la relazione fra luminanza e illuminamento dipende sia dall'efficienza di riflessione del manto stradale sia dalla ripartizione dell'intensità luminosa dell'apparecchio di illuminazione, occorre realizzare impianti di illuminazione massimizzando il fattore di luminanza stradale q_R , definito dalla formula:

$$q_R = \frac{L}{E \cdot Q_0} \quad (3.4)$$

in cui Q_0 è il coefficiente medio di luminanza stradale, misurato o presunto, del manto C2, definito dalla norma UNI 11248, con cui è progettato l'impianto.

Questo fattore è contemplato nella pubblicazione CIE 144, pagina 9, paragrafi dal 6 al 10, [4.13].

The average road luminance L can be expressed as $L = Q E$, where Q is an average luminance coefficient of the road surface and E is the average illuminance on the road surface.

When the degree of specular illumination is low (note: typical condition of concrete surfaces), the value of Q_0 is close to Q_d irrespective of the S1 value. Accordingly, the uncertainty of the road surface luminance is small.

When the degree of specular illumination is high (note: typical condition of asphalt surfaces), on the other hand Q approaches and even exceeds Q_0

Road lighting with a high degree of specular illumination is typical in most countries because of the resulting gain in average road surface luminance.

L'equazione (3.3) permette di calcolare il flusso luminoso emesso e riflesso verso l'alto con elevazione non maggiore di 20° per un impianto di illuminazione basato sull'illuminamento stradale, tipicamente una zona conflittuale o pedonale in un centro urbano. Per una strada con traffico motorizzato si può scrivere :

$$UPF_{20} = L \cdot S \cdot \left[\frac{1}{q_L \cdot Q_0} \right] \cdot \left[\frac{ULR_{20}}{u} + \rho_{1_{20}} + \rho_{2_{20}} \left(\frac{DLR}{u} - 1 \right) \right] \quad (3.5)$$

La delegazione italiana nel CEN ha ottenuto il recepimento del fattore di luminanza stradale nella bozza di norma prEN 13201-5 sul risparmio energetico nell'illuminazione stradale per la valutazione dell'efficienza energetica.

5 Misurazioni in laboratorio e sul campo

Le misurazioni da effettuare sono indicate nella relazione dell'INRIM sulla prima fase del programma ENEA.

7 Scelta degli apparecchi di illuminazione

8 Progettazione degli impianti

9 Ricerca degli apparecchi

Le attività suddette fanno parte della prima fase del programma e sono qui riportate per memoria.

L'obiettivo del programma di ricerca è verificare mediante misurazioni su un limitato numero di impianti sperimentali la coerenza dei calcoli progettuali e delle considerazioni teoriche con le effettive prestazioni illuminotecniche e con le esigenze di compatibilità energetica ed ambientale. Non si tratta quindi di verificare la conformità degli impianti a norme e/o prescrizioni, anche se richiamate nella ricerca come elemento di guida, ma di costituire un punto di riferimento per l'estensione dei risultati della ricerca a più numerosi casi di studio con garanzia di coerenza con la realtà.

Nel nostro caso è previsto che le esperienze siano effettuate su due strade, in aperta campagna ed in centro città. In entrambe le strade verranno installati impianti pilota con le seguenti caratteristiche.

- **Apparecchi di illuminazione.** Con vetro piano e coppa liscia.
- **Condizioni particolari.** Apparecchio di illuminazione ottimizzato nella versione con vetro curvo e disponibile anche con vetro piano.
- **Colore della luce.** Bianco.
- **Lampade.** Ioduri metallici e LED.
- **Categoria illuminotecnica.** ME3b della norma UNI EN 13201-2.
- **Tipo di asfalto.** C2 con $Q_0=0,07\text{strad}^{-1}$.
- **Larghezza della strada.** 7,5 m.
- **Fattore di riflessione verso l'alto del manto stradale.** $\rho_1 = 0,12$.
- **Fattore di riflessione delle superfici illuminate per $\epsilon \leq 20^\circ$.** $\rho_2 = 0,34$,

Sono stati presi in esame molti tipi di apparecchi di illuminazione. Ne è emersa la proposta che segue.

- **Apparecchi di illuminazione con lampade ioduri metallici.** Tipo Iridium di Philips, con vetro piano e coppa liscia, equipaggiati con lampade a ioduri metallici tipo Cosmopolis.

- **Apparecchi di illuminazione con LED.** Tipo Senso 2 di Schröder con vetro piano e coppa liscia equipaggiati con 96 LED con temperatura di colore 4500 K.
- **Flusso luminoso nominale per i calcoli.** 10000 lm.

Il programma prevede l'installazione di quattro impianti di illuminazione pilota, in modo da ottenere risultati estendibili a ogni tipo di apparecchio di illuminazione. Le caratteristiche degli apparecchi utilizzati in questa ricerca sono riportati nella tabella 7.1.

Per l'installazione degli impianti è previsto l'uso di pali mobili di costruzione Grechi.

Tabella 7.1 – Caratteristiche degli impianti pilota					
Grandezza	Unità	Caratteristiche			
Apparecchi	-	Philips Iridium		Schröder Senso 2	
Lampada		Ioduri metallici		LED	
Finestra emissione		Vetro piano	Coppa	Vetro piano	Coppa
Altezza	m	8			
interdistanza		33	37	33	37
Flusso lampade	lm	12000		9600	
Flusso emesso		8100	8400	6170	6490

13 Analisi dei risultati disponibili

Le misurazioni programmate dall'INRIM nel mese di luglio a Mercallo sono poi state interrotte per il mutamento delle condizioni meteorologiche intervenute durante le prove.

Pali mobili e apparecchi di illuminazione sono stati trasportati a Torino presso l'INRIM, dove le prove sono state eseguite, come descritto nella relazione dell'INRIM.

L'analisi dei risultati, tuttora in corso, rende disponibili alcuni risultati parziali, comunque significativi, che è utile commentare.

La tabella 13.1 riporta gli illuminamenti misurati sulla strada e la tabella 13.2 risultati significativi per gli obiettivi della ricerca.

Tabella 13.1 – Illuminamenti a Mercallo con Casone

Illuminamenti stradali con apparecchio LED con vetro curvo

[m]	0,625	1,875	3,125	4,375	5,625	6,875
1,42	28,38	36,17	35,13	27,09	19,06	11,03
4,27	23,22	28,49	27,06	21,17	15,29	9,4
7,12	16,28	20,23	19,7	15,88	12,05	8,23
9,97	10,71	12,61	13,55	11,36	9,16	6,97
12,82	9,22	10,53	9,79	8,59	7,4	6,21
15,67	7,07	9,57	10,09	8,72	7,35	5,98
18,52	6,27	8,43	10,5	9,09	7,68	6,27
21,37	6,1	8,82	10,4	9,11	7,82	6,53
24,22	7,19	9,78	10,91	9,66	8,41	7,16
27,07	9,73	12,99	14,85	12,82	10,79	8,75
29,92	14,66	19,76	22,57	18,45	14,33	10,21
32,77	21,89	28,3	29,47	23,66	17,86	12,05
35,62	27,27	35,87	37,24	28,59	19,93	11,27

Illuminamento medio 14,8 lx

Illuminamenti stradali con apparecchio LED con vetro piano

[m]	0,625	1,875	3,125	4,375	5,625	6,875
1,5	25,92	33,28	34,25	26,99	19,73	12,47
4,5	21,35	27,29	27,63	22,04	16,44	10,85
7,5	15,41	20,04	21,53	17,62	13,72	9,81
10,5	10,55	13,8	14,85	12,69	10,54	8,38
13,5	8,08	10,89	11,5	9,96	8,41	6,86
16,5	6,8	9,35	10,67	9,14	7,62	6,09
19,5	7,05	9,5	10,85	9,54	8,23	6,92
22,5	9,51	12,68	14,49	12,57	10,66	8,74
25,5	14,39	19,16	20,41	17,03	13,65	10,26
28,5	19,47	25,4	27,67	22,43	17,18	11,94
31,5	24,92	32,08	34,38	27,16	19,94	12,73

Illuminamento medio 15,8 lx

Illuminamenti stradali con apparecchio a Ioduri con vetro curvo

[m]	0,625	1,875	3,125	4,375	5,625	6,875
1,42	36,54	37,8	34,91	27,78	20,66	13,54
4,27	25,55	27,27	26,14	22,36	18,58	14,79
7,12	16,83	19,93	20,93	17,22	13,5	9,78
9,97	9,21	11,6	12,11	10,08	8,04	6,01
12,82	6,53	8,13	9,88	8,24	6,59	4,95
15,67	3,8	4,45	5,23	5,02	4,81	4,6
18,52	3,5	4,16	4,85	4,97	5,1	5,22
21,37	4,16	4,92	5,73	5,82	5,9	5,99
24,22	4,95	6,07	6,82	6,86	6,9	6,94
27,07	8,37	9,6	15,92	13,1	10,28	7,46
29,92	9,23	17,91	22,66	18,28	13,9	9,52
32,77	24,57	26,74	26	22,2	18,39	14,58
35,62	37,13	37,11	33,09	26,98	20,87	14,76

Illuminamento medio 13,9 lx

Illuminamenti stradali con apparecchio a Ioduri con vetro piano

[m]	0,625	1,875	3,125	4,375	5,625	6,875
1,5	29,98	32,02	30,22	25,49	20,77	16,04
4,5	20,69	22,98	23,37	20,94	18,51	16,08
7,5	12,14	15,15	18,34	16,45	14,55	12,66
10,5	7,66	9,3	11,55	10,81	10,06	9,31
13,5	5,27	6,18	7,53	7,72	7,91	8,1
16,5	6,04	7,24	8,11	7,26	6,41	5,56
19,5	6,95	8,23	9,6	8,45	7,31	6,16
22,5	9,8	12,07	13,66	11,46	9,26	7,06
25,5	15,46	18,45	19,79	16,42	13,05	9,68
28,5	22,77	25,23	24,98	21,35	17,73	14,11
31,5	32,72	33,35	30,16	24,79	19,43	14,06

Illuminamento medio 15,0 lx

Apparecchio	Inter-distanza [m]	Flusso Emesso [lm]	Illumin. [lx]	Luminanza [cd/m²]	q_R
LED vetro curvo	37	6490	14,8	1,49	1,43
LED vetro piano	33	6170	15,8	1,46	1,32
Ioduri vetro curvo	37	8400	13,9	1,10	1,13
Ioduri vetro piano	33	8100	15,0	1,23	1,14

La tabella 13.2 merita alcuni commenti.

- A parità di lampada, il flusso luminoso emesso è inferiore per gli apparecchi con vetro piano rispetto agli equivalenti con vetro curvo a causa delle riflessioni interne di Brewster.
- Per gli impianti con LED, a parità di luminanza gli illuminamenti stradali medi sono maggiori con conseguente maggiore flusso luminoso riflesso verso l'alto, come indicato anche dal minore valore del fattore di luminanza stradale q_R .
- Per entrambe le lampade, per un impianto di illuminazione è richiesto un maggior numero di apparecchi di illuminazione con vetro piano a causa delle minori interdistanze, con un considerevole aumento dei costi di installazione e dei consumi energetici.

L'analisi riportata in questa sede, anche se parziale in attesa della disponibilità di tutti i risultati, è comunque significativa per gli obiettivi del programma di ricerca.

L'analisi sarà completata non appena disponibili altri dati da parte dell'INRIM.

Bibliografia

- [1] CIE 32 "Lighting in situations requiring special treatment ", 1973
- [2] REGOLAMENTO (CE) N. 245/2009 DELLA COMMISSIONE del 18 marzo 2009
- [3] UNI 10819 "Guida alla limitazione del flusso luminoso emesso verso l'alto", 1989
- [4] CIE 126 "Guide for minimising sky glow", 1997
- [5] UNI EN 12464-2 "Illuminazione dei luoghi di lavoro all'aperto", 2004
- [6] VITO "Public street lighting", 2008
- [7] M. Bonomo, LUCE, 2004
- [8] L. Fellin, P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo "PUBLIC LIGHTING - ANALYSIS OF ENVIRONMENT AND ENERGY CONSERVATION", CIE Congress, San Diego, 2003
- [9] L. Fellin, P. Fiorentin, A. Scroccaro, Paola Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo "LUMINOUS EMISSION AND ARTIFICIAL SKY LUMINANCE - THE CASE OF THE NORTH ITALIAN CITIES", Lux Europa, 2005
- [10] Waldram JM. "The calculation of sky haze - luminance from street lighting". Lighting Research and Technology 1972; 4: 21-2
- [11] R.H. Garstang, "The status and prospects of ground based observatory site ", Ann. Rev. Astron. Astrophys., 27, 1989, 19-40.
- [12] CIE TC 4-21 "Revisione della pubblicazione CIE 126", 20190
- [13] CIE publication 144 "Road surface and road marking reflection characteristics",
- [14] Soardo P., Fellin L., Iacomussi P., Rossi G. "Compatibility of road lighting with star visibility", Lighting Research and Technology, 4, p. 307-322, 2008
- [15] M.F. Walker, "The California Site Survey, Publ. Astron. Soc. Pacific", 82, 19
- [14-16] P. Soardo, L. Fellin, P. Iacomussi, G. Rossi, "Weight on sky luminance and limiting magnitude of the light sources around a site", Urban Nightscape, Athens, 2006
- [17] Soardo P., Fellin L. Iacomussi P., Rossi G. "A scientifically based analysis of the effects of town lighting on sky glow" CIE Session, Beijing, 2007
- [18] P. Iacomussi, G. Rossi, L. Fellin, P. Soardo "External lighting installations - Energy saving and environmental compatibility - Analysis of a territory around a site", CIE TC 3-21, Budapest 2009