



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

Evoluzione dell'inquinamento luminoso all'Osservatorio di Asiago

Relatore:

Prof. Sergio Ortolani

Correlatori:

Dott. Stefano Cavazzani

Dott. Andrea Bertolo (ARPAV)

Laureanda:

Rosina Russo

Matricola n. 1126566

Anno Accademico 2018 / 2019

Indice

Introduzione	1
1.Luminosità del cielo notturno	2
1.1 Luminosità naturale del cielo notturno	2
1.2 Luminosità artificiale	5
1.2.1 Emissione diretta sopra l'orizzonte.....	6
1.2.2 Apparecchi d'illuminazione per arredo urbano	8
2.Modelli Teorici.....	14
2.1 Legge di Walker (1977)	14
2.2 Modello di Garstang (1986).....	14
2.3 Modello di Soardo.....	16
3.L'inquinamento luminoso nel mondo	20
3.1 Situazione in Europa	20
3.2 Situazione ad Asiago.....	21
4.Effetti sulla salute e sull'ambiente	24
4.1 Salute.....	24
4.2 Ambiente	26
5.SQM (Sky Quality Meter).....	27
5.1 Lo Sky Quality Meter.....	27
5.2 Calibrazione	28
5.3 L'SQM di Asiago	29
6.Analisi delle curve di brillantezza	31
6.1 Analisi dei grafici	33
6.2 Contributo dei veicoli.....	39
6.3 Contributo della Via Lattea.....	43
7.Confronto con la letteratura	50
8.Conclusioni	59
Ringraziamenti	62
Bibliografia	63

Appendice	66
-----------------	----

Introduzione

Negli ultimi anni con il processo d'industrializzazione di molti paesi sempre crescente si è sviluppato di pari passo il fenomeno dell'inquinamento luminoso. Esso consiste nell'emissione e successiva diffusione di luce artificiale che altera i livelli di luce naturale del cielo notturno. Alcuni dei paesi industrializzati hanno dei cieli così luminosi per cui non c'è il completo adattamento dell'occhio alla visione notturna, e la Via Lattea non è più visibile per il 60% degli europei e l'80% degli americani, (Falchi e Cinzano, 2016).

Ciò è causato da una crescente richiesta e da un errato utilizzo delle fonti di luminosità artificiale da parte della società odierna, come ad esempio l'utilizzo di impianti d'illuminazione inquinanti, la diffusione di alcuni tipi di lampade, soprattutto quelle a LED bianco-blu e lo spreco inutile di energia.

L'impatto dal punto di vista astronomico è molto importante: c'è sempre la ricerca continua di luoghi bui dove effettuare le osservazioni e molti dei telescopi europei sono stati installati in altri siti extraeuropei. Gli effetti dell'inquinamento luminoso sono anche visibili e non trascurabili sulla salute dell'uomo, sulla fauna e sulla flora. Infatti i cicli circadiani dell'uomo vengono alterati, aumentando il rischio di riscontrare tumore o altri tipi di malattie, (Falchi et al., 2011). Sugli animali, invece, gli effetti sono visibili nell'alterazione della migrazione, accoppiamento, caccia ecc., infine sulla flora nell'aumento dell'attività di fotosintesi.

Lo scopo di questo lavoro di tesi consiste nello studiare l'andamento dell'inquinamento luminoso nelle ore notturne e nell'individuare i principali inquinanti, in particolar modo all'Osservatorio astronomico di Asiago facendo un confronto con Padova e Passo Valles. A tal fine vengono usati i dati raccolti dall'SQM (Sky Quality Meter), ottenendo così le *curve di brillantezza* che mostrano l'andamento durante la notte della magnitudine del cielo. Questi andamenti vengono maggiormente influenzati dalla luce artificiale: illuminazione pubblica, privata e traffico veicolare. Viene inoltre studiata l'influenza della luce naturale. In particolare si evidenzia il contributo della Via Lattea in siti meno contaminati come Asiago (45°52'N 11°31'E) e Passo Valles (46°20'18.96''N 11°48'02.52''E). Tale contributo risulta invece trascurabile in siti fortemente contaminati da luce artificiale come ad esempio Padova (45°24'23''N 11°52'40''E).

Capitolo 1

Luminosità del cielo notturno

Il cielo notturno ha una sua luminosità naturale che anche nel cielo più buio può interferire con le osservazioni astronomiche.

Oltre a questa luminosità naturale, si può riscontrare in molte zone *l'inquinamento luminoso*, un tipo d'inquinamento dovuto alle luci private, stradali e commerciali che disperde la luce in atmosfera.

1.1 Luminosità naturale del cielo notturno

La luminosità naturale del cielo notturno è causata da:

- fonti extraterrestri, quali luce zodiacale, stelle e Luna;
- fonti terrestri, ad esempio i fenomeni atmosferici quali l'attività aurorale e airglow.

Gli elementi della radiazione di fondo di origine extraterrestre sono:

- *luce zodiacale* è un bagliore osservabile in cieli bui e senza Luna poco dopo il tramonto e poco prima dell'alba, lungo l'eclittica, nei dintorni del Sole. È causato dalla diffusione della luce solare da parte dei granelli di ghiacci e polveri, rilasciate sul piano orbitale da comete o collisioni tra asteroidi, che costituiscono le polveri interplanetarie. Questa diffusione della luce solare avviene nel visibile e come emissione di corpo nero a 160-220K nell'infrarosso. Tale luminosità ha due massimi sul piano dell'eclittica, uno in direzione del sole e un altro nella direzione esattamente opposta, nel punto antisolare (*gegenshein*), a causa del *back scattering* della luce solare dalle particelle di polveri e ghiacci, (figura 1.1). Cinzano (1998) afferma che il contributo della luce zodiacale in cd/m^2 (unità di misura della luminanza), varia lungo l'eclittica da $120 \times 10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$ a $56 \times 10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$.

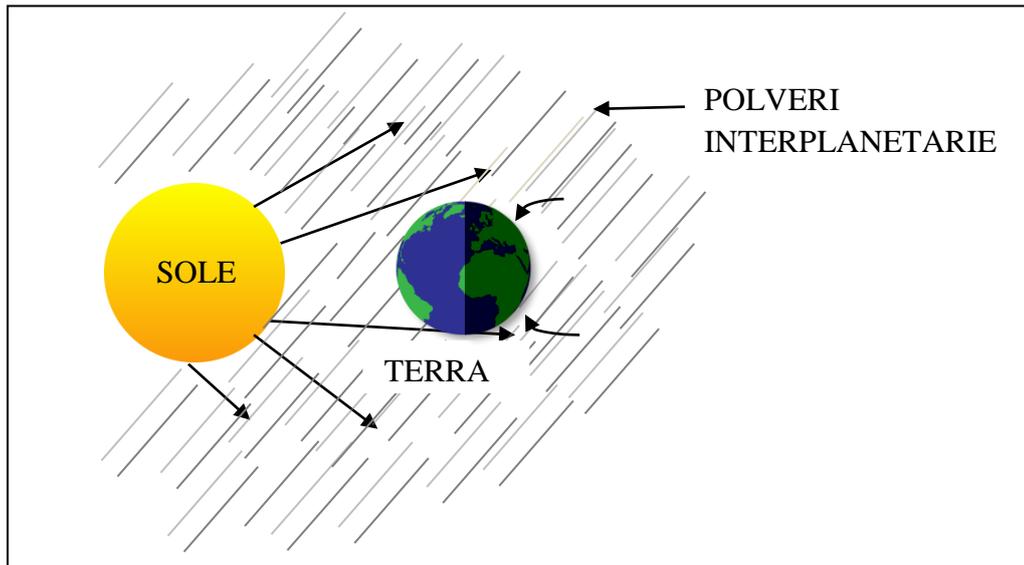


Figura 1.1 Rappresentazione schematica dello scattering e back scattering della luce zodiacale da parte delle polveri interplanetarie.

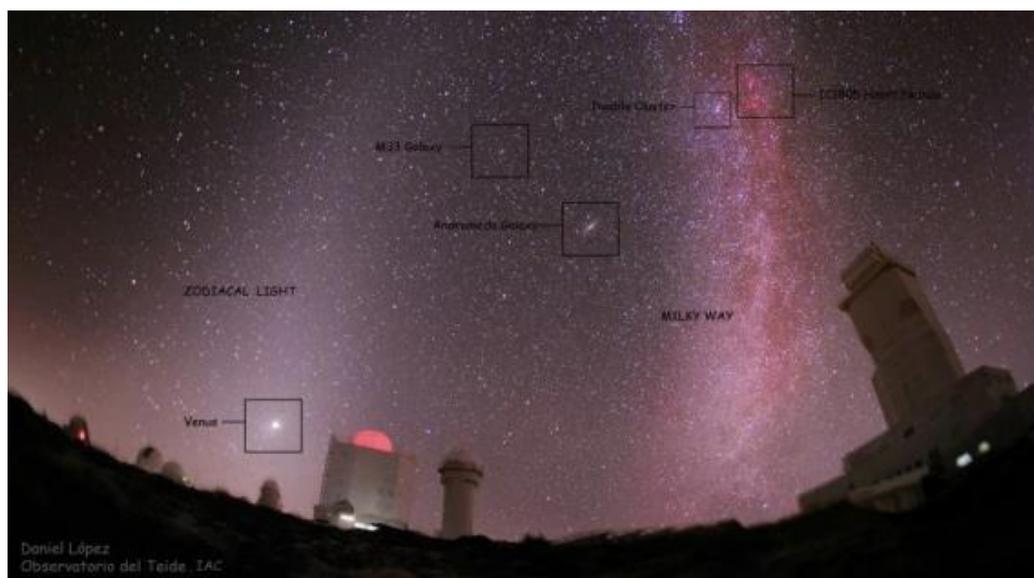


Figura 1.2 Confronto Via Lattea (a destra) e luce zodiacale (a sinistra), Teide Observatory a Tenerife, (Web: www.focus.it).

- **Luce stellare integrata:** luminosità dovuto a stelle e sorgenti cosmiche, seppur deboli da osservare in ottico, risidenti sul piano galattico. Tale luminosità varia fortemente da un massimo di $250 \times 10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$ in corrispondenza del piano galattico (costellazione del Sagittario) ad un minimo di $20 \times 10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$ in corrispondenza dei poli galattici (costellazione dell'Auriga). Seppur sia un contributo debole, va considerato poiché influisce sulle misure.

- *Luce galattica diffusa*: è la luce stellare diffusa dalle polveri interstellari. Ha un massimo lungo la Via Lattea e varia tra 6×10^{-6} cd m^{-2} e 14×10^{-6} cd m^{-2} .
- *Fondo cosmico integrato*: causato dalle sorgenti cosmiche visibili, però fornisce un valore talmente basso da poter essere trascurato nella nostra analisi.

Le costituenti della radiazione di fondo cosmico di origine terrestre sono:

- *Airglow*: è un bagliore diffuso dovuto a reazioni chimiche tra elementi presenti in atmosfera, con conseguente fotoemissione, eccitazioni di costituenti e chemiluminescenza, cioè emissione elettromagnetica nel visibile e vicino infrarosso, associata alle reazioni dell'ossigeno e azoto con lo ione idrossido. Infatti, molecole come N_2 , O_2 , O_3 , H_2O , H_2O_2 , H_2 vengono dissociate in N, O, O_2 , OH, H. Tra i 90 km e i 100 km di altezza (mesosfera), si verificano le reazioni neutre procurando l'energia necessaria ad eccitare l'emissione rotazionale e vibrazionale del radicale OH. Tra i 250 e i 300 km di altezza (ionosfera) hanno luogo reazioni ioniche che producono abbastanza energia per eccitare l'emissione degli atomi di ossigeno neutro provocando un'intensa riga a 6300 Å, (Cinzano, 1998).

Patat (2010) afferma che nel blu lo spettro è contraddistinto dal cosiddetto *airglow pseudo-continuum*, e le emissioni, accentuate sotto i 400nm e dominanti nell'UV, sono dovute alle *bande di Herzberg e Chamberlain* dell'ossigeno molecolare O_2 . Le *bande di Meinel* dell'OH, invece, sono presenti nel visibile ma soprattutto nell'IR, ed emesse a 85 km di altezza. Le bande Meinel cominciano ad apparire nel rosso e sono rilevanti nel vicino IR, e a causa di ciò il cielo è molto più scuro nel visibile-blu, diventando più luminoso quando si avvicina al rosso.

- *Luce delle aurore*: è luce generata in alta atmosfera (ionosfera) dall'interazione con il vento solare, formato da particelle cariche quali protoni ed elettroni che eccitano le particelle presenti in atmosfera, le quali diseccitandosi emettono in diverse lunghezze d'onda per poi muoversi sulle linee di campo terrestre. Tuttavia questa luminosità è visibile solo ai poli geomagnetici e varia con l'attività solare.



Figura 1.3 La fascia sottile in verde che si estende lungo tutto l'orizzonte della Terra, è l'airglow, a sinistra le aurore, sempre in verde, a tratti sovrapposta all'airglow, (Web).

1.2 Luminosità artificiale

La luce naturale del cielo notturno appena descritta è alterata dall'emissione di luce artificiale che causa il cosiddetto inquinamento luminoso che è definito quindi come: *“Ogni radiazione di luce diretta al di fuori delle aree a cui essa è funzionalmente dedicata, ed in particolare verso la volta celeste”* Infatti la luce dispersa verso l'alto illumina le particelle sospese in atmosfera creando così uno sfondo luminoso.

Esempi di fonti di luce artificiale sono: illuminazioni stradali, impianti sportivi, illuminazioni di opere e monumenti, illuminazione di edifici esterna e interna e fari dei veicoli. L'inquinamento luminoso oltre a essere l'effetto di un dispendio economico inutile, crea considerevoli problemi sia all'ambiente, alla salute umana che alle osservazioni astronomiche. Molte osservazioni astronomiche devono essere eseguite fuori dal continente europeo, e i più grandi telescopi europei sono stati installati o alle Canarie o in altri posti remoti, generalmente nel continente sudamericano. L'osservazione della Via Lattea è diventata un fenomeno ormai raro in Europa o America settentrionale. Ciò è causato da un cattivo uso degli impianti d'illuminazione urbana, che seppur disperdendo una piccola quantità di luce sopra l'orizzonte, questa a causa dello *scattering* è diffusa anche per un centinaio di chilometri prima di essere finalmente deviata verso il suolo, (Patat, 2010).

Come viene dispersa e successivamente diffusa tale radiazione?

1.2.1 Emissione diretta sopra l'orizzonte

Prendiamo la verticale passante per la sorgente luminosa, come in figura 1.4 e il fascio di piani passante per tale retta, definiamo γ l'angolo tra la verticale e la direzione presa in considerazione e C l'angolo tra il piano e la parallela al piano stradale: per $C=0^\circ$ avremo il piano parallelo alla strada, per $C=90^\circ$ quello perpendicolare. Poi tali coordinate, C in ascissa e γ in ordinata, sono rappresentate in un piano detto *diagramma isocandela*, come in figura 1.5.

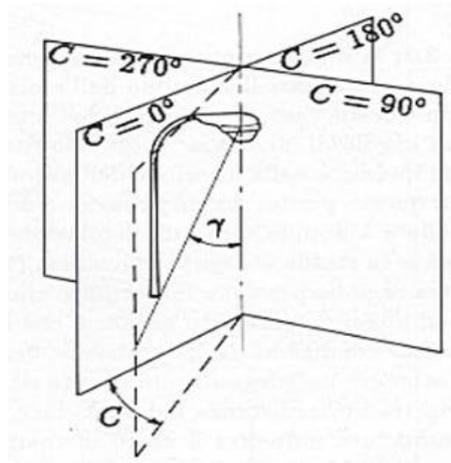


Figura 1.4 Rappresentazione degli angoli C e γ . Per $C=0^\circ$ piano parallelo al piano stradale, $C=90^\circ$ piano perpendicolare al piano stradale, (Cinzano, 1998).

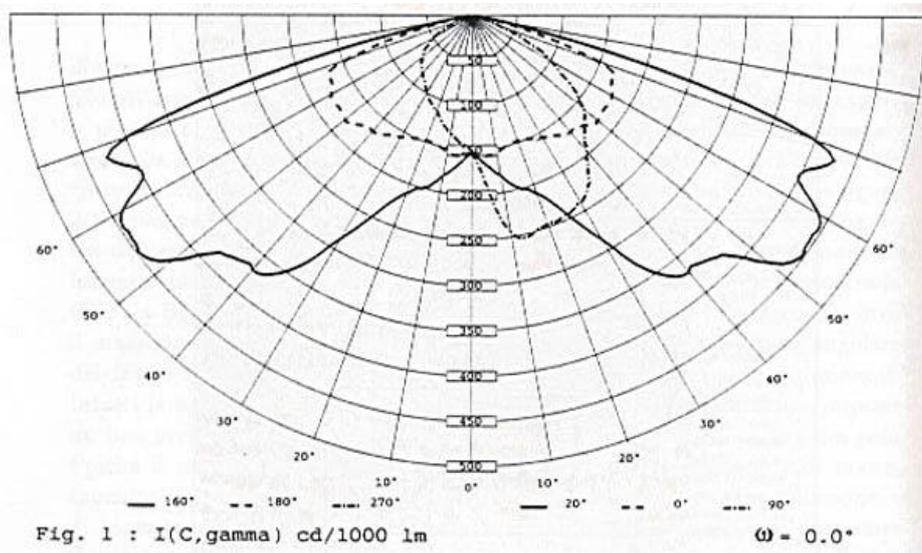


Figura 1.5 Esempio di diagramma isocandela, C in ascissa e γ in ordinata. (Cinzano, 1998).

Per garantire una sufficiente illuminazione stradale, la distribuzione di luce deve avere un angolo γ che sia elevato, in tal modo l'intensità arriva sulla strada con un angolo di incidenza che permette la massima riflessione in direzione dell'automobile, come mostrato in figura 1.6.

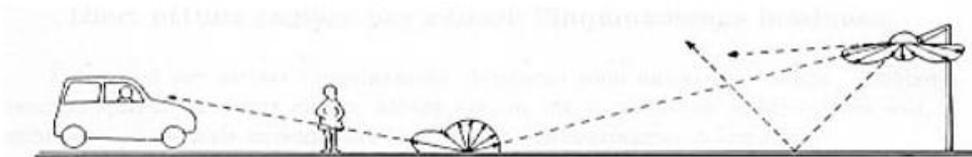


Figura 1.6 Rappresentazione schematica dell'angolo incidente γ sul piano stradale e della successiva riflessione. Al valore massimo di γ si ha la maggiore riflessione in direzione dell'automobile, (Cinzano, 1998).

In tal modo è possibile illuminare la strada da un lato a un altro, inoltre la distribuzione di luce deve essere tale da illuminare tutta la strada, ma ai bordi ridursi rapidamente a zero per evitare inutili perdite di luce. Tale angolo è chiamato *angolo limite* e l'intensità emessa dal sistema ottico scende bruscamente a zero, così si evita sia l'*abbagliamento* dell'autista, sia la dispersione della luce in cielo.

Alcuni apparecchi sono montati su pali a sbraccio per essere avvicinati al centro della strada e produrre un'inclinazione dell'ottica nulla o molto

piccola (minore o uguale di 5°) in modo che la sorgente risulti totalmente schermata.

L'inclinazione dell'ottica rispetto il piano orizzontale è il risultato della somma dell'angolo di sbraccio del palo con l'angolo dell'ottica rispetto l'armatura ν meno l'inclinazione dell'attacco rispetto l'armatura.

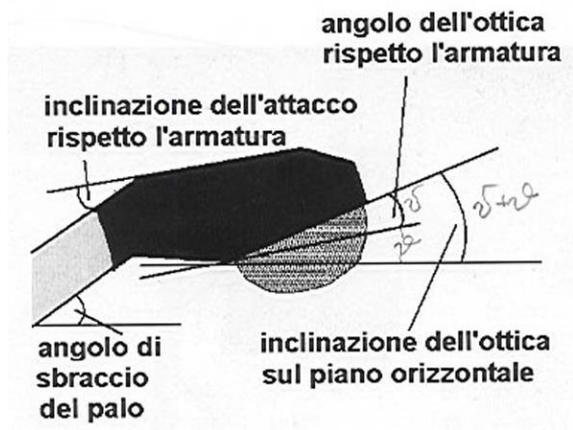


Figura 1.7 Rappresentazione schematica degli angoli dei pali a sbraccio, (Cinzano, 1998).

La luce inviata sopra l'orizzonte cresce quindi con l'inclinazione ottica, questa dovrebbe essere nulla o minore di 5° , poiché ad angoli superiori l'inquinamento luminoso diventa rilevante.

1.2.2 Apparecchi d'illuminazione per arredo urbano

Tra gli apparecchi d'illuminazione per arredo urbano molti sono inquinanti e disperdono notevoli quantità di luce.

Il sistema ottico di un apparecchio d'illuminazione è formato da un *riflettore* di alluminio che posto nella parte alta dell'armatura ha come scopo di riflettere la luce emessa dalla lampada. In genere sono preferibili apparecchi su pali a sbraccio che li avvicinino al centro della strada. Tal volta il vetro di protezione potrebbe non esserci proprio, però è utile poiché oltre ad evitare che l'ottica si sporchi, filtra le radiazioni UV emesse dalla lampada che altrimenti contaminerebbero la banda UV nelle osservazioni astronomiche.

Per avere, quindi, degli impianti di illuminazione efficienti ma che non emettano più del dovuto disperdendo quantità inutili di luce, bisogna utilizzare apparecchi *totalmente schermati*, detti anche *fully-shielded* o *full cut off*. Essi non emettono luce sopra il piano orizzontale passante per il centro della lampada.

Un esempio di questo tipo di apparecchio è quello in figura 1.8, che risulta totalmente schermato con un'inclinazione dell'ottica nulla.



Figura 1.8 Esempio di apparecchio totalmente schermato con vetro piano, (Cinzano, 1998).

Per gli apparecchi d'illuminazione inquinanti, con alcuni accorgimenti, è possibile ottenere degli apparecchi schermati senza rinunciare all'attenzione per l'estetica. Alcuni esempi sono:

- *Apparecchio a lanterna non schermato*: Tipica lanterna con forma d'epoca come in figura 1.9. È molto inquinante poiché disperde il 35%-45% del flusso verso l'alto, inoltre è abbagliante poiché la luce attraversa le lastre di vetro laterali, ma la strada sotto la lanterna rimane buia come si vede dal diagramma fotometrico.

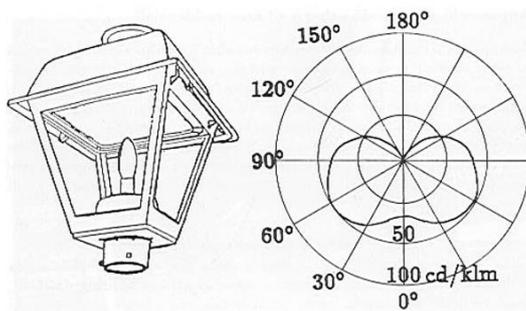


Figura 1.9 Apparecchio con lanterna a forma d'epoca inquinante. Accanto il rispettivo diagramma fotometrico: la luce attraversa i vetri laterali, ma la strada sotto la lanterna resta buia, (Cinzano, 1998).

- *Apparecchio a lanterna fortemente schermato*, questo tipo di lampada è fortemente schermato, poiché la lampada è montata in un riflettore all'interno del tettuccio, i cui bordi provocano il taglio dell'emissione di luce per angoli grandi rispetto la verticale, ciò nonostante non illumina bene la zona sottostante e comunque non riduce la riflessione verso l'alto causata dal sostegno e da altre parti dell'apparecchio, (figura 1.10).

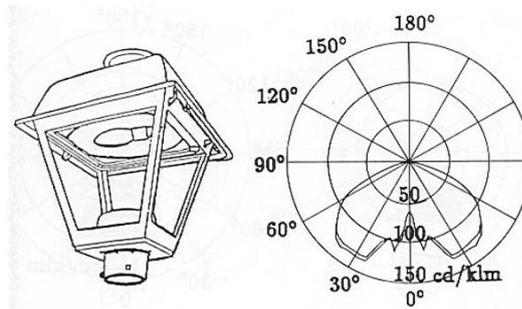


Figura 1.10 *Apparecchio con lanterna a forma d'epoca fortemente schermata. Accanto il rispettivo diagramma fotometrico: non vi è emissione per angoli grandi rispetto la verticale, (Cinzano, 1998).*

- *Globo*: Lampada contenuta all'interno di un vetro trasparente sostenuta da un palo, il quale fa ombra sulla strada. Tale apparecchio tende a disperdere tutta la luce verso l'alto, (figura 1.11). Per di più, affinché si abbia una sufficiente illuminazione stradale, bisogna usare lampade molto potenti, ciò aumenta il fattore inquinante.

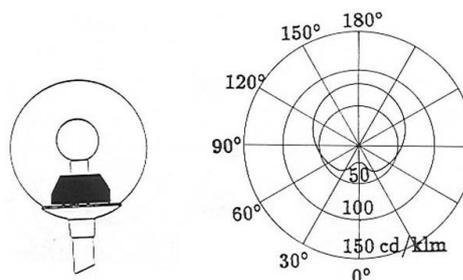


Figura 1.11 *Apparecchio con globo, altamente inquinante. Accanto il rispettivo diagramma fotometrico: la luce viene dispersa verso l'alto e il sostegno fa ombra sulla strada, (Cinzano, 1998).*

- *Globo con alette frangiluce*: Sulla lampada, all'interno del globo, viene utilizzato un apparecchio compatto, formato da alette,

moderando l'emissione sopra l'orizzonte, rimanendo comunque significativa.

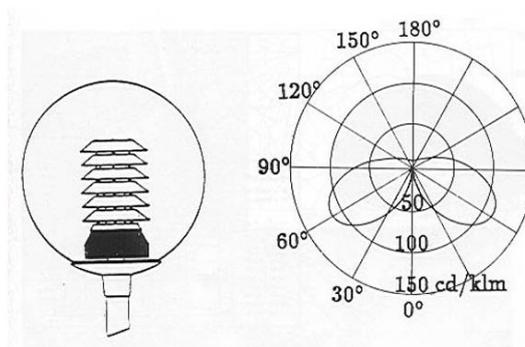


Figura 1.12 Apparecchio con globo e alette frangiluce, moderatamente inquinante. Accanto il rispettivo diagramma fotometrico: le alette moderano l'emissione sopra l'orizzonte, ma rimane importante, (Cinzano, 1998).

- *Globo fortemente schermato*: la metà superiore è opaca e racchiude la lampada e un riflettore totalmente schermato, la parte inferiore liscia trasparente. Tuttavia l'apparecchio non può definirsi totalmente schermato a causa delle riflessioni prodotte dal vetro trasparente, (figura 1.13).

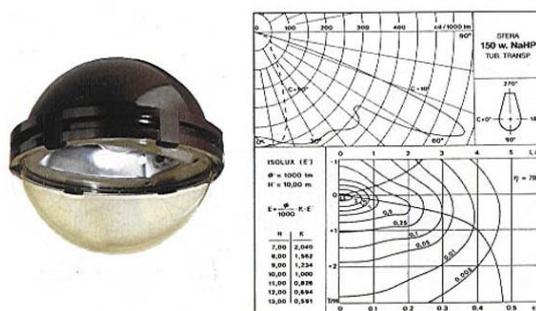


Figura 1.13 Apparecchio con globo fortemente schermato. Accanto il rispettivo diagramma fotometrico: l'apparecchio non è totalmente schermato a causa delle riflessioni prodotte dal vetro inferiore dell'apparecchio, (Cinzano, 1998).

- *Globo con vetro piano*: l'apparecchio con vetro piano risulta totalmente schermato, inoltre essendo appesa ad un supporto, esso non fa ombra sulla strada e quindi produce un'illuminazione ottimale, (figura 1.14).

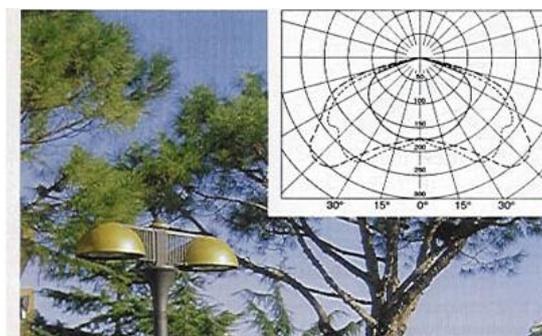


Figura 1.14 *Apparecchio con globo totalmente schermato. Accanto il rispettivo diagramma fotometrico: l'illuminazione ottimale è dovuta alla forma piana del vetro nella parte inferiore e al supporto al quale è appeso, (Cinzano, 1998).*

Per quanto riguarda l'illuminazione d'impianti sportivi e di strutture architettoniche vengono usati *proiettori simmetrici* e *asimmetrici* (figura 1.15), tra i due i primi disperdono luce mentre i secondi, a parabola, consentono di indirizzare la maggior parte della luce sull'area interessata, se però montati orizzontalmente piuttosto che verticalmente.

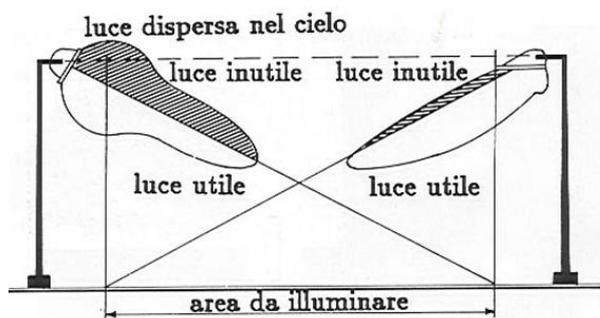


Figura 1.15 *Proiettore simmetrico a sinistra e asimmetrico a destra, quest'ultimo consente di indirizzare la luce sull'area interessata, (Cinzano, 1998).*

1.2.3 Propagazione in atmosfera

Una volta che parte della luce emessa dalle lampade è diretta verso il cielo, produce quel bagliore tipico dell'inquinamento luminoso che ostacola le osservazioni. Questo è dovuto a dei fenomeni fisici che avvengono in atmosfera. Essa è composta principalmente da azoto (78%) e ossigeno

(21%) ed altre molecole in quantità minime (CO₂ e gas vari), inoltre vi è la presenza di alcuni gas (H₂O, CO, NO₂, O₃ ecc.) variabili con le condizioni meteorologiche e l'inquinamento atmosferico locale. Inoltre sono presenti gli aerosol che sono un misto di particelle solide o liquide, cristalli o polveri presenti in atmosfera. Qui avvengono due fenomeni di diffusione (*scattering*), in cui le particelle non sono perse ma scatterate:

- *scattering di Rayleigh*, provocato da parte di particelle di dimensione inferiori alla lunghezza d'onda, dipende dalle interazioni con le molecole che ci sono lungo la linea di vista N , dalla distanza dall'osservatore R , da ϕ che è l'angolo formato tra la direzione del fascio d'incidenza e quello di osservazione, e decresce con la quarta potenza della lunghezza d'onda λ secondo la legge:

$$\frac{I}{I_0} = c \frac{1 + \cos^2 \phi}{\lambda^2}$$

La costante c vale:

$$c = \frac{8N\pi^4}{R^2}$$

Un esempio dello scattering di Rayleigh è il colore blu del cielo.

La radiazione diffusa è massima lungo la linea di incidenza e minima a 90°.

- *scattering di Mie*, è dovuto a particelle di grandezza superiori o paragonabili alla lunghezza d'onda (ad es. aerosol) e in prima approssimazione è quasi costante con la lunghezza d'onda λ , secondo la legge (con λ espresso in micron):

$$K_{\text{mic}} = 0.006\lambda^{-0.8}.$$

Lo scattering di Rayleigh, quindi, è rilevante rispetto a quello di Mie, soprattutto a lunghezze d'onda più brevi, da ciò ne segue che è importante l'altezza del sito astronomico per le osservazioni in ottico, e quindi l'altezza dell'atmosfera sovrastante.

Capitolo 2

Modelli Teorici

2.1 Legge di Walker (1977)

Walker definisce che l'intensità I emanata dalle luci artificiali è direttamente proporzionale alla popolazione P dei centri abitati e invece decresce con l'aumentare della distanza r , secondo l'equazione:

$$I = 0.01Pr^{-2.5}$$

I è l'aumento del fondo cielo causato dalle luci artificiali.

2.2 Modello di Garstang (1986)

Il modello di Garstang è basato su considerazioni geometriche e fisiche dettagliate, ed essendo uno dei modelli più completi per descrivere la propagazione della luminosità prodotta dai centri abitati, è stato utilizzato per creare delle mappe della brillantezza totale del cielo notturno e della magnitudine limite ad occhio nudo.

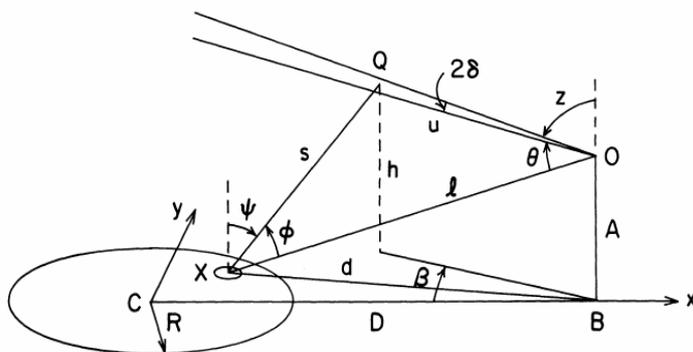


Figura 2.1 Rappresentazione geometrica del modello di Garstang.

Il modello di Garstang fa diverse assunzioni:

- Geometrica: principalmente considera la città con area circolare e illuminamento uniforme con centro in C e raggio R (come in figura 2.1). L'osservatore è situato nel punto O, a un'altezza A dalla città e

a distanza D dal centro della città (sul piano della città), mentre la città è ad un'altezza H dal livello del mare e viene assunto che la città abbia popolazione P.

- Intensità totale di luce irradiata: attribuiamo alla luce artificiale prodotta un numero L di lumen pro-capite, così la luce totale emessa dalla popolazione è LP. Una frazione F della luce prodotta dalla città è mandata direttamente nel cielo ad angoli sopra l'orizzonte, e la frazione (1-F) è irradiata verso il terreno. È inoltre assunto che F è proporzionale a Ψ^4 , dove Ψ è la distanza di un raggio di luce diretto verso l'alto dallo zenit, ciò significa che l'intensità di radiazione a $\Psi=0^\circ$ è nulla mentre a $\Psi =90^\circ$ l'intensità aumenta rapidamente. Invece per quanto riguarda la frazione 1-F di luce diretta verso l'orizzonte, di questa una frazione G è scatterata verso l'alto con una distribuzione *Lambertiana*, mentre la rimanente 1-G è assorbita. L'intensità totale diretta verso l'alto nella direzione Ψ in lumens sterad⁻¹ è:

$$I_{up} = \frac{LP}{2\pi} \{2G(1 - F) \cos \Psi + 0,554F\Psi^4\}$$

- Atmosfera: misto di polveri e molecole, descritta da un andamento esponenziale decrescente, in funzione dell'altezza rispetto il livello del mare e della relativa densità ed è assunto lo scattering di Rayleigh a una lunghezza d'onda di 5500Å. La distribuzione degli aerosol è descritta usando un profilo di decrescita esponenziale, introducendo il parametro K che è un indicatore della trasparenza dell'atmosfera, K=1 corrisponde agli aerosol che sono diffusi da un'aria abbastanza chiara al livello del mare.
- Viene calcolato il coefficiente di estinzione atmosferica EF, integrando l'estinzione della luce lungo il cammino percorso dal punto osservato che si trova ad una distanza zenitale OQ fino l'osservatore.
- Alla luminosità artificiale si somma quella naturale ricavata in banda V, $V=21.9 \text{ mag arsec}^{-2}$.

Il modello di Garstang è quindi descritto da:

$$I = fPUD^{-2}(DS)(EF)$$

in cui DS rappresenta il doppio scattering e quindi la duplice diffusione svolta sia dalle particelle che dagli aerosol. Il modello di Garstang applicato

alla luminosità delle città (omettendo la luminosità di fondo cielo) rende evidente come a varie distanze dall'osservatore e con la distanza dallo zenit fissato, in presenza di nebbia o foschia la luminosità allo zenit, nei dintorni di fonti luminose come all'interno della città, aumenta; ciò è una dimostrazione della diffusione che aumenta. Invece, in lontananza diminuisce poiché l'aumento dell'assorbimento prevale sull'innalzamento della diffusione.

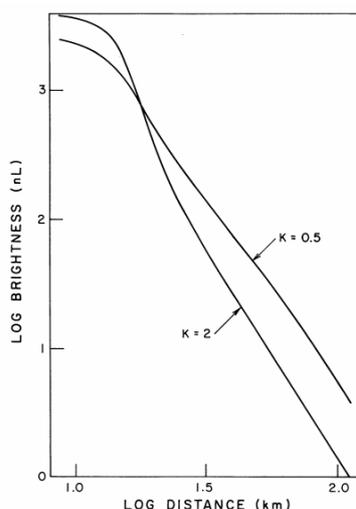


Figura 2.2 Relazione brillantezza-distanza. La brillantezza allo zenit è osservata nella città di Denver, senza considerare il fondo cielo naturale. Si nota che per un cielo leggermente nebbioso ($K=2.0$) la brillantezza allo zenit al centro della città è maggiore rispetto quella lontano da essa, (Garstang, 1986).

2.3 Modello di Soardo

Soardo (2010) ha eseguito uno studio sulla città di Torino, obiettando la conciliabilità tra il modello di Garstang con la realtà degli impianti d'illuminazione. Soardo suggerisce un nuovo modello, detto "Cavità", in cui apporta delle modifiche all'equazione di Garstang aggiungendo un termine lambertiano:

$$I(\varphi) = \frac{1}{2\pi} [2a_1 \cos(\varphi) + 2a_1(1 - \cos(\varphi)) + 0.554a_2\varphi^4]$$

in cui il primo addendo rappresenta le riflessioni diffuse, il secondo e il terzo, rappresentano l'emissione diretta verso il cielo degli impianti d'illuminazione.

Soardo identifica gli edifici e le strade cittadine come superfici lambertiane, cioè la loro brillantezza causata dagli impianti d'illuminazione è indipendente dalla direzione di osservazione, cioè riflette la luce incidente in modo uguale in tutte le direzioni come in figura 2.3.

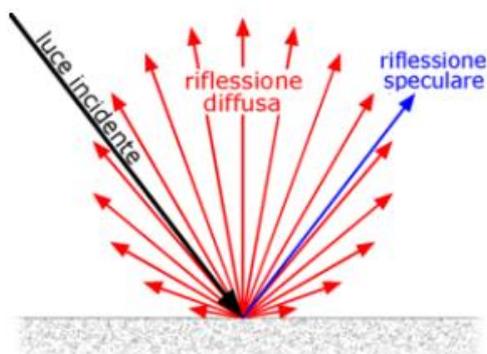


Figura 2.3 Distribuzione della luce riflessa da parte di superfici lambertiane, (Tesi Pomante, 2015).

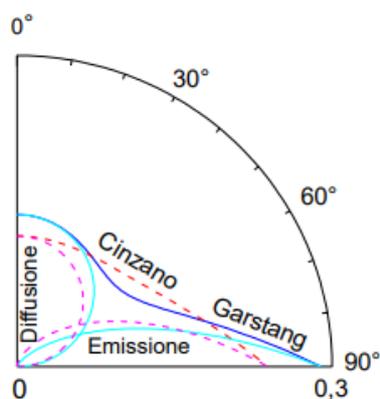


Figura 2.4 Ripartizioni relative dell'intensità luminosa di una città nel modello di Garstang (linee continue) e secondo Cinzano (linee tratteggiate), (Pomante, 2015).

Secondo Soardo il principale apporto luminoso alla brillantezza del cielo è dato dalla luce diffusa dalle superfici poiché gli apparecchi sono schermati da edifici presenti nella città, quindi l'emissione della luce diretta verso l'alto non induce sostanziali cambiamenti nella luminosità del cielo, in quanto è bloccata dagli edifici.

Tuttavia Cinzano spiega come gli apparecchi luminosi sono schermati dagli edifici solo in limitati casi, (Duchini, 2018):

1. Longitudinalmente le strade non sono schermate;

2. Per schermare gli apparecchi occorre che si accostino strade strette a edifici molto alti (es. strade con una larghezza minore di 10 metri e edifici più alti di 4-5 piani), ma ciò può realizzarsi solo nei centri città, invece, la maggior parte degli impianti è collocata in periferia o nei piccoli paesi;
3. Le misure da satellite confermano che le città hanno un'intensità maggiore a bassi angoli;
4. Misure da terra della parte predominante della luminanza artificiale del cielo (LAC) rispettano la previsione di Garstang e Cinzano che suppongono funzioni di emissione non lambertiane.
5. Osservazioni visuali da aerei e fotografie riprese da posizioni sopraelevate, mostrano per di più emissioni provenienti dai singoli apparecchi. La schermatura degli apparecchi si nota solo nei centri delle maggiori città e a bassi angoli sopra l'orizzonte ($0-2^\circ$).

Cinzano, quindi, dichiara che le emissioni che contribuiscono prevalentemente ad aumentare la luminosità del cielo notturno sono quelle emesse direttamente dagli apparecchi, quindi a bassi angoli sopra l'orizzonte.

Aubé (2015), a tal proposito, ha trattato la propagazione dell'inquinamento luminoso in presenza di ostacoli, dichiarando che la diffusione della luce dipende dalla presenza di ostacoli più alti degli impianti d'illuminazione, quindi anche montagne o colline. Ad esempio osservando a basse quote, coperti da montagne alte oltre le quali vi è una cittadina, si evidenzia il bagliore diffuso ma non le singole sorgenti artificiali, le quali sarebbero visibili da quote sufficientemente alte da superare gli ostacoli. Com'è evidente in figura 2.5 il contributo dello scattering in presenza di ostacoli alti 5 m ha lo stesso andamento del contributo dello scattering senza ostacoli.

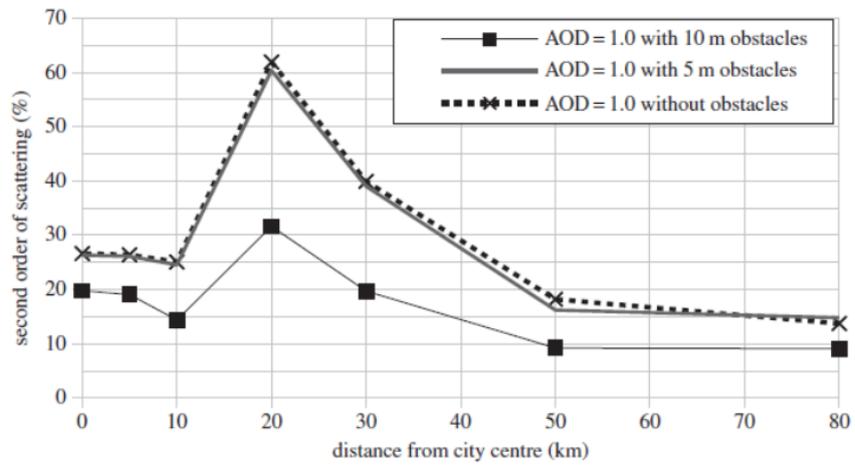


Figura 2.5 Contributo dello scattering in funzione della distanza dal centro della città, AOD (Aerosol Optical Depth)=1 cioè atmosfera inquinata, (Aubé, 2015).

Capitolo 3

L'inquinamento luminoso nel mondo

Falchi e Cinzano (2016) riportano che circa l'80% della popolazione mondiale e più del 99% di quella europea e statunitense vive sotto un cielo inquinato, la Via Lattea non è visibile per il 60% degli europei e circa l'80% degli americani, mentre alcuni dei territori non inquinati risultano essere Groenlandia, Cile, Mongolia, Siberia e alcune zone dell'Africa. I paesi industrializzati, soprattutto Singapore, hanno dei cieli così luminosi che l'occhio non riesce ad adattarsi completamente alla visione notturna. In generale la magnitudine di un cielo non contaminato e senza luna, lontano dalla Via Lattea e dalla luce zodiacale, è di 22 mag/arcsec² in banda V Johnson-Cousins. L'inquinamento luminoso provoca un'alterazione di questa brillantezza e riesce a influenzare anche zone, apparentemente non inquinate, lontane centinaia di chilometri.

3.1 Situazione in Europa

Per quanto riguarda l'Europa, Falchi e Cinzano (2016) riportano una mappa (figura 3.1) che mostra la situazione nel 2016, ai colori corrispondono i vari intervalli di luminosità in $\mu\text{cd}/\text{m}^2$. In tale lavoro è stato impostato il limite, sotto il quale il cielo può essere considerato non inquinato, all'1% della luminosità naturale. Le zone in nero rappresentano valori di brillantezza da 0 a 1.7 $\mu\text{cd}/\text{m}^2$; in blu da 1.7 a 14 $\mu\text{cd}/\text{m}^2$; in verde da 14 a 87 $\mu\text{cd}/\text{m}^2$; in giallo da 87 a 688 $\mu\text{cd}/\text{m}^2$; in rosso (da 688 a 3000 $\mu\text{cd}/\text{m}^2$) si ha la perdita della Via Lattea all'eccitazione dei coni (fotorecettori dell'occhio umano non sensibili alle scarse luminosità); in bianco (valori maggiori di 3000 $\mu\text{cd}/\text{m}^2$) zone con così forte luminosità che non c'è alcun adattamento dell'occhio umano al buio.

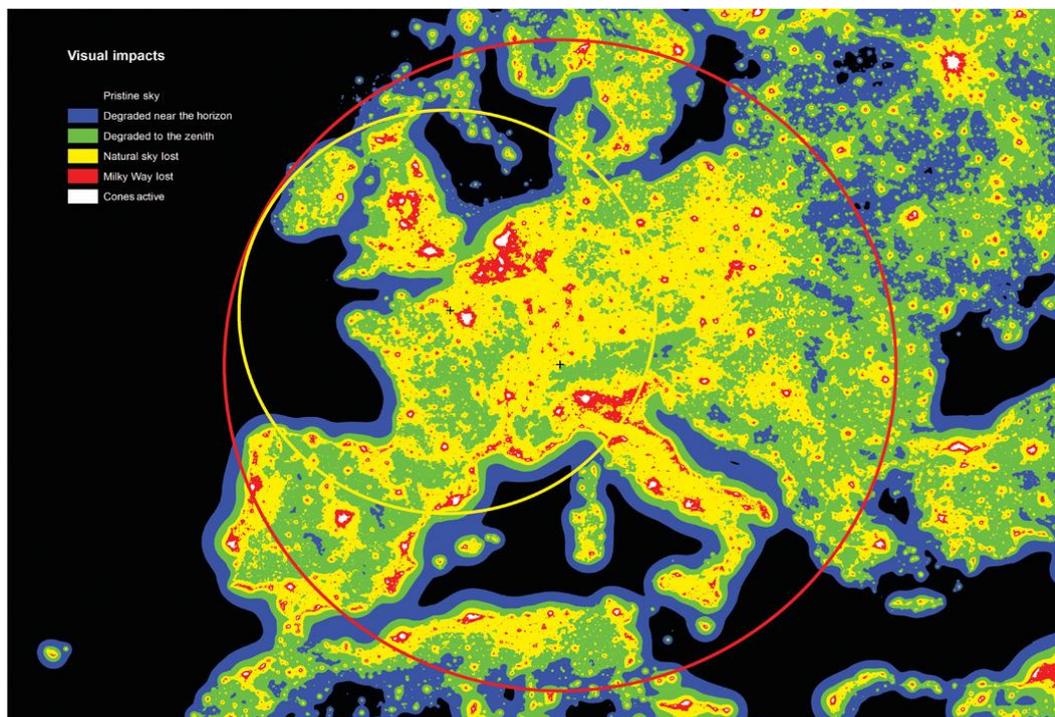


Figura 3.1 Mappa della luminosità in Europa. Il nero indica un cielo non contaminato, il blu, invece, uno contaminato all'orizzonte, il verde un cielo contaminato allo zenit, il giallo la perdita della luminosità naturale del cielo, il rosso la perdita della via Lattea, in bianco quelle zone in cui i coni nell'occhio umano vengono stimolati. I cerchi indicano un cielo relativamente incontaminato allo zenit (cerchio giallo) e di uno incontaminato (cerchio rosso), (Falchi e Cinzano, 2016).

La Via Lattea non risulta più visibile in Belgio, Paesi Bassi, alcune zone della Germania, pianura padana nell'Italia settentrionale, e in Inghilterra da Londra a Liverpool.

In Italia, la Pianura Padana è considerata uno dei territori più inquinati, (Tesi Duchini, 2018).

3.2 Situazione ad Asiago

Come già detto in precedenza, questo lavoro di tesi si focalizza sulla variazione di luminosità all'Osservatorio di Asiago (Veneto), i cui telescopi presi in considerazione sono localizzati uno all'osservatorio situato a 1050 m s.l.m. (Pennar) e un altro a Cima Ekar localizzato a 1366 m s.l.m.

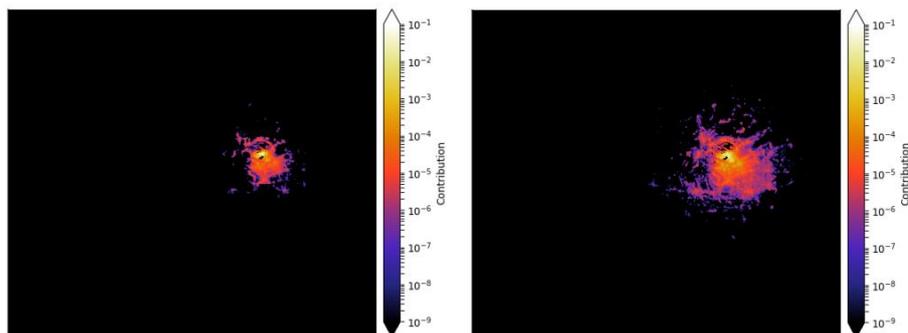
Nel 2011 è stata stilata una lista, utilizzando il modello teorico di Garstang, con i contributi delle città limitrofe agli osservatori, dalla quale si dimostra

come il 30% è il contributo della sola città di Asiago, il 70% dei restanti siti limitrofi: Vicenza, Bassano, Thiene, Schio, Padova, Gallio, Piovene, Marostica, Verona, (Tesi Vedovato, 2013). Milano contribuisce all'inquinamento luminoso di Asiago per il 3% (Carli, 2016).



Figura 3.2 Vista notturna della regione Veneto da ISS (International Space Station), (Simoneau, 2018).

In figura 3.2 è raffigurata la distribuzione geografica della luce ad Asiago (a) e a Ekar (b), da cui si nota che il contributo maggiore è dato dalle luci che stanno in prossimità dell'osservatorio (in bianco).



a) Osservatorio di Asiago (Pennar)

b) Osservatorio Cima Ekar

Figura 3.3 Contributi alla brillantezza del cielo in banda V: (a) Asiago, (b) Ekar, (Simoneau, 2018).

Un primo accorgimento utile, quindi sarebbe concentrarsi sull'illuminazione pubblica nei paesi limitrofi a entrambi gli osservatori.

Per quanto riguarda la Via Lattea, Vedovato (2013) conclude che è visibile allo zenit del cielo di Asiago ma con scarsa definizione, invece il resto è inserito in un cielo luminoso.

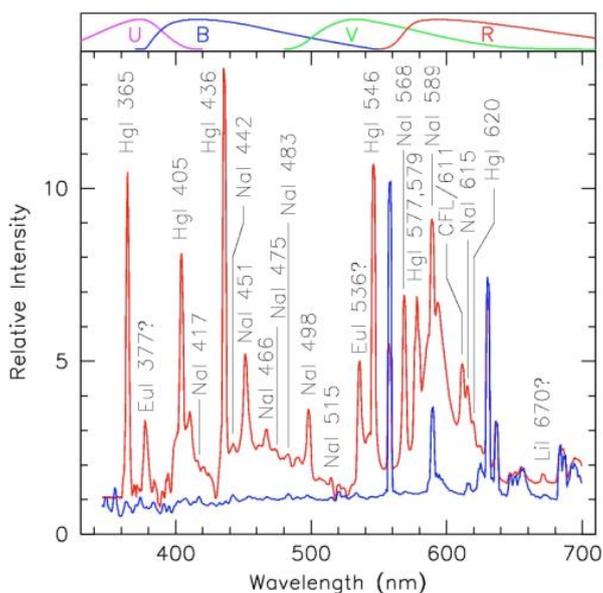


Figura 3.4 Confronto tra lo spettro ad Asiago (in rosso) e al Paranal (in blu). Sono segnate l'identificazione delle righe spettrali, si può notare come l'emissione non avvenga solo nel visibile, ma anche nel blu e nel violetto dello spettro, (Patat, 2010).

L'illuminazione artificiale contamina lo spettro di emissione del cielo: le righe di emissione del mercurio e del sodio interessano principalmente la banda visibile; vi sono inoltre intense linee di emissione nel blu e nel violetto, contaminando il dominio scotopico (visione al buio, vedi Paragrafo 4.1); altre righe sono prodotte da elementi contenute nelle lampade. Un esempio è mostrato in figura 3.3, in cui sono confrontati gli spettri del cielo notturno di Asiago e del Cerro Paranal in Cile, ad Asiago la riga del mercurio (436nm) risulta più marcata dell'ossigeno naturale (558nm), causando problemi per immagini a banda larga, (Patat, 2010).

Capitolo 4

Effetti sulla salute e sull'ambiente

L'inquinamento luminoso oltre ad avere un impatto non trascurabile sull'astronomia, rappresenta uno spreco di energia dal punto di vista economico, ad esempio in Italia il consumo per l'illuminazione pubblica è di 5977.0 GWh di cui il Veneto ne consuma 411.4 GWh, (ARPAV, 2015). Inoltre, influisce negativamente sulla salute dell'uomo e sull'ambiente.

4.1 Salute

L'esposizione alla luce notturna esterna diminuisce la produzione e secrezione della melatonina, un ormone prodotto in assenza di luce dalla ghiandola pineale che regola il ciclo sonno-veglia (ritmo circadiano). A influire su questa diminuzione sono la durata dell'esposizione alla luce, la sua intensità e la lunghezza d'onda. In particolare quest'ultima ha un ruolo rilevante, poiché è stato dimostrato che un'esposizione di luce monocromatica a 460 nm per due ore in tarda serata reprime la produzione di melatonina, invece, a 550 nm con la stessa intensità tali effetti non sono stati osservati, (Falchi et al., 2011).

La luce blu (tra i 380 e i 520 nm) è venti volte più efficace della luce bianca nel sopprimere la produzione della melatonina, (Brainard, 2001).

Una bassa illuminazione, come 1,5 lux, può avere effetti sul ritmo circadiano, e alterazioni di quest'ultimo provocano disordini metabolici e nel ciclo sonno-veglia, (Falchi et al., 2011).

Le misure fatte da Aubé (2015) per la città di Sherbrooke mostrano come frequentemente nelle camere dei cittadini arrivi una luminosità di 2 lux. La melatonina è un importante agente antitumorale, quindi bassi livelli nel sangue possono favorire la comparsa di tumore in particolare al seno e alla prostata, sembra avere anche effetti sulle malattie coronariche, e può influire su diversi disturbi come diabete, obesità (Falchi et al., 2011). Uno studio sui topi ha perfino mostrato come un'esposizione continua alla luce indebolisca le ossa e quindi anche le attività motorie, (Cowell, 2016).

Krishnan e Rakshit (2012) ipotizzano che il ciclo circadiano rallenti l'accumulo di danni neuronali in organismi invecchiati.

Nell'occhio umano si possono distinguere due tipi di fotorecettori: i coni e i bastoncelli. I primi con risposta fotopica quindi si adattano alla luce del

giorno, i secondi con risposta scotopica, cioè si attivano in condizione di scarsa luminosità. Quando grazie alla luce esterna è possibile riconoscere i colori allora i coni sono attivi. In città l'occhio non è mai adattato al buio, invece in un sito buio in cui vi è solo la luminosità naturale di un cielo stellato, la risposta è scotopica. I coni riconoscono i colori, i bastoncelli bianco e nero con un picco nel blu - verde.

Il blu è la lunghezza d'onda che causa il peggior inquinamento luminoso, sia perché viene scatterato più facilmente in atmosfera (*scattering* di Rayleigh), sia perché un'esposizione alle componenti blu rompe i normali ritmi della melatonina.

A tal proposito la sensibilità visuale umana è sostanzialmente nella parte verde e gialla dello spettro (linea sottile continua). I ritmi circadiani sono controllati dall'emissione di luce all'interno della curva tratteggiata. Il colore della luce emesso da una lampada a LED (blu - bianca) da 5500K, è rappresentata dalla linea spessa. Una grande porzione di questa luce cade all'esterno della regione fotopica e all'interno dei ritmi circadiani.

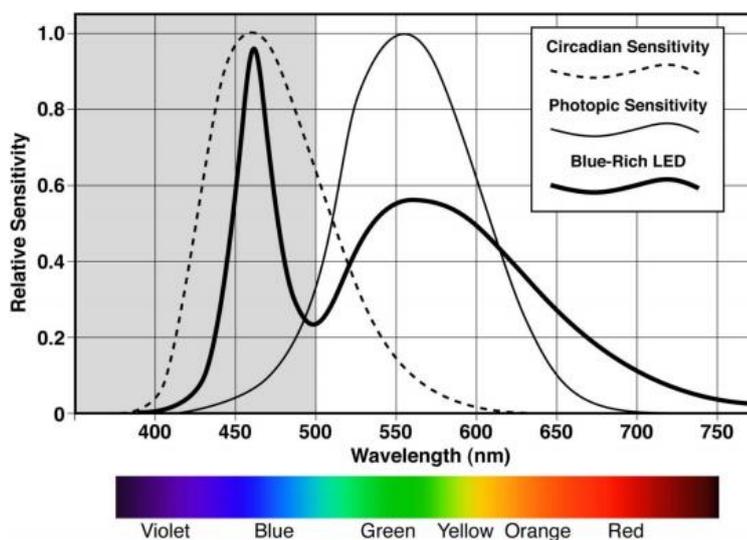


Figura 4.1 Curve della sensibilità circadiana (curva tratteggiata), fotopica (curva continua sottile), e dei Led con componenti blu (linea continua spessa) rispetto la lunghezza d'onda, (IDA: International Dark Sky Association, 2009).

IDA consiglia quindi l'uso di sorgenti inferiori a 3000K.

4.2 Ambiente

L'inquinamento luminoso influisce anche sull'ambiente, ad esempio se si considera che la luminosità emanata ad esempio da un centro commerciale sia 200 volte più brillante della luminosità di un ambiente naturale in notti vicine a quella della luna nuova, non c'è da stupirsi che l'intero ecosistema ne risenta. Gli effetti sono visibili nella caccia, accoppiamento, orientamento, migrazione e comunicazione per la fauna, e per la flora nell'aumento dell'attività di fotosintesi.

Infatti, molti insetti, che generalmente usano la luna per orientarsi sono disorientati dalle luci artificiali e sono quindi attirati e molte volte bruciati dal contatto. Le lucciole femmine mandano ai maschi dei segnali bioluminescenti per l'accoppiamento, che però sono disturbati dalle luci artificiali, (Tesi Carli, 2016).

L'emissione diretta di luce causa problemi alle migrazioni, importanti per la riproduzione e la sopravvivenza di molte specie di animale, e per quanto riguarda la luce diffusa dall'atmosfera, illumina il suolo in modo non trascurabile causando un effetto importante nel determinare la luminosità ambientale avvertita dall'animale.

Molte dinamiche predatore-preda variano a secondo dei livelli di luce presenti nell'ambiente, per alcuni animali gli atteggiamenti di caccia diminuiscono durante i periodi di elevata illuminazione lunare. La luce artificiale conduce alcuni animali a svolgere le loro attività trascurando il rischio di essere visti dai predatori.

Le tartarughe marine hanno difficoltà dopo la schiusa delle uova a causa dell'inquinamento luminoso: dopo la schiusa esse si dirigono verso il mare in modo da allontanarsi dalla spiaggia, ma a causa delle luci artificiali sono disorientate, (Navara e Nelson, 2007).

Capitolo 5

SQM (Sky Quality Meter)

I dati raccolti per questo lavoro di tesi sono stati ottenuti utilizzando lo strumento SQM (Sky Quality Meter), un misuratore che raccoglie i dati della brillantezza del cielo notturno che poi sono stati registrati nelle varie stazioni prese in analisi.

5.1 Lo Sky Quality Meter

E' un dispositivo piccolo e a basso costo, costituito da un fotodiodo di silicio (TAOS TSL237S) che misura la brillantezza media in un'area di cielo definita. Per utilizzare tale strumento, quindi, si orienta verso la zona di cielo da monitorare, e una volta acceso il dispositivo segue la registrazione dei valori di brillantezza mostrati nel display, espressi in mag/arcsec^2 , con una precisione di $\pm 0,10 \text{mag/arcsec}^2$ (Tesi Vedovato, 2013).

L'intervallo di lunghezza d'onda captato dal fotodiodo, inizialmente compreso tra i 320 e i 1050nm, con un picco a 680 nm, è ristretto con l'aggiunta di un filtro di tipo HOYA CM500 a un intervallo di sensibilità tra 320 e 720 nm, in modo da confrontare con la visione notturna dell'uomo.

Inoltre, utilizzando un sensore interno, l' SQM fornisce in automatico correzioni dovute alla dipendenza della temperatura, che seppur lievi non sono trascurabile, avendo così uno strumento stabile il cui intervallo di temperatura è assegnato dalla casa costruttrice, compreso tra i -25 e i 70°C .

Vi sono due tipi di SQM:

- SQM semplice, il quale risponde a una FWHM (Full Width at Half Maximum, mezza larghezza a metà altezza del profilo di risposta) di circa 84° ;
- SQM-L, risponde a un FWHM di circa 20° , (Vedovato, 2013).

In questa analisi viene usato il secondo modello di SQM.



Figura 5.1 Immagine di un SQM.(Web)

5.2 Calibrazione

Cinzano (2005) nell'intento di paragonare le misure dell'SQM ad altri dispositivi fotometrici condusse degli esperimenti in laboratorio, il cui risultato fu che la curva di risposta dell'SQM non corrisponde con nessuna delle curve di sistemi fotometrici standard, come si può notare in figura 5.2.

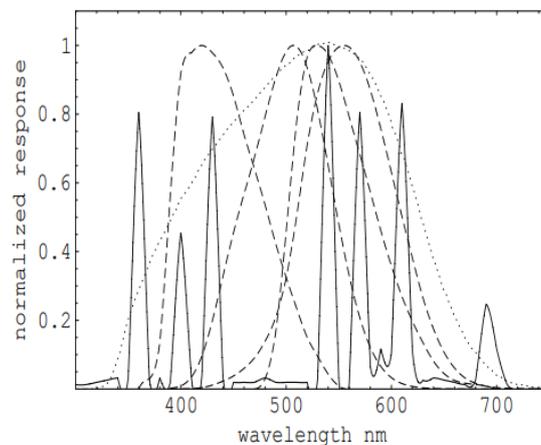


Figura 5.2 Risposta spettrale normalizzata dell'SQM (linea punteggiata) a confronto con la risposta della banda passante B-Johnson, CIE scotopica, V- Johnson e CIE fotopica (linee tratteggiate rispettivamente da sinistra a destra). Spettro di emissione di una lampada ad alta pressione di sodio(linea continua), (Cinzano, 2005).

Quindi bisogna considerare l'SQM come un nuovo sistema fotometrico e definire dei fattori di conversione opportuni per riportarsi ai sistemi standard.

I coefficienti di conversione rispetto alla banda fotometrica V-Johnson per sorgenti tipiche in ambito di luce artificiale, espressi in mag/arcsec² sono:

Lampada a vapori di mercurio +0.59

Lampada al Sodio ad alta pressione +0.48

Cielo naturale +0.54

Cielo inquinato +0.56

Per ridurre questi coefficienti al minimo sono stati identificati dei filtri adatti applicabili allo strumento ma non sono attualmente installati.

In generale per riportarsi al sistema fotometrico UBV-JOHNSON, per osservazioni allo zenith, con uno strumento standard, cioè senza filtri aggiunti, sarà necessario utilizzare un fattore di correzione da 0 a 0,3 mag/arcsec², (Cinzano, 2005).

5.3 L'SQM di Asiago

Gli SQM installati presso i telescopi astronomici di Asiago sono di tipo SQM-LE, in cui E indica Ethernet, potendo ricollegare il dispositivo alla rete per registrare flussi di continui di dati, e non vi è applicato nessun filtro. Essi si trovano al bordo di una cupola trasparente con al centro una Allsky-Camera, in modo da permettere lo scivolamento di ghiaccio o acqua sopra il sensore. La cupola impedisce le escursioni termiche, lo strumento viene mantenuto ad una temperatura di 20°C tramite un condizionatore, si possono quindi escludere errori per instabilità termica, (Vedovato,2013). Lo strumento è puntato allo zenit, e misura la brillantezza del cielo ad intervalli di 5 minuti.



Figura 5.3 A sinistra l'alloggiamento in cupola dello strumento (al centro è presente la AllSky-Camera e sulla destra l'SQM). A destra la vista interna alla cupola, (Web).

Capitolo 6

Analisi delle curve di brillantezza

È stata svolta un'analisi della brillantezza del cielo notturno nei siti Cima Ekar e Pennar ad Asiago e alcuni risultati sono stati confrontati con i dati ottenuti a Padova e Passo Valles. I valori della luminosità del cielo notturno sono stati ricavati usando l'SQM che ha registrato dati a intervalli regolari, ogni 5 minuti, in seguito sono stati selezionati dalla Dott.ssa Binotto (ARPAV), prendendo quelli corrispondenti a notti serene e *fotometriche*, vicino alla Luna Nuova.

La *notte fotometrica* consiste in: 95% sereno sopra i 30° e 85% sopra i 10° in sei ore consecutive serene, in cui la variazione di luminosità rientra in $0,05 \text{ mag/arcsec}^2$, (Vedovato, 2013).

I dati presi in considerazione per questo lavoro di tesi corrispondono ad un periodo tra il 2016 e 2019 per Cima Ekar e Pennar, e per un periodo tra 2017 e 2019 per Padova e Passo Valles.

Una volta ottenuti i dati, si sono ottenuti graficamente i valori di brillantezza in funzione del tempo, ottenendo così le *curve di brillantezza*, di cui un esempio è riportato in figura 6.1.

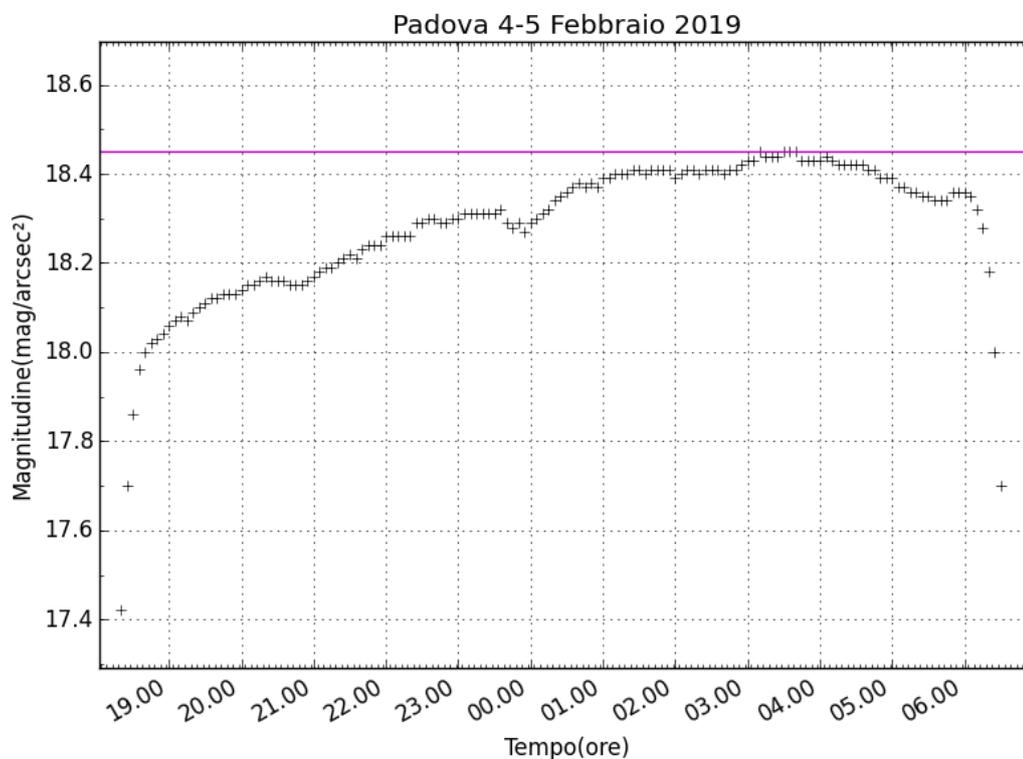


Figura 6.1 Esempio curva di brillantezza, i dati sono rappresentati con un intervallo di 5 minuti, la retta in magenta passa per il massimo della curva e serve a evidenziarne la pendenza.

Lo scopo di tale analisi è evidenziare la pendenza della curva di brillantezza che si traduce in una variazione di luminosità del cielo durante la notte.

In genere le curve di brillantezza hanno un andamento costante, delle fluttuazioni potrebbero indicare la presenza di nubi, per picchi più alti dell'andamento della curva ($\Delta\text{mag} > 0.3 \text{ mag/arcsec}^2$), la riduzione di brillantezza può essere causata da nubi a elevate altitudini. Picchi più bassi individuano un innalzamento della brillantezza, che potrebbe essere dovuto a nubi a bassa quota che riflette la luce che proviene da terra. Anche il passaggio di un aereo o dei fari di un'auto nelle vicinanze può provocare variazioni, seppur minime, nei dati registrati dallo strumento.

Queste curve in genere hanno un andamento regolare e laddove presentano delle irregolarità queste possono essere dovute a fattori meteorologici, come umidità, temperatura, vento e pressione atmosferica, che in una zona come il Veneto non sono trascurabili, (Duchini, 2018).

6.1 Analisi dei grafici

Da un confronto tra le curve di brillantezza del 4-5 febbraio a Padova, Ekar e Pennar in figura 6.2 è evidente come Ekar sia il sito meno contaminato. La fluttuazione di luminosità che avviene soltanto a Ekar diversamente dal Pennar, all'inizio della notte (19:05 circa), è da attribuire ad un fenomeno locale, del quale un'ipotesi potrebbe essere il passaggio dei fari di un veicolo.

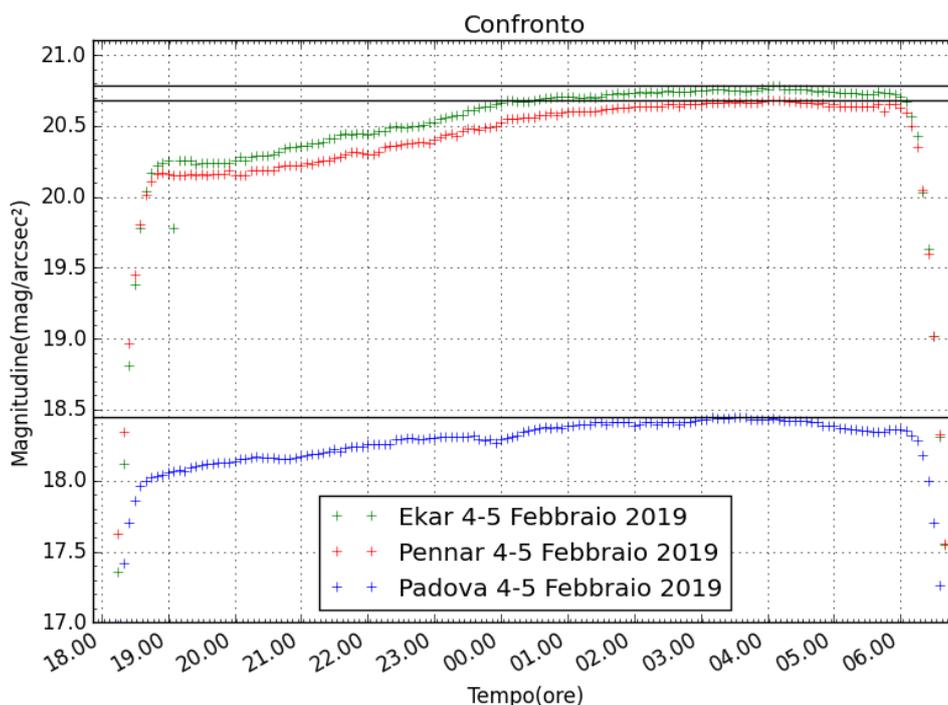


Figura 6.2 Confronto tra Ekar (verde), Pennar (rosso), Padova (blu) nella notte tra il 4-5 febbraio 2019. Le rette in magenta passano per i rispettivi massimi e servono ad evidenziare le pendenze. Ekar è il sito più buio, invece, Padova ha valori di magnitudine più bassi. La fluttuazione che avviene alle 19:05 circa soltanto ad Ekar può essere dovuta ai fari di un veicolo in prossimità dell'osservatorio. Si ha un andamento crescente durante la notte per poi rimanere costante ad Ekar e Pennar e invece decrescere a Padova.

Come si può notare in figura 6.2 si ha un graduale aumento di magnitudine fino a una certa ora della notte (Padova alle 03:10, Pennar e Ekar alle 04:10) per poi rimanere quasi piatta ad Ekar e Pennar, e iniziare di nuovo a diminuire a Padova verso le 04.40 del mattino. Un'ipotesi di tale andamento a Padova potrebbe essere dovuto sia al traffico sia a fattori meteorologici. Un aumento del traffico mattutino misto a una condizione meteo non

favorevole (quali nebbia, umidità ecc.) potrebbe portare al riflesso delle luci in atmosfera e a tale aumento di luminosità.

Inoltre, si può notare come il tramonto sia coincidente nelle tre stazioni, invece l'alba no, questo può essere dovuto a effetti topografici.

Quest'andamento di Padova è tipico delle notti prese in esame, un altro esempio è mostrato in figura 6.3, in cui la notte sembra più disturbata rispetto la precedente, ma comunque mostra un andamento crescente fino una certa ora della notte per poi decrescere di nuovo.

Per Ekar e Pennar, l'andamento delle notti è identico nelle due stazioni, il gradiente è identico a tutte le ore, in particolare alcune si appiattiscono dopo l'una o le due del mattino (figura 6.4), altre continuano ad avere una pendenza costante fino all'alba (figure 6.5, 6.6 la notte del 6-7 gennaio).

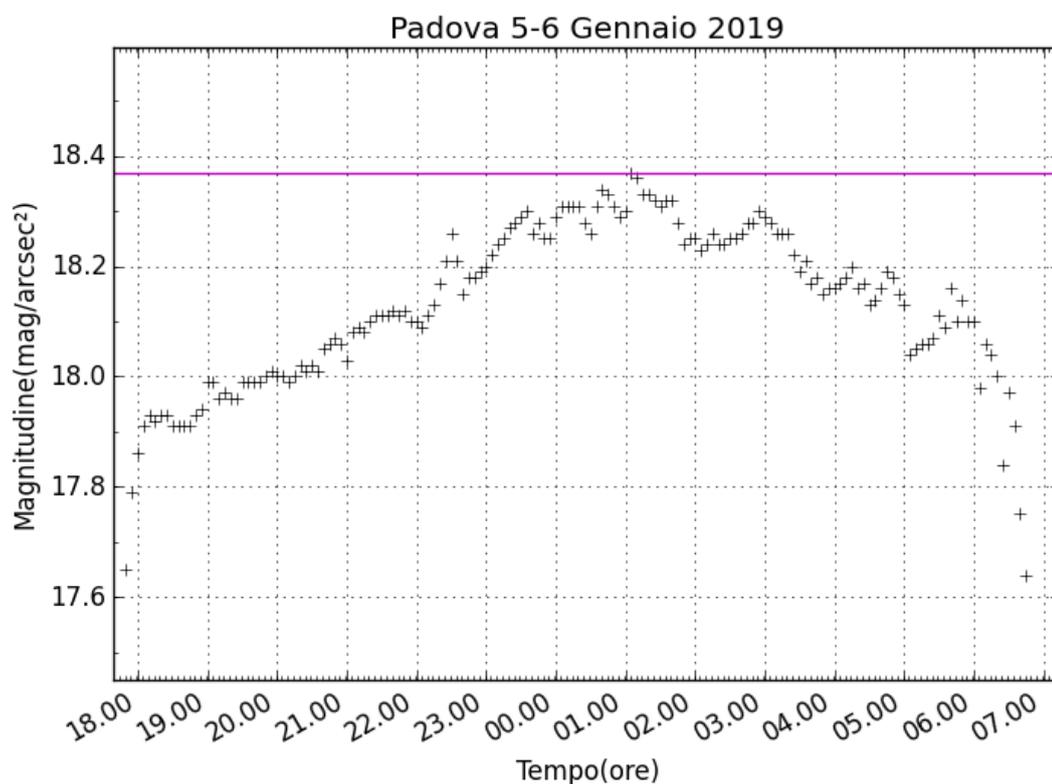


Figura 6.3 Curva di brillantezza Padova la notte del 5-6 gennaio 2019. La retta in magenta passa per il massimo e serve ad evidenziare la pendenza. Andamento tipico di Padova: crescente fino l'01:00 circa per poi iniziare a decrescere. La notte è disturbata probabilmente da nubi o altri fattori meteorologici. Notte prima del novilunio.

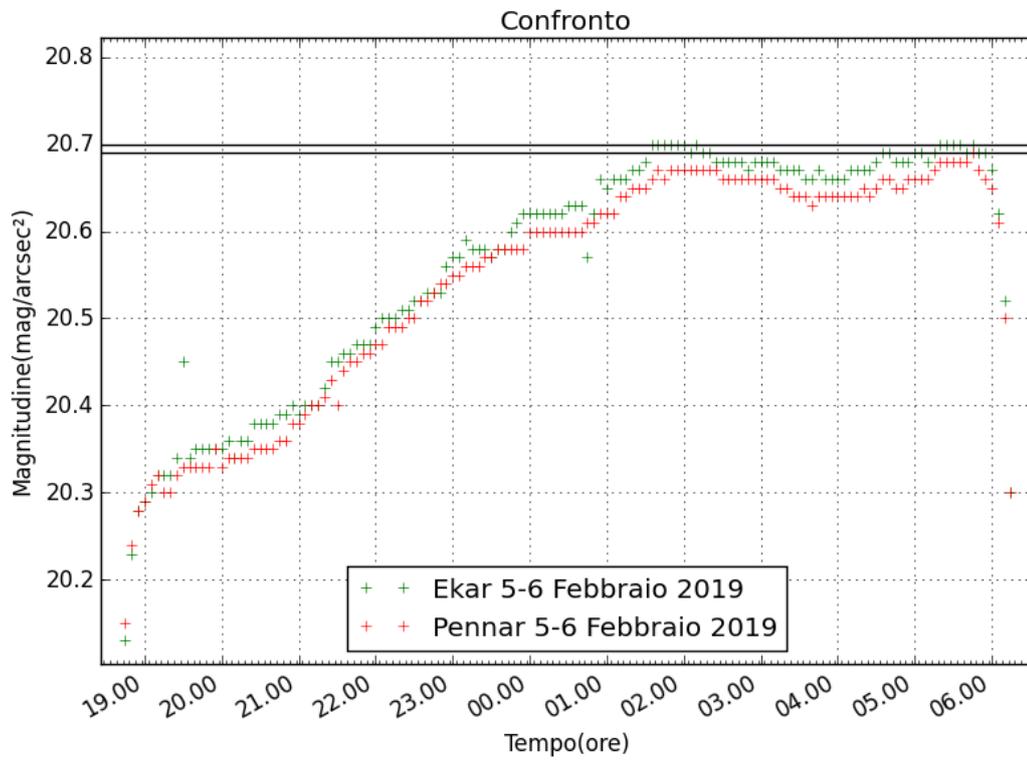


Figura 6.4 Curve di brillantezza Ekar (verde) e Pennar (rosso) la notte tra il 6 e il 7 febbraio 2019, le rette in nero passano per i rispettivi massimi e servono ad evidenziare la pendenza. Andamento crescente nella prima parte della notte (fino le 02:00 circa) per poi rimanere costante. Notte dopo il novilunio.

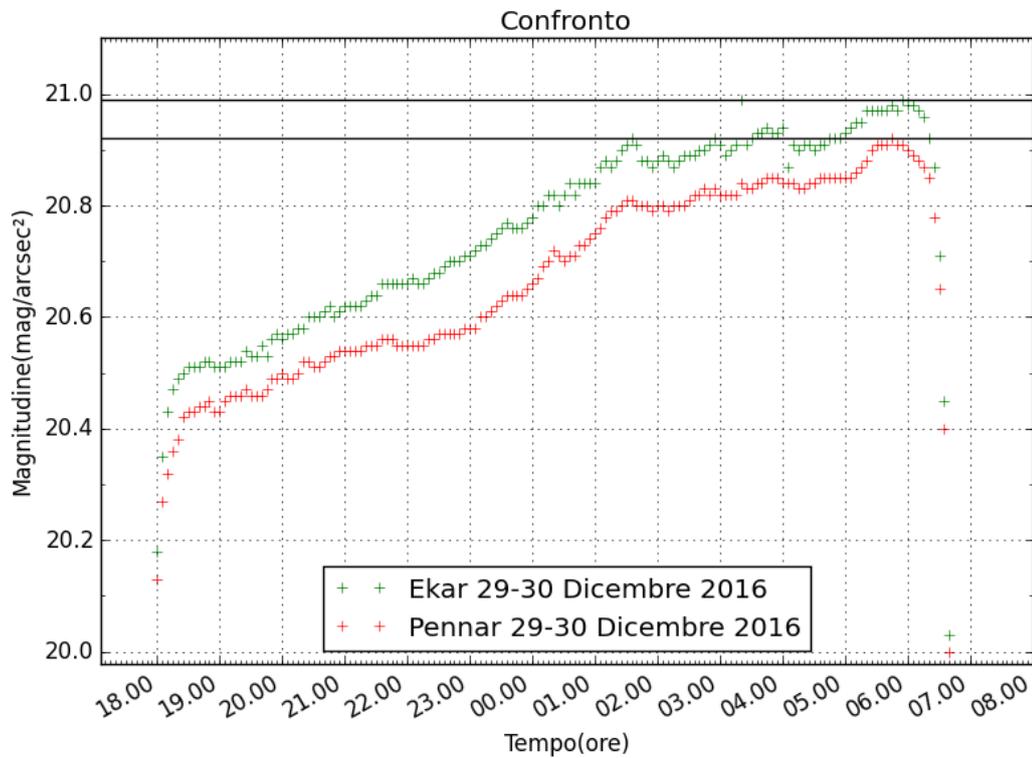


Figura 6.5 Curve di brillantezza Ekar (verde) e Pennar (rosso) la notte tra il 29-30 dicembre 2016, le rette passano per i rispettivi massimi e servono ad evidenziare la pendenza. Andamento crescente per tutta la durata della notte. È una notte di novilunio.

Ekar è tendenzialmente più buio del Pennar ma nella notte tra il 5-6 gennaio e il 6-7 gennaio 2019, come mostrato in figura 6.6, Pennar risulta essere lievemente più buio dell'Ekar per tutto l'arco della notte. Nelle notti del 5-6, 6-7 gennaio 2019 gli eventi risultano correlati solo al Pennar. La prima diventa il 20% più buia fino le 02:15. Nella notte del 6-7 gennaio mostrano andamento anomalo (probabilmente delle nubi) con diminuzione della magnitudine del cielo del 20% dalle 4:30 alle 5:00 circa.

Le nubi possono riflettere la luce proveniente da terra aumentando quindi la brillantezza del cielo, inoltre è possibile che aumentino anche la luce, seppur debole, proveniente dalla Luna, poiché considerando notti vicine al novilunio, non è trascurabile.

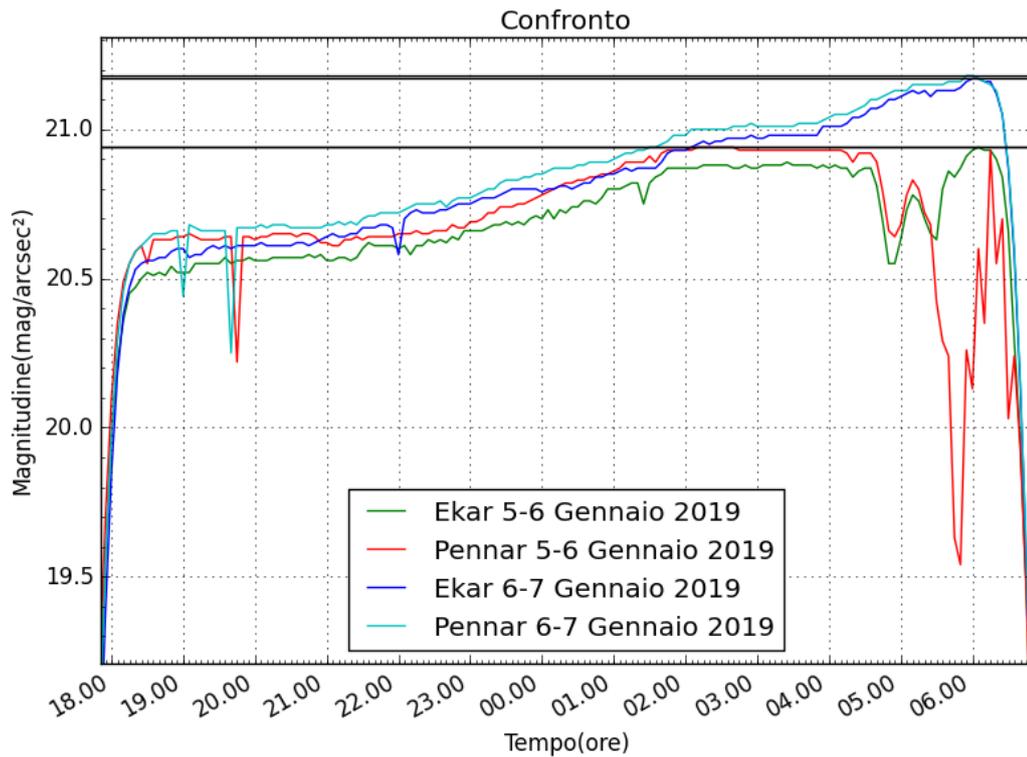


Figura 6.6 Confronto tra Ekar notti 5-6 e 6-7 gennaio (verde e blu rispettivamente) e le stesse notti al Pennar (rosso e azzurro rispettivamente). Le rette passano per i rispettivi massimi e servono ad evidenziare la pendenza. Pennar nelle due notti ha lo stesso andamento nella prima parte della notte con delle fluttuazioni alle 19:00 e alle 20:00 circa. La notte del 5-6 gennaio risulta disturbata dalle 04:00 alle 05:00 circa, probabilmente dovuto alla presenza di nubi. La notte del 6-7 è notte di novilunio.

Tra i casi esaminati, altre notti in cui Pennar è leggermente più buio dell'Ekar sono le notti tra il 4-5 e 9-10 dicembre 2018 (figura 6.7 e 6.8). Questa è un'importante conseguenza di come possa influire l'inquinamento luminoso a grandi distanze. Da una generica panoramica delle curve di brillantezza Ekar e Pennar hanno differenze minime e si conclude che piccoli eventi non influiscono su scala temporale. Al Pennar e Ekar incide la luce naturale del cielo, (vedi paragrafo 6.3).

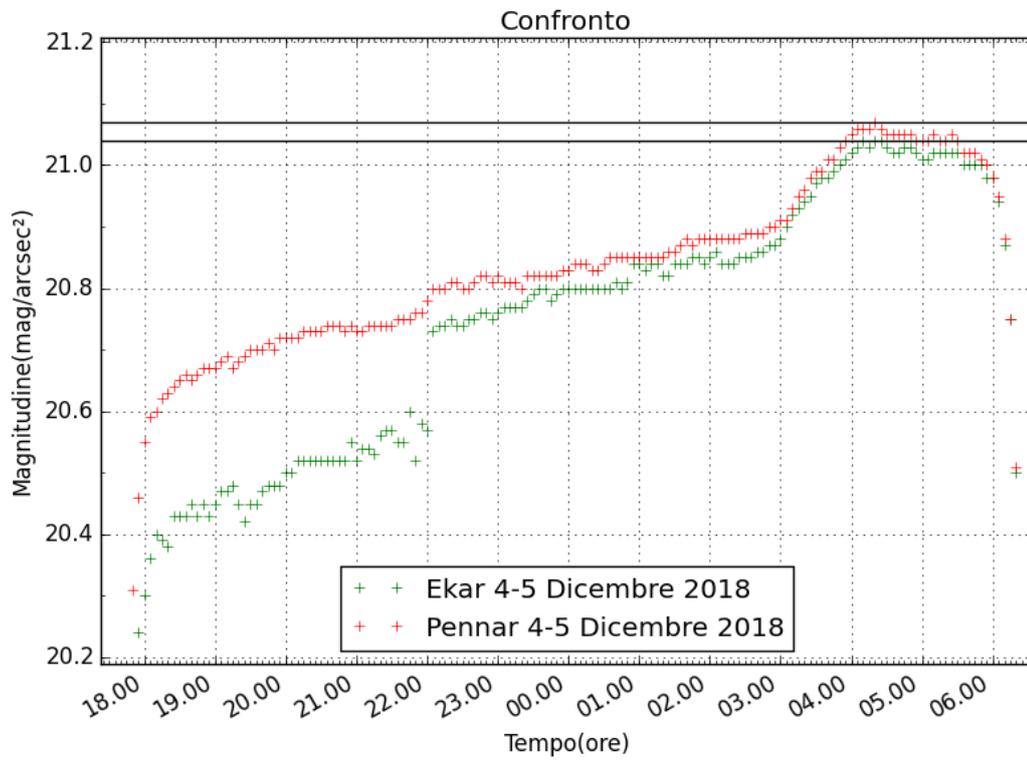


Figura 6.7 Confronto Ekar (verde) Pennar (rosso) nella notte tra il 4 e il 5 dicembre 2018. Le rette passano per i massimi delle rispettive curve e servono a evidenziare la pendenza. Il Pennar risulta avere valori di magnitudine leggermente più elevati rispetto Ekar. Tre notti prima del novilunio. Alle 22:00 possibili lavori in cupola ad Ekar.

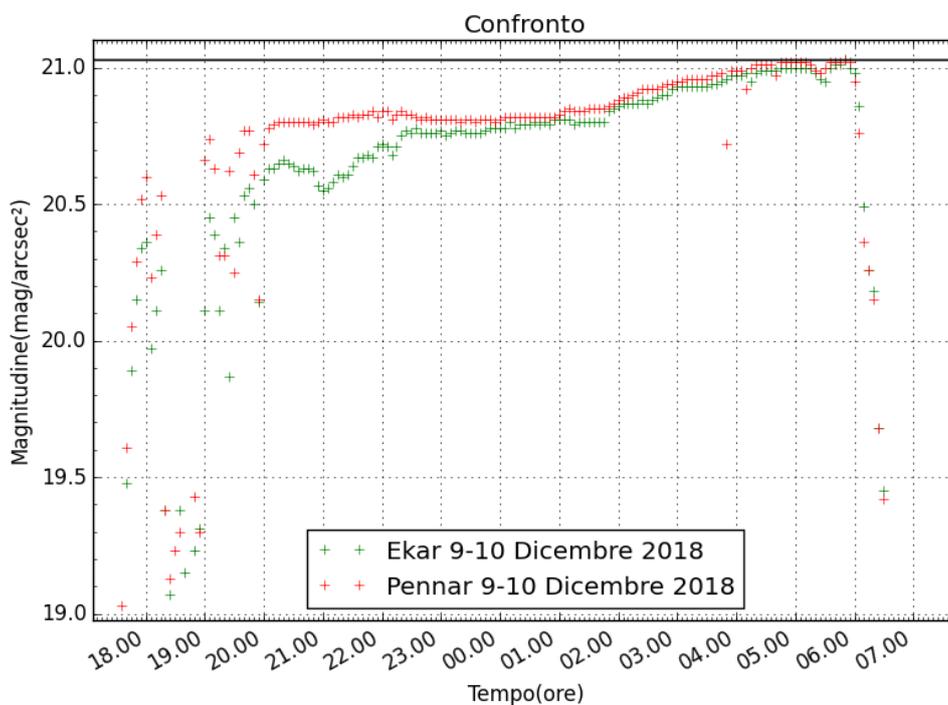


Figura 6.8 Confronto Ekar (verde) Pennar (rosso) nella notte tra il 9 e il 10 dicembre 2018. Le rette passano per i massimi delle rispettive curve e servono a evidenziare la pendenza. Il Pennar risulta avere valori di magnitudine leggermente più elevati rispetto Ekar. Due notti dopo il novilunio. Le fluttuazioni a inizio notte possono essere causate dal passaggio di nubi.

6.2 Contributo dei veicoli

Dall'andamento delle curve si ritiene che il traffico possa influire sulle pendenze.

A tal proposito è stata svolta un'analisi sul traffico a Padova stilando delle tabelle con il numero dei veicoli che attraversavano due rotatorie di Padova in certe fasce orarie, utilizzando delle telecamere poste su di esse, (figura 6.9).

Orario	Media veicoli			
	26-27/05/19 (Domenica- Lunedì)	27-28/05/19 (Martedì- Mercoledì)	30-31/05/19 (Giovedì- Venerdì)	24-25/5/19 (Venerdì-Sabato)
20:20-20:30	7	10	/	16
21:20-21:30	6	2	/	3
21:50-22:00	/	/	3	2
22:20-22:30	6	2	/	1
22:50-23:00	/	/	3	7
23:20-23:30	1	2	/	4
23:30-23:45	3	/	/	/
23:50-00:00	/	/	1	/
00:20-00:30	1	1	/	2
01:20-01:30	1	0	0	1
01:30-01:40	1	/	/	/
02:20-02:30	0	0	0	0
03:20-03:30	0	1	0	0
03:50-04:00	/	/	1	/
04:20-04:30	0	1	/	1
04:50-05:00	2	/	0	/
05:20-05:30	3	1	/	0
05:50-06:00	/	/	1	/
06:20-06:30	7	6	/	2
06:50-07:00	14	/	11	/
07:20-07:30	12	7	/	6
07:40-07:50	19	/	/	/
07:50-08:00	29	/	20	/
08:20-08:30	24	21	/	6
09:20-09:30	17	14	17	13

Tabella 6.1 Tabella del numero medio dei veicoli in alcune fasce orarie in due rotatorie di Padova, la prima e la terza colonna tengono in considerazione due rotatorie, la seconda e la quarta una sola. Con il simbolo '/' si indica la non disponibilità dei dati.



Figura 6.9 Istantanee dei video esaminati, circa le 20:30 (a sinistra) e circa mezzanotte (a destra), si può inoltre notare lo spegnimento di alcuni fari privati nello sfondo.

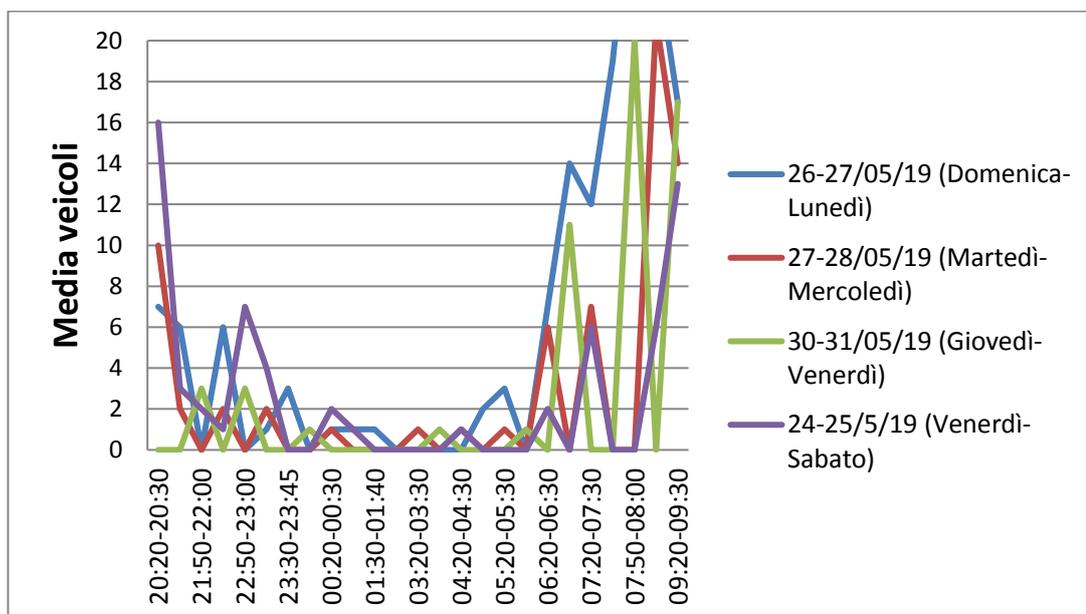


Figura 6.10 Grafico dell'andamento medio dei veicoli in funzione del tempo, (tabella 6.1). Il numero di veicoli diminuisce fino le 01:00 per poi riprendere ad aumentare alle 05:00 circa.

I dati sono stati raccolti in giorni a inizio settimana, infrasettimanali e nel fine settimana e sono stati confrontati con le curve di brillantezza, anche se corrispondono a giorni diversi, poiché si ritiene che la cadenza settimanale del traffico automobilistico sia pressoché uguale. Le notti in figura 6.2, 6.3 e 6.11 corrispondono rispettivamente alle notti tra lunedì-martedì, sabato-domenica e giovedì-venerdì. La notte del 4-5 febbraio (figura 6.2) si ha una diminuzione della brillantezza fino alle 03:10 per poi rimanere costante fino le

04:30 circa e ricominciare di nuovo a crescere. La curva risulta coerente con i dati in tabella 6.1 di un giorno infrasettimanale. La notte del 5-6 gennaio (figura 6.3) si ha un aumento della magnitudine fino l'1:00 e poi rimane pressoché costante ($\Delta m < 0,1$ mag) per poi cominciare a decrescere nuovamente verso le 03:00 del mattino. La notte del 20-21 dicembre (figura 6.11) alle 19:00 avviene un salto netto probabilmente dovuto allo spegnimento delle luci di uno stadio e si ha il massimo di magnitudine alle 02:30 circa del mattino per poi ricominciare a decrescere verso le 04:30/05:00 fino all'alba. Facendo un confronto con il grafico dell'andamento medio dei veicoli (figura 6.10) si nota come ad una riduzione dei veicoli corrisponda un aumento di magnitudine. Dal confronto tra le curve di brillantezza e il numero di veicoli sembra che il traffico influisca sulla brillantezza del cielo di Padova.

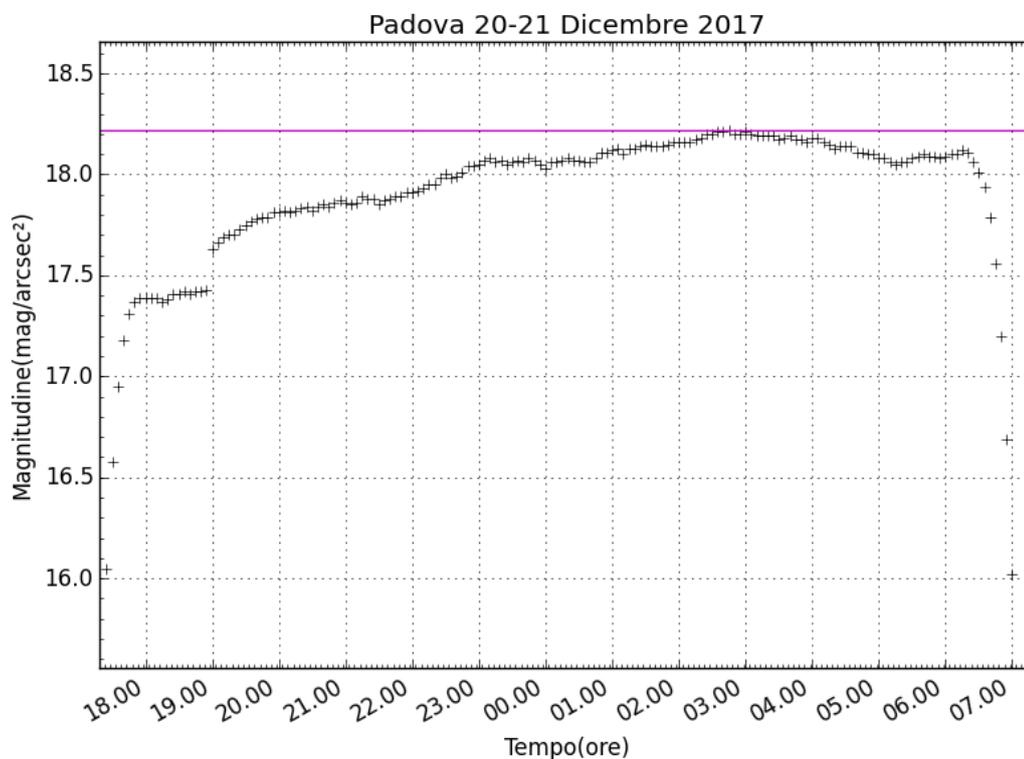


Figura 6.11 Curva di brillantezza della notte tra il 20 e il 21 dicembre 2017 a Padova. La retta in magenta passa per il massimo e serve a evidenziare la pendenza. Alle 19:00 vi è uno stacco probabilmente dovuto allo spegnimento delle luci nei pressi dello strumento. L'andamento è crescente fino le 03:00 per poi iniziare a decrescere verso le 04:30 circa.

6.3 Contributo della Via Lattea

Il Valles è il sito più buio tra quelli presi in esame in quest'analisi, le stazioni di Asiago e Passo Valles risentono meno dell'inquinamento luminoso e di conseguenze possono influire altri fattori tra cui la Via Lattea. La Via Lattea costituisce il 50% del fondo naturale, e Vedovato (2013) conclude che influisce nel cielo di Asiago. Valles è più buio rispetto Asiago, di circa il 50% rispetto Ekar (ARPAV, 2015) quindi la Via Lattea avrà un contributo maggiore. Di conseguenza per alcuni periodi dell'anno la pendenza delle curve sarà dovuta sia all'inquinamento luminoso sia al contributo fornito dalla Via Lattea.

Nei mesi, invece di febbraio, marzo, aprile e maggio la Via Lattea non risulta visibile nel quadrante dello strumento, (Tesi Vedovato, 2013).

Da un confronto nella notte del 4-5 dicembre tra Valles e Asiago (figura 6.15) l'andamento nelle due stazioni risulta identico. Il passaggio allo zenit della Via Lattea avviene alle 00:00 circa nel campo dello strumento per

uscire alle 02:00 circa e risultare completamente fuori alle 04:00. Dopo che la Via Lattea esce dal campo, la curva si appiattisce, e il Valles raggiunge valori alti di magnitudine.

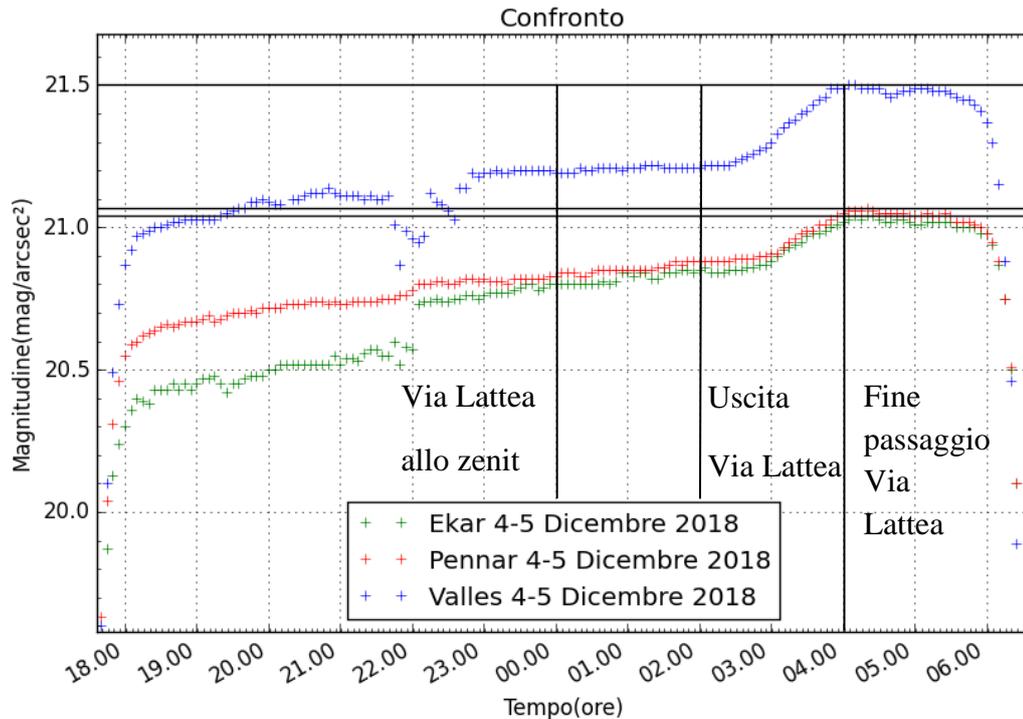


Figura 6.12 Confronto tra Ekar, Pennar e Valles la notte tra il 4 e il 5 dicembre 2018. L'andamento nelle due stazioni risulta pressoché identico. A mezzanotte avviene il passaggio della Via Lattea allo zenit, alle 02:00 circa l'uscita dal campo dello strumento, per non essere più visibile alle 04:00, a questo punto la curva si appiattisce.

Per calcolare quanto vale il contributo della Via Lattea è stata utilizzata la tabella 1 in appendice (Leinert et al., 1997) che fornisce il contributo in funzione della latitudine e longitudine galattica in unità di misura del flusso ($S10_{\odot}$), il quale indica il numero di stelle di magnitudine 10, in banda V, per grado quadrato che produrrebbero la stessa brillantezza del cielo osservata attraverso una massa d'aria limpida, (Vedovato, 2013).

Consideriamo le curve in figura 6.13, si vede il passaggio della Via Lattea avviene dalle ore 23:00 all'1:00 circa per poi uscire del tutto fino le 3:00. Confrontando una notte di aprile in cui risulta visibile il polo galattico nord (figura 6.14) il gradiente notturno è la metà rispetto dicembre, in cui invece è visibile l'anticentro galattico, con un aumento di magnitudine di 0.15. Volendo fare un conto accurato sapendo che a La Silla il contributo del centro galattico è 0.7 mag, dalla tabella 1 (vedi Appendice) si vede che

l'anticentro galattico vale 2.9 volte meno. Ma tenendo conto che il Valles ha un contributo di inquinamento luminoso che è il doppio di quello de La Silla, la differenza in magnitudine vale circa 0.3, concordante con la differenza delle due notti prese in esame. Per quanto riguarda il residuo di stelle del polo galattico rispetto l'anticentro risulta trascurabile.

Per calcolare il contributo a Ekar si effettua il confronto con una notte nel mese di marzo (figura 6.15) e si nota che la differenza in magnitudine tra i valori assoluti è di circa 0.15, considerando che Ekar è il doppio più luminoso rispetto il Valles il calcolo precedente è coerente con le curve.

Quindi la pendenza corretta dell'inquinamento luminoso è quella che si ha nel mese di aprile e il gradiente nel periodo tra novembre e gennaio deve essere dimezzato se si tiene in conto del passaggio della Via Lattea. La curva del Valles in aprile dopo le 00:30 diventa perfettamente piatta probabilmente a causa dello spegnimento del rifugio che si trova nelle vicinanze dello strumento, (figure 6.12 e 6.13).

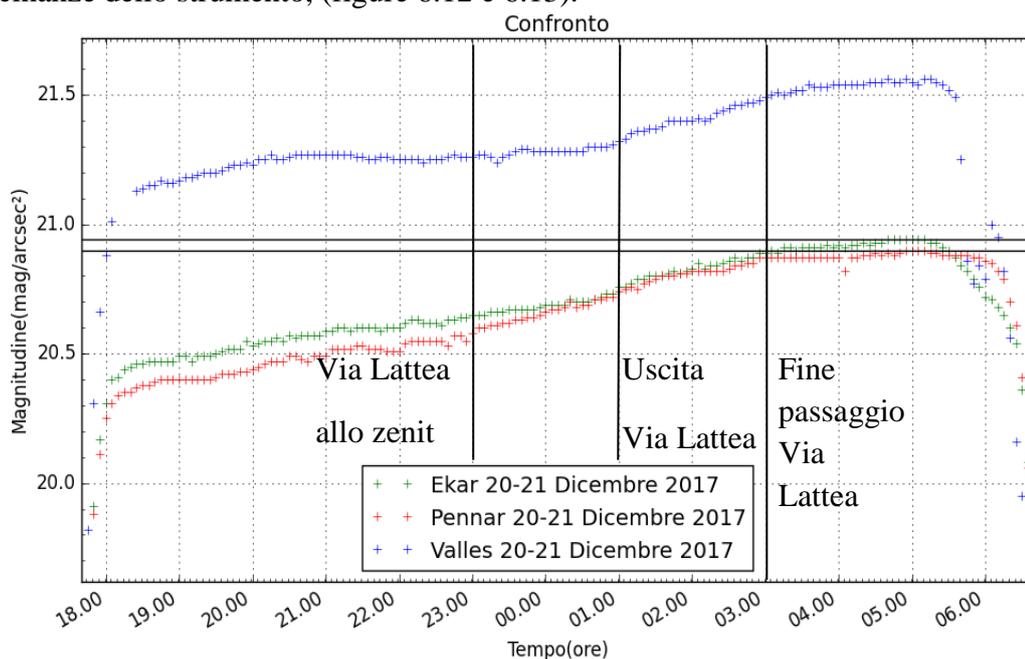


Figura 6.13 Confronto tra Valles, Ekar e Pennar per la notte del 20-21 dicembre 2017. Le rette passano per i rispettivi massimi e servono a evidenziare le pendenze. Il passaggio avviene alle 23:00 circa, l'uscita dal campo dello strumento alle 01:00 circa e la fine del passaggio alle 03:00 circa.

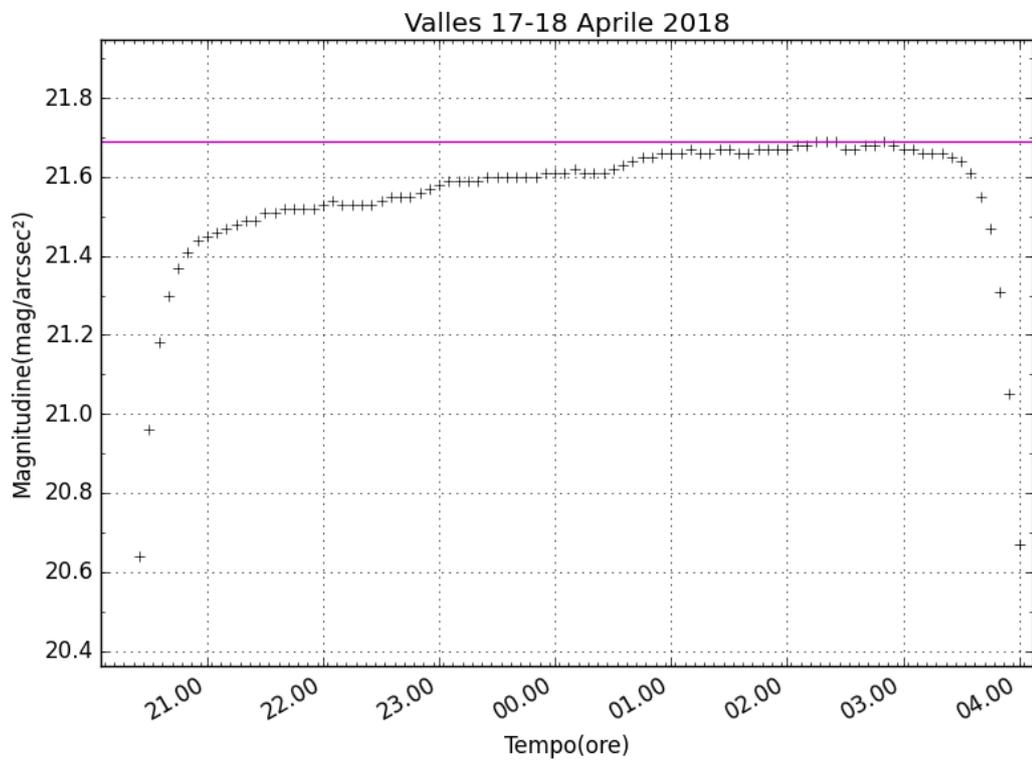


Figura 6.14 Notte del 17-18 aprile 2018 al Valles, la retta passa per il massimo e serve ad evidenziare la pendenza. In primavera il contributo della Via Lattea è trascurabile.

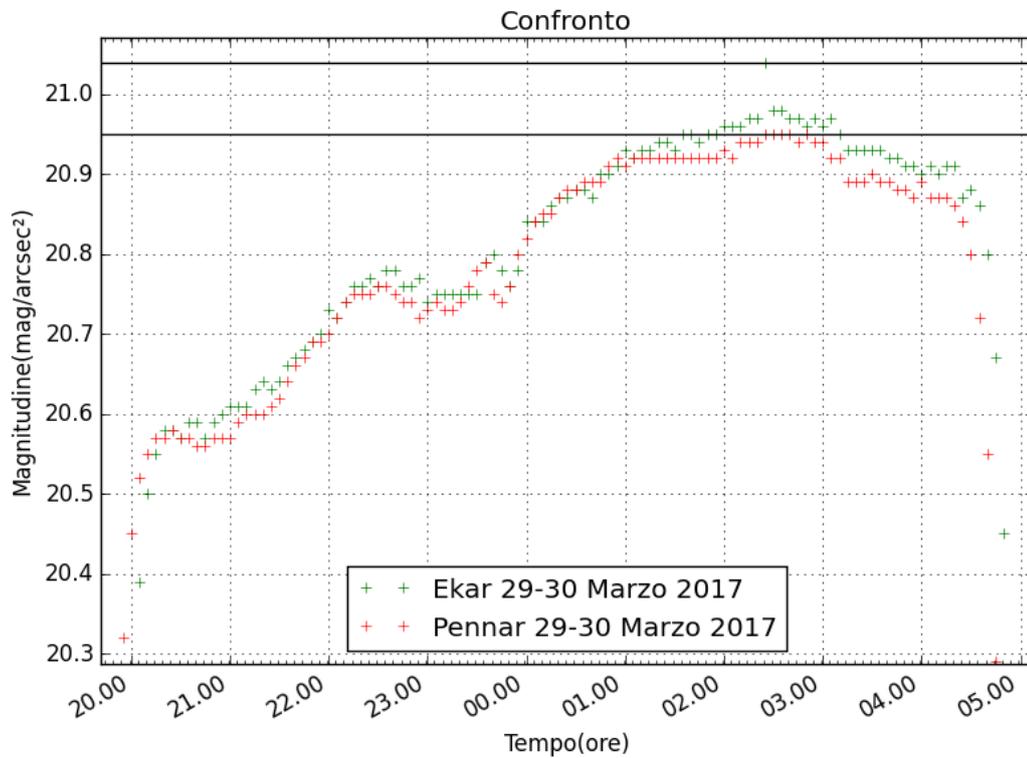


Figura 6.15 Notte del 29-30 marzo 2017 a Ekar e Pennar, le rette passano per i rispettivi massimi e servono per evidenziare le pendenze delle curve. In primavera il contributo della Via Lattea è trascurabile.

Per mancanza di dati nel periodo estivo è stato possibile esaminare solo alcune notti di agosto all'Ekar e Pennar.

Nel mese di agosto si registra il contributo massimo durante le prime ore della notte, (Tesi Vedovato, 2013). Poiché il contributo va mediato con quello dell'illuminazione artificiale durante la prima parte della notte, la pendenza è positiva ma meno ripida rispetto i mesi in cui è assente. In figura 6.16 è riportata la notte del 27 agosto: il passaggio della Via Lattea allo zenit avviene circa alle 22:30, in cui il contributo risulta essere di 330 S10_⊙ e quindi $\Delta m = -0.26$ mag, tuttavia un contributo di 330 S10_⊙ non fa appiattire la curva, quindi la diminuzione dell'illuminazione artificiale risulta essere molto più forte, come dimostrato da Vedovato (2013).

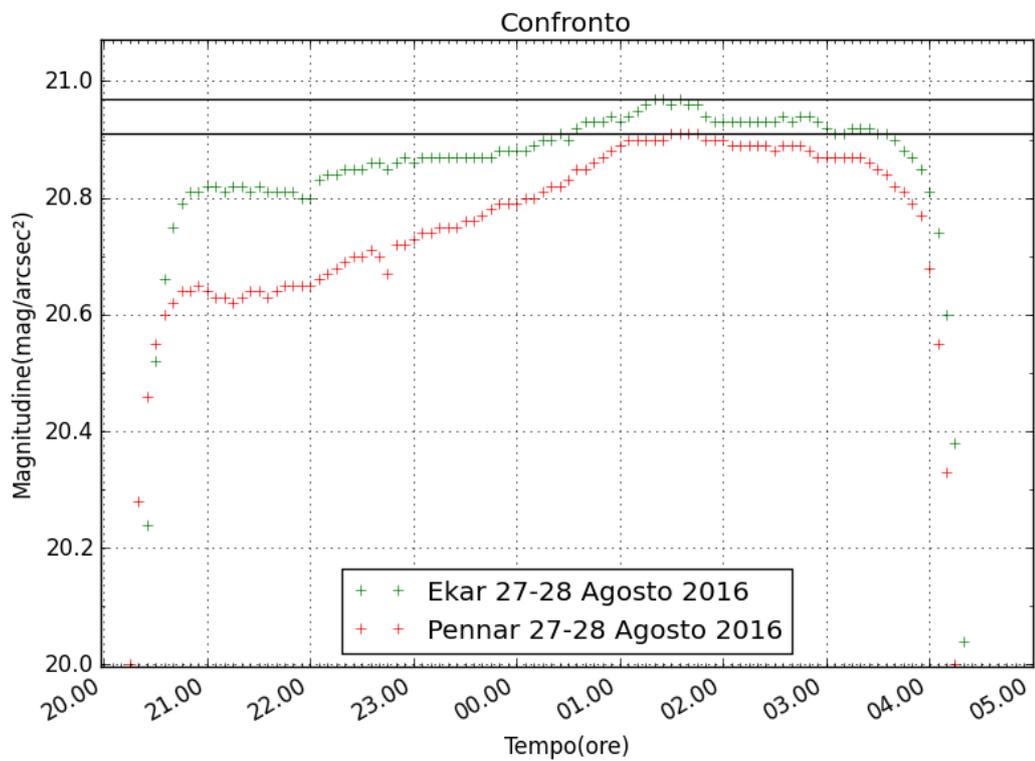


Figura 6.16 Notte tra il 27-28 agosto 2016, le rette passano per i rispettivi massimi e servono per evidenziare le pendenze delle curve. Il passaggio della Via Lattea allo zenit avviene a mezzanotte circa. Il contributo della Via Lattea va a mediarsi con il calo dell'inquinamento luminoso, la curva non si appiattisce ma la pendenza è meno ripida rispetto i mesi in cui è assente.

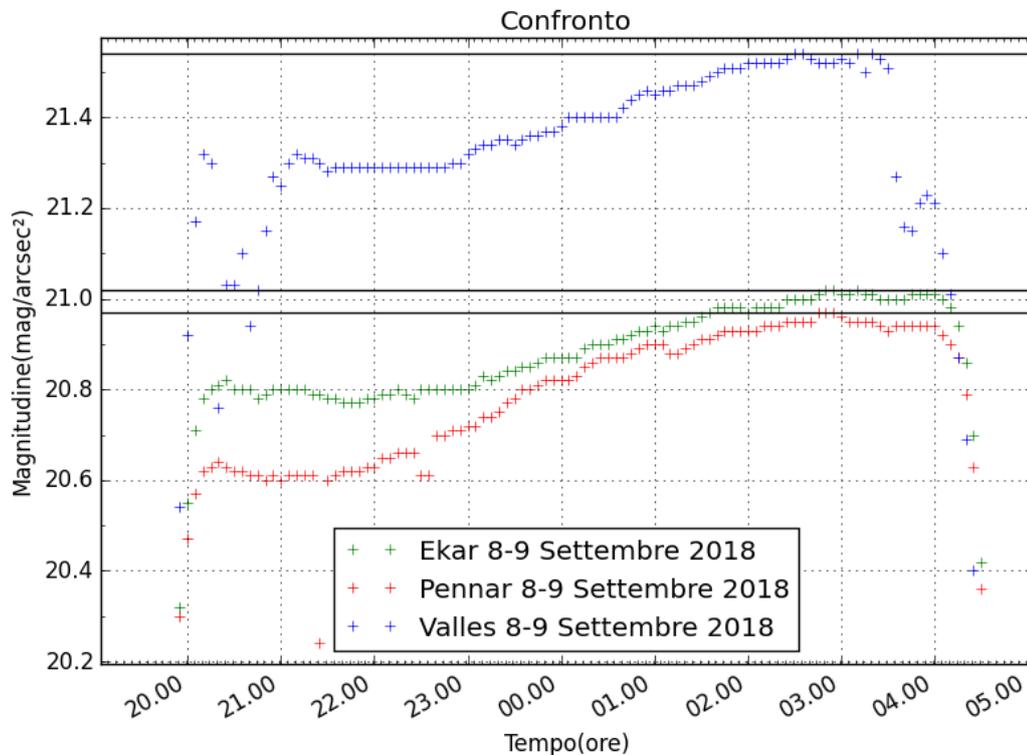


Figura 6.17 Notte tra 8-9 settembre 2018, le rette passano per i rispettivi massimi e servono per evidenziare le pendenze delle curve. Il passaggio della Via Lattea allo zenit avviene alle 23:00 circa e si media con la decrescita dovuto all'inquinamento luminoso.

Nel mese di settembre la Via Lattea passa allo zenit alle 21:30 circa quindi va a mediarsi ancora con la riduzione dell'inquinamento luminoso. Concorde ai dati di Vedovato (2013), l'abbassamento complessivo della brillantezza è più rapido, (figura 6.17).

In aggiunta, nel periodo invernale, potrebbe esserci un contributo della luce zodiacale che si avvicina fino a 20° dallo zenit proprio in corrispondenza del passaggio della Via Lattea. Non risulta visibile ad occhio a causa della Via Lattea e dell'inquinamento luminoso. Nel periodo estivo risulta, invece, lontano dallo zenit. Un possibile lavoro futuro potrebbe investigare in maniera dettagliata tale contributo.

Capitolo 7

Confronto con la letteratura

Dall'analisi dei dati si conclude che il traffico può incidere, e tende a diminuire fino le 02:30 circa e rimane costante fino le 05:30 per poi iniziare a crescere, (tabella 6.1 e figura 6.10).

L'inquinamento a grandi distanze può influire significativamente, e possono incidere anche fattori meteorologici come l'umidità, (figura 6.2 e 6.3).

Infine, la Via Lattea ha influenze non trascurabili sulle curve di brillantezza di Asiago e Passo Valles, (figura 6.12).

Un dato interessante per quanto riguarda la nostra analisi consiste nel moderamento del flusso emesso dal 15%-20% degli impianti d'illuminazione di Padova in un intervallo di tempo che va dalle 22:00 a mezzanotte, (Tesi Duchini, 2019).

Luginbuhl et al. (2009) hanno condotto uno studio sull'illuminazione esterna della città di Flagstaff (Arizona), concludendo che del consumo totale di luce esterna dispersa verso l'alto senza considerare gli impianti sportivi, caso analogo allo studio fatto in quest' analisi, è di 12.2 milioni di lumen (Mlm), di cui il 62% è dovuto agli impianti d'illuminazione industriale e commerciale, il 14% da illuminazione residenziale e il 12% da quella stradale.

Il numero di automobili diminuisce del 97.6% circa dalle 18:00 alle 3:15 del mattino, stimando che per ogni veicolo l'11.2% di luce venga diretta verso l'alto. In figura 7.1 è mostrato l'andamento in funzione del tempo.

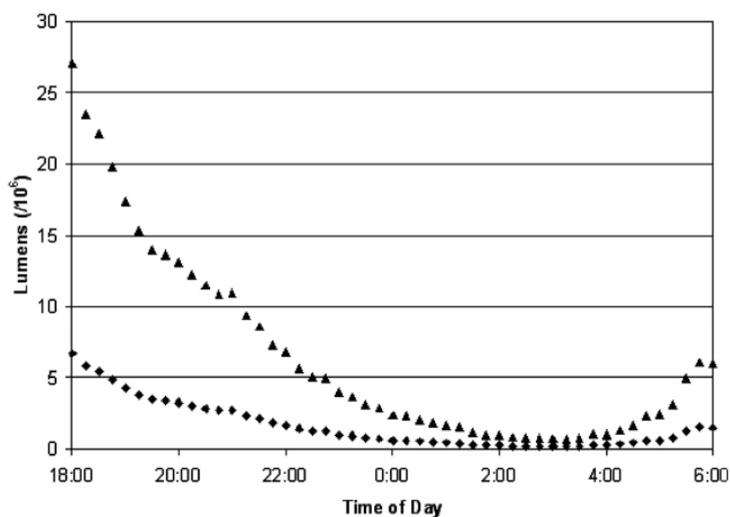


Figura 7.1 Stima dei lumen totali emessi (triangoli) e componente diretta verso l'alta (quadrati) generata dal traffico sulle strade di Flagstaff in funzione del tempo, (Luginbuhl et al., 2009).

Garstang (2004) ha effettuato uno studio sulla brillantezza del cielo notturno tra il 1900 e il 2000 all'osservatorio di Mount Wilson, nella contea di Los Angeles, correlando i risultati con la crescita della popolazione di Los Angeles e con i cambiamenti dei tipi d'impianti e tecnologie d'illuminazione. Invece, l'effetto dello smog lo considera trascurabile. Ha calcolato il rate di foto emissione *pro capite* facendo una stima sul numero dei diverse tipi di lampade delle illuminazioni stradali. Ha diviso, inoltre, i tipi d'impianti in: stradali (40%), residenziali (15%), illuminazione dei negozi (32%) e imprese (13%). Ha trovato che nel 1990 il cielo fosse più brillante a causa dell'introduzione delle lampade ad alogenuri metallici rispetto i calcoli precedenti come mostrato in tabella 7.1. I dati ottenuti inoltre mostrano variazioni tra il 1940 e il 1950 dovuto agli effetti della guerra, dal 1960 al 1970 causato dal largo utilizzo delle lampade al mercurio e dal 1980 viene attribuito all'introduzione delle lampade ad alogenuri metallici. Nel 2000 risulta un consumo di 1227 lumen *pro capite*.

Night-sky brightness at Mount Wilson*

	m_B	b_B	m_V	b_V	Eye	Mag.	$B-V$	phb	phv	lumens
Sky	22.99	0.389	21.99	0.601	54.5	6.17	1.00	—	—	—
1900	22.98	0.392	21.98	0.606	54.9	6.16	1.00	0.5	1.3	39
1910	22.95	0.405	21.95	0.626	56.7	6.15	1.00	0.85	2.2	65
1920	22.85	0.444	21.85	0.683	61.9	6.11	1.00	1.5	3.8	113
1930	22.58	0.566	21.59	0.870	78.9	5.99	0.99	2.58	6.68	198
1940	22.02	0.947	21.06	1.42	129	5.75	0.97	6.12	15.43	366
1950	21.73	1.24	20.82	1.77	160	5.64	0.91	5.98	14.43	335
1960	21.01	2.41	20.36	2.70	245	5.41	0.65	11.78	20.76	611
1970	20.89	2.68	19.91	4.10	372	5.20	0.98	11.12	28.43	877
1980	20.89	2.69	19.67	5.09	462	5.09	1.22	10.40	33.76	1048
1990	20.52	3.79	19.43	6.36	577	4.99	1.09	12.99	36.35	1093
2000	20.24	4.88	19.28	7.33	664	4.92	0.96	15.97	39.57	1227

Tabella 7.1 I dati sono riferiti allo zenit e assumono una luminosità naturale del cielo notturno a un minimo dell'attività solare. m_b e m_v in mag/arcsec², b_b e b_v in unità di 10⁸ fotoni cm⁻²sec⁻¹steradian⁻¹, riposta dell'occhio in nanolamberts. 'Mag' stima della magnitudine limite visuale e 'phb' e 'phv' rate fotoemissione per capita in unità di 10¹⁷ fotoni sec⁻¹ per le bande B e V, 'lumens' lumen pro capite, (Garstang, 2004).

In Italia il consumo *pro capite* risulta essere di circa 1500 lumen, facendo un confronto con i risultati di Garstang (2004) il risultato sembra abbastanza coerente tenendo in considerazione l'aumento di inquinamento luminoso avvenuto negli ultimi 20 anni e le "innovazioni" per quanto riguarda i tipi di lampade, soprattutto quelle al LED bianco-blu.

ARPAV (2015) stima che il consumo annuo per l'illuminazione pubblica in Veneto è di 411.4 GWh, e 84 kWh il consumo per abitante: il flusso emesso verso l'alto stimato è circa 4 miliardi di lumen (25% del flusso totale).

Il 28 marzo 2014 è stato organizzato lo spegnimento delle luci pubbliche di illuminazione esterna dell'Altopiano di Asiago. Lo scopo era valutare i contributi dell'inquinamento luminoso tra le sorgenti dell'altopiano e quelle della pianura, quindi più lontane, e i contributi delle illuminazioni pubbliche e private. Ciò ha fornito come risultato la riduzione della luminosità del cielo del 50% al Pennar e del 30% a Cima Ekar, come mostrato in figure 7.2 e 7.3.

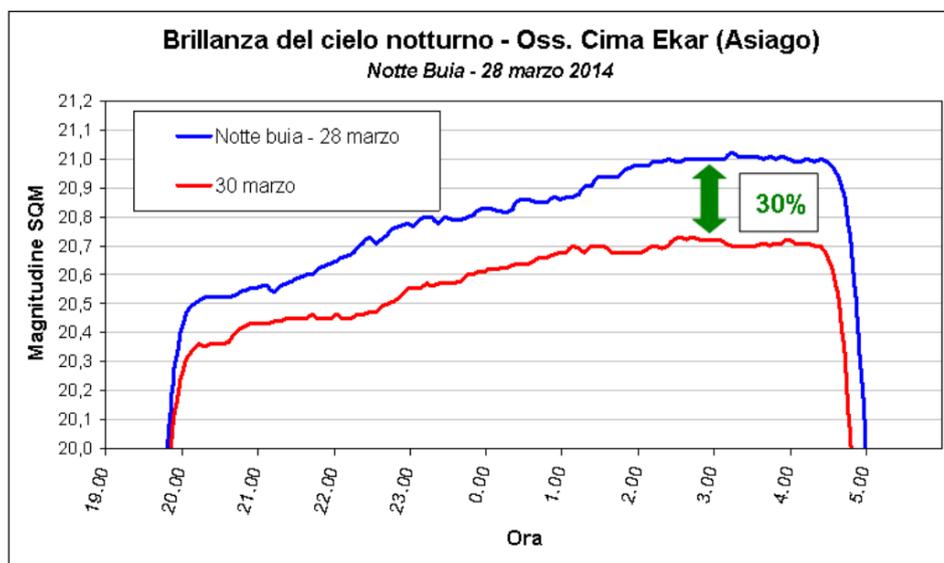


Figura 7.2 Confronto curva di brillantezza con notte buia. (ARPAV, 2015)

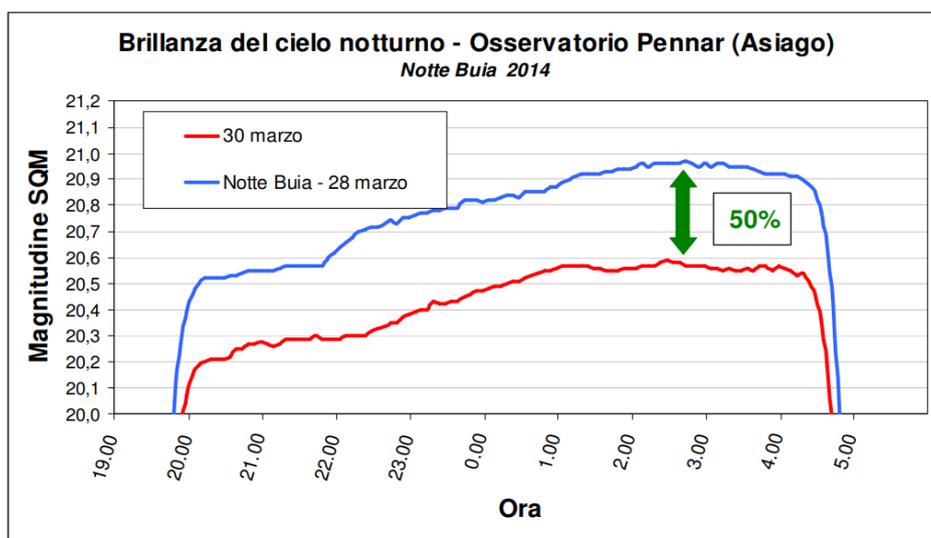


Figura 7.3 Confronto curva di brillantezza con notte buia. (ARPAV, 2015)

La conclusione è stata che la differenza di guadagno in magnitudine, maggiore al Pennar, mostra come questo sito risente dell'inquinamento luminoso locale, invece Cima Ekar risente dell'illuminazione della pianura, come ipotizzato nell'analisi dei dati. Un altro risultato importante mostra che l'illuminazione privata contribuisce al 50%.

Ashdown (2016) ricava un dato di 6000 lumen per veicolo e quindi considera ragionevole non trascurare il contributo dei veicoli all'inquinamento luminoso.

Un calcolo sulla distribuzione oraria del traffico mostra come il traffico diminuisce dalle 20:00 fino l'1:00 con una diminuzione dell' 84% e rimane costante dall'01:00 fino le 05:00, (figura 7.4). Secondo l'articolo tale decremento del traffico causa il 20-25% in meno della luminosità del cielo notturno. Dalla tabella 6.1 nello stesso intervallo di tempo si ricava un decremento del traffico del 87%.

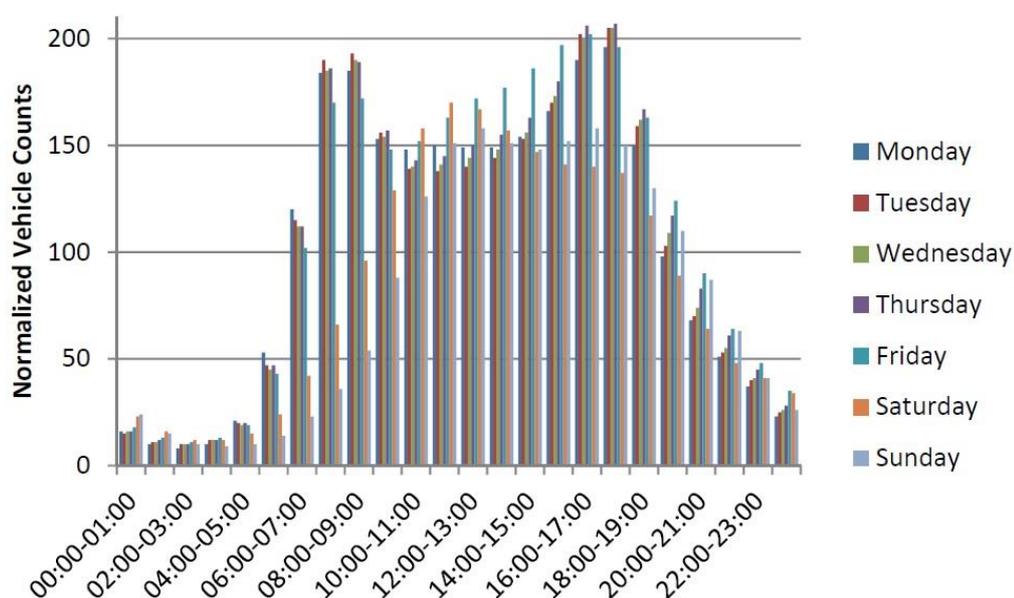


Figura 7.4 Numero veicoli per fascia oraria, (Ashdown, 2016).

Barà et al. (2017) hanno effettuato un studio su due cittadine spagnole: la prima un agglomerato urbano, la seconda un sito vicino una zona industriale.

Considera come fonti d'inquinamento luminoso:

- luci stradali;
- residenziali, cioè quelle disperse dalle finestre private;
- luci dei veicoli, poiché una frazione di luce emessa dai fari si propaga ad angoli sopra l'orizzonte e una quantità non trascurabile è riflessa dal terreno, assumendo un modello di diffusione di luce lambertiano.

In figura 7.5, per la prima cittadina (A Coruña), il grafico porta una diminuzione di luminosità del 20% dovuta sia ai veicoli sia alle luci residenziali. I risultati finali mostrano che le luci residenziali contribuiscono al 22% all'inquinamento luminoso, mentre le strade al 77% e i veicoli circa l'1%. Inoltre, viene ricavato che il contributo dei veicoli e delle luci residenziali diminuisce costantemente fino le 04:00 per poi di nuovo aumentare ma con un andamento più lento, (figure 7.6 e 7.7).

Per la seconda cittadina (Arteixo), che viene considerata un sito industriale, si trovano i valori del 55% per l'illuminazione pubblica a inizio notte con il 27% di luci residenziali e il 2% per i veicoli. Il peso dei veicoli e delle luci private diminuisce fino le 04:00, invece il peso dell'illuminazione pubblica segue l'andamento opposto (figura 7.8).

Quindi si ha una riduzione del 26% per la prima cittadina e per il sito industriale del 45% durante la notte che causa la variazione della luminosità del cielo notturno.

Tuttavia il risultato non è coerente con il nostro: il contributo del traffico, ad esempio a Padova, è considerato non trascurabile, questo può essere dovuto anche all'evoluzione che è avvenuta negli ultimi anni, utilizzando sempre più delle lampade a LED per i fari delle auto.

Dall'analisi delle curve di brillantezza abbiamo riscontrato un possibile contributo maggiore del traffico che si traduce in una diminuzione del gradiente di aumento della magnitudine. Tale cambiamento è associato alla diminuzione del traffico veicolare, (figure 6.10 e 6.11).

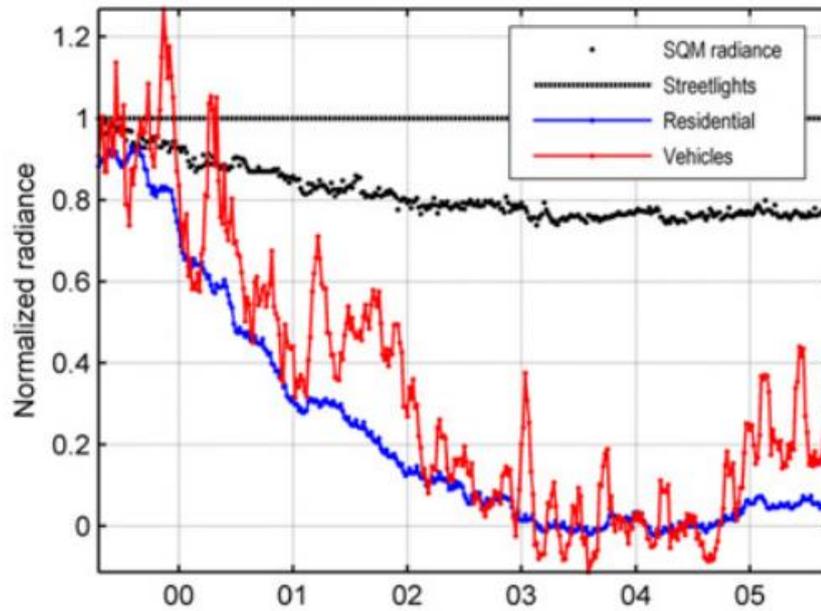


Figura 7.5 Luminosità del cielo normalizzata in funzione del tempo (in ascissa espressa in ore), con le emissioni urbane dell'illuminazione pubblica, degli edifici residenziali e dei veicoli per la città di A Coruña, (Bará et al., 2017).

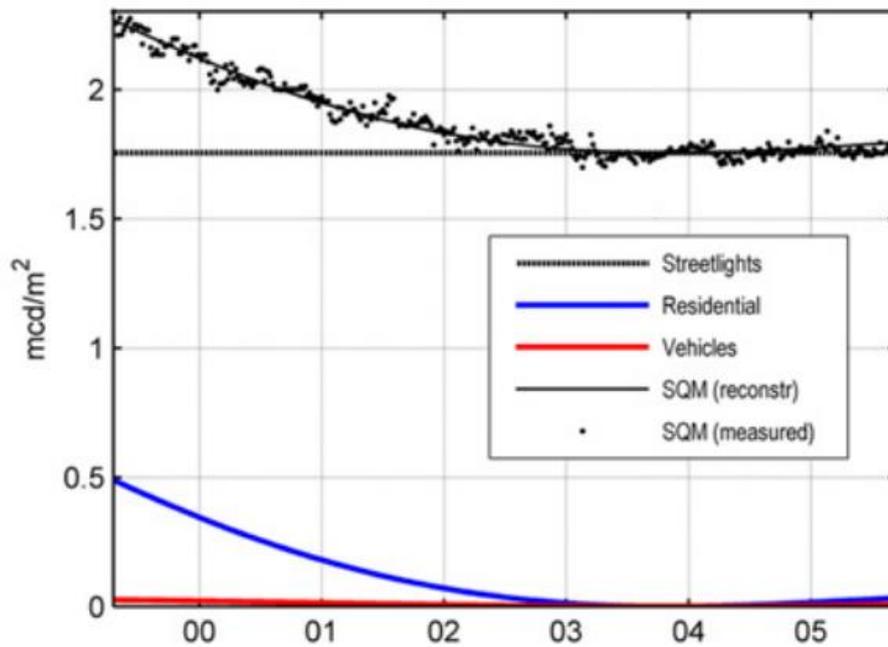


Figura 7.6 Luminosità del cielo notturno in mcd/m^2 con la stima delle componenti artificiali per la città di A Coruña, (Bará et al., 2017).

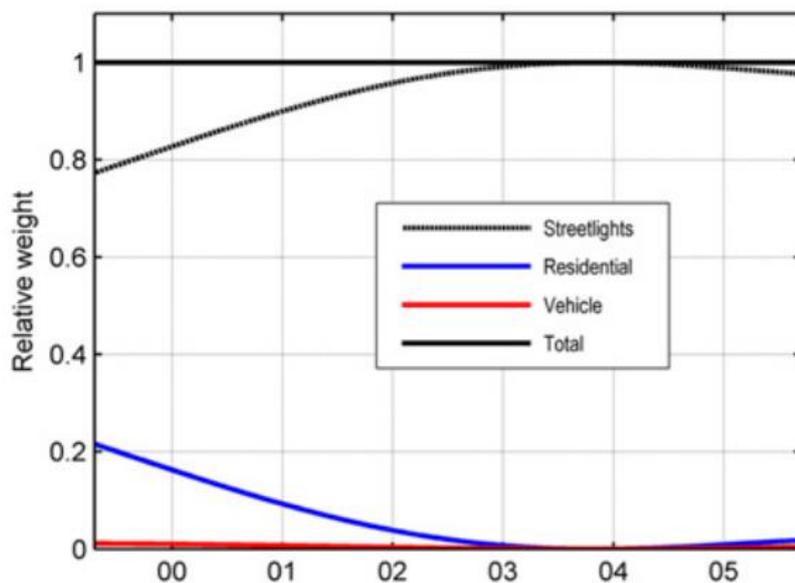


Figura 7.7 Peso relativo delle componenti della luminosità del cielo notturno durante la notte per la città di A Coruña, (Bará et al., 2017).

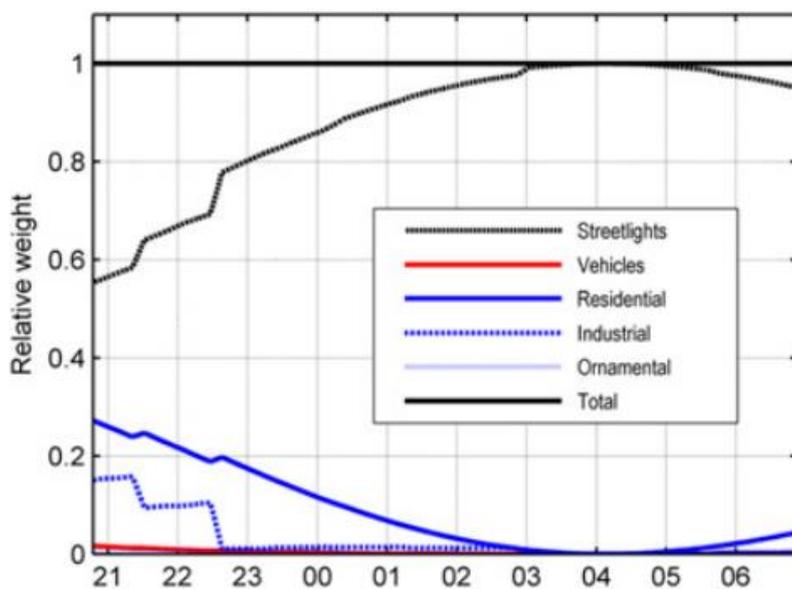


Figura 7.8 Peso relativo delle componenti della luminosità del cielo notturno durante la notte per la città di Arteixo, (Bará et al., 2017).

Bertolo (2019) conferma la variazione stagionale: in inverno vi è un minimo di magnitudine dovuto al passaggio della Via Lattea e alla neve che copre il terreno, si ha un massimo in primavera quando la Via Lattea non è più visibile nel campo. In particolare i mesi invernali, a causa del turismo per lo sci, risultano più inquinati rispetto la primavera. Inoltre a Padova a dicembre vi è un valore minimo dovuto alle luci natalizie e in agosto un massimo dovuto alla riduzione del traffico. Per quanto riguarda la variazione della brillantezza del cielo notturno, viene affermato che è causato dalla variazione del traffico, riduzione in flusso dell'illuminazione stradale e lo spegnimento di cartelloni pubblicitari e di luci residenziali.

Conclusioni

Lo scopo di quest'analisi consiste nell'indagare le possibili cause dell'andamento delle *curve di brillantezza* dovute al contributo della luce artificiale e naturale durante la notte con specifica considerazione di Asiago (Pennar ed Ekar), e in secondo luogo con riferimento ai siti di Padova e Passo Valles, confrontando tra loro i risultati.

Lo studio è stato condotto usando i dati dell'SQM, uno strumento in grado di misurare la brillantezza del cielo notturno, del quale i dati sono stati plottati in funzione del tempo ottenendo le curve di brillantezza, al fine di capirne le cause delle possibili variazioni. Le curve di brillantezza prese in considerazione, sono notti serene in vicinanza del novilunio. Seguono un andamento regolare: crescente in magnitudine nella prima parte della notte per poi rimanere costante o decrescere nelle ultime ore della notte, (vedi figura 6.1). Per studiare le cause di tale andamento sono stati presi in considerazione eventi giornalieri, quali l'andamento del traffico (vedi figura 6.12) ed eventi stagionali come il contributo della Via Lattea.

Da un'analisi preliminare Ekar e Pennar hanno sempre lo stesso andamento per tutto l'arco della notte, generalmente Ekar è leggermente più buio del Pennar. Inoltre, risulta evidente come l'inquinamento a grandi distanze possa influire sulle osservazioni: Cima Ekar risulta inquinato sia dall'illuminazione della pianura che da quella dell'altopiano di Asiago al contrario del Pennar, il quale è influenzato maggiormente dall'inquinamento locale rispetto quello proveniente dalla pianura, (ARPAV, 2015). Ciò viene riscontrato nelle figure da 6.6 a 6.8, in cui sono state prese in esame delle notti nel periodo natalizio e il Pennar risulta leggermente più buio dell'Ekar. In particolare in figura 6.6 dalle 04:30 circa sono visibili bassi valori di magnitudine, questo può essere dovuto alla presenza di nubi che riflettono maggiormente la luce emessa da terra.

Analizzando il contributo della Via Lattea, vi sono evidenze che esso influenzi principalmente Passo Valles e Asiago, nel primo il contributo relativo di quest'ultima è maggiore poiché il sito è più buio rispetto il secondo. Il passaggio della Via Lattea nel campo di vista dello strumento avviene per quasi tutto l'anno, fornendo un contributo variabile secondo la porzione di Via Lattea visibile. In inverno è visibile la zona dell'anticentro galattico (160° di longitudine) fornendo un contributo di $200 S_{10\odot}$ (vedi figure 6.12-13), in primavera è visibile il polo galattico nord, il cui

contributo risulta trascurabile, (vedi figure 6.14-6.15). Invece nei mesi estivi si ha un contributo di 330 S10_⊙, e come mostrato in figura 6.16 questo non riesce ad appiattire la curva, dimostrando che l'inquinamento luminoso risulta molto più forte. In autunno si ha un contributo che va a mediarsi con la riduzione della luminosità artificiale durante le prime ore della notte (figure 6.17).

Si conclude che la pendenza delle curve è quindi un effetto dell'inquinamento luminoso misto alla brillantezza del fondo cielo, e solo per coincidenze non ancora spiegate le pendenze dei siti presi in considerazione sono simili tra loro. Dai dati raccolti e dagli articoli esaminati lo spegnimento delle luci residenziali e la riduzione del traffico causano in parte, in modo non trascurabile, la pendenza della curva. Luginbuhl et al. (2009) dichiarano che il contributo delle luci residenziali è del 14%, Ashdown (2016) ricava che il contributo dei veicoli è del 20-25%, invece Barà et al. (2017) osservano un contributo del 22% per l'illuminazione privata e l'1% per i veicoli, quest'ultimo valore però risulta in contraddizioni con le conclusioni tratte da questa tesi. In quest'analisi è stata analizzata l'influenza del traffico di Padova (figura 6.12) deducendo che ha un effetto non trascurabile sulla brillantezza, poiché ad un andamento decrescente del traffico si ha un andamento crescente in magnitudine delle curve di brillantezza, (figura 6.10). Questa discrepanza tra gli articoli esaminati e i risultati ottenuti è dovuta a una probabile differenza della viabilità notturna tra le città considerate. A Padova, potrebbe aggiungersi la riduzione del flusso emesso da alcuni impianti d'illuminazione pubblica durante l'arco della notte (Tesi Duchini, 2018).

Altri eventi casuali sembrano influire come lo spegnimento di qualche luce nelle vicinanze dello strumento, come mostrato in figura 6.10. Non si riscontrano eventi in piccola scala temporale correlati nei diversi siti.

Per quanto riguarda i fattori meteorologici la presenza di nubi passeggere in parte delle notti considerate influisce sulle misure, infatti in un sito contaminato da inquinamento luminoso esse riflettono le emissioni da terra, causando un innalzamento della brillantezza del cielo. Al contrario in un sito non contaminato causano un aumento di magnitudine. Inoltre la presenza di nubi può amplificare e riflettere la luce lunare, considerando notti vicine al novilunio tale contributo non risulta del tutto trascurabile.

Può essere utile uno studio sull'andamento dell'umidità a Padova, poiché nell'ultima parte della notte sembra contribuire come mostrato in figura 6.2 e figura 6.3.

L'inquinamento luminoso comporta un problema dal punto di vista astronomico, ma anche uno spreco economico. Influenza in maniera negativa anche la salute umana e i cicli naturali di flora e fauna. Inoltre, negli ultimi anni vi è una forte evoluzione nell'utilizzo di lampade a LED bianco-blu. Esse risultano essere altamente inquinanti, poiché diffondono maggiormente, causando problemi ai ritmi circadiani nell'uomo, (vedi paragrafo 4.1) e all'ecosistema in generale, (vedi paragrafo 4.2).

Tale studio risulta quindi fondamentale per limitarne gli effetti e le conseguenze. Esistono diversi modi per tale scopo, sia per l'illuminazione pubblica che per quella privata: per la prima è possibile adottare impianti totalmente schermati che comunque garantiscono un'accuratezza estetica e un'adeguata illuminazione stradale, (vedi paragrafo 1.2.2); per la seconda sarebbe utile evitare inutili sprechi di energia.

In conclusione l'inquinamento luminoso è e sarà sempre di più un argomento importante di studio, come dimostra il numero sempre crescente di articoli e convegni al riguardo, come mostrato in figura 1 in appendice.

Ringraziamenti

Il Professor Sergio Ortolani e il Dottore Stefano Cavazzani che con competenza e pazienza mi hanno seguito in questo lavoro di tesi.

Il Dottor Andrea Bertolo e la Dottoressa Renata Binotto (ARPAV) per avermi fornito i dati, e quest'ultima per aver scritto il programma usato per selezionare le notti utilizzabili.

Gabriele Umbriaco per l'installazione e manutenzione della strumentazione di Asiago utilizzata in questo lavoro di tesi.

Bibliografia

ASHDOWN I., 2016, <http://agi32.com/blog>, "Mobile light pollution".

AUBÉ M., 2015, *Phil. Trans. R. Soc. B* 370: 20140117, "Physical behavior of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment".

ARPAV, 2015, L'inquinamento luminoso nella regione Veneto, Osservatorio permanente sul fenomeno dell'inquinamento luminoso.

BARÁ S. et al., 2017, arXiv, "Estimating the relative contribution of streetlights, vehicles and residential lighting to the urban night sky brightness".

BERTOLO A., 2019, *Journal of Imaging* 2019, "Measurements of night sky brightness in the Veneto Region of Italy: Sky Quality Meter Network Results and Differential Photometry by Digital Single Lens Reflex".

BRAINARD G. C., 2001, *Journal of Neuroscience* 21 (16), 6405-6412, "Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor".

CARLI D., 2016, Tesi, "Luminosità del cielo notturno e condizioni di osservazione all'Osservatorio Astrofisico di Asiago", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.

CINZANO P., 1998, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, "Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno".

CINZANO P., 2005, Internal Report 9, ISTIL v.1.4, "Night sky photometry with Sky Quality Meter".

COLWELL S. C., 2016, *Current Biology* 26, R669:R671, "Circadian Rhythms: Does Burning the Midnight Oil Leave You Weak?"

DUCHINI B., 2018, Tesi, "Evoluzione della luminosità del cielo notturno all'Osservatorio di Asiago e siti limitrofi", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli Studi di Padova.

FALCHI F. et al., 2016, *Sci. Adv.* 2:e1600377, "The new world atlas of artificial night sky brightness".

FALCHI F, P. Cinzano, 2011, "Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility".

GARSTANG R. H., 1986, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 98: 364-375, "Model for artificial night-sky illumination".

GARSTANG R. H., 2004, *NASA Astrophysics Data System*, 124: 14-21, "Light Pollution at Mount Wilson Observatory: the sad story of light pollution".

IDA, 2009, "Blue light threatens animals and people".

KRISHNAN N.; RAKSHIT K., 2012, *Neurobiology of Disease* 45(3), 1129:1135, "Loss of circadian clock accelerates aging in neurodegeneration-prone mutants".

LEINERT Ch. et al, 1997, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, v.127, p.1-99, "The 1997 reference of diffuse night sky brightness".

LUGINBUHL C. B., 2009, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 121:185-203, "From the ground up I: light pollution sources in Flagstaff, Arizona".

MULDER C. et al, 2015, *Advances in ecological research* 53, 1:53, "Chapter One - 10 Years Later: Revisiting Priorities for Science and Society a Decade After the Millennium Ecosystem Assessment".

NAVARA, K. J., NELSON, R.J., 2007, *J. Pineal, Res.* 43, 215:224, "The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences".

ORTOLANI S., 2016, *dispense*, "Complementi di Astronomia", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.

PATAT F., 2010, *CIE Conference "Light Quality and Energy Efficiency"*, arXiv: 1011.6175, "The effects of improper lighting on professional astronomical observations".

POMANTE A., 2015, Tesi, "Studio della luminosità del cielo notturno ad Asiago", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.

SIMONEAU A., 2018, Tesi, "Hyperspectral Modelling of the Artificial Night Sky Brightness", Department of Physics and Astronomy, Bishop's University.

SOARDO P. et al., 2010, Pub. CIE 126, "Considerazioni sul modello di Garstang".

VEDOVATO A., 2013, Tesi, "Misura dell'inquinamento luminoso del cielo notturno ad Asiago", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.

Associazione Cielo Buio, <http://www.cielobuio.org/>

Appendice

l (°)	galactic latitude b																								
	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-24	-20	-16	-12	-8	0	4	8	12	16	20	24	30	40	50	60	70	80	
0	42	48	52	57	67	106	143	152	245	461	801	1306	593	442	375	310	153	125	130	96	65	52	44	56	37
10	38	40	62	63	78	99	153	181	233	337	563	734	537	508	444	246	148	135	110	79	81	56	44	44	34
20	35	56	53	57	73	110	133	181	230	328	404	556	342	264	182	159	150	121	96	91	69	51	47	49	31
30	40	40	42	59	65	94	128	152	191	244	288	395	258	165	191	226	190	148	116	86	64	47	40	49	35
40	41	51	48	52	76	88	130	148	165	224	307	359	300	333	339	242	185	139	123	85	58	48	42	44	34
50	43	39	49	59	70	118	126	156	185	243	307	419	287	349	278	211	176	139	106	93	60	47	41	37	33
60	40	38	54	51	79	109	123	138	176	249	335	411	338	361	306	221	166	128	116	84	60	47	41	32	36
70	37	42	50	54	70	96	116	123	166	223	290	292	403	488	319	218	183	135	107	85	69	51	35	43	36
80	39	42	41	63	55	86	108	133	158	215	310	323	284	309	296	216	172	118	103	76	53	42	41	38	37
90	47	45	45	59	56	78	90	123	147	186	259	343	330	240	265	206	151	113	98	78	56	52	44	39	38
100	46	45	52	42	65	83	97	118	164	188	280	394	342	270	212	165	138	98	82	79	58	47	45	42	38
110	41	50	45	46	57	79	88	118	146	182	244	289	248	216	189	166	122	99	94	75	58	49	51	33	37
120	40	41	44	50	60	73	101	134	149	192	219	248	276	292	154	157	120	113	100	77	49	43	42	36	31
130	38	41	35	50	53	81	92	107	134	172	217	273	250	205	146	132	123	114	94	72	55	41	40	34	30
140	35	45	33	51	57	81	93	104	139	160	186	172	197	198	149	119	132	104	88	62	62	60	43	36	33
150	35	40	42	63	58	64	97	109	142	165	189	169	188	165	154	126	128	108	84	77	58	55	40	35	33
160	41	42	51	47	64	73	83	99	88	142	135	162	200	214	181	135	109	126	93	81	57	58	37	39	34
170	40	41	38	53	79	75	92	99	90	114	122	170	238	213	176	156	127	113	109	69	54	59	51	48	36
180	37	45	46	53	70	88	85	105	120	138	112	143	219	230	191	157	135	103	97	73	71	-	52	50	36
190	34	46	43	47	70	83	90	92	123	145	187	214	225	254	216	179	127	113	106	-	-	-	56	52	36
200	34	40	37	50	60	76	105	124	154	176	211	254	271	238	203	179	129	127	-	-	-	-	56	50	36
210	36	40	48	59	61	101	129	147	169	163	225	234	293	254	202	169	148	-	-	-	-	-	57	50	35
220	36	36	41	49	60	81	100	130	146	158	210	259	309	283	204	176	-	-	-	-	-	-	60	51	41
230	35	37	39	43	58	77	96	131	156	230	276	285	296	282	220	157	-	-	-	-	-	-	66	58	41
240	30	38	42	46	58	72	106	104	163	210	279	329	355	310	246	160	-	-	-	-	-	66	70	68	54
250	33	36	39	48	57	75	94	115	160	205	267	314	344	339	252	159	139	119	114	73	63	72	65	53	34
260	38	40	42	58	58	103	124	123	185	239	314	302	283	253	207	194	142	105	107	71	65	67	58	43	34
270	37	36	44	59	69	86	115	143	171	210	268	331	256	248	227	190	146	108	95	77	64	52	50	45	32
280	37	32	48	49	70	230	113	124	149	212	329	445	427	383	261	191	102	119	105	90	61	53	50	43	34
290	38	41	47	50	68	88	109	141	161	256	319	464	760	516	301	210	152	124	108	83	60	48	46	47	39
300	41	42	44	48	69	90	123	132	152	223	312	481	493	436	339	238	154	127	116	86	64	55	42	46	39
310	44	35	44	59	67	107	123	151	208	251	348	535	584	505	324	271	204	149	117	91	70	60	46	41	35
320	45	41	49	58	75	95	124	164	207	309	420	517	479	401	304	226	189	156	118	94	68	63	45	38	36
330	43	39	47	55	78	96	127	164	231	307	448	736	530	410	359	286	231	159	126	102	64	61	45	37	39
340	41	43	47	55	75	106	143	178	240	329	487	478	526	331	219	241	190	131	124	102	78	54	49	43	42
350	38	41	53	68	88	105	151	189	260	366	575	617	460	526	382	415	283	163	145	108	68	55	43	45	41

Tabella 1 Luce galattica integrata in rosso(640 nm), data in coordinate galattiche e in unità S10 \odot , (Leinert et al, 1997).

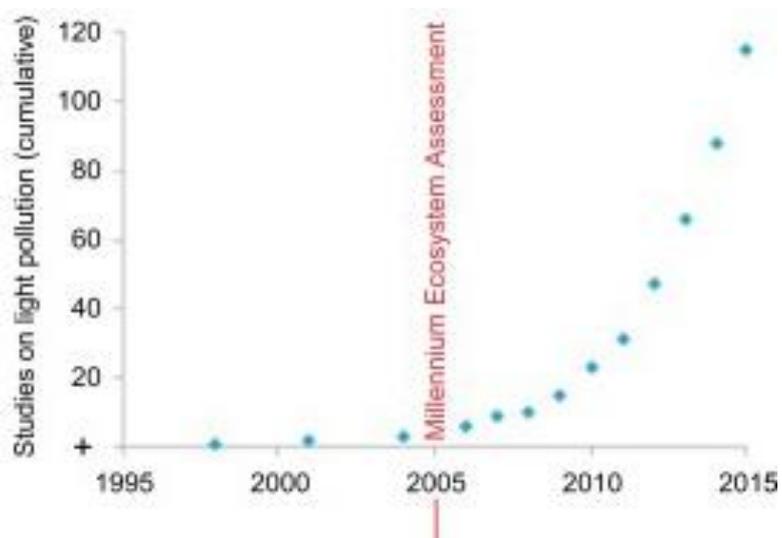


Figura 1 Evoluzione temporale che mostra la crescita degli articoli sull'inquinamento luminoso, (Mulder et al, 2015).