

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA - FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA CIVILE

L'impatto della geometria urbana per applicazioni del telerilevamento in ambito energetico: l'influenza dello Sky View Factor

Tesi di laurea in
TELERILEVAMENTO E GIS M

Tesi di laurea di:
Flavio Vallicelli

Relatore:
Prof. Ing. Gabriele Bitelli

Correlatori:
Dott. Ing. Paolo Conte
Dott. Ing. Emanuele Mandanici

II SESSIONE

Anno Accademico 2012-2013

Sommario

Introduzione.....	7
-------------------	---

Capitolo 1 – Introduzione allo Sky View Factor

1.1	Trattazione analitica di base	13
1.1.1	Trattazione di Johnson e Watson (1984).....	16
1.2	Modello analitico in ambiente urbano	18
1.2.1	Trattazione di Oke (1981).....	18
1.2.2	Trattazione di Johnson e Watson (1984).....	20
1.3	Metodo fotografico di Steyn (1980)	27
1.3.1	Integrazione del metodo di Steyn (1980) proposta da Johnson e Watson (1984).....	31
1.4	Metodo fotografico <i>fisheye</i> con trattamento digitale dell'immagine	34
1.4.1	Metodo di Steyn et al. (1986).....	36
1.4.2	Metodo di Holmer et al. (2001).....	39
1.4.3	Studio di Grimmond et al. (2001)	43
1.4.4	Software specialistici	45
1.5	Stima dello <i>Sky View Factor</i> usando ricevitori <i>GNSS</i>	47

Capitolo 2 – Mappatura dello Sky View Factor per superfici urbane

2.1	Sintesi applicazioni delle tecniche di mappatura dello <i>SVF</i>	49
2.2	Informazioni geometriche di input: file raster	50
2.2.1	Algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999).....	50
2.2.2	Software SOLWEIG di Lindberg et al. (2008)	58
2.2.3	Estensione ENVI di Zakšek et al. (2011).....	61
2.2.4	Metodo di Kastendeuch (2013).....	63
2.3	Informazioni geometriche di input: file vettoriali	67

2.3.1	3DSkyView extension per ArcGIS (Souza et al. 2003).....	68
2.3.2	SVF extension per ArcGIS (Gál et al. 2007)	72
2.3	Software SkyHelios di Matzarakis e Matuschek (2009)	77
2.5	Considerazioni.....	80

Capitolo 3 - Analisi di prestazioni e sensibilità dei software

3.1	Area di studio	84
3.2	Fase di preparazione	86
3.3	Presentazione output di calcolo e analisi di sensibilità	97
3.3.1	Modalità operative	97
3.3.2	SOLWEIG.....	99
3.3.3	SkyHelios	105
3.3.4	Estensione ENVI.....	111
3.3.5	Estensione ArcGIS	119
3.3.6	Confronti con metodo analitico.....	122
3.4	Analisi di affidabilità dei software	123
3.4.1	Analisi di affidabilità su SkyHelios	124
3.4.2	Analisi di affidabilità su estensione ENVI.....	129
3.4.3	Analisi di affidabilità su estensione ArcGIS	134
3.4.4	Scarti in corrispondenza dei siti caratteristici	137
3.5	Considerazioni.....	138

Capitolo 4 - Creazione script MATLAB per mappatura SVF

4.1	Presentazione dello Script	141
4.1.1	Formazione della proiezione stereografica	142
4.1.2	Calcolo dello Sky View Factor	147

Conclusioni.....	153
Bibliografia.....	155
Appendice A.....	161

Introduzione

La complessa morfologia di un ambiente urbano comporta vistose interferenze nel bilancio dei flussi radiativi entranti e uscenti, che si manifestano principalmente sotto forma di alterazione della dispersione per irraggiamento a onda lunga verso il cielo e di una riduzione della radiazione solare globale (nella sue componenti diretta e diffusa); ne consegue che all'interno delle città, soprattutto in quelle aree caratterizzate da un'alta densità di edifici, il bilancio energetico di tipo radiativo presenta delle forti modifiche rispetto a quanto osservabile nelle aree rurali.

Queste alterazioni determinano la comparsa, in primo luogo, dei fenomeni microclimatici caratteristici delle zone urbanizzate. Tra i più evidenti ritroviamo l'isola di calore: questa si sviluppa non solo in conseguenza del calore sensibile rilasciato da attività antropiche e delle caratteristiche termiche dei materiali, ma anche a causa della geometria dell'ambiente urbano, che sfavorisce la dispersione termica per irraggiamento a onda lunga. Un altro fenomeno degno di nota è l'effetto di schermatura che ostacoli e edifici inducono sulla radiazione solare, determinando una diminuzione del potenziale solare fotovoltaico incidente sulle superfici urbane nelle componenti dirette e diffuse.

Questo lavoro di tesi si occuperà dei metodi per la stima del fattore di vista del cielo (*Sky View Factor* oppure *SVF*): un parametro adimensionale che esprime in un singolo valore l'influenza dei fattori morfologici in un punto specifico, permettendo una stima delle informazioni climatologiche rilevanti su microscala. In altre parole, rappresenta la frazione di cielo visibile sulla superficie di un emisfero centrato sul punto di analisi e di conseguenza può essere un parametro rilevante per la stima della geometria radiativa di un sito, sintetizzando il rapporto tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie piana e la radiazione emessa (o ricevuta) dall'ambiente emisferico circostante. Nonostante lo *SVF* sia una semplice parametrizzazione, il suo calcolo si è dimostrato una sfida per gli studiosi. Negli anni sono state sviluppate diverse metodologie, ognuna con i propri vantaggi e svantaggi, ma non è emersa una tecnica definitiva.

Il fattore di vista del cielo può essere un parametro rilevante per stimare gli effetti della topografia su alcuni fenomeni caratteristici delle zone urbane. Tra i più sentiti troviamo: la disponibilità del segnale *GPS*, che all'interno delle aree cittadine presenta improvvise variazioni; la quota di

radiazione diffusa¹ incidente su una superficie orizzontale, direttamente correlata alla linea dell'orizzonte visibile da un punto; l'effetto dell'isola di calore urbana (studiato negli ambiti della pianificazione urbana e della biometeorologia), collegato alla capacità di raffreddamento in un'area per irraggiamento radiativo ad onda lunga (e in parte anche alla convezione), che risulta più efficiente nelle zone con fattore di vista del cielo elevato poiché queste aree riescono ad emettere una maggiore quantità di energia verso lo spazio sotto forma di radiazioni ad onda lunga. Questi fenomeni, a seguito di opportune considerazioni, sono tutti valutabili tramite la conoscenza dello *Sky View Factor*.

Nel primo capitolo verrà attentamente esaminata la letteratura relativa alle tecniche apparse tra gli anni 80 e gli anni 90 per la stima dello *Sky View Factor* in contesti puntuali, approfondendo come si è giunti alla definizione di formulazioni analitiche per l'ambiente urbano a partire dalle teorie generali sullo scambio radiativo, con particolare riguardo per quei modelli che descrivono gli scambi energetici tramite radiazioni ad onda lunga tra il cielo ed un elemento di superficie. La seconda parte del capitolo include la descrizione di un metodo considerato il riferimento di fatto per la stima dello *Sky View Factor* in ambito urbano, ovvero le tecniche che sfruttano fotografie *fisheye* per determinare la porzione di volta emisferica del cielo e l'orizzonte visibile da un punto.

Il secondo capitolo si occuperà degli algoritmi numerici che, tramite le informazioni geometriche contenute all'interno di database tridimensionali degli edifici di tipo raster (modelli digitali della superficie, *DSM*) oppure vettoriale (*shapefile*), hanno esteso il calcolo del valore dello *Sky View Factor* ad ampie superfici urbane, sostituendo l'utilizzo delle tecniche fotografiche nell'ultimo decennio. I vantaggi nell'adozione di questi software sono immediati e di notevole importanza poiché il tempo di finalizzazione è infinitamente minore a parità di superficie urbana studiata, collegato solamente alla potenza di calcolo del computer ed alle dimensioni del file di input.

Sono stati sviluppati numerosi modelli numerici per la stima del fattore di vista del cielo, e nel terzo capitolo saranno presi in considerazione i software considerati più affidabili ed efficaci per la mappatura dello *SVF* applicati in un ambiente urbano, al fine di evidenziare e valutare possibili differenze nei risultati ed offrire un punto di partenza per ulteriori miglioramenti. L'obiettivo è quello di valutare, per ogni modello di calcolo, la sensibilità ai diversi parametri di input al variare della risoluzione spaziale del dato altimetrico (e quindi del livello di dettaglio degli elementi riprodotti nei modelli digitali della superficie), a cui seguirà un confronto prestazionale tra i diversi

¹ Secondo l'Atlante italiano della radiazione solare realizzato da ENEA, la quota di energia solare diffusa rappresenta circa il 40% della radiazione globale annuale incidente su una superficie orizzontale nel territorio italiano.

software, adottando come riferimento di massima precisione i risultati del modello ritenuto il più affidabile all'interno della letteratura presa in esame. A tale scopo nella sperimentazione si è utilizzato un modello digitale delle superfici ricampionato a quattro diverse risoluzioni geometriche ed una cartografia vettoriale opportunamente riferiti ad un'area di studio di 0.6889 km^2 all'interno dell'area urbana della città di Bologna.

Infatti, sebbene sia evidente il vantaggio che deriva dall'utilizzo di un *DSM* ad alta risoluzione (che fornisce dei risultati assimilabili a quelli ottenuti con una base cartografica vettoriale) per limitare l'incertezza nella stima dei fattori di vista del cielo, i tempi di calcolo associati possono essere proibitivi, e pertanto occorre individuare delle soluzioni di compromesso che consentano di ottenere risultati di accuratezza sufficiente, adeguata allo scopo della valutazione in tempi operativamente accettabili.

Infine, nel tentativo di implementare nuovi miglioramenti nel calcolo dello *Sky View Factor* a partire da informazioni vettoriali e per comprendere a fondo la dinamica di funzionamento per questo tipo di algoritmi, è stato creato uno script in linguaggio *MATLAB* per la simulazione del metodo fotografico e per ottenere un'immagine *fisheye* virtuale (proiezione stereografica) dalla quale stimare il fattore di vista del cielo.

Introduzione allo Sky View Factor

Il flusso energetico intercettato da un radiometro posizionato in un determinato punto dello spazio dipende in primo luogo da due fattori: le proprietà chimico-fisiche delle superfici radianti ed un fattore geometrico tra queste e il sensore; quest'ultimo è funzione della distanza e dell'orientamento di ciascun elemento radiante. Il fattore geometrico in questione è chiamato *View Factor* (fattore di vista) [STEYN 1980]. Il fattore di vista del cielo (*Sky View Factor* oppure *SVF*) è un parametro adimensionale con valori compresi tra 0 e 1 che rappresenta la frazione di cielo visibile sulla superficie di un emisfero centrato sul punto di analisi [OKE 1981] e di conseguenza può essere un parametro rilevante per la stima della geometria radiativa di un sito, sintetizzando il rapporto tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie piana e la radiazione emessa (o ricevuta) dall'ambiente emisferico circostante [WATSON, JOHNSON 1987]. Lo *Sky View Factor* esprime in un singolo valore l'influenza dei fattori morfologici in un punto specifico, permettendo una stima delle informazioni climatologiche rilevanti su microscala [MATZARAKIS 2012]. Nonostante lo *SVF* sia una semplice parametrizzazione, il suo calcolo si è dimostrato una sfida per gli studiosi. Negli anni sono state sviluppate diverse metodologie, ognuna con i propri vantaggi e svantaggi, ma non è emersa una tecnica definitiva [CHAPMAN, THORNES 2004].

Esaminando attentamente la letteratura sull'argomento, Unger (2009) ha prodotto una sintesi sui numerosi metodi per la determinazione dello *Sky View Factor* affrontati a partire dagli anni '80, con particolare riguardo agli studi effettuati in ambito urbano, individuando cinque categorie principali: modelli in scala, metodi analitici (geometrici), metodi fotografici, trattamento di segnale *GPS* e computazione tramite software utilizzando database tridimensionali degli edifici. Grazie al contributo di Unger (2009) si riporta una panoramica introduttiva delle citazioni più frequenti riguardanti i metodi per il calcolo dello *SVF*:

- il metodo di Steyn (1980), a seguito della creazione di un'immagine formata da una griglia polare sovrainpressa ad una fotografia scattata in sito con un obiettivo *fish-eye*², prevede che

² Uno scatto *fish-eye* è una ripresa fotografica eseguita con un obiettivo grandangolare che abbraccia un angolo di campo maggiore o uguale a 180°; il termine *fish-eye* fu coniato da Wood Robert W. (1911).

gli ostacoli vengano delineati manualmente sull'immagine e quindi lo *SVF* del contesto ripreso venga calcolato dalla somma del fattore di vista del cielo determinato manualmente per ogni anello del sistema polare;

- Oke (1981) ha sviluppato un metodo analitico utilizzando modelli in scala, elaborando equazioni basate sulla geometria del sito nell'ipotesi di canyon urbano³ di lunghezza infinita e sezione simmetrica con lo scopo di studiare l'isola di calore urbana⁴;
- Johnson e Watson (1984) hanno ripreso e perfezionato il metodo analitico di Oke (1981) per canyon urbani non simmetrici;
- Steyn et al. (1986) hanno sperimentato una prima automatizzazione del metodo fotografico sfruttando immagini digitalizzate riprese da una videocamera dotata di obiettivo *fisheye*;
- Holmer (1992) ha analizzato foto *fisheye* in piccoli settori utilizzando una tavoletta grafica connessa al computer;
- Grimmond et al. (2001) hanno confrontato i risultati ottenuti con una fotocamera digitale dotata di lenti *fisheye* con quelli derivati con il sensore *plant canopy analyser*, (che misura l'indice *Diffuse Non-Interceptance DIFN*) concludendo che l'immagine digitale, trattata con un opportuno software, offre una stima migliore rispetto a quest'ultimo;
- Bradley et al. (2001), Brown et al. (2001), Chapman et al. (2001) e Holmer et al. (2001) hanno presentato alcuni metodi di elaborazione in *post-processing* delle immagini da applicare alle fotografie *fisheye* scattate con macchine digitali o digitalizzate con scanner;
- Rzepa e Gromek (2006) e Gál et al. (2007) hanno elaborato il *BMSKyView*, un software che seleziona automaticamente su una foto *fisheye* tutti i pixel simili a quelli selezionati dall'utente (ad esempio il cielo) e calcola l'*SVF* in base al metodo di Steyn (1980);
- Hämmerle et al. (2011) hanno implementato in *ArcView GIS* uno script per valutare automaticamente in modo digitale le fotografie *fisheye* tramite le formule del metodo di Steyn, in modo simile a *BMSKyView*;
- Matzarakis et al. (2007, 2010) hanno sviluppato il *RayMan Module*, un software che permette il calcolo dello *SVF* sia da un input topografico vettoriale (in genere creato manualmente dall'utente), sia a partire da fotografie *fisheye*;

³ È possibile individuare un'unità geometrica urbana presente in maniera diffusa: il canyon urbano. Il canyon consiste nella combinazione di due superfici verticali e di una orizzontale ed è formato tipicamente da due edifici adiacenti e da una strada situata tra di essi [NUNEZ, OKE 1977].

⁴ Il fenomeno dell'isola di calore urbana (Urban Heat Island - UHI) consiste nella differenza di temperatura rilevabile tra le aree cittadine, più calde, rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali, in particolare durante le ore notturne in condizioni di sereno e calma di vento. L'effetto è stato analizzato per la prima volta nel 1818 a Londra dal meteorologo Luke Howard. Il termine isola di calore è attribuito a Gordon Manley (1958).

- Chapman et al., (2002), con ulteriori sviluppi grazie a Chapman e Thornes (2004), proposero un metodo unico nel suo genere, ossia la misura in tempo reale dello *Sky View Factor* usando un ricevitore *GPS* per acquisire informazioni da correlare al fattore di vista e in particolare a numero e visibilità dei satelliti, all'indice *DOP* (*Dilution of Precision*) e all'intensità del segnale;
- Ratti e Richens (1999) posero le basi per il calcolo dello *SVF* tramite software di elaborazione delle immagini applicando un algoritmo di proiezione ripetuta delle zone d'ombra degli edifici ad un file raster *DSM*;
- diversi autori si sono cimentati nello sviluppo di software che sfruttassero file raster in associazione all'algoritmo di Ratti e Richens (1999); tra i più citati si ricordano Lindberg et al. (2008), che hanno sviluppato l'applicativo *SOLWEIG* nell'ambito di ricerche biometeorologiche;
- Souza et al. (2003, 2004) hanno sviluppato un'estensione creata per il software *ArcView GIS* che permette di calcolare lo *SVF* a partire da una database tridimensionale degli edifici di tipo vettoriale; questo metodo adotta una proiezione stereografica della scena (diversa dalla proiezione equiangolare prodotta da lenti *fisheye*); Unger (2009) e Gál et al. (2009) hanno poi sviluppato uno script di calcolo dell'*SVF* in base formula di Oke (1987) per le conche;
- il software *SkyHelios* (Matzarakis e Matuschek 2011) calcola un'immagine bidimensionale georiferita di *SVF* su un'area di analisi, a partire da un input topografico di tipo vettoriale o raster.

1.1 Trattazione analitica di base

Diversi autori, a partire dagli anni '60, hanno affrontato l'influenza del fattore di vista nell'ambito dei bilanci radiativi: ad esempio Anderson (1964) e Refschneider (1967) descrissero gli effetti di un view-factor sugli scambi radiativi all'interno di un ambiente forestale. Troups (1965) elaborò una serie di programmi per computer che potevano stimare in modo diretto i fattori di vista avendo nota la morfologia del territorio [JOHNSON, WATSON 1984].

Prima di proseguire in considerazioni più dettagliate sullo *Sky View Factor*, è opportuno approfondire alcuni concetti di base sullo scambio radiativo, partendo dalle grandezze fondamentali ritenute importanti nell'analisi del fattore di vista del cielo. I simboli nelle equazioni che seguono sono riferiti alla Figura 1.1.

Flusso radiante φ

Quantità di energia radiante Q [Unità: J] emessa, trasferita o ricevuta in forma di radiazione elettromagnetica da una superficie o una sorgente puntiforme ad un'altra superficie nell'unità di tempo, quindi è una potenza [BRIVIO et al. 2006]:

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{Unità: W}]$$

Irradianza E , emittanza M

Rapporto tra il flusso radiante Φ incidente sulla superficie (irradianza E) o emesso dalla superficie (emittanza M) e l'area dell'elemento; esprime la densità di flusso radiante [BRIVIO et al. 2006]:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{Unità: W m}^{-2}]$$

Radianza L

Flusso radiante riflesso, trasmesso o emesso da un punto di una superficie nella direzione θ (angolo tra direzione della radiazione e la normale alla superficie interessata) per unità di angolo solido $d\omega$ [BRIVIO et al. 2006]:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos \theta d\omega} \quad [\text{Unità: W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$$

Angolo solido $d\omega$

In termini geometrici sottende l'area elementare dA interessata dal flusso radiante emesso dal punto Q (Figura 1.1), esprimibile in funzione degli angoli θ' e φ' [BRIVIO et al. 2006]:

$$dA = a \cdot b = R^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'$$

con:

$$a = r d\varphi' = R^2 \sin \theta' d\varphi' \quad b = R d\theta'$$

Quindi si ottiene:

$$d\omega = \frac{dA}{R^2} = \frac{R^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'}{R^2} = \sin \theta' d\theta' d\varphi'$$

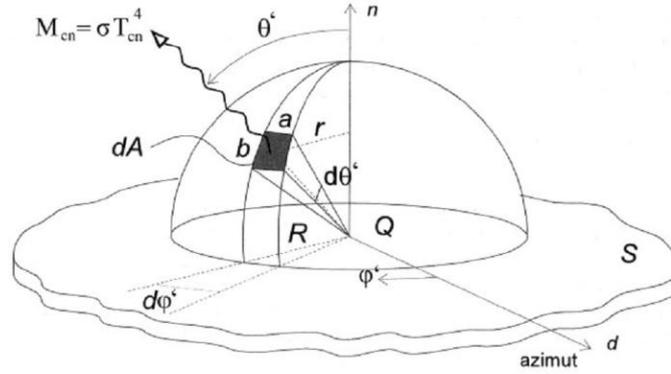


Figura 1.1. Geometria di diffusione della radianza nello spazio emisferico, nel caso di propagazione in un mezzo isotropo e proveniente da un superficie Lambertiana [BRIVIO et al. 2006].

Per valutare l'angolo solido su tutto l'ambiente emisferico si introduce l'ipotesi di radiatore Lambertiano, ossia un radiatore che si comporta da perfetto diffusore su di uno spazio emisferico⁵. Questa ipotesi comporta che il valore di radianza è indipendente dall'angolo di elevazione θ' e dall'azimut φ' :

$$L(\theta', \varphi') = L$$

Con l'ipotesi di diffusione su uno spazio emisferico, si ricava l'emittanza M complessiva emessa dalla superficie S nel punto Q :

$$M = \int_{\omega} L(\theta', \varphi') \cos\theta' d\omega = L \int_{\omega} \cos\theta' d\omega$$

Sostituendo $d\omega$ con la formula dell'angolo solido risulta:

$$L \int_{\omega} \cos\theta' d\omega = L \int_{\omega} \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi'$$

⁵ Una superficie che si comporta da perfetto diffusore o diffusore integrale costituisce un modello soltanto ideale. In letteratura tale modello ideale prende il nome di superficie lambertiana. Essa è definita come una superficie il cui valore di radianza osservata risulta costante per qualunque combinazione di geometria tra la sorgente ed il punto di osservazione (radiazione isotropica).

Infine valutando l'integrale dell'angolo solido da 0 a 2π per l'angolo azimutale φ' e da 0 a $\pi/2$ per l'angolo di elevazione θ' si ottiene il legame tra la radianza L emessa da un punto e l'emittanza M nell'ambiente emisferico:

$$M = L \int_{\omega} \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi' = L \int_{\varphi'=0}^{\varphi'=2\pi} \int_{\theta'=0}^{\theta'=\pi/2} \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi' = L\pi$$

1.1.1 Trattazione di Johnson e Watson (1984)

Un caso generale di modello analitico per lo *Sky View Factor* è stato illustrato da Johnson e Watson (1984) seguendo quanto riportato da Kreith (1965) a riguardo dei principi di trasferimento radiativo: il modello descrive gli scambi energetici attraverso radiazioni ad onda lunga tra il cielo ed un elemento ΔA sul terreno, rappresentando la volta del cielo come la superficie di un emisfero di raggio R centrato su ΔA (Figura 1.2). I simboli nelle equazioni che seguono sono riferiti alla Figura 1.2. Per continuità con la trattazione di Brivio et al. (2006) si premette che in questo modello l'angolo ϕ definito in Figura 1.2 corrisponde all'elevazione θ' del Brivio.

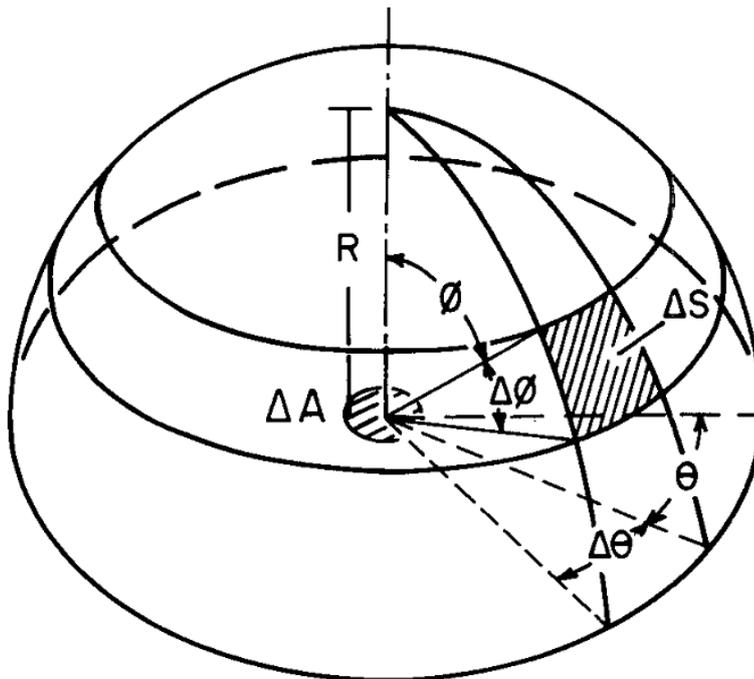


Figura 1.2. Modello per lo scambio radiativo tra il cielo ed un elemento superficiale [JOHNSON, WATSON 1984].

Se una densità di flusso radiante (emittanza) M_s è trasmessa da una porzione di emisfero avente superficie ΔS e raggiunge l'elemento ΔA posto al centro del piano equatoriale della sfera (quindi la

direzione della radiazione coincide con quella normale alla superficie ΔS , allora il flusso radiante trasferito da ΔS a ΔA risulta:

$$\varphi_{S \rightarrow A} = L_s (\Delta S \cos 0) \Delta \omega$$

dove:

$L_s = \frac{M_s}{\pi}$: radianza emessa da ΔS (in ipotesi di radiazione isotropica);

$\Delta \omega = \frac{\Delta A \cos \phi}{R^2}$: angolo solido che sottende la radianza emessa da ΔS verso ΔA .

Quindi sostituendo si ottiene:

$$\varphi_{S \rightarrow A} = \frac{M_s}{\pi} \Delta S \frac{\Delta A \cos \phi}{R^2}$$

Il flusso radiante che incide su ΔA da una porzione qualsiasi di cielo visibile risulta:

$$\varphi_{S \rightarrow A} = \frac{M_s}{\pi} \Delta A \frac{\int_{S_v} \cos \phi dS}{R^2}$$

Dove S_v è la porzione di emisfero che rappresenta il cielo visibile.

È conveniente esprimere la $\varphi_{S \rightarrow A}$ in funzione del fattore di visibilità del cielo (*Sky View Factor*) da ΔA . In generale si definisce per ΔA il fattore di vista di ΔS come la frazione di flusso radiante uscente da ΔA che raggiunge ΔS . Se la densità di flusso radiante uscente da ΔA è M_A , allora il rapporto è dato da:

$$\psi_s = \frac{\frac{M_A \cos \phi}{\pi R^2} \Delta A \Delta S}{\frac{M_A \Delta A}{\pi R^2} \int_S \cos \phi dS}$$

dove il denominatore è il flusso radiante (emesso da ΔA) che raggiunge l'intera superficie dell'emisfero. Il rapporto si riduce a:

$$\frac{1}{\pi R^2} \cos \phi \Delta S$$

Ora semplificando si può definire lo *Sky View Factor* (ψ_s) per l'elemento superficiale ΔA come la frazione di flusso radiante emessa da ΔA e intercettata dal cielo. Quindi si ha:

$$\psi_s = \frac{1}{\pi R^2} \int_{S_v} \cos\phi \, dS$$

Si nota come ψ_s sia congruente alla quota di flusso radiante ricevuto da ΔA dal cielo visibile. Questo si mostra sostituendo M_A con M_s e integrando in S_v .

Confrontando M_s con la ψ_s , e assumendo che il cielo si comporti approssimativamente come un corpo nero, si ottiene:

$$\begin{aligned} \varphi_{S \rightarrow A} &= \psi_s M_s \\ \varphi_{S \rightarrow A} &= \psi_s \sigma T_s^4 \end{aligned}$$

dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T_s è la temperatura del cielo. In un ambiente rurale pianeggiante ψ_s è prossimo all'unità e M_s semplicemente diventa pari a σT_s^4 .

1.2 Modello analitico in ambiente urbano

I primi modelli analitici applicati in contesti urbani utilizzavano equazioni impostate in funzione della geometria del sito per la stima dello *Sky View Factor*: specificatamente nel caso del metodo introdotto da Oke (1981), i parametri morfologici consistevano semplicemente in altezza H e larghezza D di un ambiente urbano composto da un unico canyon simmetrico e di lunghezza infinita. Per scenari più comuni e complessi, in cui gli edifici si presentano allineati in modo irregolare e con altezze variabili, sono necessarie equazioni più raffinate come quelle proposte da Johnson e Watson (1984) basate sulla misura degli angoli azimutali e di elevazione degli edifici.

1.2.1 Trattazione di Oke (1981)

I primi studi approfonditi dal punto di vista analitico in ambito urbano sono stati condotti da Oke (1981), che ha posto l'attenzione in particolare al collegamento tra *Sky View Factor* ed isola di calore urbana, dimostrando che il fattore di vista è la componente più influente del bilancio energetico nello sviluppo dell'isola di calore all'interno dello strato compreso tra i tetti e la superficie del terreno (denominato *Urban Canopy Layer*). Secondo Oke, la morfologia dei canyon

urbani comporta un'alterazione della dispersione di radiazione a onda lunga verso il cielo (in particolare dopo il tramonto in condizioni di cielo sereno e calma di vento), creando un accumulo di calore nelle aree cittadine rispetto alle zone rurali, che si raffreddano più velocemente.

Oke (1981) per sviluppare il suo metodo analitico ha utilizzato modelli in scala, elaborando equazioni basate sulla geometria del sito nell'ipotesi di canyon urbano di larghezza pari a $2D$, lunghezza infinita, sezione simmetrica e altezza H (Figura 1.3).

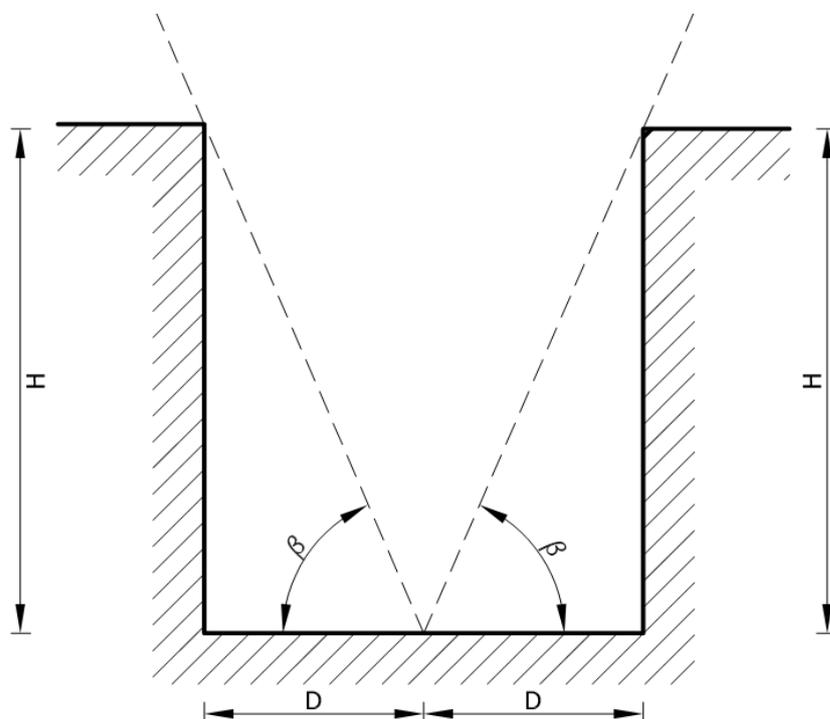


Figura 1.3. Geometria di un canyon simmetrico.

In corrispondenza della metà della base del canyon è stato individuato un elemento di superficie e su di esso lo *Sky View Factor* è determinato con questa formula [GRIMMOND et al. 2001]:

$$\psi_s = \cos \beta = \cos[\tan^{-1}(H/D)]$$

dove $\beta = \tan^{-1}(H/D)$ è l'angolo di elevazione dell'edificio misurato sul punto di riferimento a metà del canyon, ovvero ad una distanza D dalla parete. Quindi lo *SVF* in un canyon simmetrico di lunghezza infinita è funzione del rapporto geometrico bidimensionale H/D .

Il fattore di vista dei muri ψ_w (*Wall View Factor o WVF*) per ciascun lato del canyon risulta:

$$\psi_w = \frac{1}{2}(\sin^2\beta + \cos\beta - 1)(\cos\beta)^{-1}$$

$$\psi_w = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)$$

Il *WVF* complessivo sul punto in oggetto è quindi la somma del ψ_w per le due pareti che risultano congruenti avendo ipotizzato il canyon come simmetrico:

$$\psi_w + \psi_w = (1 - \cos\beta)$$

Lo *Sky View Factor* per l'elemento superficiale in funzione del *Wall View Factor* è dato da:

$$\psi_s = (1 - 2\psi_w)$$

La presenza di edifici in un ambiente urbano crea una particolare geometria per cui lo scambio radiativo al di sotto della quota dei tetti (ovvero all'interno del *Urban Canopy Layer*) avviene con uno *Sky View Factor* inferiore all'unità. Nei canyon urbani caratterizzati da un elevato rapporto *H/D*, sotto certe condizioni ideali, la maggior parte degli scambi radiativi sul fondo del canyon possono avvenire principalmente con i muri adiacenti e non con il cielo; secondo Oke (1981) questa è la principale causa dello sviluppo dell'isola di calore negli ambienti urbani.

1.2.2 *Trattazione di Johnson e Watson (1984)*

A partire dal modello di Oke (1981), Johnson e Watson (1984) hanno proposto alcune osservazioni: la formulazione di Oke è utile per molte tipologie di canyon urbani, ma una sua applicazione universale è limitata dall'ipotesi di lunghezza infinita e simmetria del canyon, per cui è necessaria l'adozione di un valore medio dell'altezza *H* che sia rappresentativo di una "skyline" eventualmente molto complessa. Per aggirare questo problema Johnson e Watson (1984) hanno esteso il trattamento analitico dello *Sky View Factor* a canyon finiti e non simmetrici, determinando espressioni basate sulla misura dell'angolo azimutale e di elevazione degli edifici circostanti.

a) *Canyon urbano simmetrico di lunghezza infinita*

Per iniziare la trattazione, si parte dalla geometria più semplice considerando un edificio, ovvero un singolo muro di lunghezza infinita e di altezza *H*, quindi si considera un elemento di superficie ΔA collocato ad una distanza *D* dal muro, come rappresentato in Figura 1.4. Il *Wall View Factor* (ψ_w)

calcolato su ΔA rappresenta la frazione di radiazione emessa da ΔA che viene intercettata dalla superficie del muro (W):

$$\psi_w = \frac{1}{\pi} \int_W \frac{\cos\phi \sin\phi}{r^2} dW$$

dove r è la distanza tra ΔA ed un elemento di superficie ΔW sul muro; l'angolo ϕ è definito in Figura 1.4.

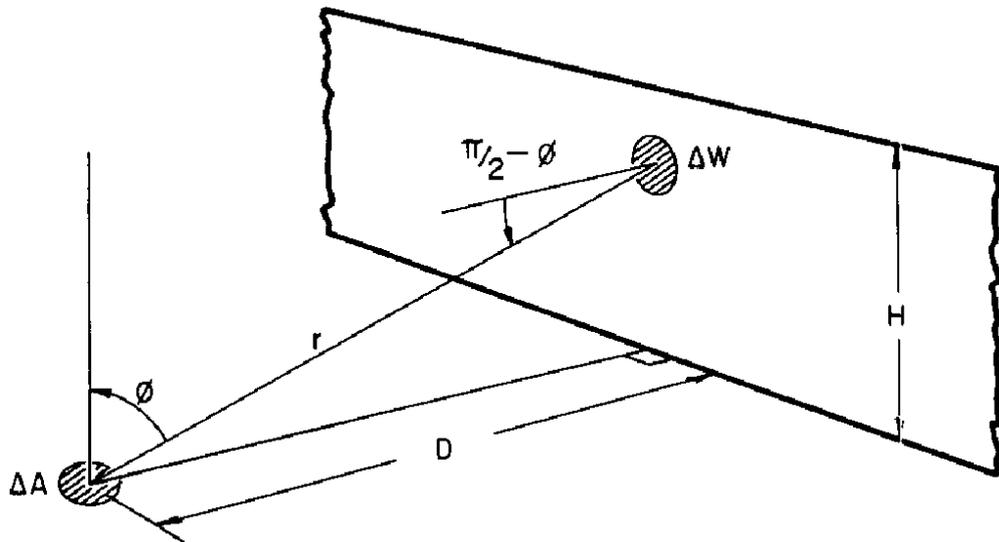


Figura 1.4. Modello per lo scambio radiativo tra un muro di lunghezza infinita ed un elemento superficiale [JOHNSON, WATSON 1984].

Se una densità di flusso radiante E_W si irradia da ΔW , allora la radianza proveniente dal muro e ricevuta dall'elemento ΔA risulta:

$$\varphi_{W \rightarrow A} = \frac{E_W}{\pi} \int_W \frac{\cos\phi \sin\phi}{r^2} dW = \psi_w E_W$$

che, se il muro si comporta approssimativamente come un corpo nero, è equivalente a

$$\varphi_{W \rightarrow A} = \psi_w E_W = \psi_w \sigma T_w^4$$

dove T_w è la temperatura del muro.

Nell'ambiente urbano è necessario valutare la frazione relativa di ψ_w e ψ_s poiché sia il cielo sia i muri sono visibili dall'elemento superficiale ΔA sul fondo del canyon. Per ottenere ciò, occorre

proiettare ΔW e W sulla superficie di un emisfero (S) centrato in ΔA e considerare queste proiezioni rispettivamente come ΔW_S e W_S . In questo caso abbiamo:

$$\psi_w = \frac{1}{\pi R^2} \int_{W_S} \cos\phi \, dW_S$$

e quindi il dominio W_S dell'integrale è rappresentato dall'ombra del muro sulla superficie dell'emisfero (Figura 1.5). Si nota che ψ_w è la frazione di flusso radiante ad onda lunga proveniente dal cielo ma oscurata dalla presenza del muro.

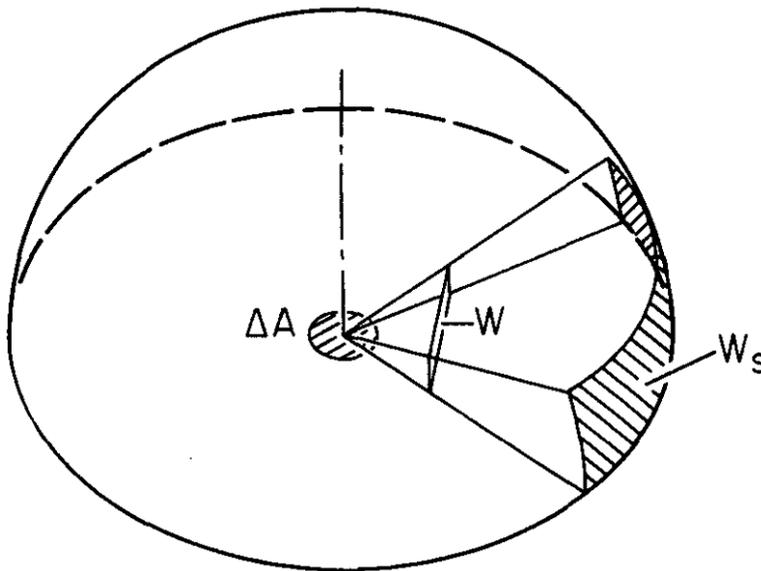


Figura 1.5. Proiezione del muro su un emisfero che rappresenta il cielo [JOHNSON, WATSON 1984].

Per un canyon simmetrico di lunghezza infinita ψ_w è dato da:

$$\psi_w = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\pi R^2} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_{-\pi/2-\omega}^{+\pi/2} R^2 \cos\phi \sin\phi \, d\phi \, d\theta \right]$$

$$\psi_w = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_0^{\omega} \cos\phi \sin\phi \, d\phi \, d\theta$$

con θ che corrisponde all'angolo del meridiano dell'emisfero (Figura 1.2) e $\omega = \tan^{-1} (H/D \cos\theta)$. Se il muro è l'unico impedimento alla radiazione proveniente dal cielo e diretta su ΔA , allora si avrà che $\psi_s = 1 - \psi_w$.

b) Canyon urbano non simmetrico di lunghezza finita

I risultati ottenuti nell'ipotesi di canyon urbano simmetrico di lunghezza infinita possono essere applicati anche ad un caso finito e non simmetrico. Si parte considerando un singolo muro di lunghezza finita, le cui estremità risulteranno comprese tra due angoli azimutali γ_1 e γ_2 rispetto all'elemento di superficie ΔA e misurati in riferimento al segmento perpendicolare al muro (Figura 1.6). Quindi in questo caso l'integrale per ottenere ψ_w non sarà compreso tra $-\pi/2$ e $\pi/2$, ma tra γ_1 e γ_2 , per cui avremo:

$$\psi_w = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_0^{\omega} \cos\phi \sin\phi \, d\phi \, d\theta$$

$$\psi_w = \frac{1}{2\pi} \{(\gamma_2 - \gamma_1) + \cos\beta [\tan^{-1}(\cos\beta \tan\gamma_1) - \tan^{-1}(\cos\beta \tan\gamma_2)]\}$$

Dall'ultima equazione è possibile calcolare il *Wall View Factor* di un elemento di superficie circondato da edifici aventi lunghezze ed altezze variabili, ognuno rappresentato da uno o più muri di dimensione finita. Non è necessario considerare l'orientamento di ciascun muro, una volta che sono noti H e D , oppure β ; quest'ultimo, che corrisponde a $\beta = \tan^{-1}(H/D)$, non è altro che l'angolo di elevazione massima del muro misurato rispetto alla linea parallela al muro stesso e passante attraverso l'elemento di superficie ΔA (Figura 1.6)

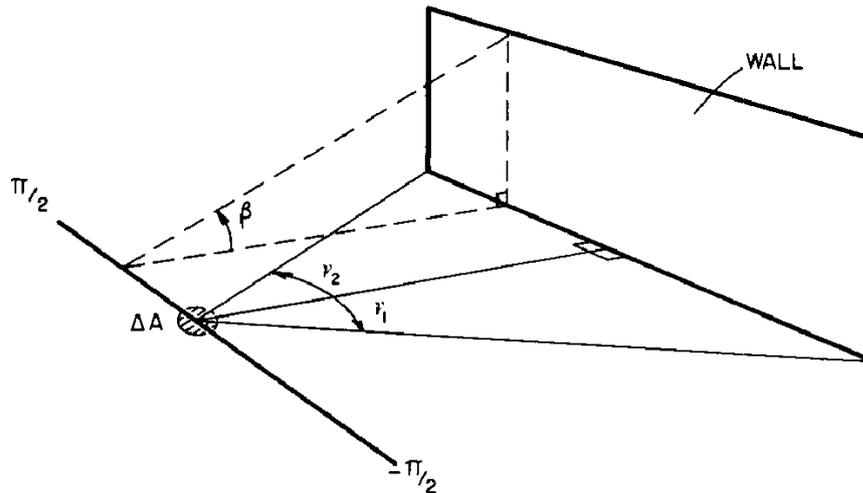


Figura 1.6. Modello per lo scambio radiativo tra un elemento superficiale ed un muro di lunghezza finita [JOHNSON, WATSON 1984].

Il *Wall View Factor* di un elemento superficiale circondato da diversi edifici sarà la somma di tutti i singoli ψ_w relativi a ciascun muro, ognuno caratterizzato da diversi angoli azimutali γ_1 e γ_2 ; questo risultato può essere applicato ad ogni tipo di configurazione di edifici.

Tramite prove sperimentali Johnson e Watson (1984) hanno riscontrato che valori di *Sky View Factor* calcolati con la tecnica di Oke (1981) risultano sottostimati rispetto ai risultati ottenibili con questo metodo. Oke ammise che il valore di ψ_s potesse risultare sottostimato poiché il modello in scala del canyon utilizzato non era infinito e le pareti non erano continue. Per correggere questo errore, i valori di ψ_s calcolati per un canyon infinito ma caratterizzato da un rapporto H/D variabile, sono stati comparati con dei ψ_s determinati da fotografie *fisheye* di 10 canyon urbani a Vancouver, usando il metodo di Steyn (1980). L'espressione lineare sviluppata per correggere ψ_s è comunque risultata inadeguata per descrivere la non-linearità della variazione di ψ_s in funzione dei differenti rapporti H/D lungo il canyon. In conclusione Johnson e Watson (1984) hanno dimostrato che il valore di ψ_s calcolato con il metodo di Oke (1981) è sottostimato rispetto a quello determinato con la formula per canyon urbano non simmetrico e di lunghezza finita.

Un altro vantaggio della formulazione di Johnson e Watson (1984) è dato dalla possibilità di determinare il *Wall View Factor* di un'area qualsiasi sulla base del canyon. Data un'area A , il *WVF* risulta:

$$\psi_{W_A} = \frac{1}{A} \int_A \psi_W dA$$

che può essere approssimato calcolando il *Wall View Factor* $\psi_{W_1}, \psi_{W_2}, \psi_{W_3}, \dots, \psi_{W_n}$ per i rispettivi n elementi di superficie $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3, \dots, \Delta A_n$. Fatte queste premesse, si può considerare:

$$\psi_{W_A} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \Delta A_i \psi_{W_i}$$

dove ψ_{W_i} è il *Wall View Factor* calcolato per ogni edificio i -esimo, noti per ognuno di essi i vari γ_1, γ_2 e β . Nella determinazione di ψ_{W_A} per un singolo canyon urbano, è tuttavia possibile evitare queste misure relative a tutti gli edifici visibili per le n aree ΔA_i . Se la distanza tra ogni elemento di superficie ΔA_i e lo spigolo della facciata è nota, allora l'angolo di azimut del muro può essere determinato da ogni altro elemento di superficie ΔA_i . Una volta che queste distanze (l_1 e l_2) sono disponibili, non è più essenziale avere noto l'angolo di elevazione massima del muro β : l'altezza H sarà sufficiente.

A questo punto non sono più indispensabili anche le misure effettive degli angoli γ_1 e γ_2 , ma si suppone per ogni parete la misura di due azimut α_1 e α_2 rispetto ad una direzione di riferimento arbitraria (Figura 1.7).

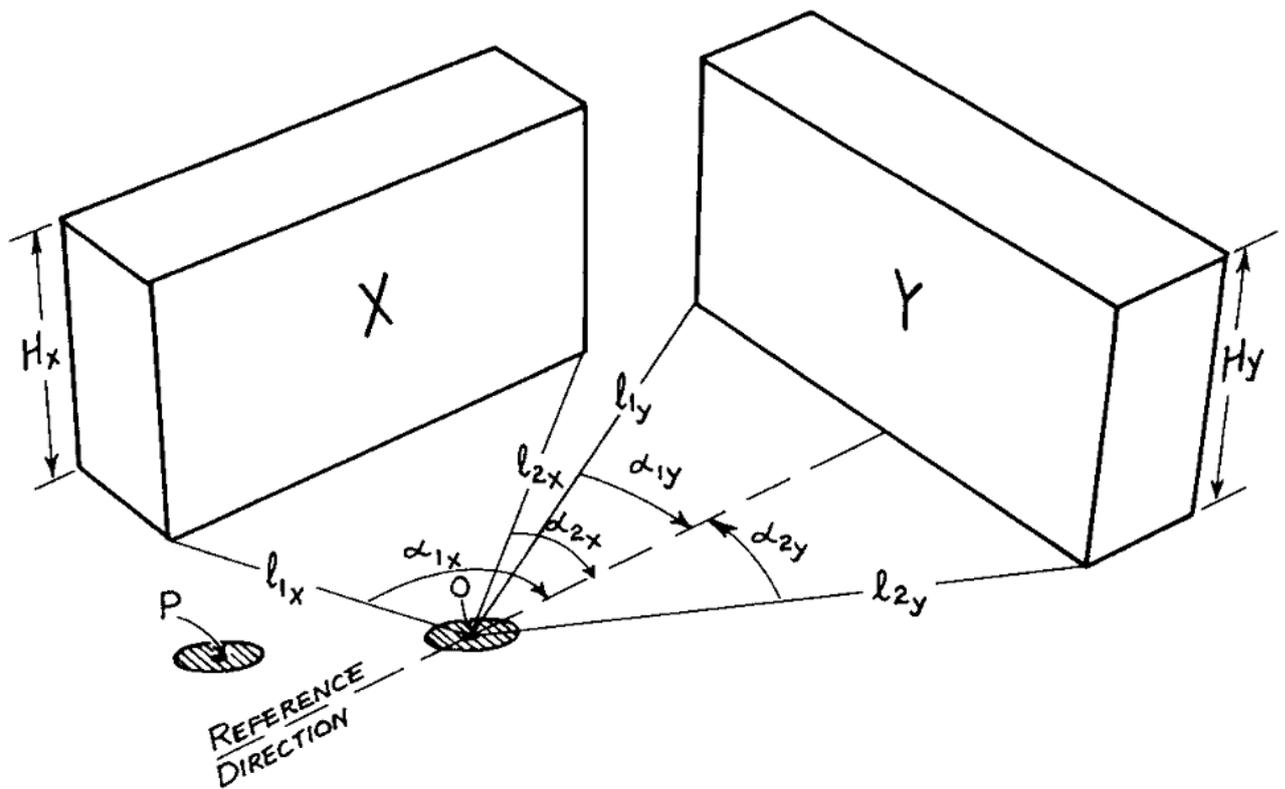


Figura 1.7. Modello di scambio radiativo tra un elemento superficiale e diverse facciate [JOHNSON, WATSON 1984].

Se la lunghezza del muro è pari a L , allora si ottiene:

$$L = [l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]^{0,5}$$

$$\gamma_2 = \cos^{-1} \left[\frac{l_1 \sin|\alpha_2 - \alpha_1|}{L} \right]$$

Per

$$l_2 - l_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \geq 0$$

$$\gamma_2 = \cos^{-1} \left[\frac{l_1 \sin|\alpha_2 - \alpha_1|}{L} \right]$$

Per

$$l_2 - l_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) < 0$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 - |\alpha_2 - \alpha_1|$$

$$D = l_2 \cos\gamma_2$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{H}{D} \right]$$

Quindi, dato H , è possibile calcolare ψ_w per ogni elemento di superficie avendo noti i valori di l_1 , l_2 , α_1 e α_2 . Una volta che questi quattro valore sono stati misurati per ogni elementi di superficie ΔA_i , allora è possibile determinare i parametri corrispondenti per tutti gli altri elementi alla base del canyon adottando le trasformazione che verranno illustrate qui di seguito.

Si suppone che l'origine O di un sistema di coordinate posto sulla base del canyon sia il punto rispetto al quale siano riferiti i quattro parametri l_1 , l_2 , α_1 e α_2 , che quindi saranno delle coordinate polari dei punti dello spigolo alla base della parete. Ad esempio facendo riferimento alla Figura 1.7, i due punti che identificano la base dell'edificio X avranno coordinate polari (l_{1x}, α_{1x}) e (l_{2x}, α_{2x}) . Ora introduciamo le trasformazione andando a calcolare lo *Wall View Factor* in corrispondenza di un elemento di superficie centrato sul punto P (Figura 1.7) che ha coordinate polari (r, δ) rispetto al sistema di riferimento centrato in O ; per ottenere ciò è necessario muovere l'origine in P e le coordinate polari di ogni punto (l, α) saranno trasformate in (l^*, α^*) tramite questo procedimento:

$$l^* = (x^{*2} + y^{*2})^{0,5}$$

$$\alpha^* = \tan^{-1} \frac{y^*}{x^*} + [1 - \text{sgn}(x^*)] \text{sgn}(y^*) \frac{\pi}{2}$$

$$x^* = l \cos \alpha - r \cos \delta$$

$$y^* = l \sin \alpha - r \sin \delta$$

Il metodo più semplice per determinare il *Wall View Factor* di una fascia trasversale alla base del canyon consiste nel prendere come riferimento la direzione perpendicolare alle pareti, suddividendo la fascia in elementi di uguale area, quindi calcolare per ognuna ψ_{wi} e infine calcolare il *WVF* totale applicando la formula ψ_{wA} . Per concludere si riportano i risultati ottenuti nel calcolo dello *Sky View Factor* applicando queste procedure per un canyon finito e simmetrico in Figura 1.8(a) e Figura 1.8(b), mentre le figure Figura 1.8(c) e Figura 1.8(d) illustrano quanto ricavato per un canyon finito e irregolare.

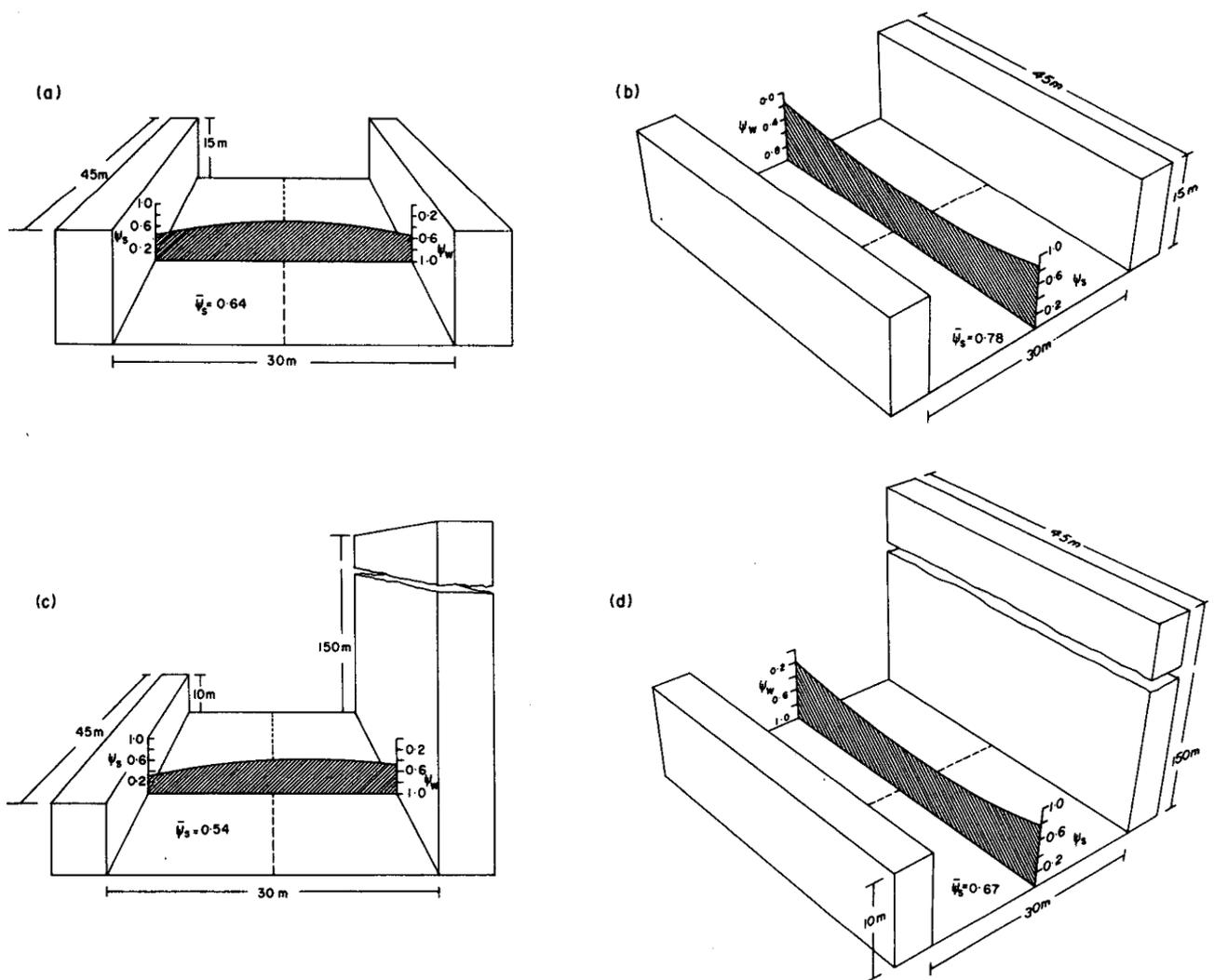


Figura 1.8. Sky View Factor al livello del suolo lungo direzioni trasversale (a) e longitudinale (b) di un canyon simmetrico e lungo direzione trasversale (c) e longitudinale (d) di un canyon irregolare [JOHNSON, WATSON 1984].

1.3 Metodo fotografico di Steyn (1980)

Steyn (1980) propose un metodo manuale per il calcolo di un fattore di vista in ambienti complessi, rendendo possibili nuovi studi sul bilancio energetico in contesti che fino ad allora erano difficilmente affrontabili come foreste, canyon urbani o vallate caratterizzati da una morfologia molto articolata: i metodi computazionali esistenti introdotti da Toups (1965) richiedevano un impegno rilevante sia per raccogliere con una certa precisione tutte le informazioni geometriche necessarie relative all'ambiente da studiare, sia per l'elevato tempo di calcolo [JOHNSON, WATSON 1984].

Steyn (1980) per aggirare questi problemi, propose l'utilizzo di fotografie del tipo *fisheye* scattate nel contesto di studio. Il modello sfrutta i principi geometrici relativi al "Metodo della Sfera

Unitaria” di Nusselt studiati da Refschneider (1967), applicati ad una proiezione equiangolare⁶ dell’ambiente radiativo emisferico ricreata attraverso l’acquisizione di una fotografia *fisheye* del sito.

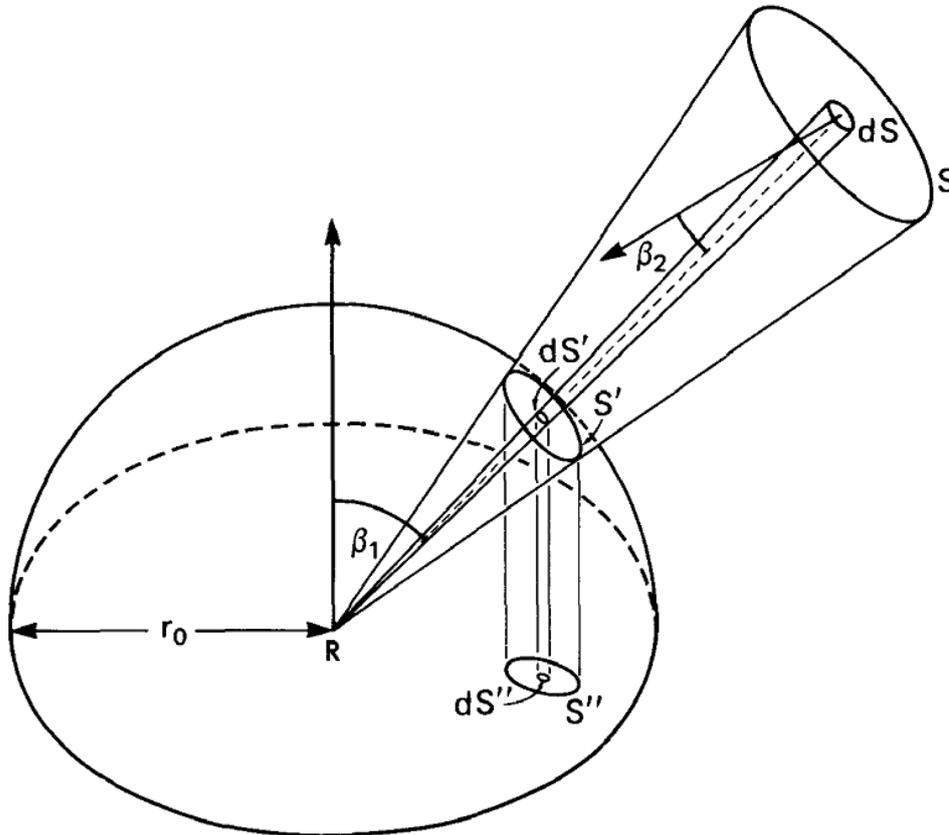


Figura 1.9. Geometria radiativa. β_1 , β_2 – angolo tra il fascio diretto e la normale alla sorgente (dS) e il radiometro (R) rispettivamente [STEYN 1980].

In riferimento alla Figura 1.9, il fattore di vista della superficie S osservato dal sensore R è dato da:

$$\psi_{S-R} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_S \cos \beta_1 \cos \beta_2 dS$$

Oppure adottando il metodo di Nusselt:

$$\psi_{S-R} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_S dS''$$

⁶ Nella proiezione equiangolare, chiamata in letteratura azimutale equidistante, i punti della scena sono riportati sul piano equatoriale dell’emisfero in modo da preservare la distanza dal centro, ottenendo una variazione di raggio costante al variare dell’angolo azimutale. [FURUTI 1997]

Le aree differenziali in una proiezione equiangolare devono subire una trasformazione per ottenere dS'' . L'effetto delle lenti *fisheye* è illustrato in Figura 1.10, dove un oggetto e la sua immagine proiettata sono indicati rispettivamente con O ed I, mentre la linea continua che li collega segue il cammino ottico equivalente. Quindi l'intero emisfero è proiettato all'interno di una circonferenza e per analizzarlo si è scelto di sfruttare un sistema piano di coordinate polari (Figura 1.11), che risulta particolarmente conveniente in questo caso. Adottando considerazioni geometriche elementari su dS'' come funzione di infinitesimi, in questa proiezioni si ha:

$$dS'' = \frac{\pi r_0}{2} \sin\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) dr d\alpha$$

Dove (r, α) sono le coordinate polari che definiscono dS'' nella proiezione equiangolare e r_0 dell'immagine *fisheye* stampata.

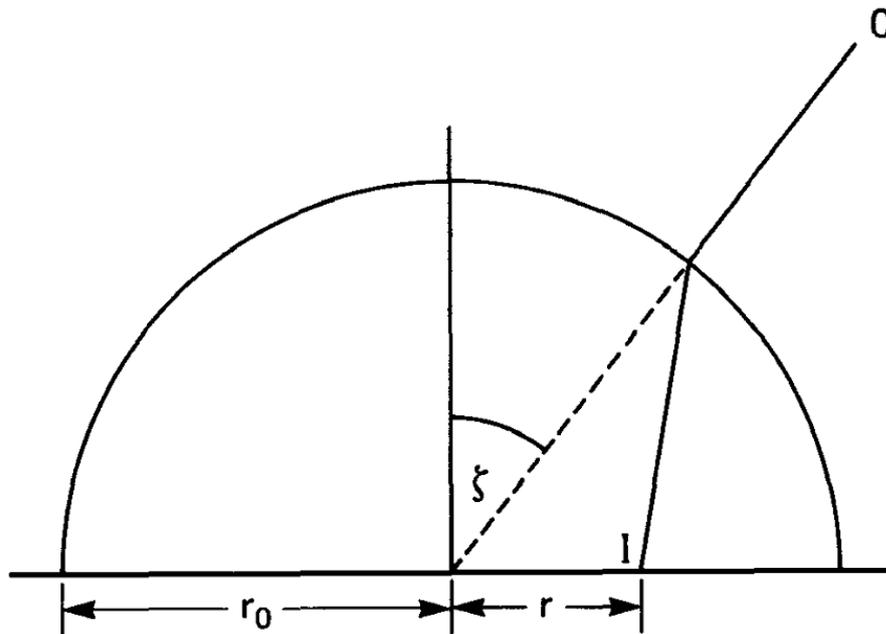


Figura 1.10. Proiezione con lenti *fisheye* (equiangolare).

O = oggetto, I = immagine, $r = 2r_0\xi/\pi$ [STEYN 1980].

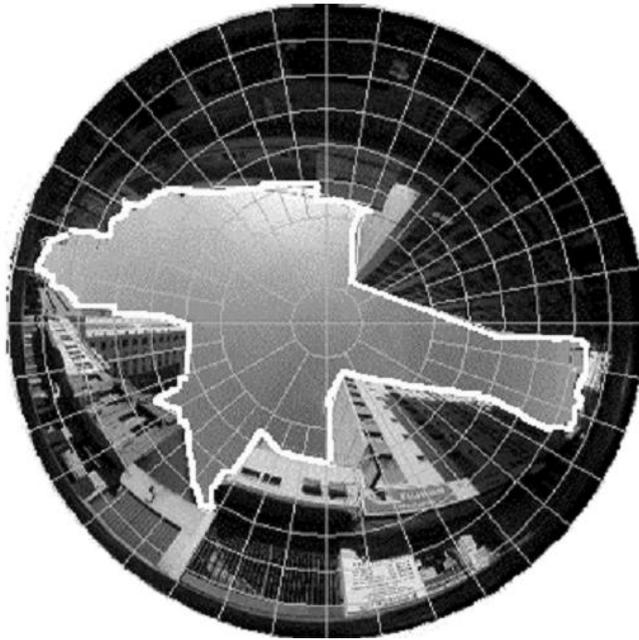


Figura 1.11. Proiezione equiangolare di un canyon urbano ripresa con obiettivo fisheye, a cui è sovrapposto la corrispondente griglia polare. Evidenziato il confine tra cielo ed edifici [GONÇALVES DOS SANTOS et al. 2003].

Sostituendo dS'' in ψ_{S-R} si ottiene:

$$\psi_{S-R} = \frac{1}{2r_0} \int_{\alpha} \int_r \sin\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) dr d\alpha$$

Questo integrale può essere espresso come somma finita su n anelli ognuno di larghezza $\Delta r = r_0/n$:

$$\psi_{S-R} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sin\left(\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{2n}\right) \cos\left(\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{2n}\right) \alpha_i$$

dove α_i è l'ampiezza angolare di cielo visibile dell' i -esimo anello compresa tra 0 a 2π , mentre $(i - 1/2)$ è un raggio corrispondente alla metà di larghezza per ogni i -esimo anello. Il numero degli anelli deve essere scelto con cura: un valore basso renderebbe l'analisi troppo sensibile alla misura di α_i , un valore troppo alto influisce negativamente sul tempo di elaborazione, particolarmente elevato se la procedura viene eseguita manualmente.

Il fattore di vista per ogni anello quindi risulta:

$$\psi_i = \frac{\pi}{n} \sin\left(\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{2n}\right) \cos\left(\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{2n}\right)$$

ψ_i è simmetrico ed ha un valore massimo di $\pi/2n$ con $i = (n + 1)/2$. Poiché una risoluzione dello 0,5% per il fattore di vista è sufficiente per la maggior parte degli utilizzi, si ottiene che il numero ideale di anelli risulta pari a $n = 39$. Sommando gli ψ_i di ogni anello si ottiene lo *Sky View Factor* globale dell'immagine.

1.3.1 Integrazione del metodo di Steyn (1980) proposta da Johnson e Watson (1984)

Con il metodo di Steyn (1980), già affrontato nel paragrafo precedente, è possibile determinare facilmente tramite macchine fotografiche dotate di obiettivo *fisheye* lo *Sky View Factor* di canyon urbani anche con geometrie molto irregolari. Attraverso questa particolare tipologia di lenti, Johnson e Watson (1984) hanno osservato che ΔW_S e W_S sono proiettati su di un piano circolare di raggio r_0 , diventando rispettivamente ΔW_P e W_P e ottenendo:

$$\psi_{w(Steyn)} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_{W_P} \cos\phi \, dW_P$$

$$\psi_{w(Steyn)} = \frac{1}{2r_0^2} \int_{W_P} \sin\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \, dr d\alpha$$

dove (r, α) sono le coordinate polari che definiscono ΔW_P sulla proiezione equiangolare (Figura 1.12). Considerando quanto affrontato in precedenza nella trattazione di Johnson e Watson per una parete infinita, l'ultima equazione diventa:

$$\psi_{w(infinita)} = \frac{1}{2r_0} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{r_0[1-(\frac{2}{\pi})\omega]}^{r_0} \sin\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \, dr d\alpha$$

Per un muro di lunghezza finita invece si ha:

$$\psi_{w(finita)} = \frac{1}{2r_0} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_{r_0[1-(\frac{2}{\pi})\omega]}^{r_0} \sin\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{2r_0}\right) \, dr d\alpha$$

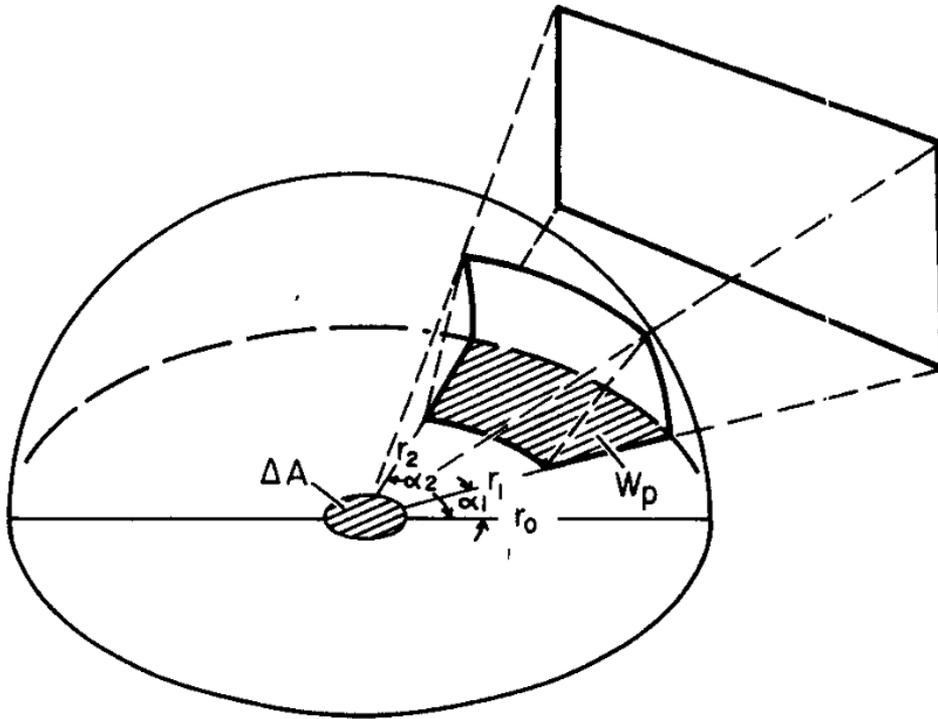


Figura 1.12. Proiezione di una parete tramite una lente *fisheye* su un piano circolare [JOHNSON, WATSON 1984].

Steyn valutò ψ_w approssimando W_P su n anelli, ognuno di larghezza $\Delta r = r_0/n$ e di ampiezza angolare α_i , con $i = (1, 2, \dots, n)$; prendendo come argomenti delle funzioni trigonometriche gli angoli rappresentati dalla metà di ogni anello, si ottiene:

$$\psi_w = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sin \left[\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{2n} \right] \cos \left[\frac{\pi(i - \frac{1}{2})}{2n} \right] \alpha_i$$

che può essere semplificata in

$$\psi_w = \frac{1}{4n} \sum_{i=1}^n \sin \left[\frac{\pi(2i - 1)}{2n} \right] \alpha_i$$

L'equazione ψ_w (*finita*) per una parete di lunghezza finita può essere valutata esattamente su ogni singolo anello, risultando:

$$\psi_w = \frac{1}{2\pi} \sin \frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n \sin \left[\frac{\pi(2i - 1)}{2n} \right] \alpha_i$$

Il confronto delle ultime due espressioni mostra come Steyn avesse approssimato $\sin[\pi/(2n)]$ in $\pi/(2n)$ che comporta una differenza minore dello 0,03% con $n=40$.

Poiché le immagini fotografiche non sempre coincidono con le linee del grafico delle coordinate polari, Steyn procedeva ridisegnando i bordi dell'immagine in modo graduale per facilitare il calcolo di α_i . Un approccio alternativo è stato ottenuto da Johnson e Watson identificando ogni singola facciata nella fotografia *fisheye* senza ridisegnare i bordi dell'immagine e calcolando il *Wall View Factor* tramite l'equazione per un canyon non simmetrico e di lunghezza finita proposta da Johnson e Watson riportata nuovamente qui di seguito:

$$\psi_w = \frac{1}{2\pi} \{(\gamma_2 - \gamma_1) + \cos\beta[\tan^{-1}(\cos\beta \tan\gamma_1) - \tan^{-1}(\cos\beta \tan\gamma_2)]\}$$

Considerando le coordinate polari (r_1, α_1) e (r_2, α_2) relative ai punti dello spigolo alla base della parete rappresentata in una fotografia *fisheye* (Figura 1.12), gli angoli di elevazione massima del muro rispetto al punto O , corrispondente al centro dell'immagine, sono dati da:

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{r_1}{r_0}\right) \quad e \quad \beta_2 = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{r_2}{r_0}\right)$$

Se $\alpha_0 = |\alpha_2 - \alpha_1|$, l'angolo azimutale di fine parete risulta:

$$\gamma_2 = \tan^{-1} \left[\frac{\tan\beta_1 - \tan\beta_2 \cos\alpha_0}{\tan\beta_2 \sin\alpha_0} \right]$$

con $\gamma_1 = (\gamma_2 - \alpha_0)$. Inoltre, l'angolo di elevazione del muro a partire da una linea parallela alla parete e passante per il punto di riferimento è pari a:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\tan\beta_1}{\cos\gamma_1} \right]$$

Usando γ_1 , γ_2 e β per ogni muro, il *Wall View Factor* totale calcolato per un elemento di superficie centrato in O può essere determinato semplicemente, anche nel caso di “*skyline*” complesse: le uniche informazioni richieste sono le coordinate polari per ogni vertice di fine parete nella fotografia. Ovviamente non è possibile calcolare il *Wall View Factor* per altre posizioni solo dalla singola fotografia, ma se le altezze degli edifici sono disponibili, il *WVF* in altri punti può essere

determinato sfruttando le equazioni di trasformazione delle coordinate polari illustrate per un canyon di lunghezza finita e non simmetrico al paragrafo 1.2.1.

1.4 Metodo fotografico *fisheye* con trattamento digitale dell'immagine

Usufruendo dei vantaggi delle tecniche di elaborazione digitale delle immagini e grazie all'aumento di potenza dei computer, all'inizio degli anni 2000 si studiano tecniche per automatizzare il metodo fotografico di Steyn (1980), velocizzando notevolmente operazioni che altrimenti dovrebbero essere eseguite manualmente [CHAPMAN, THORNES 2004], estendendo l'analisi dello *Sky View Factor* da contesti puntuali a transetti di misura composti anche da centinaia di misure [BRADLEY et al. 2001]. Allo stato attuale non esiste una tecnica standard, ma a fini introduttivi, secondo quanto riportato da Grimmond et al. (2001) e Holmer et al. (2001), il procedimento si compone sommariamente di questi passaggi:

- successivamente alla fase di acquisizione, recuperare l'immagine *fisheye* dalla memoria della macchina fotografica digitale oppure, se la ripresa è stata eseguita con una attrezzatura a pellicola, provvedere alla digitalizzazione del negativo tramite uno scanner;
- discriminare i pixel appartenenti al cielo attraverso il trattamento software delle immagini che prevede una conversione in bianco e nero, l'alterazione di luminosità e contrasto e infine la scelta di una soglia all'interno dell'istogramma della fotografia;
- computare lo *Sky View Factor* tramite algoritmi di calcolo impostati sui metodi studiati da Steyn (1980), Johnson e Watson (1984) e Steyn et al. (1986).

La classificazione dei pixel appartenenti al cielo consiste fondamentalmente nell'analisi dell'istogramma dell'immagine per determinare un valore di soglia discriminante; a titolo di esempio, si riporta una foto *fisheye* (Figura 1.13) convertita in bianco e nero a 8 bit (265 livelli di grigio), trattata in modo che l'istogramma mostri una distribuzione dei valori di tipo bimodale, ossia caratterizzato da elevati picchi di frequenza in corrispondenza della luminosità minima e massima [STEYN et al. 1986]. La Figura 1.13 illustra un tipico istogramma che può essere diviso in quattro distinte sezioni: il primo picco corrispondente al valore di *Digital Number (DN) = 10*, che identifica il bordo scuro dell'immagine. Fino a circa un $DN = 60$ i pixel appartengono agli edifici. Tra $DN = 60$ e $DN = 160$ c'è una zona di bassa frequenza, e questo è l'intervallo dove la soglia di classificazione deve essere fissata. Infine per valori superiori a $DN = 160$ il numero dei pixel cresce, andando a rappresentare la porzione di cielo nella fotografia [CHAPMAN, THORNES 2004]. Il valore deciso per la soglia è importante che sia rappresentativo soprattutto per il centro

dell'immagine poiché avvicinandosi al perimetro la sensibilità dello *SVF* nei confronti di errori di classificazione dei pixel tende a diminuire [HOLMER et al. 2001].

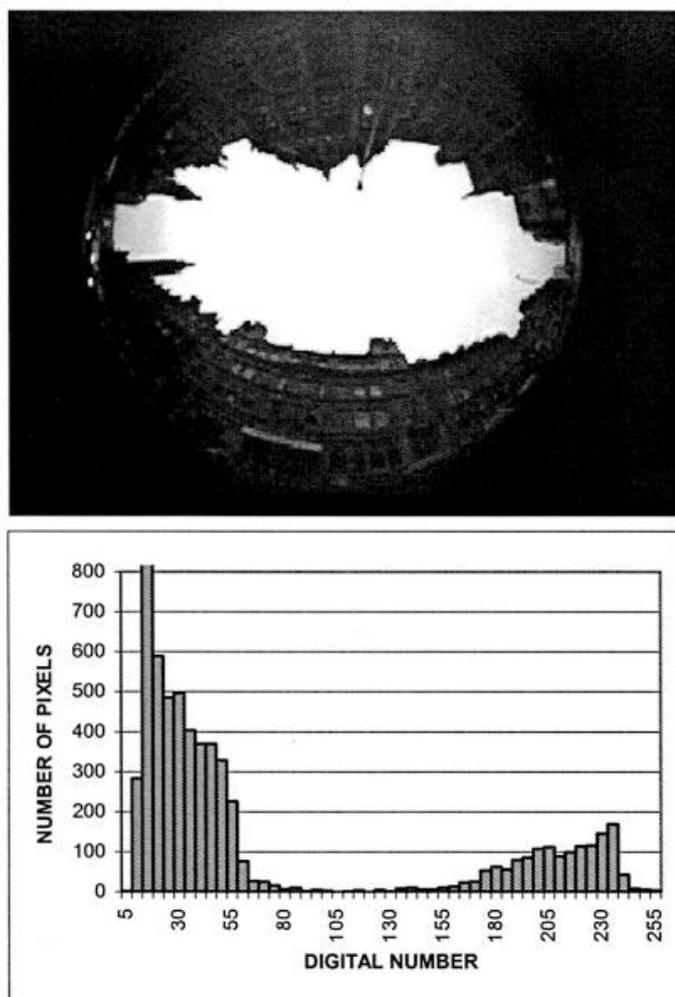


Figura 1.13. Esempio di immagine *fisheye* a 8bit e relativo istogramma [CHAPMAN, THORNES 2004].

La qualità di un'immagine *fisheye* per questo tipo di applicazioni non dipende tanto dalla risoluzione, ma soprattutto dalla luminosità e dal contrasto tra il cielo e gli ostacoli, favorito da una leggera sottoesposizione durante lo scatto [HOLMER et al. 2001]: infatti le elaborazioni non risentono in modo significativo del formato e della risoluzione dell'immagine [GRIMMOND et al. 2001], a patto che non si scenda al di sotto di 256 x 256 pixel, considerata una definizione eccessivamente bassa [STEYN et al. 1986]. L'immagine dovrebbe essere ripresa preferibilmente con il cielo coperto, onde evitare riflessioni della luce solare tramite le facciate degli edifici [HOLMER et al. 2001]. Nei primi lavori di questo tipo apparsi in letteratura, una volta completata la fase dedicata all'elaborazione grafica effettuata con un generico software commerciale per il trattamento delle immagini, il calcolo dello *SVF* era affidato ad un programma scritto in *FORTRAN*, sviluppato a partire da una routine nello stesso linguaggio di programmazione risalente agli anni '80, presentata da Johnson e Watson (1985) [BROWN et al., GRIMMOND et al. 2001]. Con

Holmer et al. (2001) si tenta un approccio che prevede l'integrazione di tutti i passaggi all'interno di un unico software, anche se non specificatamente creato per la determinazione dei fattori di vista, grazie all'ausilio di un applicativo *GIS* che prevede la possibilità di applicare diverse operazioni matematiche alle immagini raster. Chapman et al. (2001) introducono *SKYVIEW*, un software specializzato nella gestione integrale delle fotografie *fisheye* per estrarne lo *Sky View Factor*, sulla base delle formule di Steyn (1980) e scritto in linguaggio *FORTTRAN*; anche nei *paper* recenti, le tecniche fotografiche convergono verso l'utilizzo di software simili a *SKYVIEW*. Tra di essi i più citati sono il *BMSkyView*, sviluppato da Rzepa e Gromek (2006), ed il *RayMan Module* di Matzarakis et al. (2007, 2010).

1.4.1 Metodo di Steyn et al. (1986)

Ricercando una tecnica veloce per il calcolo dello *Sky View Factor*, Steyn et al. (1986) proposero una procedura con cui i fattori di vista sono stati ottenuti in modo automatico a partire da immagini video successivamente digitalizzate a 256 livelli di grigio riprese tramite una videocamera dotata di obiettivo *fisheye*. Con questo tipo di equipaggiamento è stata acquisita una proiezione equiangolare emisferica dell'ambiente radiativo che viene successivamente convertita in una matrice di pixel; il fattore di vista è quindi calcolato per ognuno dei pixel rettangolari anziché per ogni anello come descritto in Steyn (1980), discriminando le zone dell'immagine appartenenti al cielo in funzione del livello di luminosità; sommando i singoli valori per tutta la matrice si ricava lo *SVF* complessivo della scena.

a) Fattore di vista del pixel

In primo luogo è necessario determinare il *View Factor* per ciascuno dei pixel della matrice su cui è stata rilevata l'immagine circolare prodotta dalle lenti *fisheye*. Partendo dalla formulazione di Steyn (1980) per il fattore di vista di un elemento di superficie dell'emisfero, si considera che per un elemento orizzontale piano al centro dell'immagine il fattore di vista di un'area *P* appartenente alla superficie dell'emisfero di raggio r_0 centrato sulla fotografia, può essere definito in funzione della sua proiezione equiangolare *P* sull'immagine circolare come:

$$\psi_P = \frac{1}{2r_0} \int_P \sin \frac{\pi r}{2r_0} \cos \frac{\pi r}{2r_0} dr d\alpha$$

dove r_0 è il raggio dell'immagine, mentre r e α sono le coordinate polari che definiscono il punto P (Figura 1.14). L'equazione ψ_P può essere semplificata come

$$\psi_P = \frac{1}{4r_0} \int_P \sin \frac{\pi r}{r_0} dr d\alpha = \frac{1}{4r_0} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{r_1(\alpha)}^{r_2(\alpha)} \sin \frac{\pi r}{r_0} dr d\alpha$$

$$\psi_P = \frac{1}{4r_0} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[\cos \frac{\pi r}{r_0} r_1(\alpha) \cos \frac{\pi r}{r_0} r_2(\alpha) \right] d\alpha = \psi(\alpha_1, \alpha_2, r_1(\alpha), r_2(\alpha))$$

Tramite l'ultima equazione, ψ_P può essere valutato numericamente quando sono noti gli angoli α_1 , α_2 e le funzioni $r_1(\alpha)$, $r_2(\alpha)$. In questa applicazione l'area P corrisponde ad un singolo pixel che ha una forma rettangolare. In questo caso si esegue l'integrazione sugli angoli azimutali e sui raggi che definiscono i limiti del rettangolo.

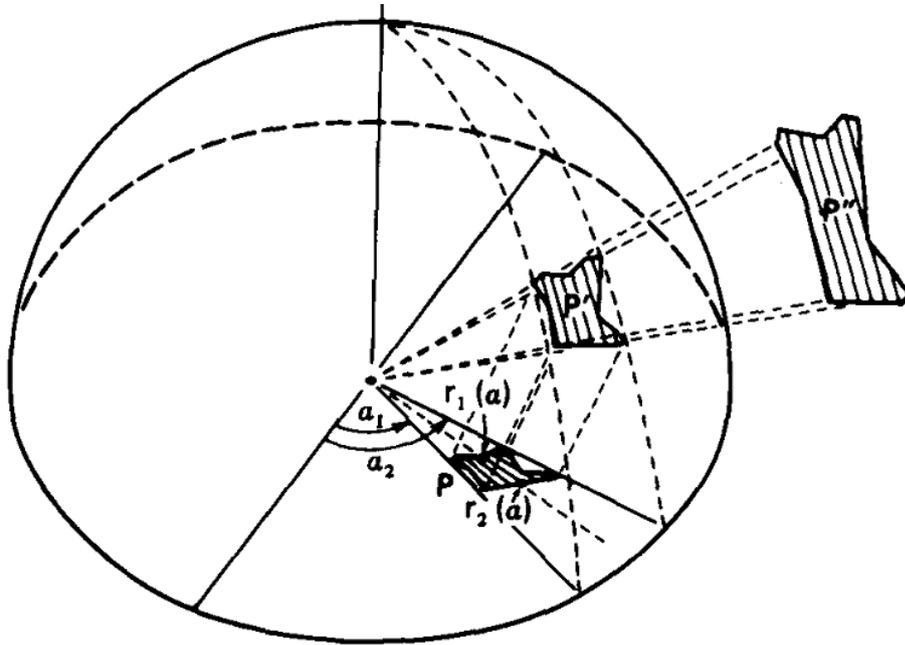


Figura 1.14. Proiezione schematica di un'area P' attraverso un emisfero (P') all'immagine P impressa sulla fotografia [STEYN et al. 1986].

Tuttavia, il processo di integrazione in realtà non è così univoco, come dimostra la Figura 1.15 dove si sottolinea l'ambiguità nel posizionamento di un singolo pixel rispetto al centro dell'immagine. Per facilità di computazione, l'equazione di ψ_P deve essere valutata separatamente per tre segmenti del pixel come mostrato in Figura 1.15, ottenendo:

$$\psi_P = \psi_\alpha \left(\alpha_1, \alpha_2, \frac{c}{\sin \alpha}, \frac{b}{\cos \alpha} \right) + \psi_\beta \left(\beta_1, \beta_2, \frac{c}{\sin \beta}, \frac{d}{\cos \beta} \right) + \psi_\gamma \left(\gamma_1, \gamma_2, \frac{a}{\sin \gamma}, \frac{d}{\cos \gamma} \right)$$

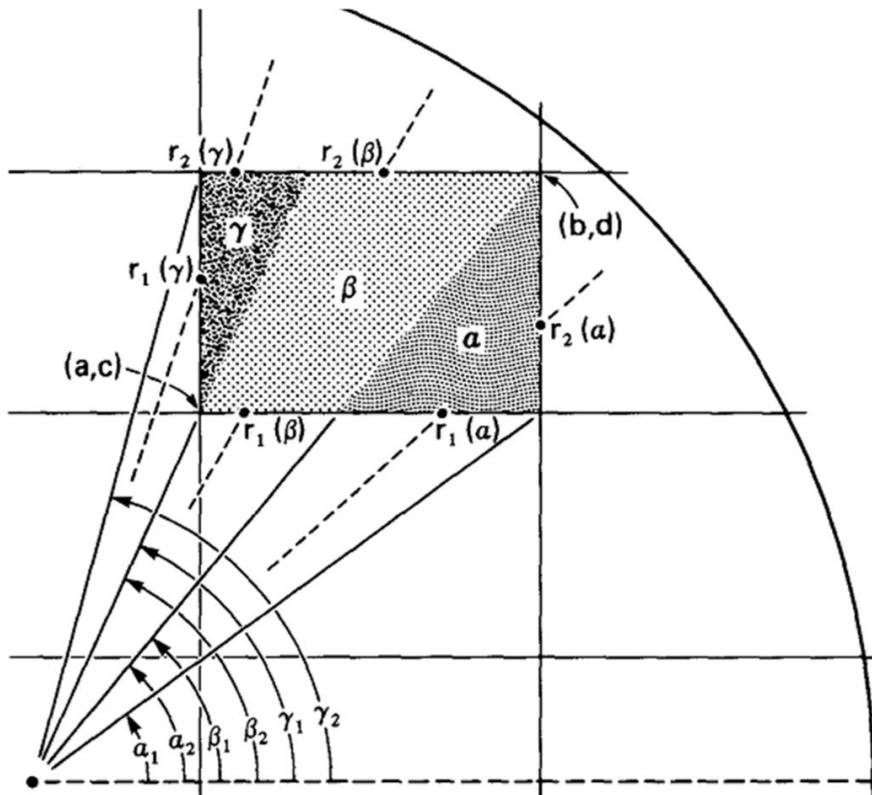


Figura 1.15. Modello per calcolare il fattore di vista di un pixel rettangolare appartenente ad un'immagine circolare [STEYN et al. 1986].

Questa formulazione è necessaria poiché accade che i pixel presentino una serie di posizioni alternative all'interno dell'immagine. I dettagli computazionali di questo aspetto sono forniti da Johnson e Watson (1985) che hanno elaborato una routine in *FORTRAN 77* per il calcolo di ψ_p . Determinare ψ_p in questo modo produce un errore in virtù del fatto che sono considerati solo i pixel della matrice che ricadono nella proiezione circolare delle lenti *fish-eye*. Poiché i pixel sono rettangolari, è inevitabile che alcuni non cadano completamente all'interno dell'immagine circolare, quindi si verificherà un errore in ψ_p per i pixel in corrispondenza dei margini della circonferenza di ripresa, che si tradurrà in una perdita di accuratezza. Per ridurre questa ambiguità è sufficiente aumentare la risoluzione della matrice di pixel oltre i 256 pixel per lato.

b) Analisi dell'immagine

La procedura analitica che permette di distinguere tra pixel che rappresentano il cielo e non, consiste nell'aumentare il contrasto dell'immagine per ottenere una soglia molto netta tra le due categorie di pixel; all'epoca di Steyn et al. (1986) non avendo a disposizione metodi per le elaborazioni delle immagini tramite computer, l'effetto è stato ottenuto regolando i filtri elettronici e l'apertura del diaframma delle lenti durante la ripresa per raggiungere la saturazione dei pixel relativi al cielo. In questo modo si è ottenuto un istogramma dell'immagine di tipo bimodale, ossia caratterizzato da picchi di frequenza in corrispondenza della luminosità minima e massima. Quindi i

pixel appartenenti al cielo saranno quelli dell'insieme P_{ij} selezionati tra tutti quelli della matrice $i \times j$ impostando come discriminante una luminosità superiore ad un certo valore soglia. Per concludere, lo *Sky View Factor* dell'immagine sarà fornito dalla sommatoria

$$\psi_S = \sum_{P_{ij} \in S} \psi_{P_{ij}}$$

1.4.2 Metodo di Holmer et al. (2001)

Il metodo implementato da Holmer et al. (2001) è stato sviluppato in un ambiente forestale, ma risulta utile anche in ambito urbano. Esso sfrutta le capacità di analisi di dati raster del software *GIS IDRISI* applicato a fotografie *fish-eye* scansionate, su cui sono state adottate le teorie sulle proiezioni equiangolari sviluppate da Steyn (1980), Johnson e Watson (1984) e Steyn et al. (1986).

La procedura si basa sulla classificazione delle aree appartenenti al cielo, quindi sui pixel selezionati in questo modo viene applicato un peso assegnato in funzione dalla distanza angolare di ognuno dal centro dell'immagine *fish-eye*, ovvero l'angolo zenitale. In questo studio Holmer et al. (2001) hanno individuato 8 fasi di elaborazione, seguite da un controllo di qualità con alcune osservazioni riguardanti la risoluzione e le condizioni del cielo durante la ripresa.

a) Fase 1

Le immagini *fish-eye* scansionate sono importate in *IDRISI* che identifica la foto come un'immagine raster andando a assegnare le coordinate della matrice di pixel: colonne (c) e righe (r).

b) Fase 2

Sono determinati il centro dell'immagine (c_0, r_0) ed il raggio (R), viene quindi impostato un sistema di tre equazioni scrivendo per tre punti (c_i, r_i) l'equazione della circonferenza: $(c_i - c_0)^2 + (r_i - r_0)^2 = R^2$.

c) Fase 3

Creare in *IDRISI* un'immagine di diametro $2R$, il cui scopo è quello di tenere conto delle differenti dimensioni degli elementi di cielo proiettati sulla superficie piana per effetto della proiezione equiangolare, in funzione della distanza angolare dallo zenit, come riportato da Steyn (1980) e rielaborato da Johnson e Watson (1984) nel calcolo della funzione di peso per ciascun anello, riportata nuovamente di seguito:

$$\psi_i = \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \sin\left(\frac{\pi(2i-1)}{2n}\right) \alpha_i$$

Il numero di anelli nel metodo *IDRISI* è assunto uguale al numero di pixel del raggio dell'immagine. Quindi il numero di pixel dell'*i*-esimo anello è pari a $2\pi i$ e l'ampiezza angolare di un pixel risulta $2\pi(2\pi i)^{-1} = i^{-1}$. Date queste premesse, l'equazione dello *SVF* dell'*i*-esimo anello ψ_i va moltiplicata per i^{-1} , operazione necessaria per tenere conto del numero di pixel che aumenta per ogni anello spostandosi dal centro verso l'esterno dell'immagine. Per cui il peso di un pixel (*c*, *r*) alla distanza $i = (c^2 + r^2)^{0,5}$ dal centro della fotografia risulta:

$$\psi_{c,r} = \frac{1}{2\pi i} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \sin\left(\frac{\pi(2i-1)}{2n}\right)$$

dove *i* ha un valore compreso tra *l* e *R*, ovvero si ha che *R* è pari al numero degli anelli *n*.

d) Fase 4

Viene identificato il confine tra l'immagine *fisheye* e la parte esterna alla fotografia che deve essere esclusa dall'analisi.

e) Fase 5

Si ricercano le aree corrispondenti al cielo: il software *IDRISI* trasforma l'immagine da RGB a livelli di grigio con valori compresa tra 0 e 215 convertendo le tre componenti di colore in una scala da 0 a 5 e applicando la formula:

$$IDRISI \text{ pixel value} = blu + (6 \cdot verde) + (36 \cdot rosso)$$

Questo consente di ottenere una distribuzione di frequenza nell'istogramma dei pixel di tipo bimodale con picchi in corrispondenza delle estremità in cui si possono individuare i pixel appartenenti al cielo scegliendo un valore di soglia da parte dell'operatore: se la soglia è fissata troppo bassa, verranno classificati come appartenenti al cielo anche pixel associati ad ostacoli; se la soglia è impostata troppo elevata, l'eventuale presenza di nuvolosità sarà classificata come un'area non appartenente al cielo.

f) Fase 6

A seguito della classificazione dell'immagine in Fase 5, al cielo viene assegnato il valore *1* e al resto il valore *0*.

g) Fase 7

Il risultato ottenuto nella Fase 6 viene moltiplicato per $\psi_{c,r}$ per eliminare dalla funzione peso i pixel non appartenenti al cielo.

h) Fase 8

Si ottiene lo *Sky View Factor* complessivo sommando tutti i pesi $\psi_{c,r}$ depurati dai pixel appartenenti agli ostacoli.

i) Controllo di qualità

Nella scelta di un valor di soglia appropriato, un confronto a cura dell'utente con l'immagine originale a colori può essere utile. Un errore di classificazione causato dall'attribuzione di un pixel al cielo quando in realtà appartiene ad un ostacolo, pesa sullo *SVF* complessivo in funzione della sua distanza zenitale dal centro dell'immagine: la Figura 1.16 mostra quanto deve essere grande in percentuale l'area di errore per causare un incremento dello *SVF* pari a 0,01 a diverse distanze dal centro. Dal perimetro fino ad una distanza pari al 70% del raggio, l'area necessaria non supera l'1% quindi lo *SVF* è poco sensibile ad eventuali classificazioni errate, mentre con valori superiori al 70% del raggio, quindi giungendo al centro dell'immagine, si ha un veloce calo di sensibilità.

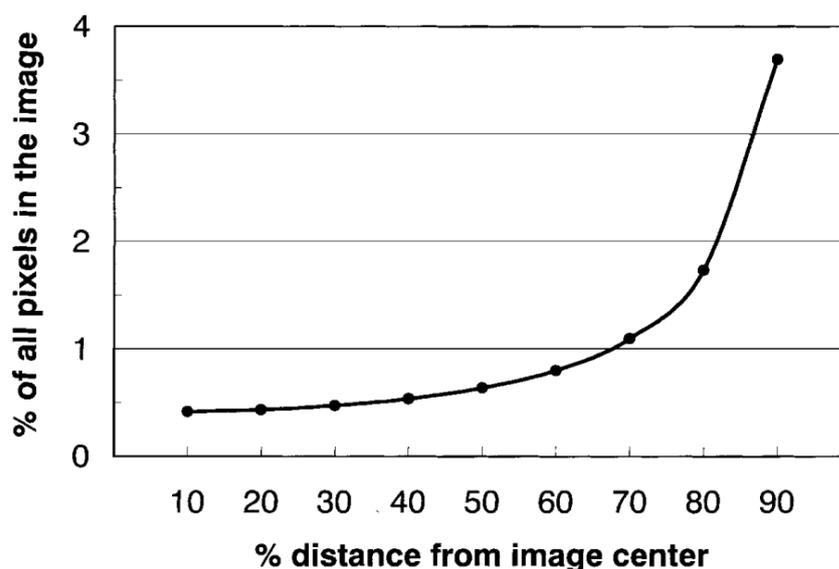


Figura 1.16. Influenza di errate interpretazioni dei pixel sul valore complessivo dello *SVF*. Il grafico mostra la dimensione dell'area di immagine necessaria per variare lo *SVF* di un valore pari a 0,01 [HOLMER et al. 2001].

La Figura 1.17 sottolinea ulteriormente la variazione di *SVF* risultante dalla selezione di un range di soglie: i segmenti orizzontali mostrano un intervallo considerato realistico dall'utente e che varia a seconda del contesto, per cui si deduce che l'azione dell'operatore nella scelta della soglia può comportare un'incertezza nella valutazione dello *Sky View Factor* non superiore a 0,1. La Figura

1.17 mostra inoltre che un abbassamento della risoluzione (in questo caso specifico una riduzione pari al 75% del diametro) comporta piccole differenze nello *SVF* inferiori a 0,01.

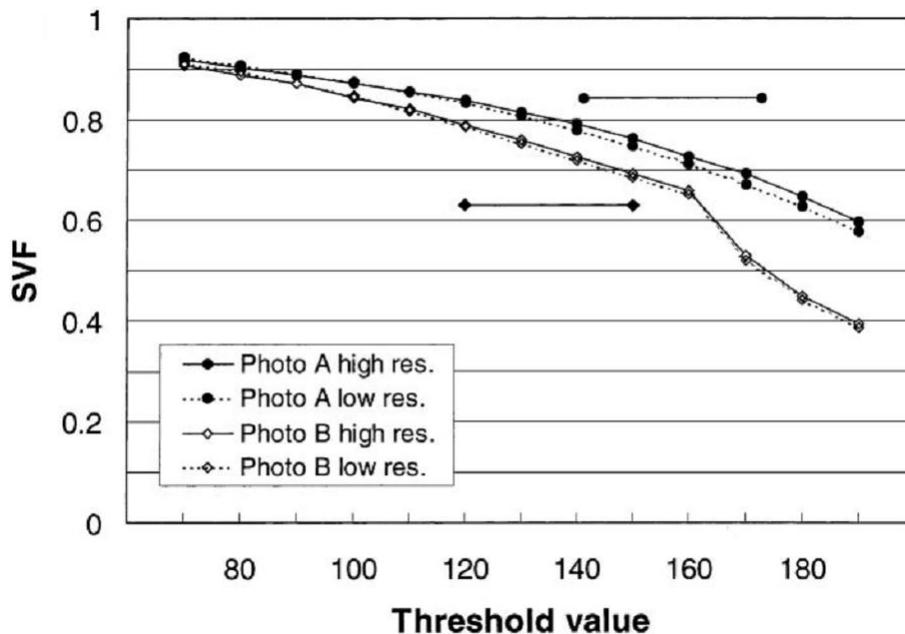


Figura 1.17. *SVF* per due foto in bianco e nero al variare del valore di soglia. Le linee continue rappresentano le immagini a risoluzione piena, mentre quelle tratteggiate hanno risoluzione ridotta del 75% [HOLMER et al. 2001].

Altri test effettuati in questo studio confermano che a seguito di una riduzione del diametro della fotografia da 2048 a 64 pixel (quindi una radicale diminuzione della definizione) lo *Sky View Factor* non soffre di variazioni significative, tranne quando il fattore di vista della scena si avvicina all'unità: in tal caso il calcolo risente del calo di accuratezza, evidenziato dalla sommatoria dei pesi che si allontana dall'unità.

Quindi da queste osservazioni si conclude che la qualità di un'immagine *fisheye* per questo tipo di applicazioni non dipende tanto dalla risoluzione, ma soprattutto dalla luminosità e dal contrasto tra il cielo e gli ostacoli, favorito da una leggera sottoesposizione durante lo scatto. L'immagine dovrebbe preferibilmente essere ripresa con il cielo coperto, onde evitare riflessioni della luce solare tramite le facciate degli edifici.

Dal punto di vista della scelta di una soglia sull'istogramma, questo valore è importante che sia rappresentativo soprattutto per il centro dell'immagine poiché avvicinandosi al perimetro la sensibilità dello *SVF* nei confronti di errori di classificazione dei pixel tende a diminuire.

1.4.3 Studio di Grimmond et al. (2001)

Il lavoro di Grimmond et al. (2001) offre una panoramica sui metodi fotografici, confrontandoli con misure effettuate tramite un *Plant Canopy Analyzer*, ovvero una tipologia di strumento (sempre assimilabile ai metodi ottici) per la misura dell'indice di luminosità *DIFN* (*Diffuse Non-Interceptance*), collegato indirettamente ad una stima dello *Sky View Factor*.

a) *Plant Canopy Analyzer*

Questo strumento misura in modo automatico e continuo l'indice di penetrazione luminosa *DIFN* attraverso un sensore ottico *fisheye* e, prima dell'avvento degli obiettivi *fisheye* per macchine digitali alla fine degli anni '90, era molto utilizzato in ambito forestale per la sua velocità di rilievo. Il modello usato in questo studio è il *LI-COR LAI-2000*, in grado di misurare la radiazione diffusa (lunghezze d'onda 320–490 nm) su cinque angoli simultaneamente (0–12.3°, 16.7–28.6°, 32.4–43.4°, 47.3–58.1° and 62.3–74.1°), determinando un valore compreso tra 0 e 1 che indica la frazione di cielo visibile non ostruita da ostacoli. Appare evidente come il *DIFN* e lo *Sky View Factor* siano collegati solo indirettamente.

Ci sono principalmente due fonti di errore associate all'utilizzo del *LAI-2000* nel calcolo dello *SVF*: in primo luogo l'angolo di vista dello strumento è 148°, molto minore a quanto necessario per calcolare in modo appropriato il fattore di vista del cielo (che quindi risulterà sempre sovrastimato); inoltre lo strumento, misurando indistintamente la radiazione ricevuta, considera anche quella inviata per riflessione dagli oggetti, quindi è un metodo molto sensibile alle condizioni della nuvolosità e alla posizione del sole; la condizione ideale di utilizzo dovrebbe essere un cielo completamente coperto. Per rendere più accurato il rilievo, si pongono spesso due sensori che acquisiscono in contemporanea e sincronizzati tra loro: il primo posizionato nel sito di misura ed il secondo su un luogo aperto non esposto ad ostacoli per quantificare l'effetto dello stato del cielo.

b) *Metodi fotografici*

In questo studio sono stati utilizzati due equipaggiamenti: una macchina analogica ed una digitale, entrambe dotate di obiettivo *fisheye*. La stessa scena acquisita con le due fotocamere è stata poi sottoposta all'analisi manuale secondo il metodo di Steyn (1980) e ad un'analisi digitale, scansionando le fotografie analogiche. Nella Figura 1.18 lo schema illustra efficacemente il processo di calcolo dello *SVF* per i quattro procedimenti. Le differenze nel calcolo dello *Sky View Factor* che appaiono nei risultati finali confrontando l'analisi manuale e digitale sono piccole, dovute soprattutto ad errori umani ed eventualmente piccole incongruenze nei sistemi di ripresa che

caratterizzano diverse attrezzature fotografiche, in particolare per quanto riguarda gli angoli di vista degli obiettivi *fisheye*.

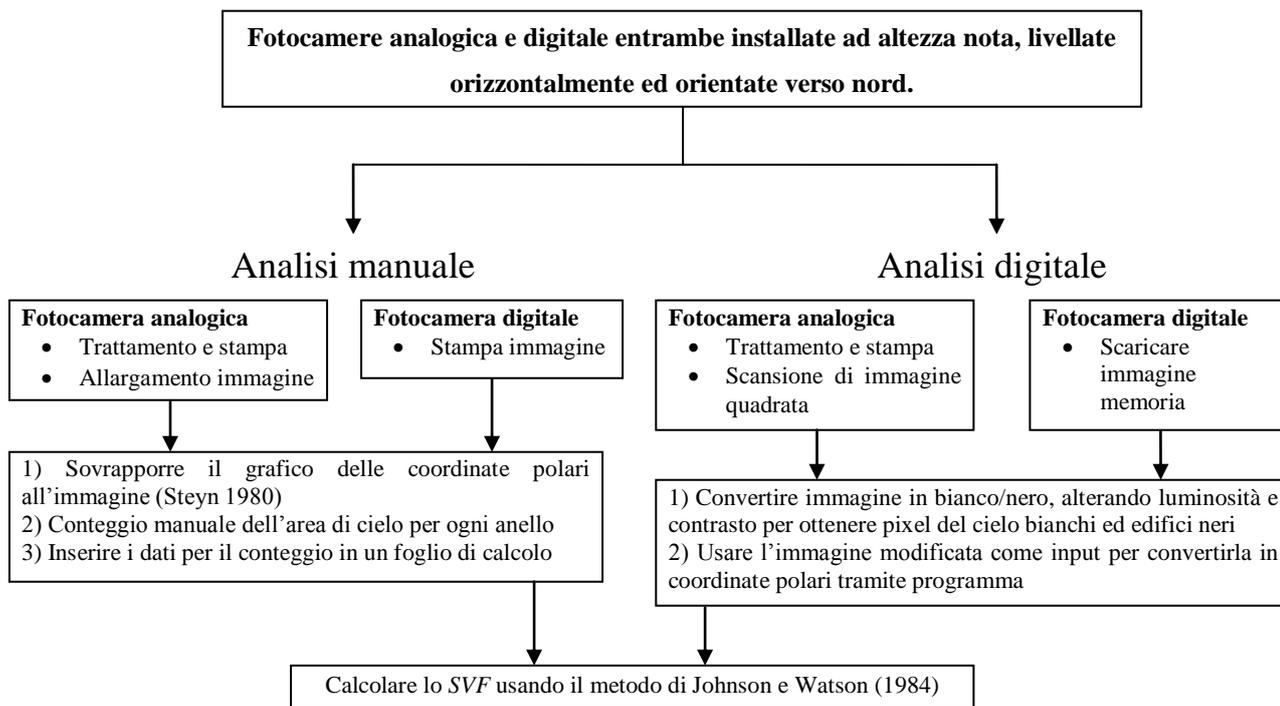


Figura 1.18. Fasi coinvolte nella determinazione dello SVF a partire da una fotografia *fisheye* sfruttando tecniche digitali ed analogiche [GRIMMOND et al. 2001].

Degno di nota è invece il tempo di elaborazione che, per le analisi delle immagini analogiche, è notevolmente superiore a causa delle fasi di sviluppo della pellicola e stampa. Ovviamente adottare il metodo digitale abbatte i tempi nelle fasi finali del calcolo e aumenta, sebbene di poco, la precisione. Per verificare la riproducibilità delle misure con il metodo digitale, è stata acquisita una serie di immagini in un periodo di 2 mesi con una grande varietà di condizioni del cielo e si è concluso che, a differenza del *Plant Canopy Analyzer*, questo approccio è molto preciso e poco sensibile a differenti gradi di nuvolosità.

Come è stato osservato da Holmer et al. (2001), le elaborazioni non hanno risentito in modo significativo del formato e della risoluzione dell'immagine, a patto che non si scenda al di sotto di 256 x 256 pixel, ovvero una definizione molto bassa [STEYN et al. 1986].

Un aspetto importante da considerare nel calcolo dello *Sky View Factor* è l'altezza alla quale viene effettuata la misura. Logicamente, un'acquisizione ad altezza più elevata andrà ad escludere una porzione di ostacoli dall'immagine, con una conseguente sovrastima dello SVF. Questo effetto è particolarmente pronunciato nei canyon con un basso rapporto *H/W*, cioè quelli caratterizzati da un'ampia larghezza ed una limitata altezza. La Figura 1.19 illustra i risultati di un'analisi di

sensibilità sull'effetto di diversi rapporti H/W e varie altezze di misurazione calcolare con il metodo di Oke (1981).

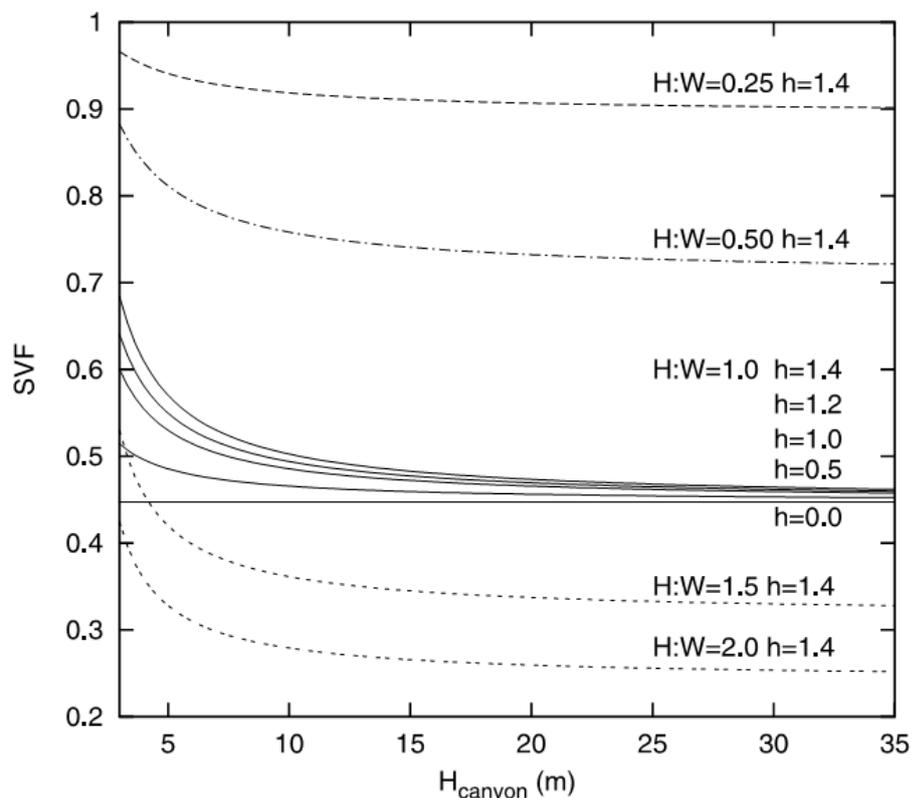


Figura 1.19. Effetto sul calcolo dello *SVF* dell'altezza (h) alla quale la fotocamera è installata usando equazione di Oke (1981) per canyon con diverso rapporto H/W [GRIMMOND et al. 2001].

1.4.4 Software specialistici

a) *SKYVIEW* di Chapman et al. (2001)

SKYVIEW è un software sviluppato usando il linguaggio *FORTRAN*: l'input principale del programma è una fotografia *fisheye JPEG* orientata verso il nord. La prima operazione eseguita consiste in una conversione dell'immagine nel formato *ASCII PGM* (che la trasforma in una matrice di pixel a 8 bit, quindi apparirà con 256 valori in scala di grigi. In funzione della quantità di immagini da elaborare, si può prediligere una riduzione della definizione dell'immagine per accorciare i tempi di calcolo. In seconda istanza *SKYVIEW* delinea il confine tra il cielo e gli ostacoli attraverso un algoritmo automatico, determinando un valore di soglia sull'istogramma impiegando la seguente formula algebrica ad ogni pixel per aumentar il contrasto, come esaminato da Steyn et al. (1986):

$$\left(\frac{P_{(x,y)} P_{(x,y)}}{a}\right) - b = Pt_{(x,y)}$$

dove se $Pt_{(x,y)} > 255$, allora $Pt_{(x,y)} = 255$.

$P_{(x,y)}$ è un singolo pixel posizionato alle coordinate della griglia (x, y) e $Pt_{(x,y)}$ è il nuovo *Digital Number*. I parametri a e b vanno a definire il contrasto e, attraverso varie prove, è stato definito come ottimale un valore di 75 per entrambi. Una volta discriminati i pixel del cielo, il calcolo dello *SVF* avviene tramite il metodo di Steyn (1980), automatizzato a partire dalla soluzione proposta in Steyn et al. (1986), ossia confrontando l'immagine reale con un modello in cui ogni pixel ha un certo peso nel contribuire alla formazione dello *Sky View Factor*.

b) *BMSky-view* di Rzepa e Gromek (2006)

BMSky-view è un software molto semplice che permette il calcolo dello *SVF* direttamente da fotografie digitali *fisheye*. L'algoritmo di computazione è stato implementato usando il linguaggio C++ e si basa sul metodo di Steyn (1980). All'utente compete solo la selezione di pixel appartenenti al cielo, quindi il software provvederà automaticamente all'individuazione di un valore di soglia ed al calcolo del fattore di vista del cielo. [GÁL et al. 2007]

c) *RayMan* di Matzarakis

Il modello *RayMan* è principalmente orientato al calcolo di indici inerenti alla biometeorologia umana all'interno di un contesto urbano, quindi in questo caso lo *Sky View Factor*, sebbene sia determinato dal programma stesso, rappresenta uno degli input richiesti da questo applicativo. Le informazioni necessarie per il calcolo degli indici termici che costituiscono l'output di questo software, comprendono i parametri meteorologici principali (temperatura, umidità relativa, vento), l'intensità della radiazione diretta, diffusa e riflessa del sole, la radiazione ad onde lunghe emessa dalle superfici ed infine dei parametri per il calcolo dei flussi radianti che descrivano l'ambiente fisico, ossia l'albedo, l'emissività ed il fattore di vista delle superfici. Il calcolo dei *View Factors* può essere eseguito a partire da fotografie *fisheye* oppure riproducendo la scena simulando virtualmente una fotografia *fisheye* tramite una utilità interna al programma che permette la creazione di un contesto morfologico formato da edifici ed alberi (caducifolia o conifere) [MATZARAKIS et al. 2007].

1.5 Stima dello *Sky View Factor* usando ricevitori *GNSS*

La principale fonte di errore utilizzando il sistema *GNSS*, deriva dalla mancata visibilità dei satelliti per la presenza di ostruzioni come edifici, vegetazioni o caratteri topografici; Chapman et al. (2002) conclusero che si tratta di un metodo con le potenzialità per essere sfruttato per lo stima dello *SVF* in un punto specifico. I parametri elaborati dai ricevitori e utilizzati per questo calcolo sono:

- il numero N di segnali satellitari ricevuti;
- l'indice *DOP* (*Dilution Of Precision*), che misura con quale accuratezza il ricevitore sta determinando la posizione ed è funzione della configurazione dell'insieme di satelliti visibili in quell'istante;
- l'indice *SSI* (*Satellite Status Index*) che consiste nella somma di tutte le intensità di segnale di ogni satellite visibile.

In Figura 1.20 è mostrato un sito di esempio con a sinistra la rappresentazione dei 4 satelliti visibili (in tratteggio) e dei 5 satelliti (in bianco) ostruiti da edifici, mentre a destra la relativa foto *fisheye*. Questi tre valori rilevati in 112 siti, suddivisi tra misure in ambiente urbano, suburbano e rurale, sono stati posti in un grafico per essere confrontati con lo *Sky View Factor* determinato simultaneamente attraverso il metodo fotografico descritto da Chapman et al. (2001). In prima istanza si osserva che la misura indiretta dello *SVF* risulta più affidabile in ambito urbano; questa diminuzione di correlazione che si osserva spostandosi verso gli ambienti suburbani e rurali è spiegabile considerando la maggiore presenza di alberi che influenzano la qualità della ricezione *GPS* in modo variabile e imprevedibile.

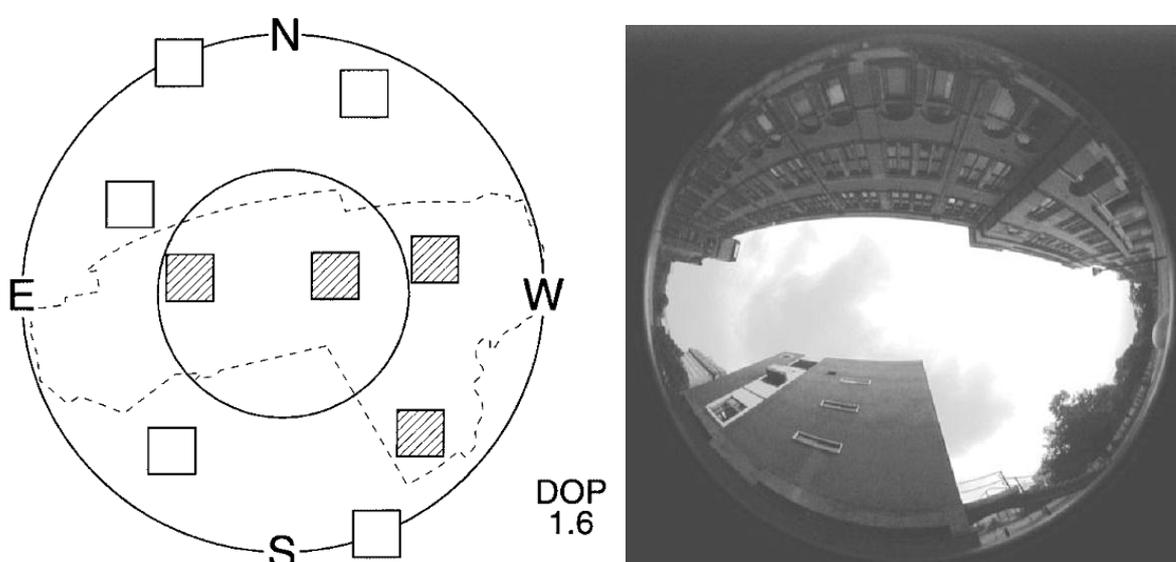


Figura 1.20. Posizione dei satelliti in un certo istante e foto *fisheye* del sito [CHAPMAN et al. 2002]

In Figura 1.21 è mostrata la correlazione tra gli indici e lo *Sky View Factor* rilevati nei siti urbani: la dispersione minore attorno alle linee di tendenza si ottiene con il *Satellite Status Index*.

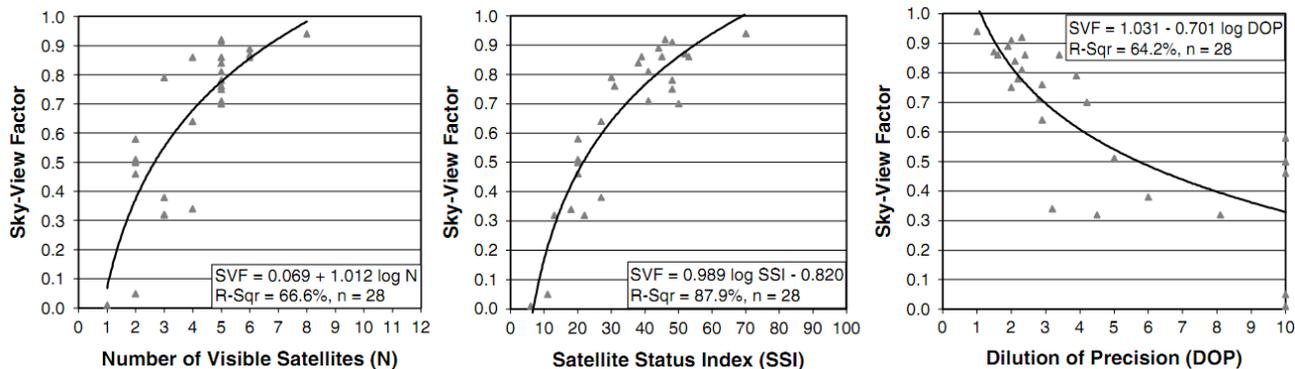


Figura 1.21. Relazione tra gli indici di precisione del segnale e lo SVF.

Si nota una minore dispersione per il SSI [CHAPMAN et al. 2002]

Ma se N e DOP non sono utili singolarmente come lo SSI per la stima dello SVF , possono essere usati proficuamente quando combinati assieme allo SSI tramite equazioni di regressione multipla riportate di seguito, in particolare per l'ambito rurale che risentirà di un incremento della correlazione, tutto nell'ipotesi di una linearità multipla reciproca esistente tra gli indici:

- urbano: $\psi_s = 0.169 \log N + 0.742 \log SSI - 0.40788.0$
- suburbano: $\psi_s = 5.55 \log SSI - 17.517 \log N - 4.76252.1$
- rurale (con foglie): $\psi_s = 2.47 \log SSI - 1.759 \log N - 2.24972.1$
- rurale (senza foglie): $\log \psi_s = 0.45 \log SSI - 0.29 \log N - 0.16 DOP - 0.2975.8$

Il coefficiente di correlazione R^2 è compreso tra il 72% dell'ambiente rurale e l'88% della zona urbana. Questa tecnica è potenzialmente molto utile per misure sul campo quando non è richiesta una particolare accuratezza oppure per rilievi continui in tempo reale lungo transetti di grandi dimensioni soprattutto in ambito urbano dove è stata osservata una maggiore affidabilità, ottenendo un notevole risparmio di tempo nei confronti delle tecniche fotografiche. Quando la precisione è essenziale è necessario ricorrere ai metodi tradizionali per la stima dello *Sky View Factor*.

Mappatura dello Sky View Factor per superfici urbane

Le tecnologie di trattamento digitale delle immagini hanno reso sensibilmente più veloce il calcolo dei fattori di vista anche con il tradizionale metodo fotografico, estendendo la convenienza dell'analisi dello *Sky View Factor* da contesti puntuali a transetti di misura composti anche da centinaia di punti: un caso tipico è il rilievo molto accurato del fattore di vista lungo una strada urbana [BRADLEY et al. 2001]. Nonostante queste premesse, le tecniche fotografiche richiedono comunque una notevole quantità di tempo per compiere tutte le fasi di acquisizione ed elaborazione, ottenendo una serie di informazioni molto precise ma comunque applicabili solo in un contesto isolato e puntuale. Nell'ultimo decennio, parallelamente all'aumento della capacità di calcolo dei computer, sono stati sviluppati algoritmi numerici che, sfruttando le informazioni geometriche contenute all'interno di database tridimensionali degli edifici di tipo raster (modelli digitali della superficie) oppure vettoriale (*shapefile*), hanno esteso il calcolo del valore dello *Sky View Factor* ad ampie superfici urbane [BROWN et al. 2001]. I vantaggi nell'adozione di queste tecniche sono immediati e di notevole importanza: non sono più necessarie misure in sito con tecniche fotografiche, salvo eventuali rilievi per la validazione dei risultati, ed il tempo di finalizzazione, infinitamente minore a parità di superficie urbana studiata, è collegato solamente alla potenza di calcolo del computer ed alle dimensioni del file di input [GÁL et al. 2007].

2.1 Sintesi applicazioni delle tecniche di mappatura dello SVF

La stima dello *Sky View Factor* su superfici anche molto vaste apre nuove opportunità di studio per alcuni fenomeni influenzati dalla morfologia di un territorio urbano: lo studio di Zakšek et al. (2011) evidenzia la correlazione tra lo *SVF* e la capacità di prevedere la disponibilità del segnale GPS.

Sempre secondo Zakšek et al. (2011) il fattore di vista del cielo risulta di estrema importanza per la stima degli effetti della topografia sulla radiazione solare ricevuta dalle superfici; infatti la quota di radiazione diffusa è direttamente correlata alla linea dell'orizzonte visibile da un punto e quindi valutabile tramite lo *SVF*.

In numerose città, l'effetto dell'isola di calore urbana è un problema molto sentito. L'isola di calore è collegata alla capacità di raffreddamento in un'area poiché influisce sui meccanismi di trasferimento per irraggiamento e convezione. Il raffreddamento radiativo è più efficiente nelle zone dove il fattore di vista del cielo risulta elevato [OKE 1981] poiché queste aree riescono ad emettere una maggiore quantità di energia verso lo spazio sotto forma di radiazioni ad onda lunga. Sempre in caso di *SVF* elevato, la convezione è altrettanto più efficiente perché la zona risulta più esposta ad un maggior volume d'aria.

Grazie ad i metodi esposti nei prossimi paragrafi, lo studio di questi fenomeni può essere estesa fino a coprire l'intero territorio di una città.

2.2 Informazioni geometriche di input: file raster

I modelli digitali della superficie (*DSM*) utilizzati in questi studi per determinare i fattori di vista, sono facilmente reperibili tramite gli archivi cartografici degli enti locali ed in genere, poiché queste informazioni sono usate per scopi di pianificazione, sono contraddistinti da una buona accuratezza e precisione spaziale. In assenza di cartografia in formato raster, è comunque possibile trasformare un layer vettoriale contenente le sagome e l'elevazione degli edifici in un formato raster di qualità soddisfacente che possa essere utilizzato come input [GAL et al. 2009].

La prima tecnica apparsa in letteratura per il calcolo dello *SVF* a partire da informazioni tridimensionali in formato raster ad alta risoluzione ripresi in ambito urbano, è quella denominata di *shadow casting* (in italiano “proiezione delle ombre”) sviluppato da Ratti e Richens (1999), che tutt'ora rappresenta una delle tecniche più valide per la mappatura dello *SVF*.

2.2.1 Algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999)

Ratti e Richens (1999) notarono che algoritmi molto efficaci per l'analisi della geometria urbana nell'ambito di studi microclimatici, potevano essere messi a punto e implementati in software di elaborazione delle immagini per essere applicati sui modelli digitali della superficie (*DSM*, Figura 2.1).

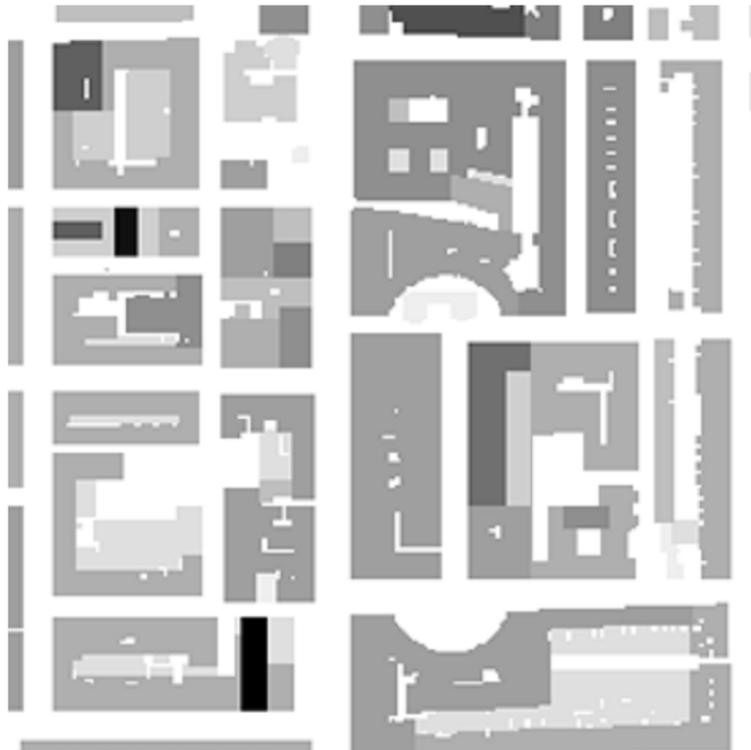


Figura 2.1. *DSM* di un ambiente urbano [RICHENS 1997].

Richens (1997) sviluppò un algoritmo per calcolare le ombre dato un arbitrario angolo di illuminazione: l'approccio consiste nel ricavare un nuovo *DSM* che contenga i "volumi d'ombra", ossia la superficie superiore del volume d'aria che è in ombra. Si parte definendo le tre componenti del vettore che punta verso il sole in funzione del suo orientamento zenitale ed azimutale. Quindi si calcola la componente di un vettore opposto, per la quale la maggiore tra le componenti x e y è scalata in modo che il suo movimento sia uguale alla dimensione in pixel del *DSM*. Convertendo la componente x e y in un *DSM*, e simultaneamente riducendo la sua altezza sottraendone la componente z , si ottiene parte del volume d'ombra. Tutto ciò si traduce in uno spostamento del *DSM* lungo l'angolo azimutale solare e una contemporanea riduzione dell'altezza per iterazioni seguendo l'angolo di elevazione del sole (Figura 2.2).

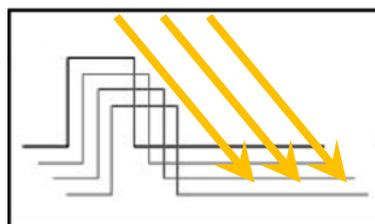


Figura 2.2. Iterazioni di riduzione dell'altezza. Le frecce indicano l'angolo di elevazione solare [LINDBERG, GRIMMOND 2010].

Proseguendo con operazioni di traslazione ed abbassamento e prendendo il massimo del volume per ogni iterazione, si ottiene l'intero volume d'ombra (Figura 2.3).

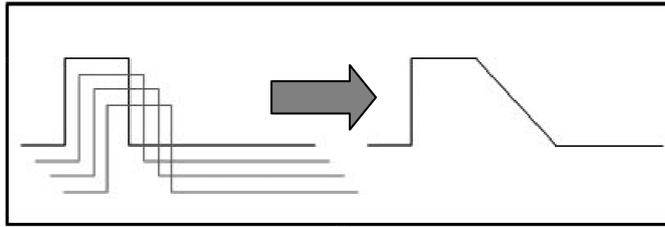


Figura 2.3. Costruzione dell'intero volume d'ombra considerando il massimo da ogni iterazione [LINDBERG, GRIMMOND 2010].

Il processo si interrompe quando tutti i livelli sono nulli, oppure la traslazione ha spostato il volume fuori dall'immagine. Questo procedimento può essere implementato facilmente in software di elaborazione delle immagini. Il risultato dell'applicazione di questo algoritmo è rappresentato nell'esempio in Figura 2.4.

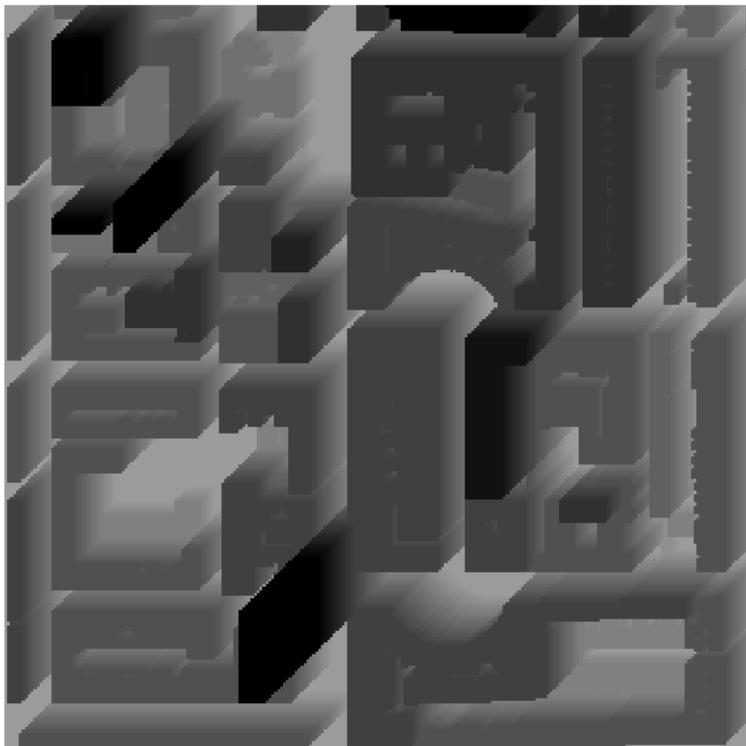


Figura 2.4. Volume d'ombra per un singolo angolo di illuminazione calcolato con l'algoritmo di proiezione delle ombre in un DSM urbano [RATTI, RICHERS 1999].



Figura 2.5. Immagine booleana dell'ombra per un singolo angolo di illuminazione [RATTI, RICHENS 2004]

Per ridurre il volume d'ombra calcolato ad una mappa reale delle ombre sulle superfici dei tetti e del terreno cittadino, il *DSM* originale è sottratto dal volume d'ombra, ottenendo un'immagine booleana in cui i pixel con valori negativi o nulli sono illuminati e quelli positivi sono in ombra (Figura 2.5). Tramite questo procedimento si ricava l'ombra per un arbitrario angolo di illuminazione. Lo *Sky View Factor* viene calcolato ripetendo l'applicazione dell'algoritmo di proiezione delle ombre per un elevato numero di sorgenti luminose distribuite nel cielo, quindi per ogni pixel si conta il numero di volte in cui sono illuminati. Ad esempio, usando 255 sorgenti ogni pixel che otterrà un conteggio di 255 avrà una vista completa del cielo (perciò uno *SVF* pari a 1), mentre al contrario un conteggio pari a 0 corrisponderà ad un fattore di vista logicamente nullo. Per ottenere risultati significativi, è necessario distribuire nel cielo i punti relativi alle sorgenti luminose in modo appropriato.

Se si usasse una distribuzione uniforme di illuminatori posti su una superficie emisferica (che rappresenta la volta del cielo), allora il parametro misurato non rappresenterebbe il fattore di vista, ma un angolo solido riferito al cielo visibile in ogni punto (con un fattore di proporzionalità 2π). Invece, adottando due coefficienti applicati con lo scopo di dare un peso differente a diverse porzioni della volta del cielo, secondo Ratti (2001) si può ottenere lo *Sky View Factor*, espresso dalla formula (simboli riferiti alla Figura 2.6):

$$F_{dA_i \rightarrow sky} = \int_{sky} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_j$$

dove:

dA_j : elemento di superficie appartenente alla volta del cielo;

dA_i : elemento di superficie urbana.

Si può osservare come questa formula corrisponda a quella dello *SVF* ricavata dalla trattazione analitica del trasferimento radiativo tra un punto ed una superficie emisferica centrata in quel punto, già affrontata nel capitolo precedente.

Per tenere in considerazione la correzione sul coseno, la densità dei punti sulla superficie emisferica deve essere maggiore allo zenit e calare avvicinandosi all'orizzonte. Per cui la corretta distribuzione degli illuminatori può essere creata dislocandoli uniformemente su un piano orizzontale circolare per poi proiettarli sulla superficie emisferica corrispondente. Poiché il numero di punti è elevato, è possibile scegliere una distribuzione uniforme e casuale per evitare l'insorgere di schemi di interferenza.

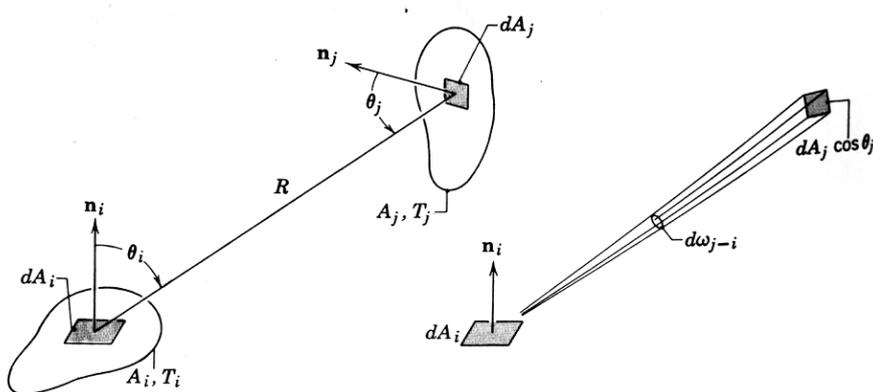


Figura 2.6. Simboli usati nella formula dello *Sky View Factor* di Ratti (2001).

L'algoritmo di generazione dei punti di illuminazione casuali è mostrato di seguito, estratto da una parte del codice scritto in linguaggio *MATLAB* da Ratti (2001).

```
...
while index<1000

    % uniform distribution on points on a circle
    azimuth=rand*360;
    radius=sqrt(rand);
    % altitude is calculated by projecting on a sphere of unit radius
    altitude=acos(radius);
    altitude=altitude*180/pi;
```

```

f=f+shadowingfunction(a,azimuth,altitude,scale);

index=index+1
imagesc(f);
colormap(1-gray);
pause(0.001);

```

end

Il funzionamento di questa parte di codice può essere spiegata in termini matematici come la generazione casuale sulla superficie di un cerchio di raggio unitario delle due coordinate polari di ogni punto, angolo *azimuth* e raggio *radius*, tramite una generazione casuale di numeri grazie al comando *rand*. Il termine *radius* è stato calcolato a partire dalla radice quadrata (*sqrt*) poiché in questo modo la distribuzione dei punti all'interno del cerchio di raggio unitario risulta distribuita in modo uniforme. Avendo note le due coordinate polari piane dei punti, si proiettano sull'emisfero ottenendo l'angolo zenitale *altitude*. Quindi i due valori ricavati, *azimuth* e *altitude*, sono inseriti all'interno della funzione per il calcolo della proiezione della singola ombra *shadowingfunction* che le richiede come variabili relative al punto di illuminazione. Il ciclo *while* ripete queste operazione per 1000 raggi luminosi differenti.

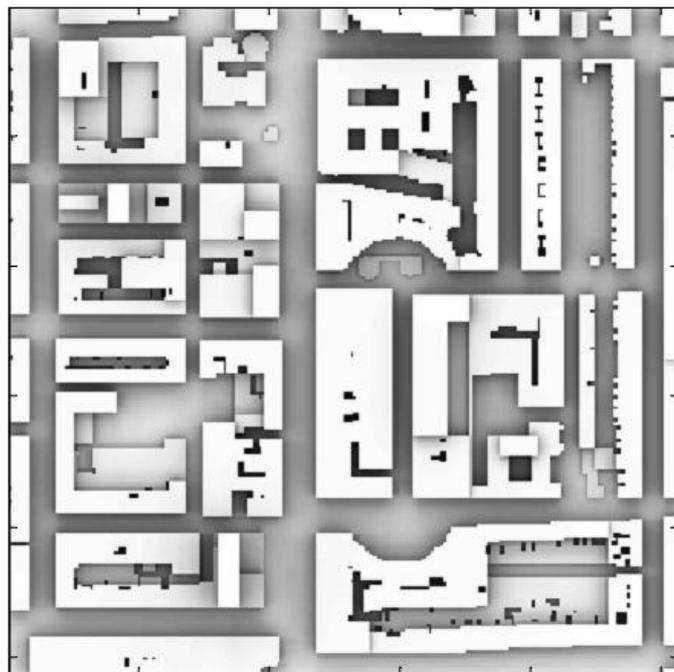


Figura 2.7. Sky View Factor calcolato a partire dall'applicazione ripetuta dell'algoritmo di proiezione delle ombre in un *DSM* urbano [RATTI 2001].

Il risultato di questo algoritmo di calcolo dello *Sky View Factor* ottenuto da Ratti (2001) è mostrato in Figura 2.7.

Verifica sperimentale dei risultati

Brown et al. (2001) hanno verificato l'attendibilità di questo algoritmo nella stima dello *SVF* affiancandolo a misure puntuali in sito affidate ai "consolidati" metodi fotografici che fanno uso di lenti *fisheye* per acquisire la scena e delle equazioni di Johnson e Watson (1984) per determinare il valore dello *Sky View Factor* sull'immagine.

Nella Figura 2.8 è possibile apprezzare in sovrapposizione alla cartografia vettoriale, la distribuzione dei punti rilievo con fotografie *fisheye* effettuate nella città di Salt Lake City nell'Ottobre 2000. Nella Figura 2.9 è rappresentato il risultato dell'algoritmo di Ratti e Richens (1999) applicato sul database tridimensionale degli edifici della stessa zona.

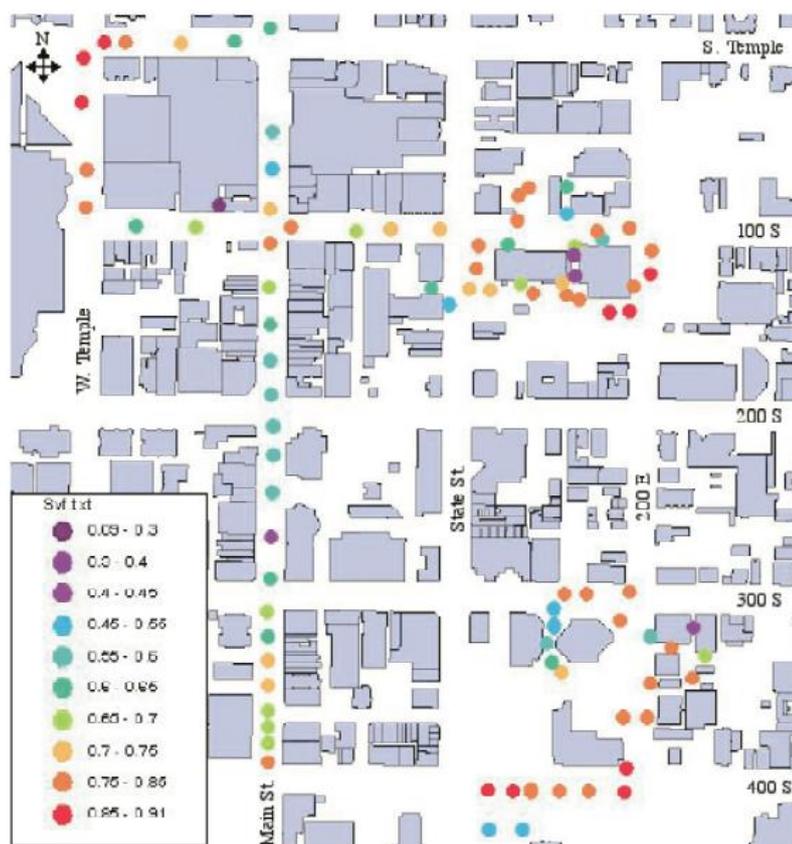


Figura 2.8. Punti di rilievo in sito dello *Sky View Factor* con metodo fotografico [BROWN et al. 2001]

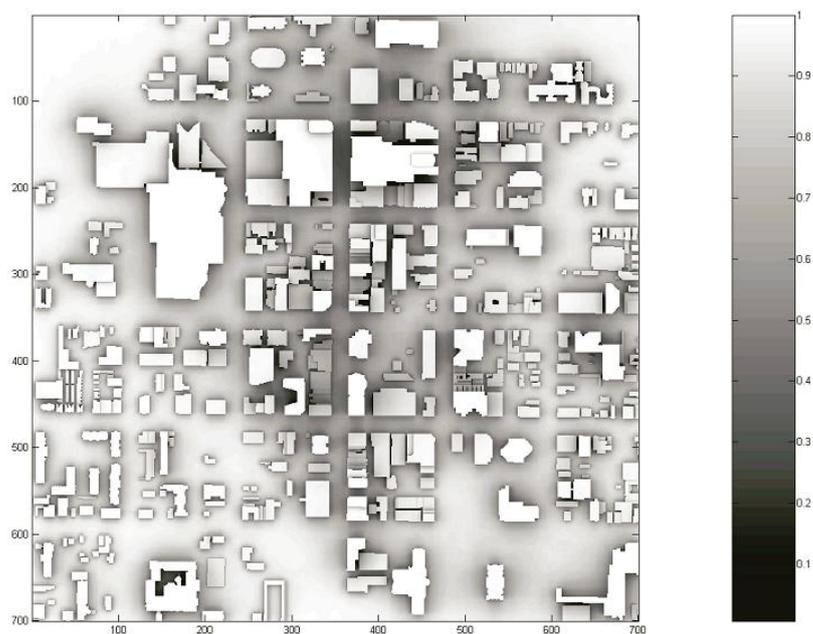


Figura 2.9. *Sky View Factor* calcolato con l'algoritmo di Ratti e Richens (1999) a partire da un database tridimensionale degli edifici [BROWN et al. 2001]

Nel grafico di correlazione tra i due metodi in Figura 2.10 fornito dallo studio di Brown et al. (2001), si nota che il risultato finale dell'algoritmo può essere considerato di buona qualità, anche se è possibile notare un leggero errore sistematico che tende a sottostimare il valore dello *SVF* determinato con metodi fotografici.

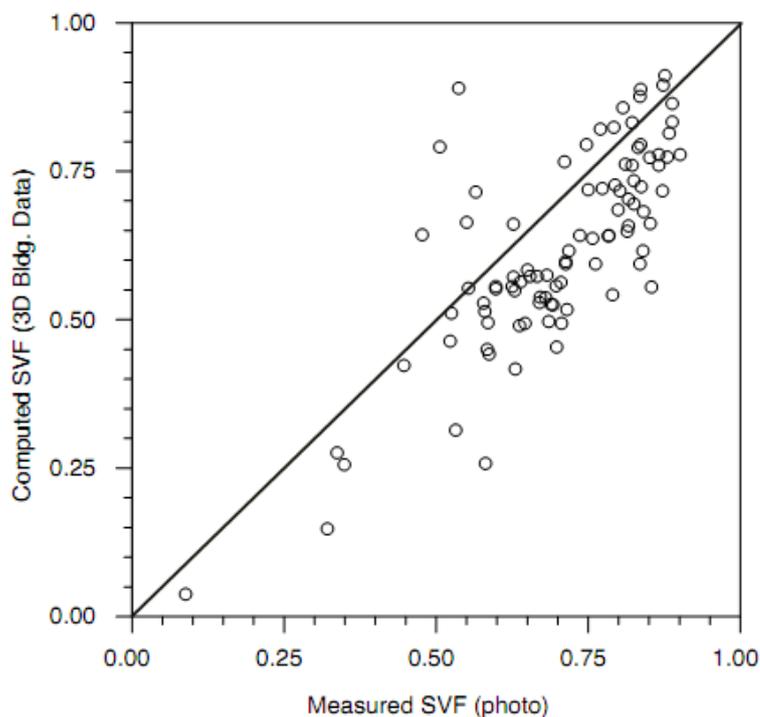


Figura 2.10. Confronto dei valori di *SVF* calcolato con metodi fotografici e database tridimensionali degli edifici [BROWN et al. 2001]

Lindberg e Grimmond (2010) invece hanno verificato la bontà di questo algoritmo applicandolo a due casi morfologici notevoli: una conca circolare (*basin*) avente rapporto dimensionale $H/W = 0.5$ e un canyon infinito caratterizzato da $H/W = 1$. Poiché il metodo di Ratti e Richens (1999) produce valori lievemente differenti per ogni mappatura dello *Sky View Factor*, in virtù della generazione casuale di zenit e azimuth per ogni punto luminoso, è stato necessario ripetere 10 volte il calcolo e ricavarne la media. A seguito di questa operazione è stato estrapolato il valore nel punto centrale di entrambe i casi (SVF_{Ratti}). La verifica sperimentale è stata eseguita determinando lo scarto con il risultato fornito dalle formule analitiche di Oke (1987):

$$SVF_{canyon} = \cos\beta \qquad SVF_{basin} = \cos^2\beta$$

dove l'angolo β è l'angolo di elevazione dal punto centrale alla sommità della parete (Figura 1.3). I risultati sono riassunti nella Figura 2.11:

	H/W	SVF_{Oke}	Scarto $SVF_{Ratti} - SVF_{Oke}$
SVF_{basin}	0.5	0.400	0.009
SVF_{canyon}	1	0.447	0.012

Figura 2.11. Confronto statistico dello SVF calcolato con metodo analitico di Oke (1981) e algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999) [LINDBERG, GRIMMOND 2010]

Il risultato è molto buono ma, come già anticipato, per ottenere un valore preciso, univoco e “stabile” è necessario mediare il risultato di più elaborazioni con questo algoritmo. Fatta questa premessa, Lindberg e Grimmond (2010) hanno cercato di ottimizzare questo metodo, individuando una nuova distribuzione dei punti luminosi: invece di sfruttare posizioni casuali degli illuminatori, è stato adottato il concetto degli anelli pesati proposto da Steyn (1980) in modo da ridurre le sorgenti luminose e quindi le iterazioni necessarie, a parità di precisione; questo principio è stato incluso nel software di calcolo *SOLWEIG*, che utilizza DSM raster come input.

2.2.2 Software *SOLWEIG* di Lindberg et al. (2008)

L'algoritmo su cui si basa *SOLWEIG* è scritto in linguaggio *MATLAB* che, in considerazione degli obiettivi di questo modello di calcolo, offre una serie di vantaggi concernenti l'elaborazione di

strutture matriciali: infatti i risultati ottenibili in questo ambiente software sono veloci ed efficienti. L'interfaccia grafica di *SOLWEIG* è scritta in *Java* e fa uso di un *runtime engine* chiamato *MCR* (*MATLAB Compiler Runtime*) che rende possibile l'esecuzione di comandi *MATLAB* anche senza l'installazione del software, per cui l'utilizzo di questo software è completamente gratuito [SOLWEIG User manual for version 2]. L'obiettivo finale dell'applicativo è quello di simulare le variazioni spaziali dei flussi di radiazione tridimensionale e la temperatura media radiante⁷ T_{mrt} in ambienti urbani complessi, richiedendo un numero limitato di input: la radiazione ad onda corta diretta, diffusa e globale, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la geometria urbana e le informazioni geografiche del sito (latitudine, longitudine e quota media). Per quanto concerne la geometria urbana nella computazione dei flussi radianti, questa è sintetizzata tramite il calcolo dello *Sky View Factor* a partire dall'algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999), considerando alcuni accorgimenti supplementari: invece di sfruttare posizioni casuali degli illuminatori per l'elaborazione dell'algoritmo delle proiezioni d'ombra (Figura 2.12a) ed il calcolo dello *Sky View Factor* ($SVF_{casuale}$), è stato adottato il concetto degli anelli pesati proposto da Steyn (1980) per determinare l'immagine del fattore di vista SVF_{anelli} :

$$SVF_{anelli} = \sum_{i=1}^n S \frac{2}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi}{180}\right) \sin\left(\frac{\pi(2\alpha_j - 1)}{2n}\right) \frac{360}{\theta_i}$$

dove S è l'immagine booleana dello schema di ombreggiatura, n è il numero totale delle mappe d'ombra generate, α_i è l'angolo di altitudine e θ_i è il numero di angoli azimutali usati per suddividere l' i -esimo livello anulare. Usando questo metodo, la posizione degli illuminatori può essere predefinita e distribuita in modo uniforme su tutto l'emisfero, considerando una minore ponderazione per gli anelli con α compreso tra 25° e 65° (Figura 2.12b), ovvero dove si presentano solitamente con una certa variabilità le ostruzioni emisferiche provocate dagli edifici nell'ambiente urbano.

⁷ Definita da ASHARAE (2001) come la temperatura uniforme di una cavità fittizia in cui la trasmissione del calore per irraggiamento dal corpo umano equivale di energia termica effettivamente scambiata con le pareti reali (generalmente disomogenee) che delimitano l'ambiente. Rappresenta la somma di tutte le radiazioni a onda lunga e onda corta, dirette o riflesse, a cui è esposto un corpo umano ed è uno dei più importanti fattori meteorologici che governano il comfort termico. Il metodo più semplice e diretto per misurarla è il globo-termometro, ossia una sfera metallica di spessore sottile, generalmente del diametro di 0,15 m, verniciata di nero, all'interno della quale è posto un sensore di temperatura [LINDBERG et al. 2008].

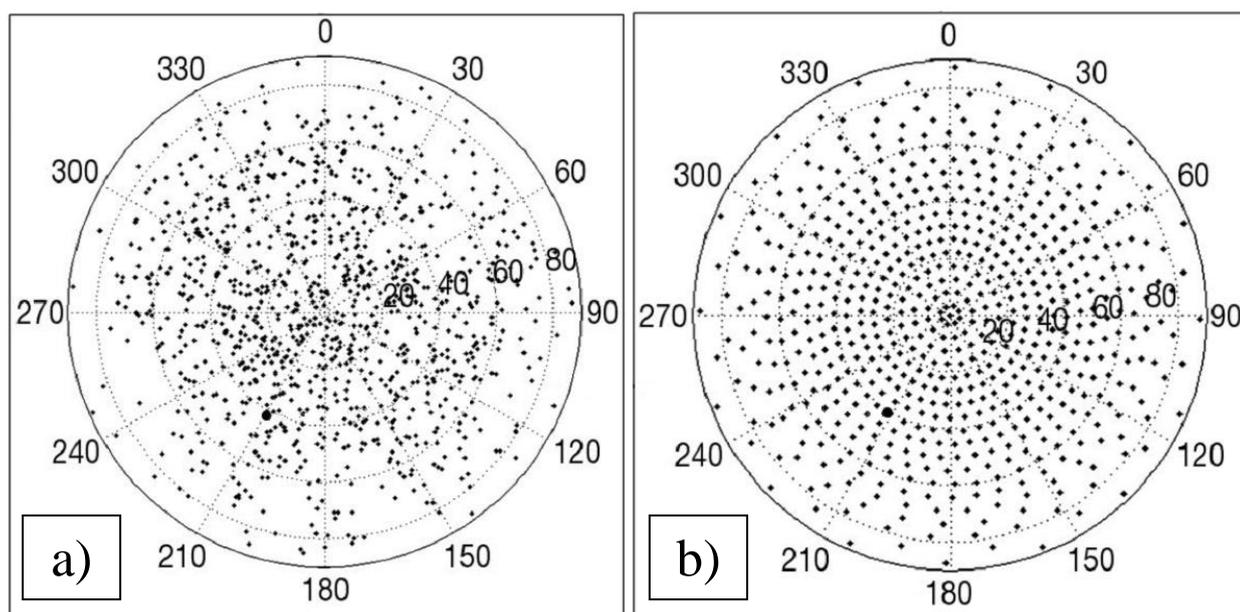


Figura 2.12. Diagramma polare delle posizioni del sole con il metodo casuale (a) ed il nuovo metodo proposto (b) [LINDBERG, GRIMMOND 2010].

Il numero n di immagini d'ombra generate, una per ogni sorgente luminosa, è stato ridotto a 633, contro un n pari a 1000 utilizzate nel metodo di Ratti (2001), riducendo in modo significativo il numero di iterazioni dell'algoritmo ma senza un guadagno significativo in termini di tempo di computazione (per via di una maggiore presenza di sorgenti luminose con basso angolo di altitudine che generano delle ombre più lunghe). Riducendo il numero di immagini d'ombra si corre il rischio di produrre schemi di interferenza riconoscibili sull'immagine che, ad esempio, possono crearsi se un alto numero di posizioni solari sono allineate lungo lo stesso angolo azimutale; per prevenire questo comportamento, è stato inserito un offset nell'angolo azimutale tra differenti livelli di angolo zenitale (visibile in Figura 2.12b).

La bontà di questo algoritmo è stata verificata applicandolo a due casi morfologici notevoli: una conca circolare (*basin*) avente rapporto dimensionale $H/W = 0.5$ e un canyon infinito caratterizzato da $H/W = 1$. Poiché il metodo di Ratti e Richens (1999) produce valori lievemente differenti per ogni mappatura dello *Sky View Factor*, in virtù della generazione casuale di zenith e azimut per ogni punto luminoso, è stato necessario ripetere 10 volte il calcolo e ricavarne la media. A seguito di questa operazione è stato estrapolato il valore nel punto centrale di entrambe i casi (SVF_{Ratti}). La verifica sperimentale è stata eseguita determinando lo scarto con il risultato fornito dalle formule analitiche di Oke (1987). I risultati sono riassunti nella Figura 2.13:

	H/W	SVF_{Oke}	Scarto $SVF_{casuale} - SVF_{Oke}$	Scarto $SVF_{anelli} - SVF_{Oke}$
SVF_{basin}	0.5	0.400	0.009	-0.012
SVF_{canyon}	1	0.447	0.012	0.013

Figura 2.13. Confronto statistico dello SVF calcolato con metodo analitico di Oke (1981) e algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999) [LINDBERG, GRIMMOND 2010]

A parità di algoritmo di calcolo utilizzato una diminuzione dei punti luminosi dovrebbe comportare un calo di precisione, ma nonostante la quantità inferiore di illuminatori nel SVF_{anelli} si osserva un'accuratezza simile a $SVF_{casuale}$: la minor precisione nell'utilizzo delle sorgenti luminose distribuite casualmente è stata notata confrontando i due metodi a livello di pixel, osservando la presenza di schemi anisotropi nell'immagine generata con il metodo *random*; l'errore osservato ha un intervallo del 10-15% circa, una media del 0,2% e una deviazione standard del 1,3%, quindi basso ma non trascurabile. Per cui, a parità di punti luminosi, è certamente da preferire SVF_{anelli} che permette una maggiore accuratezza.

2.2.3 Estensione ENVI di Zakšek et al. (2011)

Questo algoritmo per il calcolo dello SVF è stato implementato nel linguaggio *ENVI+IDL*, ed è sviluppato con lo scopo di mettere in evidenza i rilievi con l'applicazione di algoritmi di ombreggiatura (*hill-shading*) all'interno di un modello digitale del terreno. Gli autori fanno osservare che per migliorare queste tecniche di ombreggiatura, possono essere applicate sorgenti luminose fittizie distribuite sull'emisfero celeste.

Secondo questo studio, il modo più conveniente per esprimere la porzione di cielo visibile è l'angolo solido Ω , che misura quanto ampio appare un oggetto a un osservatore. L'angolo solido di un oggetto è proporzionale all'area A della proiezione dell'oggetto sulla sfera unitaria centrata nel punto di osservazione. Per cui l'angolo di emisfero (celeste) è definito come:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\phi \, d\phi \, d\lambda = 2\pi$$

dove ϕ è la latitudine dell'emisfero e λ la longitudine. Assumendo che al di sotto della superficie orizzontale, l'orizzonte abbia lo stesso angolo di elevazione in tutte le direzioni, allora la visibilità del cielo è limitata entro la superficie di un cono che corrisponde al seguente angolo solido:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_{\gamma_i}^{\pi/2} \cos\phi \, d\phi \, d\lambda = 2\pi (1 - \sin \gamma_i)$$

dove γ è l'angolo di elevazione dell'orizzonte dell'ostacolo. Se l'orizzonte non è di uguale altezza in tutte le direzioni, l'angolo solido può essere calcolato osservando γ_i in un certo numero di direzioni (Figura 2.14)

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \int_{\gamma_i}^{\pi/2} \cos\phi \, d\phi = 2\pi \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sin \gamma_i}{n} \right)$$

dove n è il numero di direzioni usate per stimare l'angolo verticale di elevazioni dei rilievi. L'angolo γ_i può essere calcolato dalla distanza orizzontale e l'angolo di elevazione tra l'orizzonte ed il punto di calcolo. Normalizzando per 2π l'angolo solido definito nell'ultima equazione, si ottiene lo *Sky View Factor*

$$SVF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sin \gamma_i}{n}$$

Il vantaggio principale di questo algoritmo è la velocità di calcolo: invece di generare una mappa di proiezione d'ombra per tutta l'area come esegue l'algoritmo di Ratti e Richens, questa estensione per *ENVI* calcola lo *SVF* un pixel per volta, entro il raggio di ricerca definito ed in funzione dell'angolo di elevazione massimo sull'orizzonte γ_i degli ostacoli nelle direzioni di ricerca impostate.

La Figura 2.14 mostra che questo algoritmo calcola lo *Sky View Factor* in funzione della porzione di cielo visibile Ω , determinato nelle n direzioni di calcolo definite come input entro lo specificato raggio di ricerca R . La validità di questo software rispetto all'algoritmo di Ratti e Richens verrà affrontata nel capitolo successivo.

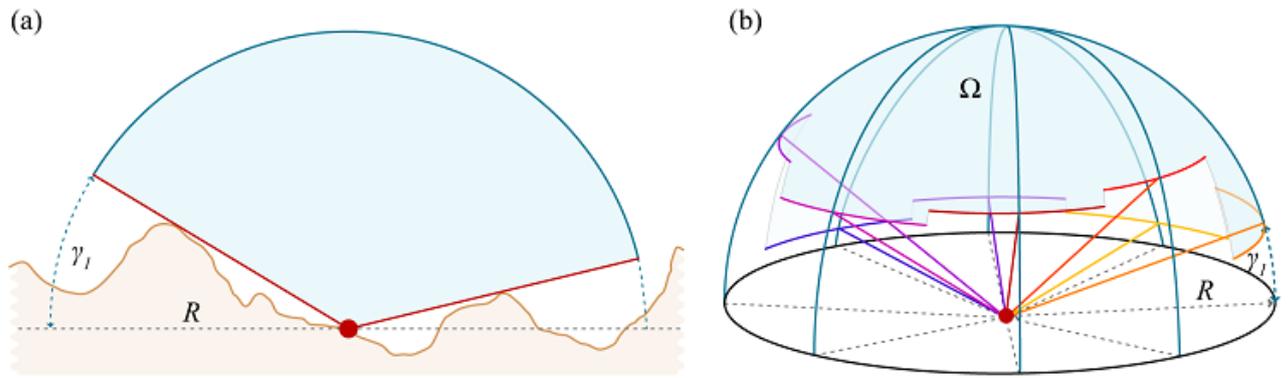


Figura 2.14. Esempio del procedimento di individuazione dell'emisfero di cielo visibile individuato dall'angolo solido Ω in n direzioni di ricerca ed entro il raggio R . [ZAKŠEK et al. 2011].

2.2.4 Metodo di Kastendeuch (2013)

L'approccio di Kastendeuch (2013) parte da un'analisi della fisica dell'illuminazione e del trasferimento di calore per irraggiamento: un problema comune in questi casi è prevedere la quantità di radiazione che può essere scambiata tra una piastra emittente (chiamata X) e una piastra ricevente (chiamata Y), ipotizzando la presenza di un mezzo che non interferisce tra di esse (un gas inerte). La soluzione consiste nell'ottenere l'irradianza (W/m^2) della piastra ricevente Y secondo la formula:

$$I_{X \rightarrow Y} = \frac{E_X A_X F_{X \rightarrow Y}}{A_Y}$$

dove $F_{X \rightarrow Y}$ è il fattore di vista tra le due piastre (valori tra 0 e 1), E_X è l'emittanza della piastra X (W/m^2), A_X e A_Y sono rispettivamente le aree (m^2) delle piastre X e Y . Il fattore di vista $F_{X \rightarrow Y}$ è un termine di particolare importanza poiché parametrizza la frazione di radiazione uscente diffusa da un emettitore ideale che raggiunge realmente il ricevitore; è sviluppato sulla base di considerazioni puramente geometriche.

Un esempio di come sia possibile calcolare il fattore di vista differenziale tra due elementi infinitesimi, è dato dalla seguente equazione:

$$dF_{dX \rightarrow dY} = \frac{\cos\theta_X \cos\theta_Y}{\pi S^2} dA_Y$$

dove dX è l'elemento collocato sulla piastra X e dY collocato sulla piastra Y , θ è l'angolo (radianti) tra la normale dell'elemento differenziale ed il segmento che li congiunge, S è la distanza (m) tra gli elementi dX e dY aventi area rispettivamente dA_X e dA_Y (Figura 2.15).

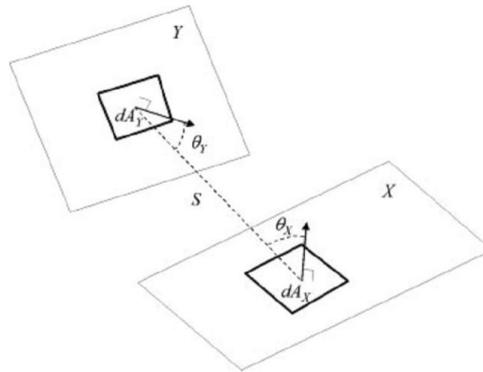


Figura 2.15. Fattore di vista tra due elementi infinitesimi (dX , dY) appartenenti a due piastre finite (X , Y) [KASTENDEUCH 2013].

Per analogia, l'ultima equazione può essere usata anche per stimare il fattore di vista tra un emettitore infinitesimo (dX) ed un ricevitore finito (Y):

$$F_{dX \rightarrow Y} = \int_Y \frac{\cos\theta_X \cos\theta_Y}{\pi S^2} dA_Y = \int_Y F_{dX \rightarrow Y}$$

Per applicare quest'ultima, il ricevitore finito Y è diviso in un numero finito n di elementi differenziali dY (Figura 2.9) per cui è possibile calcolare il fattore di vista infinitesimo associato a dX , quindi l'ultima equazione può essere riscritta nella forma discreta:

$$F_{dX \rightarrow Y} = dF_{dX \rightarrow dY_1} + dF_{dX \rightarrow dY_2} + dF_{dX \rightarrow dY_3} + \dots + dF_{dX \rightarrow dY_n} = \sum_{i=1}^n dF_{dX \rightarrow dY_i}$$

L'analogia tra $F_{dX \rightarrow Y}$ e lo *Sky View Factor* diventa evidente quando l'elemento differenziale dX è posto sul terreno e l'elemento finito Y rappresenta l'intera emisfera celeste (come in Figura 2.16): in questo caso tutta la radiazione emessa da dX in assenza di ostacoli dovrà colpire Y e, di conseguenza, $F_{dX \rightarrow Y}$, avrà valore unitario, che è esattamente il valore dello *SVF* di un punto posizionato su terreno orizzontale privo di ostacoli. Se una parte di Y non è visibile da dX per la presenza di ostacoli, ovviamente il valore di $F_{dX \rightarrow Y}$ dovrà diminuire fino ad essere nullo nel caso in cui la visione di Y sia completamente ostruita; per tenere in considerazione di questo fenomeno, è

introdotto il parametro di visibilità v per ogni elemento poligonale dY , avente solo due possibili valori, ossia 0 (Y invisibile) oppure 1 (assenza di ostacoli), eliminando in questo modo i fattori di vista degli elementi poligonali dY non visibili da dX :

$$F_{dX \rightarrow Y} = \sum_{i=1}^n dF_{dX \rightarrow dY_i} \cdot v_i = SVF$$

Quest'ultima non è altro che l'equazione dello *SVF*, calcolato sommando il termine $dF_{dX \rightarrow dY_i}$ per ogni elemento poligonale i -esimo che discretizza l'emisfero Y , composto complessivamente da n elementi piani, calcolati tramite un algoritmo di "tessellation".

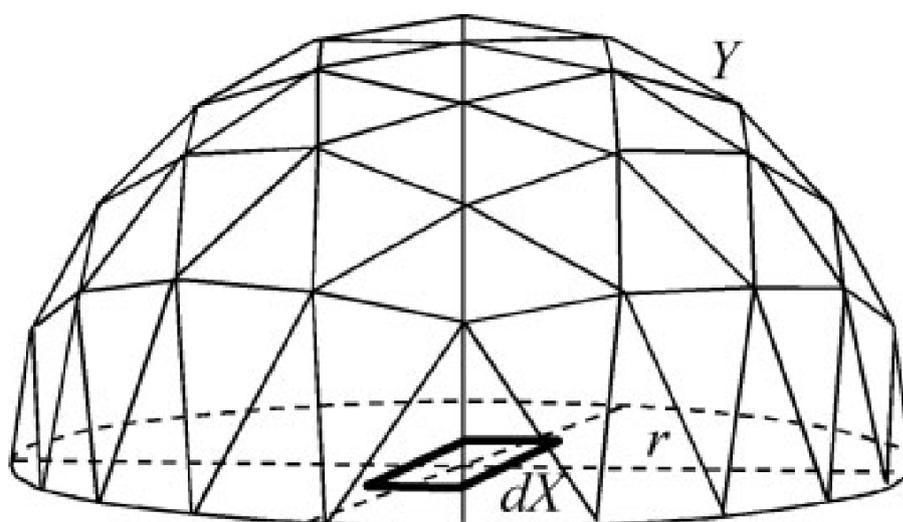


Figura 2.16. Configurazione per calcolare lo *Sky View Factor* tra un'area infinitesima dX ed un emisfero finito di cielo Y di raggio r discretizzato in piccoli poligoni triangolari [KASTENDEUCH 2013].

Per determinare il parametro di visibilità v si adotta una tecnica applicata in computer grafica tridimensionale: consiste nel tracciare dei raggi virtuali tra il centro di ogni poligono dY ed il punto di calcolo dX posizionato sulla superficie del *DSM*. Come già anticipato, il parametro di visibilità v è unitario se il raggio non è intercettato dal *DSM*. Altrimenti se il raggio è intercettato dal *DSM* ci sono due possibilità: se l'oggetto è opaco v sarà nullo, mentre se l'oggetto è trasparente v sarà pari alla trasmittanza dell'oggetto. Per semplificare il calcolo ogni poligono è disposto in modo che il vettore uscente dal punto medio di dY_i e diretto al punto di calcolo dX sia sempre ortogonale ad ogni poligono, quindi si avrà:

$$SVF = \sum_{i=1}^n \frac{\cos\theta_{xi}}{\pi S^2} dY_i v_i$$

L'accuratezza di questa equazione aumenta al diminuire della dimensione dei poligoni, logica conseguenza del fenomeno per cui la forma e l'area dell'insieme di elementi poligonali tende sempre più ad un emisfero e la distanza S tra i due elementi dX e dY_i tende sempre più al raggio r dell'emisfero: infatti nel caso di elementi poligonali non infinitesimi, la distanza reale (che chiameremo $S2$) risulta inferiore al raggio r . Tramite prove sperimentali è stato appurato che la migliore approssimazione possibile per S è una media pesata tra $S2$ ed r :

$$S = 0,49 S2 + 0,51 r$$

Inoltre questo metodo può essere usato per ogni tipo di superficie inclinata: come illustrato in Figura 2.17, il piano infinitesimo dX separa l'emisfero in due semispazi (anteriore e posteriore) in accordo con il verso della normale alla superficie. Quando un elemento poligonale ricade nello spazio posteriore, la sua visibilità v è semplicemente fissata nulla.

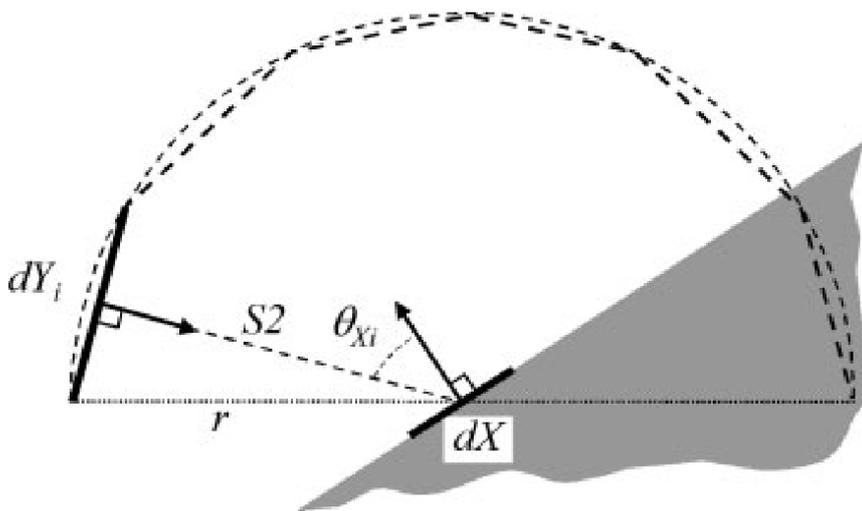


Figura 2.17. Configurazione per il calcolo dello Sky View Factor per una superficie inclinata. La zona grigia corrisponde al semispazio posteriore [KASTENDEUCH 2013].

2.3 Informazioni geometriche di input: file vettoriali

L'approccio più frequente per il calcolo dello *Sky View Factor* a partire da database di tipo vettoriale consiste nello sviluppo di algoritmi operanti preferibilmente in ambito GIS: gli ambienti software di questo tipo consentono di analizzare facilmente le informazioni geometriche tridimensionali. In particolare il software *ArcGIS* (denominato *ArcView GIS* in versioni precedenti) prodotto dalla *ESRI* (*Environmental Systems Research Institute*) è stato diffusamente sfruttato in considerazione delle capacità di analisi dell'informazione spaziale e per le ampie possibilità di personalizzazione ed implementazioni di script progettati dall'utente [SOUZA et al. 2003a, LI et al. 2004]. I database urbani tridimensionali di tipo vettoriale sono un modello semplificato della superficie urbana; solitamente sono forniti dalle amministrazioni locali in estensione *shapefile* (*.shp*), un formato sviluppato da *ESRI* per l'utilizzo all'interno di sistemi informativi geografici e molto diffuso nell'ambito professionale. Le specifiche tecniche di *ESRI* [ESRI Shapefile Technical Description 1998] definiscono lo *shapefile* come un sistema in grado di memorizzare attributi e caratteri geometrici non-topologici per definire le caratteristiche spaziali di una serie di dati. Questa modalità di archiviazione presenta vantaggi rispetto ad altre fonti di dati (come i *DSM* raster) quali la velocità di modifica ed un ridotto spazio di archiviazione richiesto. Gli *shapefile* supportano tre tipi di rappresentazioni: punti, polilinee e aree (poligoni chiusi). Questo formato consiste in realtà in 3 file collegati:

- un file principale con estensione *.shp* contenente la descrizione delle forme geometriche con una lista dei rispettivi vertici;
- un file indice con estensione *.shx* contenente l'indice delle forme geometriche, collegandole al terzo file relativo al database degli attributi;
- un file database con estensione *.dbf* (formato *dBASE*) che contiene gli attributi di ogni singola forma geometrica.

In ambito urbano, gli edifici sono schematizzati come geometrie poligonali chiuse, contraddistinte da diversi attributi contenuti nel file *.dbf* (ad esempio: area, perimetro, volume, elevazione, quota al piede, tipologia edilizia, ecc.). Ogni regione poligonale può essere definita da unico attributo di elevazione per tutte le pareti, per cui il tetto risulta piano. Da questa considerazione è possibile affermare che le rappresentazioni di situazioni geometriche notevolmente complesse tramite database vettoriali in questo formato, di sicuro consistono in una semplificazione della realtà (poiché, ad esempio, le falde inclinate degli edifici o altri elementi tridimensionali quali camini non possono essere rappresentati).



Figura 2.18. Colorazione di ogni regione poligonale in funzione dell'attributo altezza [HÄMMERLE et al. 2011].

I metodi vettoriali presi in esame, sebbene con lievi differenze, seguono tutte un procedimento analitico che consiste nel proiettare gli edifici sull'emisfero di cielo visibile dal punto prescelto per il calcolo dello *SVF*, e quindi determinare il fattore di vista in modo proporzionale all'angolo di elevazione massima dell'ostacolo rispetto al punto centrale dell'emisfero [SOUZA et al. 2003a, LI et al. 2004, GÀL et al. 2007].

2.3.1 *3DSkyView extension per ArcGIS (Souza et al. 2003)*

L'estensione sviluppata da Souza chiamata *3DSkyView* incrementa le potenzialità di calcolo tridimensionale del software *ArcView GIS 3.2* (con estensione *3D Analyst*⁸ installata) per il calcolo e la visualizzazione dello *Sky View Factor*. L'approccio consiste nell'andare a simulare la rappresentazione spaziale della morfologia urbana generata da una macchina fotografica dotata di obiettivo *fisheye*, tramite un algoritmo che sfrutti come input un database di coordinate cartesiane, ovvero una sorgente vettoriale *shapefile* contenente le informazioni geometriche degli edifici. *3DSkyView* è stato concepito tramite il linguaggio di programmazione *Avenue* incluso nell'ambiente software *ArcView GIS 3.2*. Il principio matematico su cui si basa questo script consiste nell'identificazione delle dimensioni angolari tra l'osservatore e gli ostacoli costituiti dagli elementi

⁸ Estensione a pagamento di *ArcView GIS* che aggiunge funzionalità di manipolazione e visualizzazione delle informazioni tridimensionali raster e vettoriali al software [esri.com].

urbani; la determinazione di questi angoli consente di proiettare il canyon urbano su una superficie piana bidimensionale, sfruttando i principi della proiezione stereografica azimutale⁹ che mette in relazione il sistema di coordinate tridimensionale dell'ambiente urbano con un sistema bidimensionale piano generato dalla proiezione stessa.

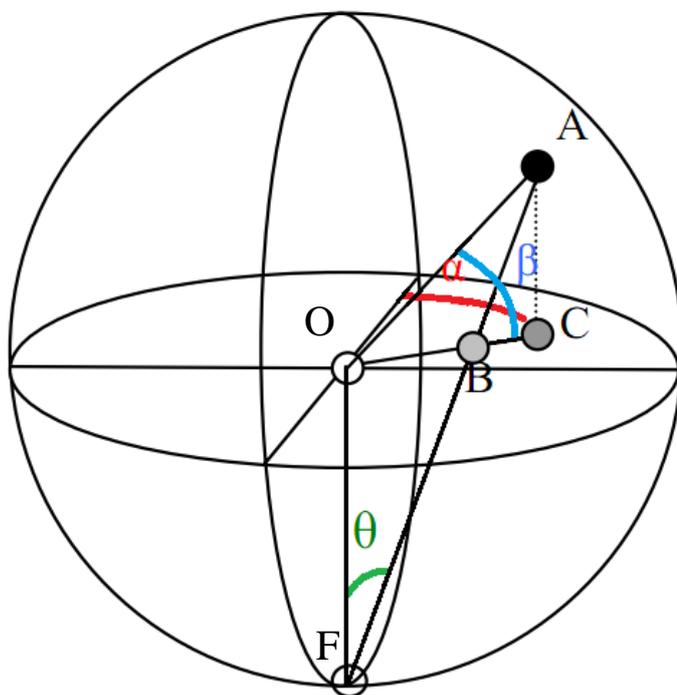


Figura 2.19. Proiezione stereografica [SOUZA et al. 2003b]

In riferimento alla Figura 2.19, la creazione di una proiezione di tipo stereografico si riassume graficamente in queste fasi:

- 1) si considera un emisfero centrato nel punto O che rappresenta il cielo visibile dal punto di osservazione;
- 2) i punti che delimitano gli elementi occludenti vengono proiettati sulla una superficie emisferica (nel punto A) lungo la direzione di visibilità OA che congiunge il centro della sfera ed i vertici dell'elemento;
- 3) vengono tracciati segmenti di unione tra i punti determinati sulla superficie emisferica (punto A) ed il punto di fuga nadirale (punto F);
- 4) dall'intersezione tra il segmento AF ed il piano equatoriale della sfera si ricava un nuovo punto B , che fa parte di un nuovo sistema di coordinate bidimensionali relativo ai vertici appartenenti alle ostruzioni visibili dal punto di osservazione e proiettate in modo stereografico.

⁹ Una proiezione stereografica azimutale è di tipo conforme, ossia per ogni porzione infinitesima di proiezione l'ampiezza dell'angolo compreso tra due linee incidenti viene mantenuta [FURUTI 1997].

Analiticamente, il procedimento si compone di questi passaggi:

- 1) determinazione delle coordinate polari per i vertici delle ostruzioni, ovvero l'angolo azimutale α , compreso tra la proiezione di OA sul piano equatoriale e all'asse polare diretto verso nord, e l'angolo zenitale β , compreso tra il piano equatoriale e la direzione OA ;
- 2) calcolo dell'angolo centrato sul punto di fuga nadirale e compreso tra le direzioni di FO e FA :

$$\theta = (90 - \beta)/2 ;$$

- 3) calcolo delle coordinate del punto A (dato il raggio r della sfera):

$$x = \cos(90 - \alpha) r \tan \theta \quad y = \sin(90 - \alpha) r \tan \theta$$

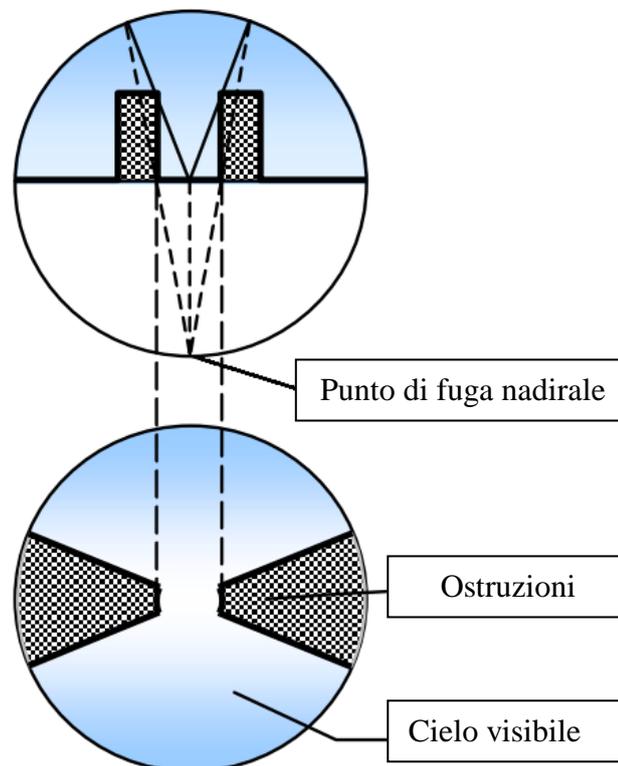


Figura 2.20. Proiezione stereografica di un canyon urbano [SOUZA et al. 2003b]

Procedendo con questa operazioni per tutti i vertici appartenenti agli elementi urbani, è possibile tracciare la proiezione sul piano orizzontale, ottenendo una rappresentazione della volta del cielo visibile e delle relative ostruzioni dal punto O (esempio per un semplice canyon in Figura 2.20), simulando una ripresa della scena simile a quella compiuta tramite un obiettivo *fisheye* che, come è già stato discusso nel capitolo precedente, genera una proiezione di tipo equiangolare. A questo

punto determinare lo *Sky View Factor* è solo una questione di manipolazione spaziale: secondo Souza et al. la tecnica più appropriata prevede la suddivisione della sfera in parti omogenee che a loro volta saranno proiettate in modo stereografico sul piano equatoriale, creando uno *stereonet*: per quello rappresentato in Figura 2.21 è stato assegnato un intervallo angolare di 5 gradi sia per l'angolo azimutale sia per quello zenitale.

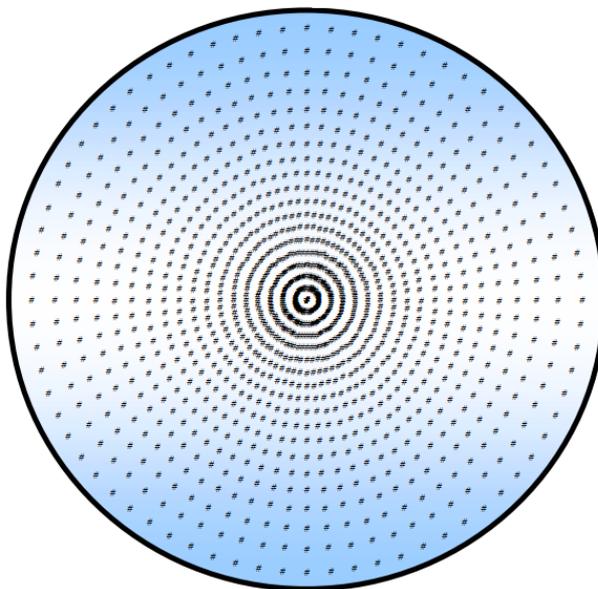


Figura 2.21. Stereonet proiettata sul piano equatoriale con spaziatura regolare di 5 gradi di altitudine e latitudine [SOUZA et al. 2003b].

Il passo successivo consiste nel sovrapporre questa *stereonet* alle ostruzioni degli edifici (Figura 2.20), entrambi proiettati sul piano equatoriale: il rapporto tra punti non ostruiti ed il loro numero complessivo, fornirà il valore di *Sky View Factor*.

Dal punto di vista operativo, il procedimento è molto semplice: oltre al caricamento di un file vettoriale di estensione *.shp* contenente le informazioni geometriche degli edifici, è richiesto un ulteriore input vettoriale contenente le coordinate del punto di osservazione. Entrambi i file devono contenere una tabella di attributi e per ogni vertice sono previsti almeno due parametri: la quota assoluta (la quota al piede) e l'elevazione rispetto al suolo.

Una caratteristica molto limitante rispetto agli algoritmi di proiezione delle ombre applicabili ai file raster è quella di poter analizzare un solo punto per volta, ma allo stesso tempo rappresenta una notevole evoluzione dal lato della valutazione della visibilità del cielo: gli autori sottolineano che la caratteristica più importante dell'estensione *3DSkyView* è relativa alla possibilità di sostituire rilievi fotografici puntuali sul campo tramite lenti *fish-eye*. Le ottime performance di questo metodo sono mostrate in Figura 2.22 dove gli output del software sono accostati ai dati misurati sul campo: valore dello *SVF* calcolato tramite il metodo di Johnson e Watson (1984) ed il profilo del cielo

visibile acquisito con macchina fotografica dotata di obiettivo *fisheye*. Si osserva solo una leggera sovrastima dell'ordine di 0.03, che tende a 0.04 per ridotti fattori di vista del cielo.

Case Nr.	SVF Field Data	3DSky View SVF	Actual urban geometry	3DSkyView 2D Stereographic Scene
1	0.59	0.62		
2	0.24	0.28		
3	0.67	0.70		
4	0.19	0.25		

Figura 2.22. Confronto tra valori sul campo e stimati dal software [SOUZA et al. 2003c].

2.3.2 SVF extension per ArcGIS (Gál et al. 2007)

SVF extension, installabile sul sistema informativo geografico *ArcView GIS 3.2*, rappresenta l'evoluzione dell'estensione *3DSkyView* di Souza et al. (2003). In prima istanza non è richiesta l'estensione *3D Analyst*; e questo fa intuire che per la determinazione dello *Sky View Factor* con questo algoritmo di calcolo non sia necessaria un'elaborazione grafica tridimensionale, per cui ci si dovrebbe attendere un peso computazionale più basso: il tempo di calcolo riscontrato, notevolmente inferiore con *SVF extension*, conferma questa ipotesi. Un'altra caratteristica, di notevole importanza, è la possibilità di estendere il calcolo ad una serie di punti per creare una mappatura dello *SVF* su un'ampia superficie. Anche il principio di computazione è sostanzialmente diverso: la proiezione di ogni edificio sulla volta emisferica del cielo è trattata come la proiezione delle sole pareti visibili da un punto sul terreno ed il risultato è espresso dal poligono $g(x)$ in Figura 2.23 che rappresenta il bordo del cielo visibile. La porzione di cielo visibile sottesa a $g(x)$ viene divisa in strisce di ampiezza azimutale costante α e l'altezza di ogni striscia sarà pari a $g(x)$ nella mezzeria della striscia.

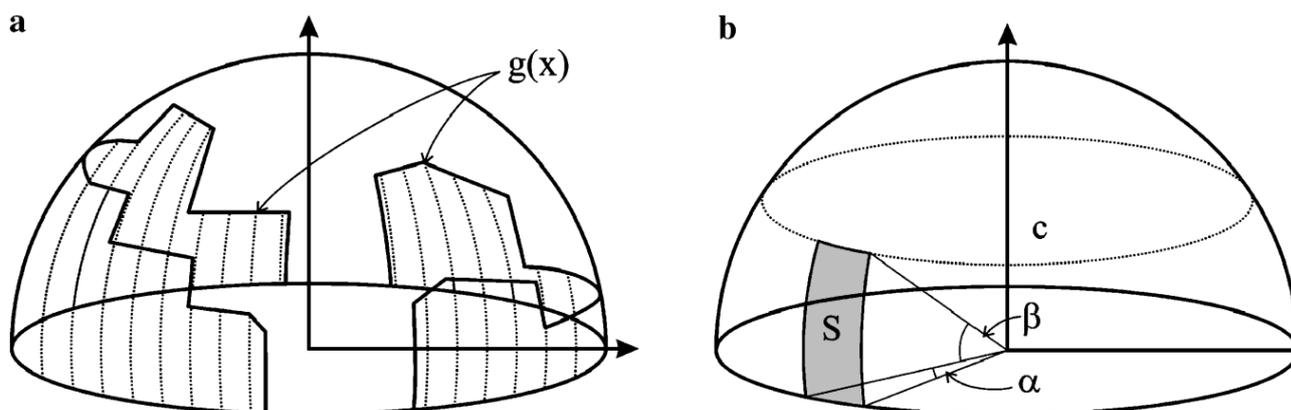


Figura 2.23. il poligono $g(x)$ rappresenta il bordo di cielo visibile. La porzione di emisfero sottesa a $g(x)$ viene suddivisa in strisce S di ampiezza angolare costante α [GÁL et al. 2009].

La formulazione analitica adottata per il calcolo dello *SVF* è quella di Oke (1987), che per una conca regolare circolare determina il fattore di vista del cielo al centro della conca in funzione dell'angolo di elevazione β dal centro rispetto alla parete tramite la formula $SVF_{basin} = \cos^2\beta$; il fattore di vista della parete risulterà quindi $VF_{basin} = 1 - \cos^2\beta = \sin^2\beta$. Si conclude che il fattore di vista di una striscia S (definita in Figura 2.23) può essere scritto come $VF_S = \sin^2\beta(\alpha/360)$.

L'algoritmo opera tracciando una linea secondo la direzione α , andando ad identificare l'edificio che determina la massima ostruzione cercando quella parete che determina l'angolo di elevazione β maggiore entro un certo raggio attorno al punto di calcolo definito dall'operatore. L'accuratezza dell'algoritmo dipende dall'ampiezza dell'angolo α scelto: per piccoli intervalli angolari si avrà una stima più accurata dello *SVF*, ma è richiesto un maggiore tempo di computazione. Il calcolo prosegue con la somma di tutti i valori VF_S relativi ad ogni striscia ed infine lo *Sky View Factor* è determinato sottraendo la sommatoria da 1.

Dal punto di vista operativo, il procedimento è del tutto simile a quello *3DSkyView*: oltre al caricamento di un file vettoriale con estensione *.shp* contenente le informazioni geometriche degli edifici, è richiesto un ulteriore input vettoriale contenente le coordinate e l'elevazione dei punti di osservazione. Tra gli input sono richiesti anche l'angolo di ampiezza delle strisce α ed il raggio di ricerca.

Per ottenere una mappatura dello *SVF* su un'ampia porzione urbana è quindi necessario creare uno *shapefile* contenente una rete di punti, la cui elevazione può essere ricavata ad esempio da un *DSM*. È importante selezionare un'appropriata distanza reciproca tra i punti, considerando la risoluzione

dell'immagine che si vuole ottenere ed il tempo di computazione necessario. La Figura 2.24 mostra la distribuzione dei punti di calcolo in un'area di studio.

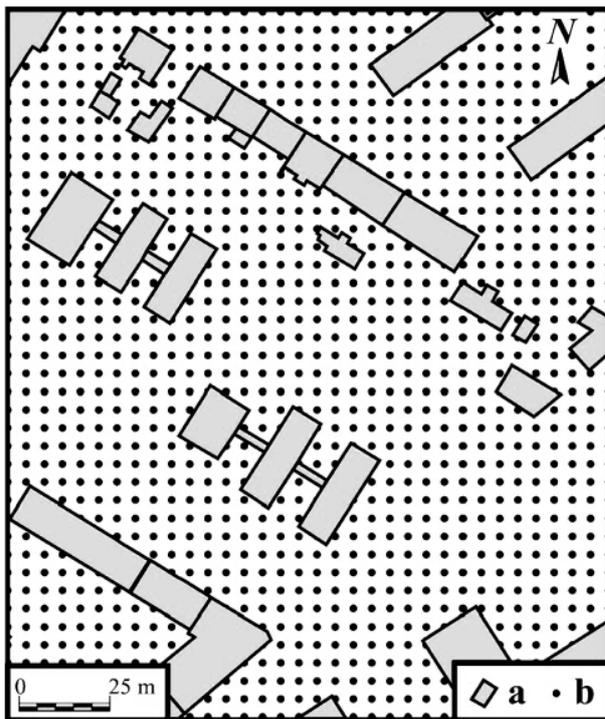


Figura 2.24. Esempio di area di studio con l'impronta degli edifici (a) ed i punti di misurazione dello *SVF* con risoluzione di 5 m (b) [GÁL et al. 2009].

Una prima verifica di affidabilità su questo metodo è stata compiuta comparando fotografie *fisheye* acquisite in sito con il risultato grafico dell'algoritmo: alcuni esempi sono riportati in Figura 2.25.



Figura 2.25. Confronto tra fotografie *fisheye* ed il risultato grafico di *SVF extension* [GÁL et al. 2007].

Il risultato visivo è di buona qualità, e le ostruzioni non considerate dal software sono dovute principalmente alla presenza della vegetazione (ed eventualmente all'arredo stradale) non inclusa nel database vettoriale e che rappresenta la principale causa di sovrastima dello *SVF*. Nella Figura

2.26 è evidenziato infatti lo scarto tra il fattore di vista del cielo calcolato dalle fotografie tramite il software *BMSky-View* e quello determinato dall'algoritmo di *SVF extension*: le differenze maggiori si riscontrano nei siti dove la vegetazione è più fitta.

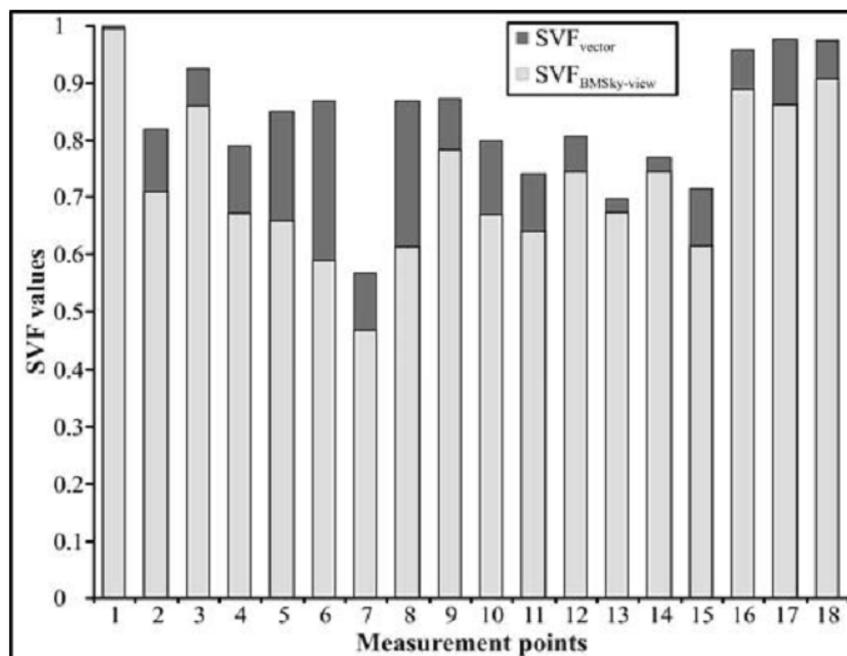


Figura 2.26. Differenze tra *SVF* con metodo vettoriale e fotografico valutato su 18 punti di misura in sito [GÁL et al. 2007].

Una valutazione rigorosa sull'attendibilità dell'algoritmo è stata attuata applicandolo a due casi morfologici notevoli: una conca circolare (*basin*) ed un canyon infinito (nel calcolo è stata usata una lunghezza di 3 km) aventi rapporto dimensionale $H/W = 0.6$ (altezza 12 m, larghezza 20 m). Il valore estrapolato nel punto centrale ($SVF_{vettoriale}$) di entrambe i casi è stato confrontato con i risultati forniti da:

- algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999) applicato su file raster (SVF_{raster});
- formule analitiche di Oke (1987): $SVF_{canyon} = \cos\beta$; $SVF_{basin} = \cos^2\beta$ (SVF_{Oke}).

La Figura 2.27 mostra che il metodo vettoriale stima circa lo stesso valore del metodo analitico, mentre il metodo raster assegna un valore leggermente superiore (con una differenza comunque di entità trascurabile).

	H/W	SVF_{Oke}	Scarto $SVF_{raster} - SVF_{Oke}$	Scarto $SVF_{vettoriale} - SVF_{Oke}$
SVF_{basin}	0.6	0.4098	0.0072	0.0000
SVF_{canyon}	0.6	0.6402	0.0141	-0.0012

Figura 2.27. Confronto statistico dello SVF calcolato con metodo analitico di Oke (1981) e algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999) [LINDBERG, GRIMMOND 2010]

Un confronto più ampio è stato ottenuto suddividendo un'ampia area di studio (corrispondente al territorio urbanizzato della città di Szeged in Ungheria) in celle quadrate di 500 metri di lato e per ogni cella è stato calcolato il valore medio dello SVF determinato con i metodi vettoriale e raster. Il risultato finale è mostrato in Figura 2.28 mentre nella Figura 2.29 è riportata la retta di regressione che correla la media in ogni cella stimata con i due metodi: la deviazione è minima ed il coefficiente di determinazione R^2 è molto elevato.

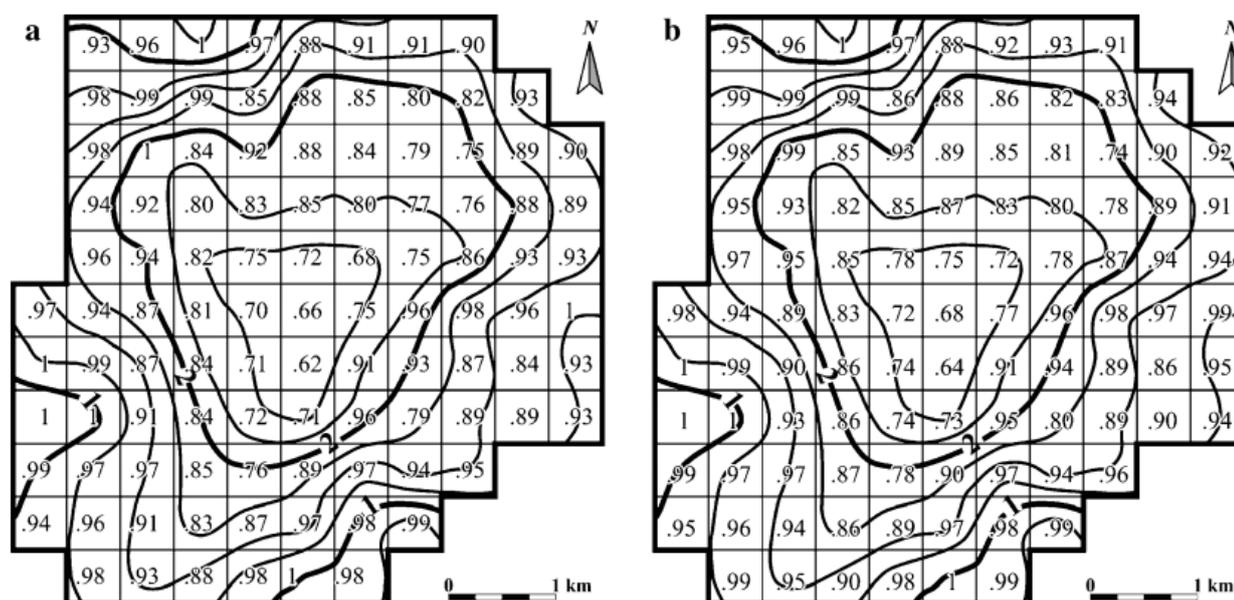


Figura 2.28. Distribuzione spaziale di (a) $SVF_{vettoriale}$ e (b) SVF_{raster} relativi ai valori medi per ogni cella [GÁL et al. 2009].

Per cui la differenza tra le due tecniche si conferma molto piccola, ma con tendenza a valori leggermente superiori per il metodo raster: questo piccolo scostamento è dovuto principalmente alle caratteristiche dell'algoritmo vettoriale che, andando a considerare gli edifici solo entro un certo raggio di azione, porta ad escludere dalla computazione ostacoli lontani ma che comunque influirebbero sul fattore di vista del cielo (in particolare nelle zone con densa urbanizzazione), ovvero quelle che presentano uno SVF mediamente più basso. Al contrario, il metodo raster di Ratti

e Richens, per come è strutturato, deve necessariamente considerare l'intera area di studio per il calcolo dello *SVF* anche per un singolo punto, includendo nella computazione anche ostacoli molto lontani. Un altro aspetto da considerare è che la quota del terreno inclusa nel *DSM* raster, induce degli aumenti nei valori di *Sky View Factor* in alcuni contesti.

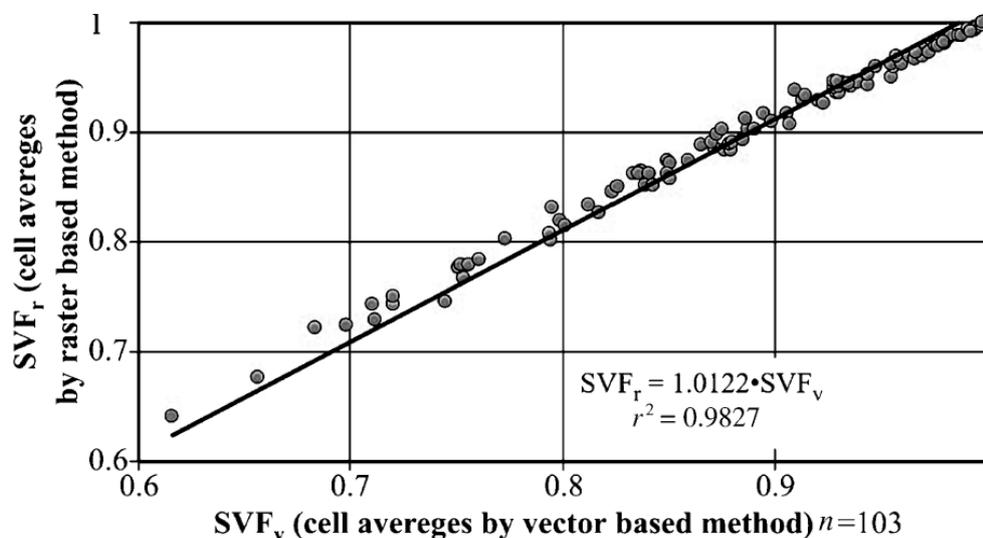


Figura 2.29. Relazione tra i valori medi dello *SVF* per ogni cella [GÁL et al. 2009].

2.3 Software SkyHelios di Matzarakis e Matuschek (2009)

A partire dall'esperienza maturata con il software *RayMan* (già descritto nel capitolo precedente), gli stessi autori hanno sviluppato un nuovo modello per la stima di parametri microclimatici su ampie superfici urbane, con l'intenzione di estendere le funzionalità di *RayMan* da un ambito puntuale ad uno spaziale. L'algoritmo principale di *SkyHelios* provvede alla creazione di una scena tridimensionale a partire da informazioni raster e vettoriali; questa scena viene poi fornita ad un motore grafico che opererà il calcolo dei parametri di interesse tramite il processore grafico (*GPU*) del computer utilizzato. Il modello è stato implementato in *C#* e si avvale di un motore grafico di tipo *open source* (*3D Graphics Library Mogre*).

Il calcolo dello *Sky View Factor* per un punto selezionato (Figura 2.30) prevede tre passaggi principali:

- 1) il render della scena è prodotto per cinque volte, simulando lenti con apertura a 90° orientate rispettivamente verso Nord, Ovest, Sud, Est e in direzione del cielo (Figura 2.31);
- 2) queste cinque immagini sono combinate su un emisfero (Figura 2.32) e proiettate sul piano equatoriale, formando una singola immagine che riproduce una proiezione equiangolare del

cielo visibile, compatibile con il risultato ottenibile tramite una fotografia *fisheye* (Figura 2.33);

- 3) il risultato viene infine elaborato dalla scheda grafica tramite un programma che opera sulla *GPU* incaricato di conteggiare i pixel appartenenti al cielo e quelli appartenenti agli ostacoli. Il numero di pixel appartenenti al cielo rapportato al numero totale di pixel fornirà lo *Sky View Factor* per il punto interessato.

I passi descritti vengono ripetuti per ogni punto sulla mappa, con un intervallo spaziale ed un'altezza di osservazione dal suolo decisi dall'utente. Il risultato è un file *.txt* che definisce sia le coordinate immagine del punto che il valore dello *SVF*. Il software inoltre, dopo aver definito la data e la latitudine del sito, può anche stimare il percorso solare e l'influenza degli ostacoli sulle ore di sole complessive che interessano un determinato sito.



Figura 2.30. Mappa vettoriale degli ostacoli con il punto di calcolo indicato dalla freccia [MATZARAKIS, MATUSCHEK 2011].

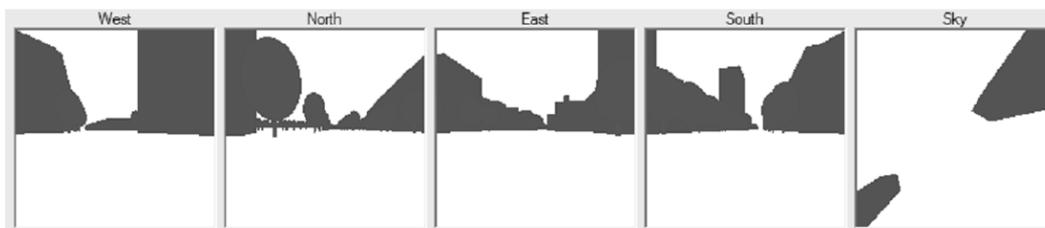


Figura 2.31. Visualizzazione delle cinque direzioni di calcolo su punto indicato nella figura precedente [MATZARAKIS, MATUSCHEK 2011].



Figura 2.32. Composizione emisferica delle cinque direzioni di calcolo [MATZARAKIS, MATUSCHEK 2011].

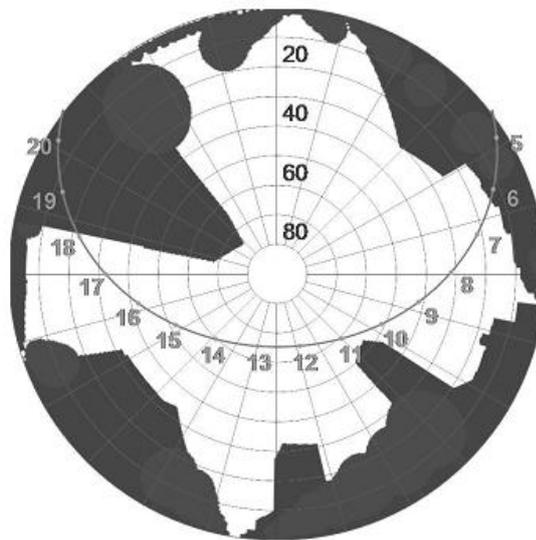


Figura 2.33. Proiezione equiangolare finale [MATZARAKIS, MATUSCHEK 2011].

Questo software pertanto offre delle potenzialità nuove ed interessanti per il calcolo dello *Sky View Factor* rispetto agli applicativi che abbiamo visto finora:

- è in grado di usare, anche contemporaneamente, sia file raster che file vettoriali come input, ad esempio caricando un file raster *DSM* su cui può essere sovrapposto un livello vettoriale in formato *.obs* (estensione dei file vettoriali usata in *RayMan*);
- si avvale della potenza di calcolo del processore grafico, alleggerendo il peso computazionale gravante sulla *CPU*;
- è possibile visualizzare in tempo reale la proiezione equiangolare generata nel punto selezionato (una sorta di “camminata virtuale” all’interno del database tridimensionale) e di esportare nei più comuni formati immagine i risultati puntuali;
- ha un utilizzo gratuito.

2.5 Considerazioni

Lo studio di Hämmerle et al. (2011) offre una valutazione complessiva delle principali tecniche analizzate finora, ed è utile per comprendere l'affidabilità dei software più rappresentativi di ogni metodo di calcolo. L'analisi sperimentale, applicata lungo un transetto di misura all'interno di un centro urbano, comprende dei set di valori determinati sia a partire da fotografie *fisheye* che con metodi numerici applicati a database tridimensionali degli edifici.

I rilievi fotografici *fisheye* sono stati valutati con:

- il metodo di Steyn (1980) automatizzato tramite uno script in ambiente *GIS*;
- il software *RayMan*;
- il software *BMSkyView*.

Sono stati utilizzati i seguenti software di calcolo che sfruttano database tridimensionali degli edifici:

- *SkyHelios*;
- *SVF extension* per *ArcGIS*;
- *SOLWEIG*.

Il confronto è stato operato andando ad estrapolare i valori di *SVF* determinati tramite gli algoritmi di mappatura in corrispondenza delle coordinate in cui sono stati effettuati i rilievi reali in sito con macchina fotografica dotata di lenti *fisheye*. Il risultato complessivo è mostrato in Figura 2.34.

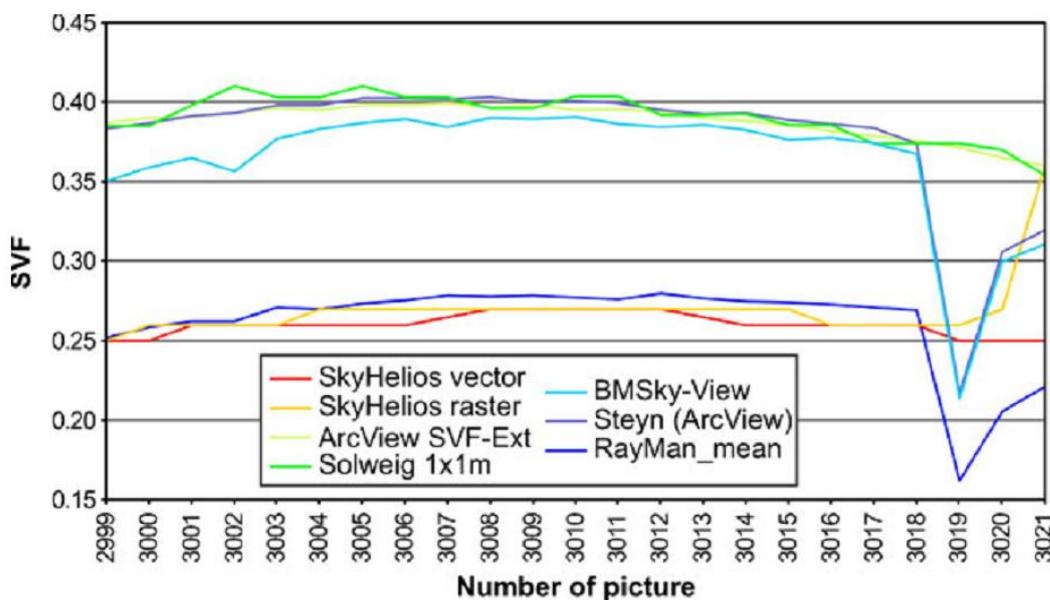


Figura 2.34. Valori di *SVF* calcolati per tutti i metodi investigati lungo un transetto [HÄMMERLE et al. 2011].

Se escludiamo gli ultimi quattro punti del transetto, dove si nota un forte scostamento per tutte le tecniche dovuto alla presenza di un muro non rappresentato nel database tridimensionale degli edifici, a prima vista appare subito evidente una deviazione sistematica di *RayMan* e *SkyHelios*, che sfruttano lo stesso procedimento di computazione, rispetto ad un andamento piuttosto uniforme per tutti gli altri metodi. La causa di questa discrepanza è stata individuata nella mancata applicazione della legge di Lambert¹⁰ all'interno dell'algoritmo di calcolo.

Per concludere, in estrema sintesi, possiamo individuare quattro aspetti salienti a riguardo dei metodi analizzati in questo capitolo:

- se ben progettati e tarati, entrambi i metodi (raster e vettoriali) sono accurati ed offrono risultati di ottima qualità se confrontati sia con le formule analitiche che con le tecniche fotografiche tradizionali;
- il vantaggio dei metodi raster risiede nel basso tempo di calcolo (da 5 a 10 volte più veloce delle tecniche vettoriali), che ne permette l'utilizzo anche per la mappatura di ampie aree di studio [GÁL et al. 2009];
- il punto di forza dei metodi vettoriali consiste nell'elevata precisione di calcolo, con la possibilità di ottenere una fotografia fisheye virtuale del sito;
- il software *SkyHelios* si pone come un tramite tra le due metodologie.

¹⁰ Secondo la legge di Lambert l'illuminamento prodotto sul piano equatoriale (nel punto centrale) e proveniente dall'emisfero è direttamente proporzionale all'area della superficie, al coseno dell'angolo che la normale della superficie forma con la direzione del flusso radiante ed inversamente proporzionale al raggio al quadrato.

Analisi di prestazioni e sensibilità dei software

Come sottolineato più volte all'interno di questo studio, sono stati sviluppati una grande quantità di modelli numerici per la stima dello *Sky View Factor*. In seguito all'ampia indagine bibliografica documentata nei capitoli precedenti, ora saranno presi in considerazione i software considerati più affidabili ed efficaci per la mappatura dello *SVF* ed applicati in un ambiente urbano per determinare possibili differenze nei risultati e offrire un punto di partenza per ulteriori miglioramenti.

I metodi messi a confronto saranno quattro, i primi tre di tipo raster e l'ultimo vettoriale:

- *SOLWEIG* che opera applicando l'algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999);
- *SkyHelios* che simula un'immagine *fisheye*;
- estensione *Sky-View Factor* per *ENVI*;
- *SVF extension* per *ArcGIS 3.2* l'unico che sfrutta file vettoriali.

L'obiettivo è quello di valutare, per ogni modello di calcolo, la sensibilità ai diversi parametri di input al variare della risoluzione spaziale del dato altimetrico (e quindi del livello di dettaglio degli elementi riprodotti nei modelli digitali della superficie), a cui seguirà un confronto prestazionale tra i diversi software, adottando come riferimento di massima precisione i risultati di *SOLWEIG*, ritenuto il più affidabile all'interno della letteratura presa in esame. A tale scopo è stato selezionato un modello digitale della superficie a quattro diverse risoluzioni geometriche e una cartografia vettoriale opportunamente trattati e riferiti a un'area di studio di 0.6889 km² all'interno dell'area urbana della città di Bologna. Per valutare la degradazione dei risultati al variare del dettaglio cartografico, in termini di risoluzione geometrica dei pixel nel modello digitale della superficie, i dati ottenuti dalle simulazioni eseguite con il *DSM* a maggiore dettaglio sono stati successivamente confrontati con quelli generati nella medesima area con il modello digitale della superficie sottoposto ad un *resampling*.

Sebbene sia evidente il vantaggio che deriva dall'utilizzo di un *DSM* ad alta risoluzione (che fornisce dei risultati assimilabili a quelli ottenuti con una base cartografica vettoriale) per limitare

l'incertezza nella stima dei fattori di vista del cielo, i tempi di calcolo associati possono essere proibitivi, e pertanto occorre individuare delle soluzioni di compromesso che consentano di ottenere risultati di accuratezza sufficiente, adeguata allo scopo della valutazione in tempi operativamente accettabili.

3.1 Area di studio

L'area di studio scelta appartiene al territorio urbano della città di Bologna, 384000 abitanti, situata nell'Italia settentrionale, capoluogo della regione Emilia-Romagna. Il territorio del comune di Bologna si estende dai margini meridionali della Pianura Padana ai primi rilievi collinari dell'Appennino tosco-emiliano. Degno di nota per questa analisi, è la conformazione altimetrica dell'area urbanizzata presa in considerazione avente dimensione 830x830 metri e centrata nel punto di coordinate 44°29'32.29"N, 11°19'29.51"E (WGS 84), ovvero la parte settentrionale del quartiere Saragozza, localizzata nella fascia di transizione tra il settore pianeggiante a nord e quello collinare posto a sud, evidenziata nella Figura 3.1 e Figura 3.2.

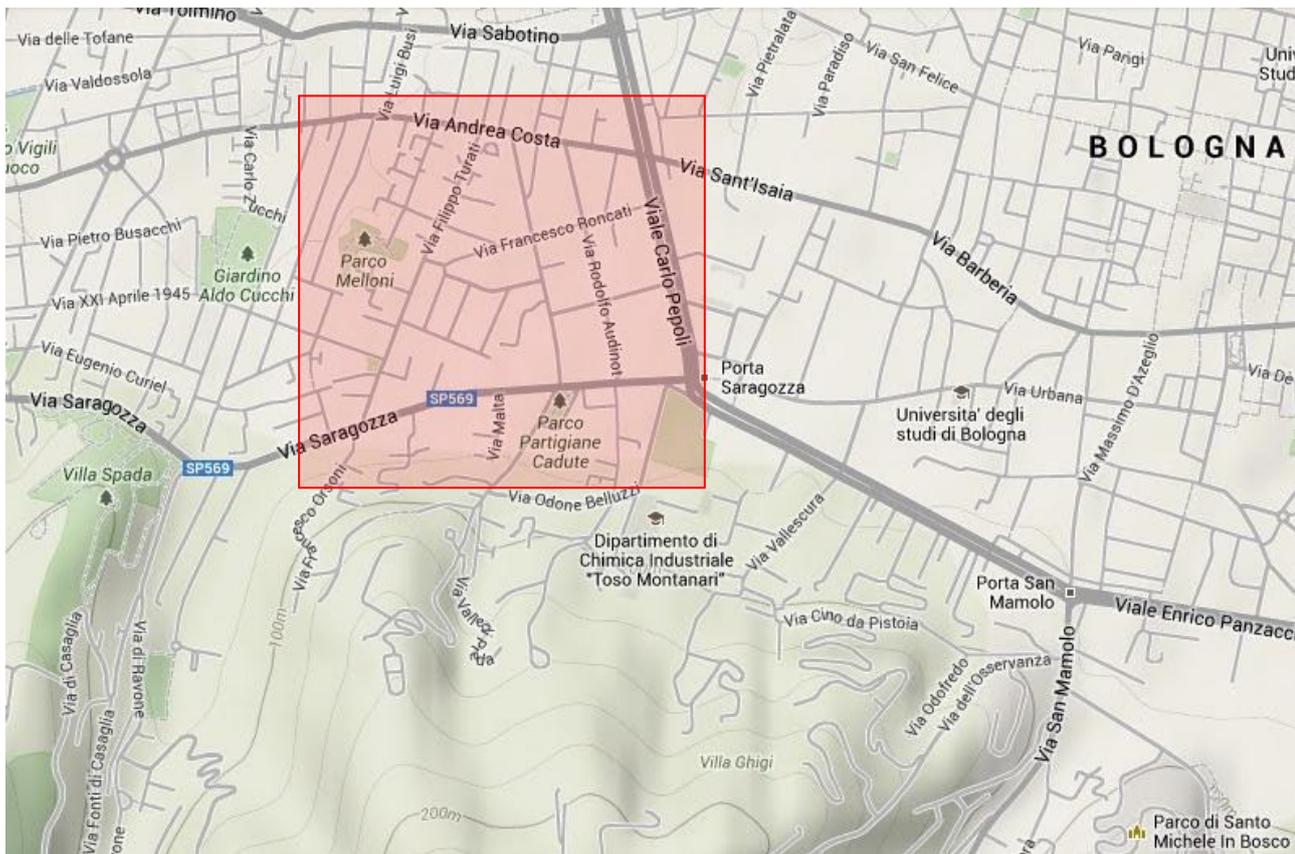


Figura 3.1. Area di studio evidenziata in carta altimetrica.



Figura 3.2. Area di studio evidenziata in immagine satellitare.

Altre indagini sperimentali di questo tipo, ovvero valutazioni delle prestazioni di software per calcolare lo SVF in un'area urbana come quelle contenute nello studio di Hämmerle et al. (2011), sono state realizzate in contesti completamente pianeggianti proprio per evitare di includere dettagliate informazioni altimetriche che, oltre ad essere soggette ad errori ed aumentare i tempi di elaborazione, possono mettere in difficoltà i modelli che sfruttano informazioni di tipo vettoriale. Al contrario, l'area di studio presa in esame per questo confronto è contraddistinta da un moderato dislivello medio lungo l'asse Nord, stimato attorno a 3%.

I software utilizzati hanno richiesto come input due tipologie di informazioni tridimensionali: modelli digitali della superficie (*DSM*) in formato raster e file vettoriali in formato *shapefile* contenenti le caratteristiche tridimensionali degli edifici.

Il *DSM* che include la zona oggetto di analisi è stato fornito dalla sezione Topografia del dipartimento DICAM dell'Università di Bologna: il file raster in formato *TIFF* è il risultato di una campagna di misura tramite *Laser Scanner* aerotrasportato effettuato sulla città di Bologna che ha prodotto un modello digitale della superficie con risoluzione geometrica dei pixel pari a 0.5 metri. Le coordinate sono nel sistema di proiezione Universale Trasversa di Mercatore (UTM), zona 32N, con datum WGS84.

Il database vettoriale in formato *shapefile* è stato prelevato tramite il sito del Sistema Informativo Territoriale del Comune di Bologna¹¹: contiene il database cartografico di tutti gli edifici compresi nel territorio comunale sotto forma di poligoni a cui sono associati i relativi attributi di quota necessari per il calcolo dello *SVF*, in particolare la quota al piede, la quota di gronda e l'altezza complessiva di ogni edificio. Le coordinate sono nel sistema di proiezione Universale Trasversa di Mercatore (UTM) zona 32N ma con datum ED50* (utilizzato dalla regione Emilia Romagna, in tutto e per tutto analogo all'ED50 ma con una falsa origine sulla coordinata Nord di -40000000 m).

3.2 Fase di preparazione

Prima di fornire l'input ai modelli di calcolo, sono state necessarie alcune elaborazioni operate sul file raster e vettoriale, eseguite con l'ausilio di software per la gestione, manipolazione, analisi e rappresentazione delle informazioni geospaziali:

- *ENVI*, acronimo di *Environment for Visualizing Images*, specializzato nell'analisi delle immagini telerilevate e molto utile per la gestione dei file raster relativi ai modelli digitali della superficie;
- *Quantum GIS*, un applicativo *GIS* open source molto simile nell'interfaccia utente e nelle funzioni alle versioni di pacchetti *GIS* commerciali equivalenti.

a) Conversione delle coordinate dei dati raster e vettoriali nella stessa proiezione cartografica

Per rendere possibili le operazioni di confronto tra i risultati, si rende necessaria un'operazione di conversione delle coordinate che determini la migliore corrispondenza geometrica possibile tra le due tipologie di informazione planimetrica. Per rendere coerenti a livello planimetrico le due tipologie di dato è stato necessario convertire la cartografia numerica vettoriale nella stessa proiezione del DSM, ovvero UTM zona 32N dato WGS 84. il risultato finale mostrato in Figura 3.3 dove c'è una coerenza soddisfacente tra gli edifici vettoriali e le corrispondenti immagini raster.

È stato necessario anche rendere coerenti tra loro le quote memorizzate nel file raster DSM e nella cartografia numerica vettoriale, in quanto mentre il primo fa riferimento alle quote ellissoidiche, la seconda registra le informazioni di elevazione come quote ortometriche.

¹¹ <http://www.comune.bologna.it/sit>



Figura 3.3. Risultato della co-registrazione.

Non avendo a disposizione un modello di ondulazione accurato sull'area in esame, e visto che dalla stima della differenza tra le quote nei due formati (determinata dalla differenza tra il valore del *Digital Number* del pixel sull'immagine raster e l'attributo quota di gronda del corrispondente edificio nel file vettoriale) risultava un valore di ondulazione medio pressoché costante di 40 m, è stato aggiunto alle quote ortometriche memorizzate tra gli attributi dello *shapefile*, tramite il calcolatore campi di *Quantum GIS*, il valore di 40 metri.

b) Estrazione dell'area di studio

Come anticipato, è stata scelta un'area di studio avente dimensioni 830x830 metri: questa soluzione rappresenta un buon compromesso che permette di mantenere i tempi di computazione non eccessivamente elevati (come si vedrà successivamente hanno toccato anche le 100 ore per una singola elaborazione) assecondando l'esigenza di mettere a confronto il maggior numero di software possibili e rispettando l'obiettivo di eseguire il test su un'area rappresentativa di dimensioni sufficienti. L'estrazione della porzione di modello digitale della superficie è stata eseguita tramite la funzione *Spatial subset* di *ENVI*, ottenendo Digital Surface Model immagine raster di 1660x1660 pixel in formato .TIFF (Figura 3.4). Le elaborazioni sul file vettoriale sono state finalizzate con *Quantum GIS* tramite gli strumenti di *Geoprocessing*: dopo aver creato un poligono vettoriale avente dimensioni corrispondenti a quelle del *subset DSM*, è sufficiente eseguire il comando *Intersezione* selezionando come vettore input lo *shapefile* del Comune di Bologna, e impostando come vettore intersezione il nuovo poligono quadrato (risultato in Figura 3.5).



Figura 3.4. Area di studio estratta da modello digitale della superficie a risoluzione 0.5m.



Figura 3.5. Area di studio estratta da *shapefile* vettoriale.

In Figura 3.7 sono riportati i principali attributi geospaziali dei vertici di riferimento relativi all'area di studio estratti dal file raster *DSM*. Dall'analisi nello *shapefile* della differenza tra gli attributi “quota di gronda” e “quote al piede”, rappresentativa delle altezze degli edifici, si evidenzia sull'area di studio una notevole variabilità di quest'ultima (con un massimo di 38 m), confermando la validità dell'area per l'analisi dello Sky View Factor con svariate configurazioni geometriche. .

		Coordinate				Quota
		Geografiche		UTM - WGS 84		DSM raster
		Latitudine	Longitudine	Nord metri	Est metri	Metri
Vertici di riferimento area di studio	Centro	44°29'32.28"	11°19'29.53"	4929182.75	684847.25	99.252
	Nord-ovest	44°29'46.10"	11°19'11.29"	4929597.75	684432.25	94.38
	Nord-est	44°29'45.33"	11°19'48.82"	4929597.75	685261.75	93.39
	Sud-est	44°29'18.47"	11°19'47.75"	4928768.25	685261.75	134.83
	Sud-ovest	44°29'19.24"	11°19'10.23"	4928768.25	684432.25	132.32

Figura 3.6. Principali attributi dei vertici dell'area di studio.

c) Ricampionamento file raster

Il modello digitale della superficie a disposizione per l'analisi, caratterizzato da una risoluzione geometrica dei pixel pari a 0.5 metri, possiede un'elevata capacità di riproduzione dei dettagli altimetrici.



Figura 3.7. Particolare dei DSM. Risoluzioni da sinistra a destra: 0.5 m e 1 m.



Figura 3.8. Particolare dei DSM. Risoluzioni da sinistra a destra: 2 m e 5 m.

Per simulare condizioni operative più sfavorevoli, e con l'obiettivo di effettuare un'analisi di sensibilità alla qualità del dato di *input*, sono state analizzate le performance dei software con *DSM* a diverse risoluzioni geometriche, ottenuti tramite un ricampionamento eseguito secondo il criterio *Nearest Neighbor* del file raster di riferimento. In questo modo sono a disposizione per l'analisi tre ulteriori modelli digitali della superficie (Figura 3.8) con risoluzione spaziale rispettivamente di 1 metro, 2 metri e 5 metri.

d) Conversione in formato Arc/Info ASCII Grid

Arc/Info ASCII Grid (estensione *.ASC*) è un formato binario per archiviare ed esportare immagini raster georeferenziate. Questi file sono caratterizzati da una struttura molto semplice: una matrice delle stesse dimensioni dell'immagine definisce lo spazio geografico ed ogni cella memorizza un valore numerico che rappresenta l'attributo geografico. Ogni punto è riferito con le sue coordinate locali ad un sistema geografico; è utilizzato in ambito GIS come formato alternativo al *.TIFF*.

Questa conversione è necessaria poiché il software *SOLWEIG* accetta come input solamente questo formato di *DSM* raster. Il procedimento è stato eseguito tramite la funzione di conversione di *Quantum GIS* avendo cura di non alterare l'informazione plano-altimetrica dei file originali.

e) Applicazione buffer esterno

L'algoritmo dell'estensione *Sky-View Factor* per *ENVI*, in considerazione delle sue caratteristiche di funzionamento, va ad escludere dalla computazione la cornice più esterna dell'immagine raster per una profondità pari al raggio di ricerca impostato nel calcolo dello *SVF*. Per ottenere un risultato

confrontabile con gli altri software, è stato quindi necessario incrementare artificialmente l'area dell'immagine inserendo sul bordo esterno dell'area di studio una superficie fittizia a quota nulla e con uno spessore di 140 m: in tal modo, anche utilizzando un raggio di ricerca ampio, non si va ad escludere dal calcolo parte dell'area oggetto dell'analisi (esempio in Figura 3.9).

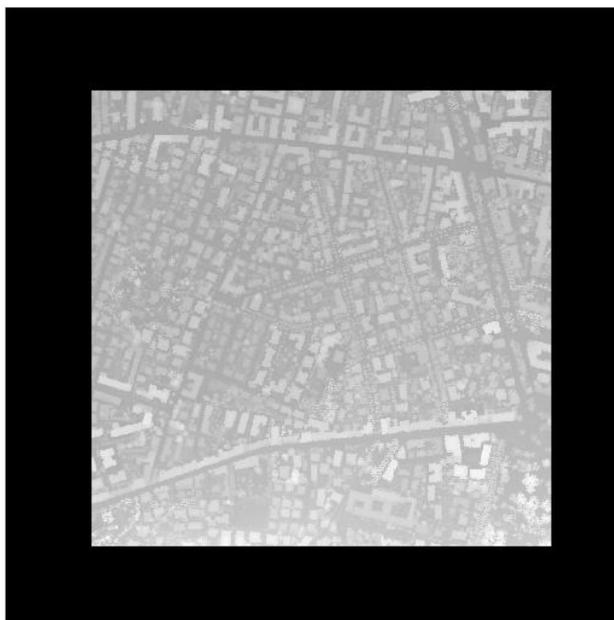


Figura 3.9. Applicazione di un *buffer* a quota nulla sul modello digitale della superficie.

Per ottenere un'immagine rigorosamente georeferenziata, la creazione di questo nuovo *DSM* ha comportato le seguenti fasi di elaborazione:

- definizione di un nuovo *layer* vettoriale con *Quantum GIS*, creando un poligono avente dimensioni corrispondenti a quelle del modello digitali del terreno ed un attributo di quota pari a zero;
- applicazione del comando *Buffer* presente tra gli strumenti di *Geoprocessing* di *Quantum GIS*;
- tramite il comando *Rasterizzazione*, trasforma un livello vettoriale in raster che ha come valore del *Digital Number* l'attributo di quota (in questo caso nulla);
- applicazione del comando *Layer Stacking* in *ENVI* per unire il *DSM* ed il nuovo file raster;
- salvataggio del risultato in formato *.TIFF*.

f) Creazione griglia di punti shapefile con attributo di quota

SVF extension per *ArcGIS* richiede come input uno *shapefile* contenente una griglia di punti, ognuno dotato dell'attributo riguardante la quota di calcolo che l'algoritmo andrà a considerare per la stima dello *Sky View Factor* su quel punto. Il manuale fornito con questo software mostra esempi

applicativi in cui viene considerato un contesto d'analisi pianeggiante e di grandezza modesta, per cui l'elevazione è stata considerata costante. Nel presente studio l'applicazione di una quota costante per tutti i punti sarebbe un'approssimazione eccessiva considerando che il dislivello massimo al livello del terreno è di almeno 28 metri (vedi quote al piede e di gronda in Figura 3.10). Quindi, è stata sfruttata la capacità di elaborazione delle informazioni geospaziali di *Quantum GIS*, usando il modello digitale della superficie come input per impostare automaticamente la quota dei punti per un valore pari al *Digital Number* del *DSM* alle stesse coordinate geografiche, seguendo questo procedimento:

- convertire il *DSM* da raster a vettore tramite il comando Poligonizzazione in modo da creare un file vettoriale costituito da poligoni, ognuno dei quali ha un attributo pari al *Digital Number* acquisito dal modello digitale della superficie (come numero intero);
- creare una griglia di punti con il comando Punti regolari, impostando una distanza reciproca pari alla risoluzione dell'immagine dello *Sky View Factor* che si vuole ottenere;
- tramite il comando Unisci attributi per posizione, è possibile caricare nella tabella degli attributi della griglia di punti i valori di quota assegnati al livello vettoriale poligonale creato in precedenza.

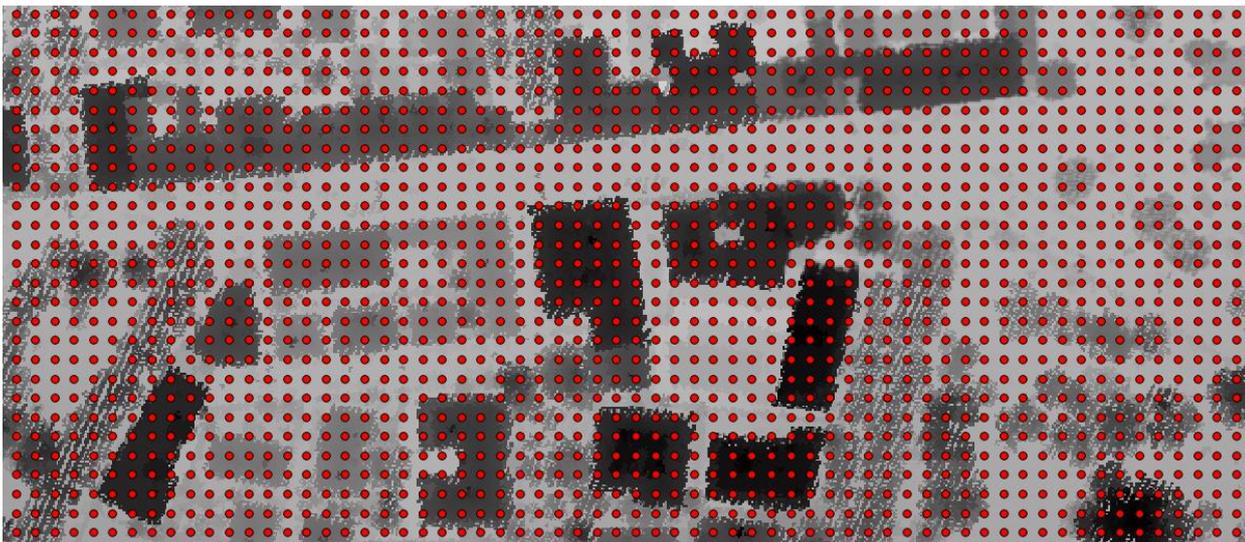


Figura 3.10. L'attributo quota di ogni punto (ogni 5 metri) corrisponde al *Digital Number* del *DSM*.

g) Preparazione casi notevoli

Per valutare quale soluzione di calcolo si avvicina ai valori ideali, si determinerà lo *SVF* tramite i metodi proposti nel punto centrale di una conca circolare e nella mezzeria di un canyon di lunghezza infinita, per essere poi confrontati con il metodo analitico di Oke (1987) spesso citato in letteratura. La creazione di questi contesti morfologici notevoli è cominciata a partire dalla realizzazione del canyon in formato vettoriale: per ottenere la massima precisione sono stati

disegnati, con l'ausilio del software *AutoCAD*, due rettangoli paralleli di lunghezza 1750 unità e posti a 24 unità di distanza. Tramite *Quantum GIS*, grazie alla funzione *snap* al vertice, è stato tracciato un livello vettoriale poligonale in formato *shapefile* sulla base del disegno *AutoCAD*, ottenendo un canyon di lunghezza 1750 metri e larghezza 24 metri (Figura 3.11). Come ultimo passaggio è stato inserito un attributo di quota pari a 24 per i due poligoni che rappresentano le pareti del canyon; in questo modo si ottiene un rapporto *H/W* unitario.

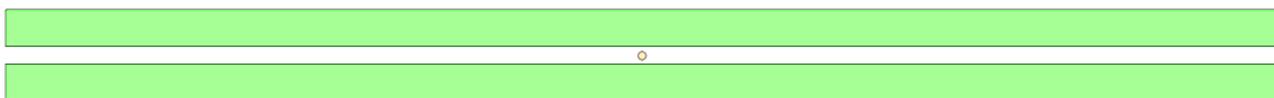


Figura 3.11. Shapefile di un canyon di lunghezza 1750 metri e larghezza 24 metri.

Per la vasca circolare, è stato utilizzato *AutoCAD* per disegnare una circonferenza di raggio 12 unità. Tramite *Quantum GIS*, grazie alla funzione *snap* al vertice è stato tracciato un poligono vettoriale in modo da discretizzare fedelmente la circonferenza. Lo *shapefile* finale è stata creato tramite il comando Differenza tra gli strumenti di Geoprocessing usando come vettore di input un poligono rettangolare (Figura 3.12). Come ultimo passaggio, è stato inserito un attributo di quota pari a 24 ai al poligono, ottenendo un rapporto *H/W* unitario. I file in formato *.TIFF* sono stati creati con il comando rasterizzazione.

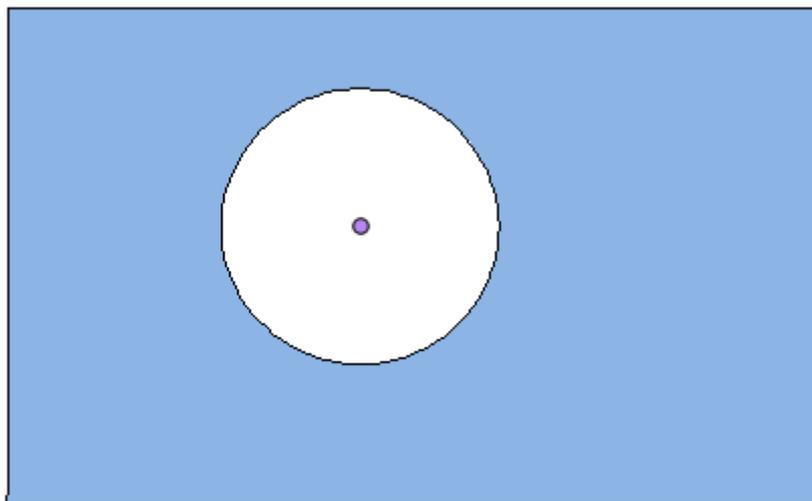


Figura 3.12. Shapefile di una vasca circolare di raggio 12 metri.

h) Scelta dei siti caratteristici

Per ottenere un'analisi di sensibilità completa ed un immediato confronto tra i risultati ottenuti dai software di calcolo, saranno selezionati 4 siti specifici all'interno dell'area di studio, contraddistinti

dai caratteri morfologici tipici di un ambito urbano. In Figura 3.13 sono presentati gli attributi geospaziali principali per ogni sito.

	Carattere morfologico	Coordinate				Quota DSM Metri
		Geografiche		UTM - WGS 84		
		Latitudine	Longitudine	Nord metri	Est metri	
Sito 1	Piazzale	44°29'41.13"	11°19'41.84"	4929463.75	685111.25	95.94
Sito 2	Tetto a basso fattore di vista del cielo	44°29'44.65"	11°19'44.15"	4929573.25	685160.75	103.03
Sito 3	Tetto a elevato fattore di vista del cielo	44°29'28.73"	11°19'12.62"	4929066.75	684477.25	125.33
Sito 4	Canyon	44°29'23.73"	11°19'20.32"	4928912.75	684647.25	106.21

Figura 3.13. Principali attributi dei vertici dei siti notevoli.

In Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16 e Figura 3.17 sono riportate le caratteristiche e l'identificazione dei punti scelti sia sul modello di elevazione digitale che su un'immagine ottica (acquisita tramite la piattaforma Google EARTH). Inoltre a partire dal file vettoriale sono state realizzate quattro proiezioni stereografiche che simulano una fotografia *fisheye* scattata per ogni sito (Figura 3.18 e Figura 3.19).



Figura 3.14. Sito 1 (piazzale) localizzato in DSM e immagine telerilevata.



Figura 3.15. Sito 2 (tetto a basso fattore di vista del cielo) localizzato in *DSM* e immagine telerilevata.



Figura 3.16. Sito 3 (tetto a elevato fattore di vista del cielo) localizzato in *DSM* e immagine telerilevata.



Figura 3.17. Sito 4 (canyon) localizzato in *DSM* e immagine telerilevata.

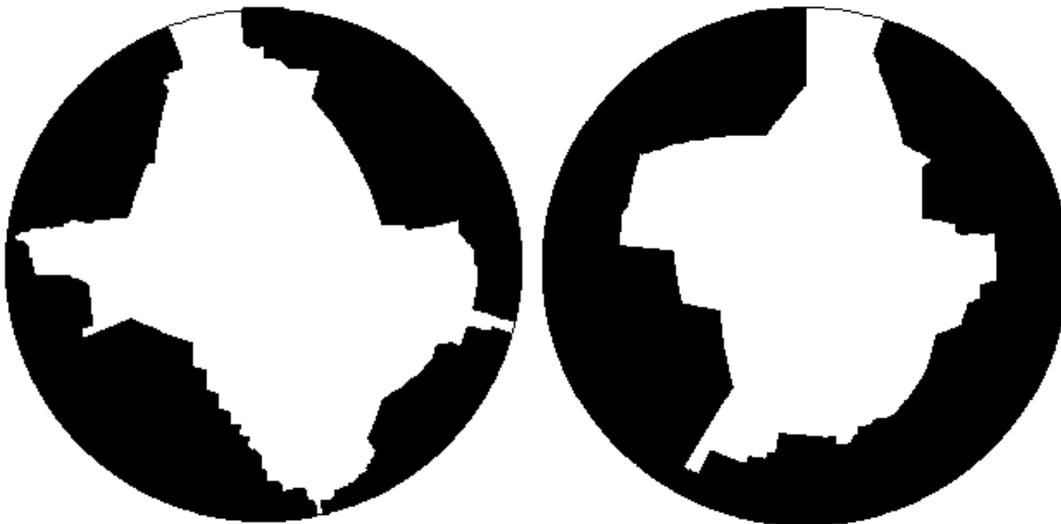


Figura 3.18. Proiezione stereografica *fish-eye* per i siti 1 e 2.

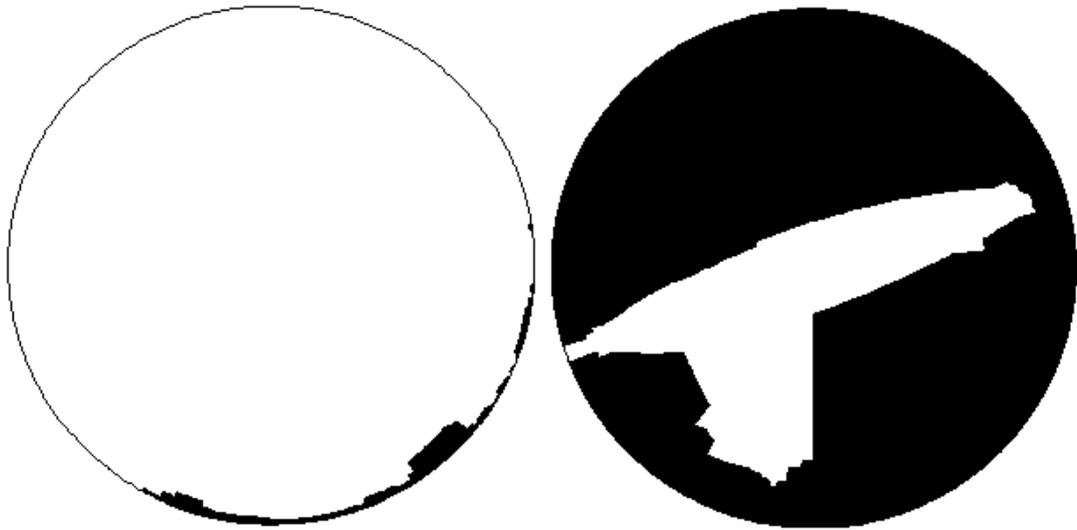


Figura 3.19. Proiezione stereografica *fish-eye* per i siti 3 e 4.

3.3 Presentazione output di calcolo e analisi di sensibilità

In questo paragrafo saranno presentati tutti i risultati relativi alla valutazione della sensibilità di ogni modello al livello di dettaglio del *DSM* di input. Per determinare l'alterazione del valore di *SVF* in funzione della risoluzione dei file, sono state effettuate analisi statistiche sulle immagini di *Sky View Factor* calcolate sull'area di studio e sui 4 siti caratteristici all'interno della zona di studio, contraddistinti da caratteri morfologici salienti. A completamento dell'analisi di sensibilità, sono state incluse alcune considerazioni sui tempi di computazione ed è stato determinato il valore dello *SVF* puntuale nei due casi ideali (al centro di una conca circolare e nella mezzeria di un canyon di lunghezza infinita) con l'obiettivo di confrontare i modelli con il valore offerto dal metodo analitico di Oke (1987).

3.3.1 Modalità operative

Il processo di calcolo ha richiesto un elevato carico computazionale, specialmente per le immagini raster ad alta risoluzione e le elaborazioni a partire da informazione vettoriale; l'hardware utilizzato è un Personal Computer portatile dotato di CPU Pentium Dual-Core T4300 2.1 GHz 64-bit, 4 GB di RAM. Per la velocità e la qualità di presentazione dei risultati, le immagini di mappatura ed i singoli istogrammi sono stati elaborati con *MATLAB* tramite un semplice script contenente funzioni per la lettura di file raster e la creazione di istogrammi già predisposte nel linguaggio di

programmazione (esempio in Figura 3.23). I grafici di confronto tra istogrammi sono stati creati con *Excel* (esempio in Figura 3.28) a partire dalle informazioni estrapolate con il comando *Compute Statistics* di *ENVI* applicato ad ogni immagine di mappatura dello *SVF* (Figura 3.20).

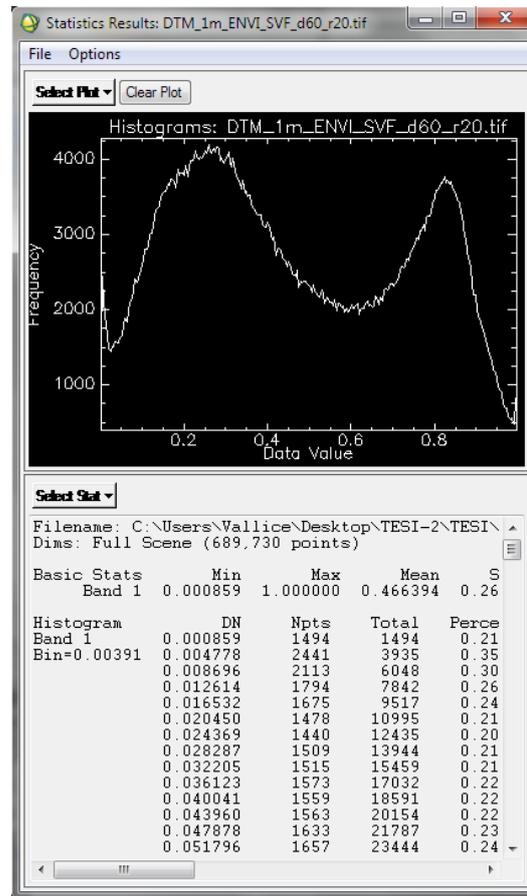


Figura 3.20. Funzioni di elaborazione statistica in *ENVI*.

Per rendere rigoroso il confronto tra valori di *Sky View Factor* sui siti caratteristici, nell'intorno di ognuno è stata individuata un'area di 25 m^2 , pari alla superficie del pixel nell'immagine a risoluzione geometrica più elevata (5 m), selezionata con la funzione *ROI tool* di *ENVI*. Questo accorgimento permette di sottoporre a confronto il valore dello *SVF* per un'area reale il più possibile congruente nelle diverse definizioni disponibili (Figura 3.21), quindi per immagini con risoluzione geometrica inferiore a 5 m sono stati selezionati un gruppo di punti ed è stato considerato il valore medio come riferimento del confronto (Figura 3.22).

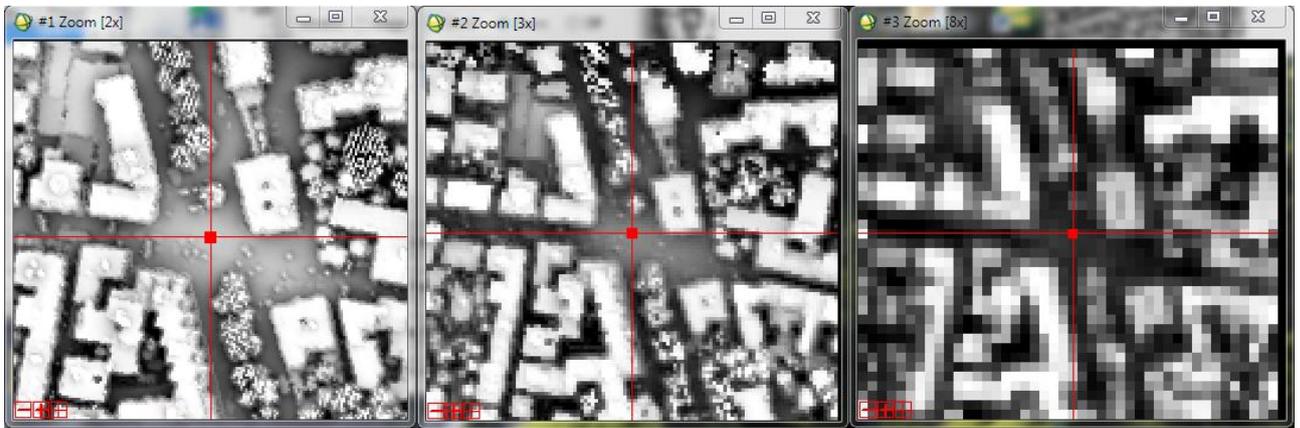


Figura 3.21. Selezione di una superficie ad area costante per diverse risoluzioni geometriche con ROI tool di ENVI.

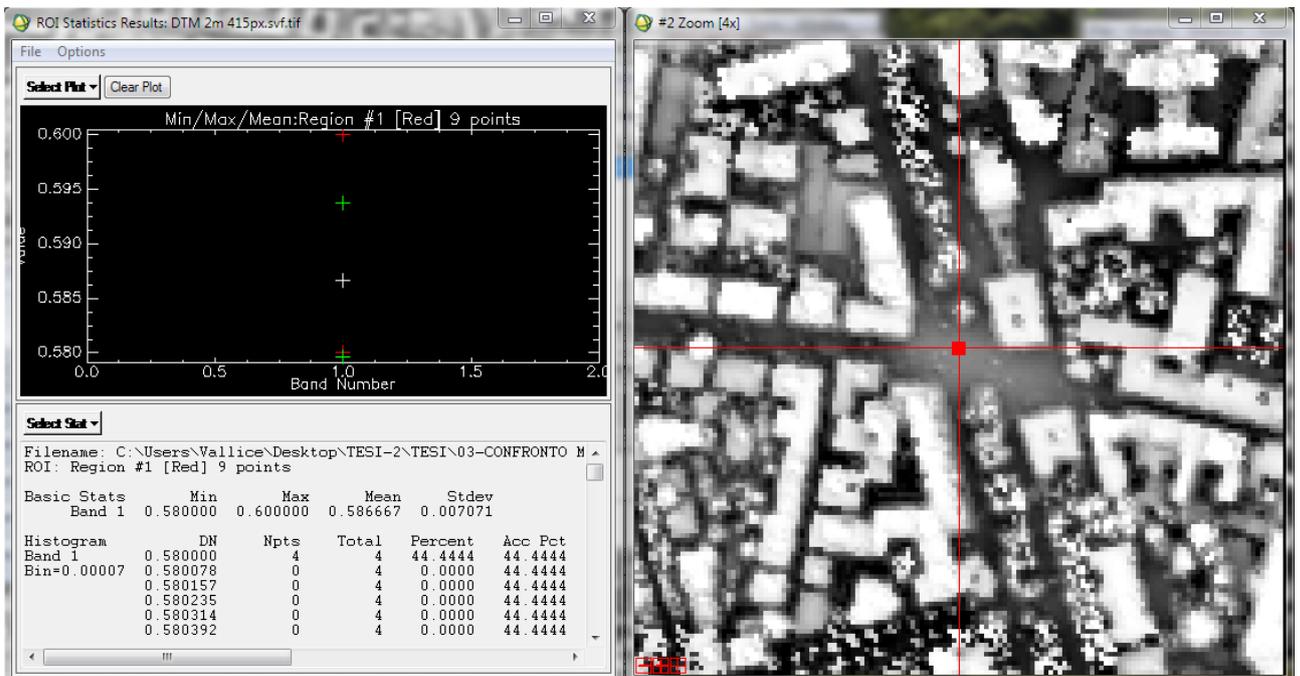


Figura 3.22. Determinazione del valore medio sulla regione di interesse (ROI).

3.3.2 SOLWEIG

L'analisi inizia dal software ritenuto più affidabile nel campo dell'elaborazione dei modelli digitali della superficie secondo le fonti bibliografiche prese in esame. L'interfaccia è semplice ed immediata: non sono necessarie operazioni particolari prima di avviare il modello di calcolo, che come accennato accetta in input modelli digitali della superficie in formato *Arc/Info ASCII Grid* (estensione .ASC). In Figura 3.23, Figura 3.24, Figura 3.25 e Figura 3.26 sono riportati i risultati di mappatura alle diverse risoluzioni geometriche.

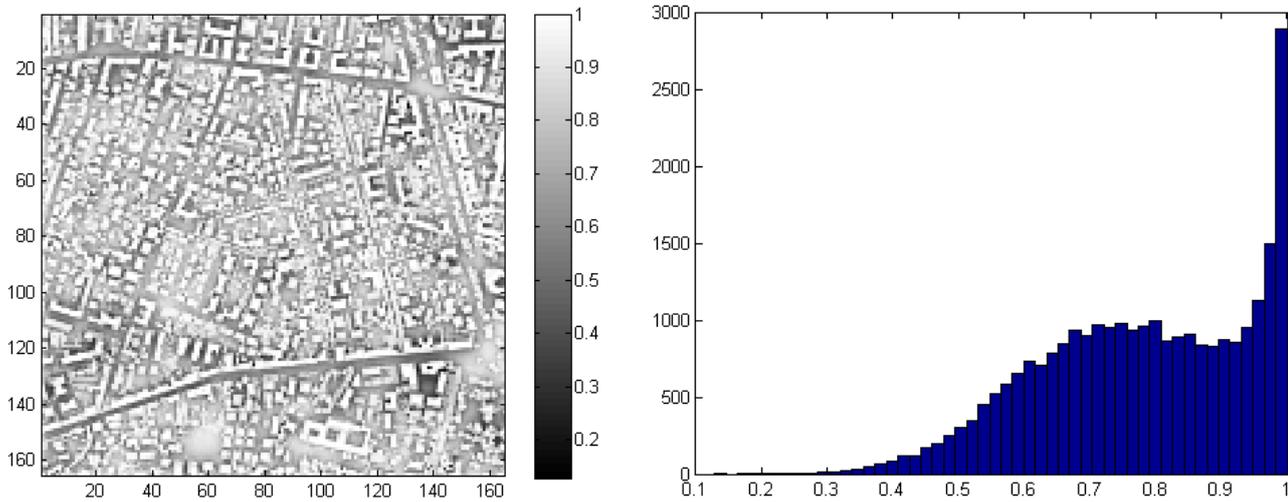


Figura 3.23. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 5 metri e relativo istogramma dell'immagine.

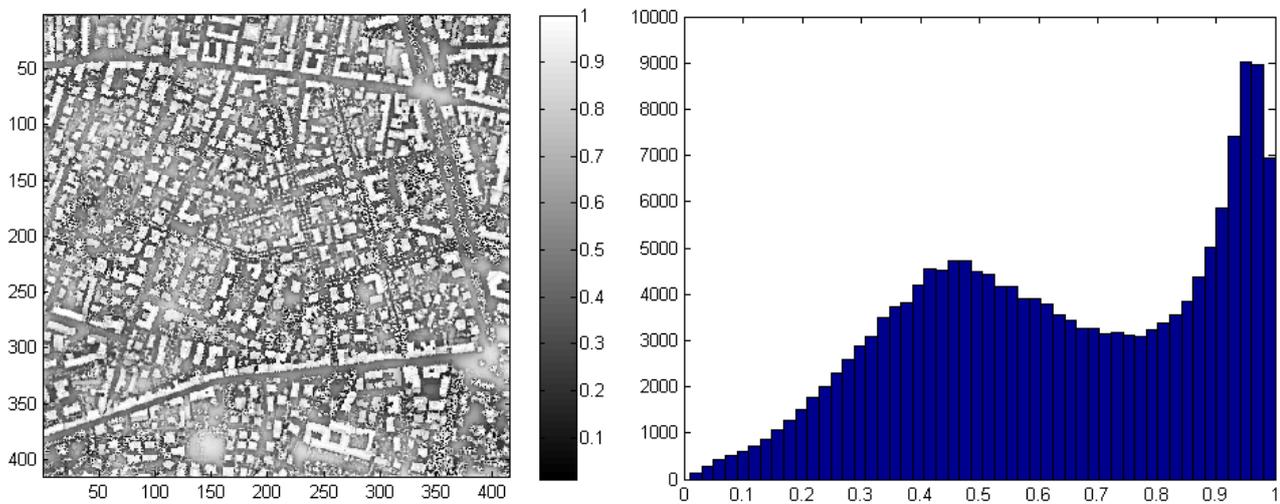


Figura 3.24. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 2 metri e relativo istogramma dell'immagine.

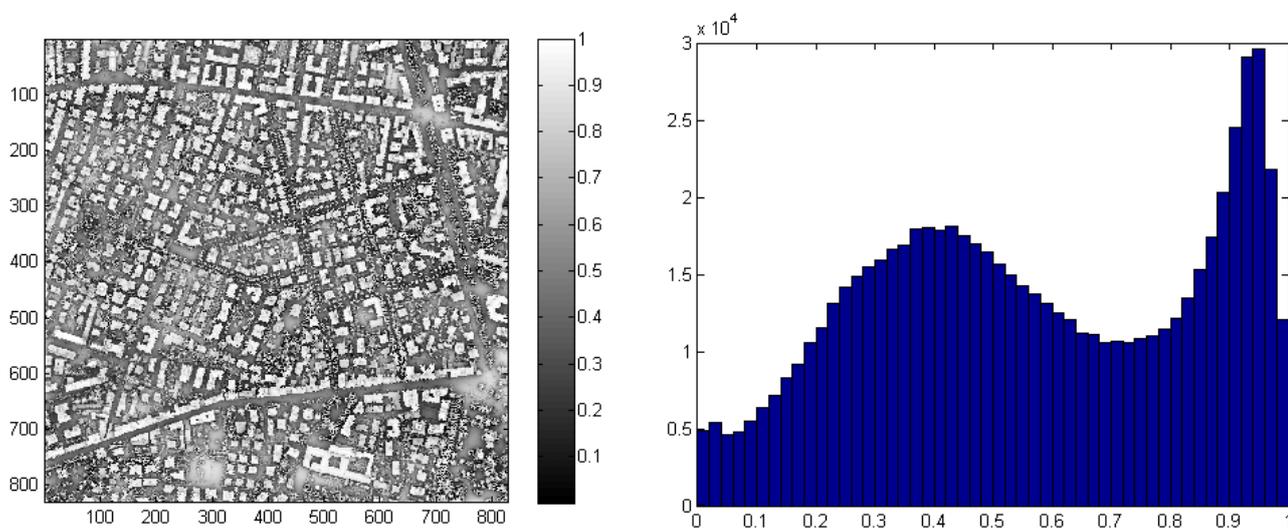


Figura 3.25. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 1 metro e relativo istogramma dell'immagine.

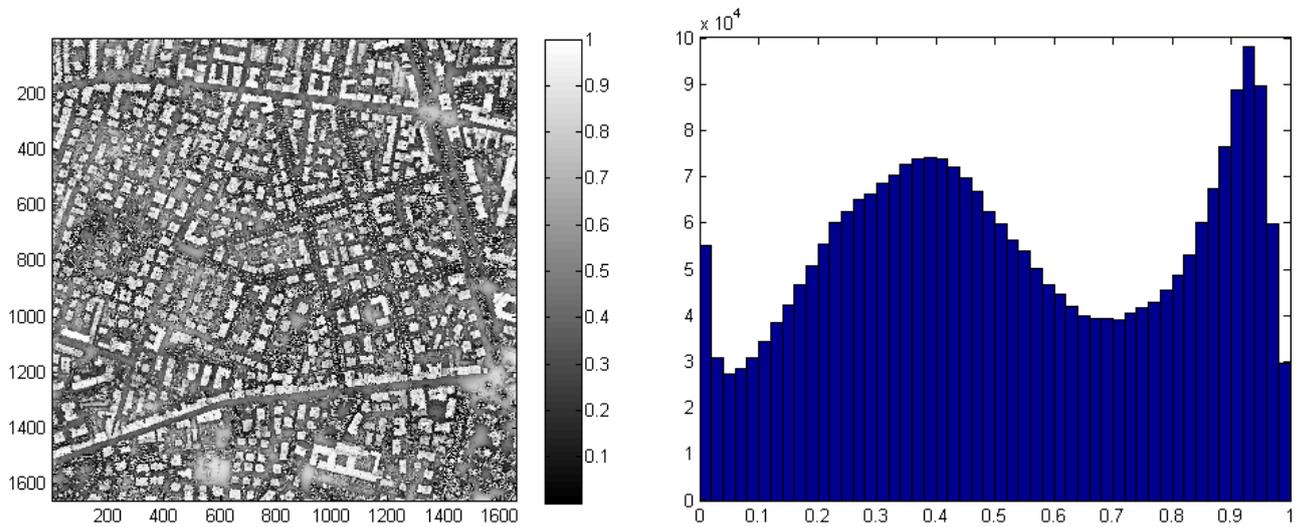


Figura 3.26 Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 0.5 metri e relativo istogramma dell'immagine.

Nella Figura 3.27 si riportano i parametri statistici fondamentali per un primo confronto di sensibilità tra i risultati.

Risoluzione	Minimo SVF	Massimo SVF	Media SVF	Dev. standard
5 m	0.1287	1	0.7800	0.1581
2 m	0.0109	1	0.6350	0.2510
1 m	0.0003	1	0.5667	0.2742
0.5 m	0.0003	1	0.5239	0.2814

Figura 3.27. Parametri statistici.

Nella Figura 3.28 sono illustrati in termini assoluti (in funzione della frequenza) gli istogrammi delle 4 immagini: da una prima disamina dei risultati si nota un effetto molto marcato di appiattimento dell'istogramma (*stretching*) all'aumentare del grado di dettaglio del *DSM* da 5 m a 2 m, come evidenziato dalla diminuzione della media ma soprattutto dall'aumento della deviazione standard. Con l'immagine a 1 m e 0.5 m la deviazione standard aumenta ulteriormente ma in modo meno significativo. Da un'analisi più approfondita si osserva, per dimensioni del pixel decrescenti, una rapida diminuzione di frequenza per valori dello *SVF* tendenti a 1, mentre per *SVF* tendente a 0 un piccolo incremento (evidente solo per la risoluzione massima). Gli effetti di *stretching* e le variazioni concentrate alle estremità dell'istogramma appaiono direttamente correlate all'attenuazione del dislivello tra punti adiacenti nei *DSM*, soprattutto con elevate dimensioni geometriche dei pixel: questo fenomeno è evidenziato dall'evidente diminuzione del contrasto

all'aumentare della risoluzione del DSM, parallelamente alla diminuzione della precisione geometrica; per questo motivo lo *Sky View Factor* avrà, di conseguenza, valore mediamente più elevato.

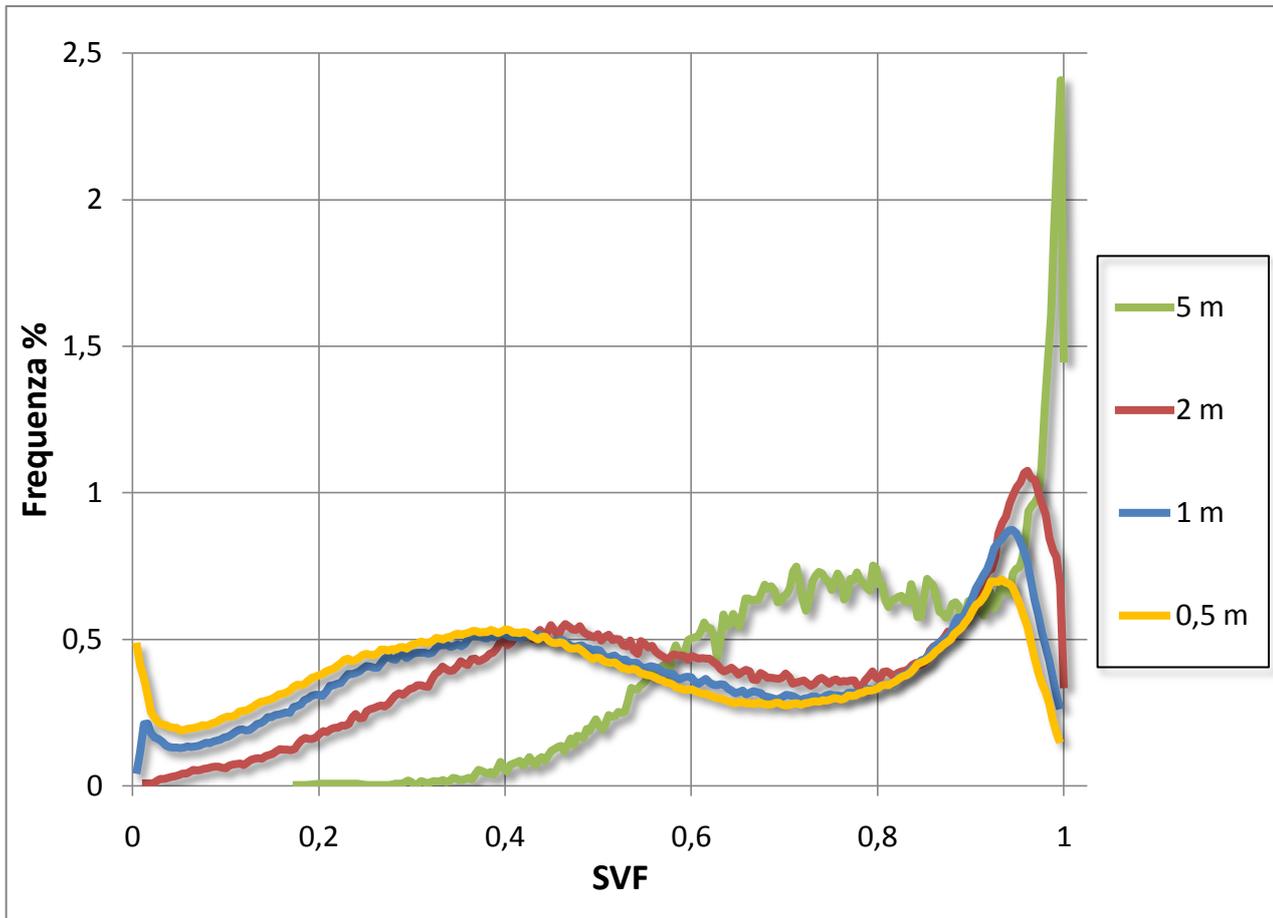


Figura 3.28. Istogrammi in funzione della frequenza dei valori di *SVF*.

L'estrazione del valore dello *SVF* in corrispondenza dei siti caratteristici riassunti in Figura 3.29 ha sostanzialmente confermato le osservazioni colte finora: il grafico in Figura 3.30 sottolinea l'effetto di proporzionalità diretta tra la dimensione del pixel e lo *Sky View Factor* calcolato per ogni sito, evidenziando una regressione di tipo lineare per ogni gruppo di valori. Il Sito 1 presenta un comportamento simile, ma il coefficiente della retta di regressione tende ad essere nullo, con valori di *SVF* quasi congruenti: questa situazione è facilmente spiegabile considerando che la superficie del sito appartiene ad una copertura di un edificio caratterizzata da un fattore di vista del cielo tra i più elevati in tutta l'area di studio; questo significa che da quel punto non sono visibili ostacoli degni di nota e quindi la definizione geometrica del *DSM* influenza molto marginalmente il calcolo dello *SVF*.

	0.5 m	1 m	2 m	5 m
Sito 1	0.799	0.807	0.826	0.863
Sito 2	0.739	0.753	0.776	0.828
Sito 3	0.993	0.996	0.998	0.9991
Sito 4	0.332	0.344	0.351	0.410

Figura 3.29. Valori di SVF estratti sui siti caratteristici.

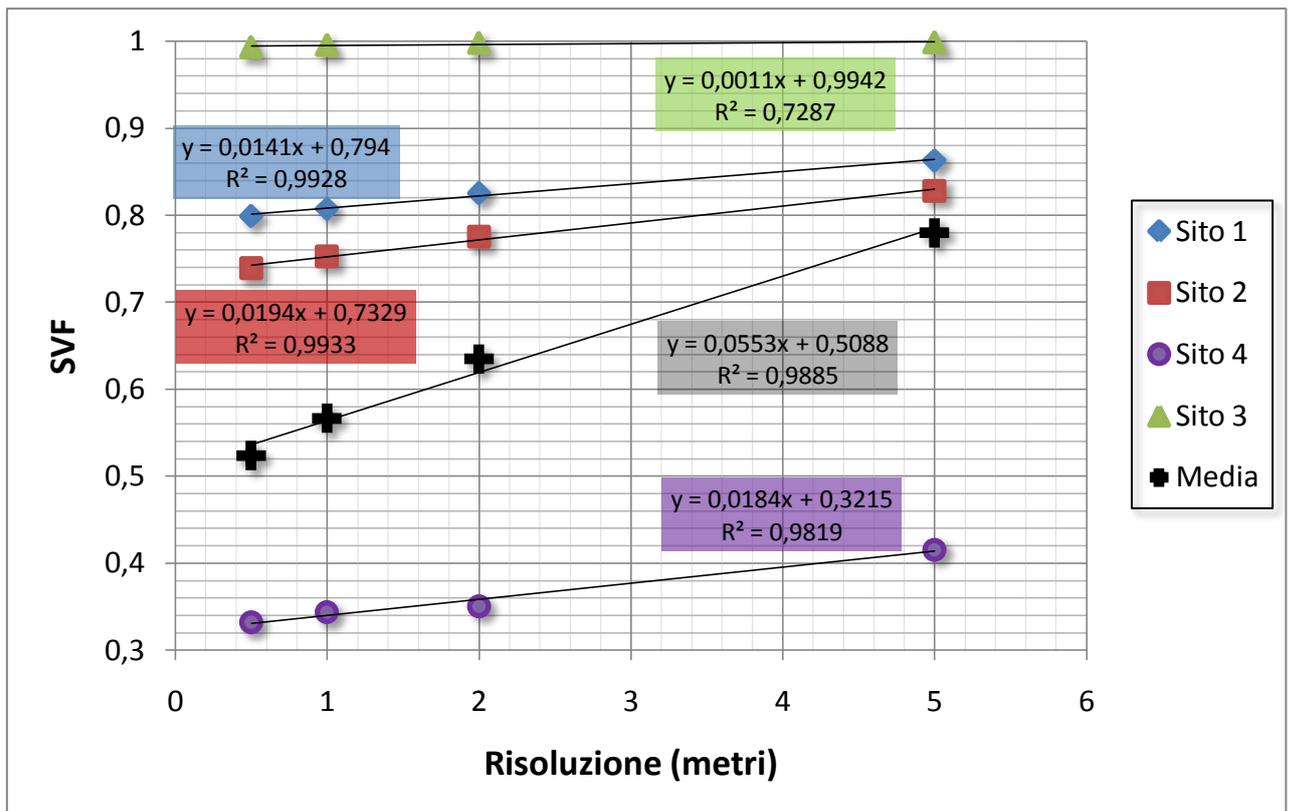


Figura 3.30. Andamento dello SVF alle varie risoluzioni su diversi siti caratteristici confrontati con la media.

Da questi dati si conclude che la degradazione dei risultati nella stima dello SVF al variare del dettaglio nella riproduzione della geometria urbana è di tipo lineare, con un errore medio stimabile attorno a 0.055 per ogni metro di risoluzione del pixel (retta di regressione dei valori medi in Figura 3.30), mentre le analisi puntuali mostrano che il coefficiente di variazione dipende dal contesto morfologico (canyon, tetto, strada, ecc.).

Nella Figura 3.31 si pongono a confronto i tempi di calcolo in relazione al numero complessivo di pixel nell'immagine.

Risoluzione	Numero punti	Tempo di calcolo	Tempo ogni pixel
5 m	27556	0.2 minuti	0.0004 secondi
2 m	172225	5 minuti	0.0017 secondi
1 m	688900	48 minuti	0.0042 secondi
0.5 m	2755600	380 minuti	0.0083 secondi

Figura 3.31. Numero punti e tempo di calcolo (incertezza del 20% sul tempo di calcolo).

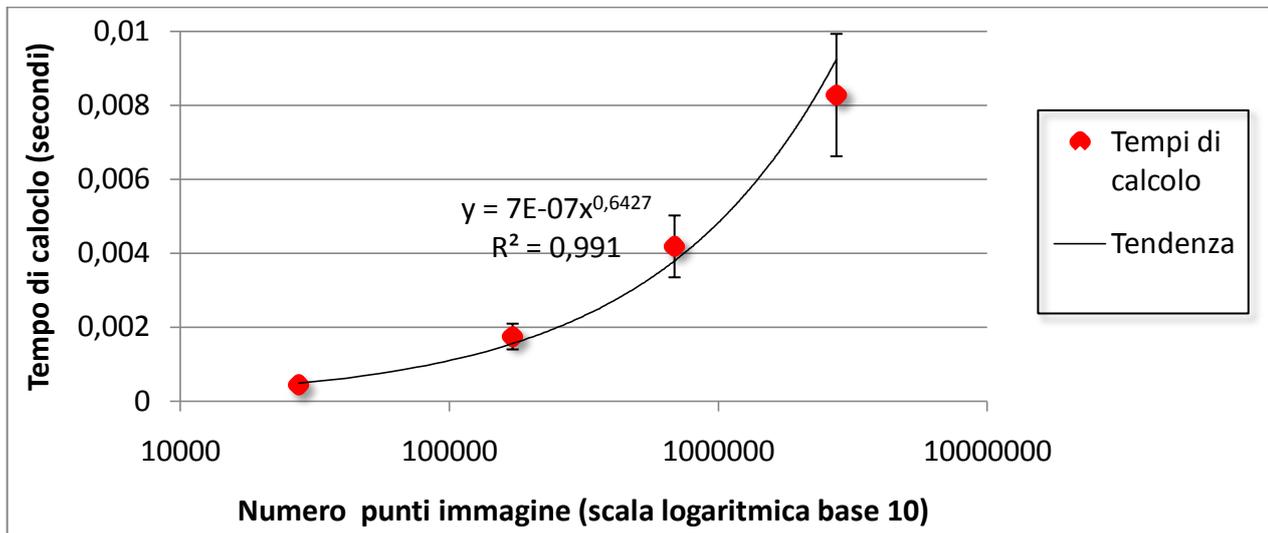


Figura 3.32. Variazione del tempo di calcolo per singolo punto (evidenziata un'incertezza del 20%) e la funzione di regressione di tipo esponenziale.

In Figura 3.31 e Figura 3.32 è possibile apprezzare una caratteristica dell'algoritmo utilizzato da *SOLWEIG* per il calcolo dello *Sky View Factor*: oltre all'atteso incremento del tempo complessivo in funzione dell'aumento del numero di pixel del file raster, la durata del calcolo è influenzata anche da un'altra componente temporale che comporta un'ulteriore ascesa del peso computazionale per un numero di pixel crescente. La funzione di regressione dei tempi di calcolo per singolo pixel nei quattro casi analizzati è di tipo esponenziale. Confrontando gli estremi, si osserva che per un aumento del numero di punti pari a 100 volte tra la risoluzione 5 m e 0.5 m, il corrispondente tempo di calcolo per pixel aumenta di 20 volte. Una causa di questo fenomeno è da ricercarsi nel modello di calcolo implementato in *SOLWEIG*, ovvero l'algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999) che, per proiettare una componente d'ombra da una singola sorgente luminosa, deve applicare un algoritmo a tutta l'area dell'immagine.

3.3.3 SkyHelios

Il software *SkyHelios*, dopo aver caricato il *DSM* in formato *TIFF*, richiede di impostare il valore minimo e massimo di elevazione in termini di *Digital Number* per la visualizzazione corretta della scena. Inoltre, poiché questo modello è specializzato nella simulazione di fotografie *fisheye* a partire da file raster e vettoriali, è necessario specificare l'elevazione dal terreno alla quale sarà posizionata la camera fotografica virtuale; per rendere questa analisi confrontabile con gli altri software, il valore è stato impostato nullo. A seguito delle considerazioni scaturite dallo studio di Hämmerle et al. (2011), nelle ultime versioni del software è stata implementata dall'autore la possibilità di scegliere tra il metodo di calcolo di *RayMan* e quello di Oke. Quest'ultimo tiene in considerazione la legge di Lambert nel calcolo dello *Sky View Factor*, avvicinando i risultati del modello alla realtà: è stato pertanto scelto di avviare il calcolo considerando solamente il metodo di Oke. Il software inoltre offre la possibilità di utilizzare file vettoriali, eventualmente anche unito ad un livello raster *DSM* su cui può essere sovrapposto un livello vettoriale in formato *.obs*, un'estensione usata nell'applicativo *RayMan* (gli *shapefile*, in presenza di un modello digitale della superficie caricato, sembrano essere ignorati nel calcolo).

Sebbene il modello sia in grado di mappare lo *Sky View Factor* anche a partire da elementi vettoriali, estraendo l'elevazione degli edifici dalla tabella degli attributi dei poligoni, sulla versione installata non è stato possibile eseguire il calcolo in quanto un quadrante della proiezione *fisheye* veniva costantemente rappresentato come libero da ostacoli, risultando quindi in quell'intervallo azimutale un fattore di vista del cielo sempre massimo, (e sovrastimando eccessivamente lo *SVF*); per questo motivo. In Figura 3.33, Figura 3.34, Figura 3.35 e Figura 3.36 sono riportati gli output di mappatura per le diverse risoluzioni geometriche con il metodo di calcolo di Oke.

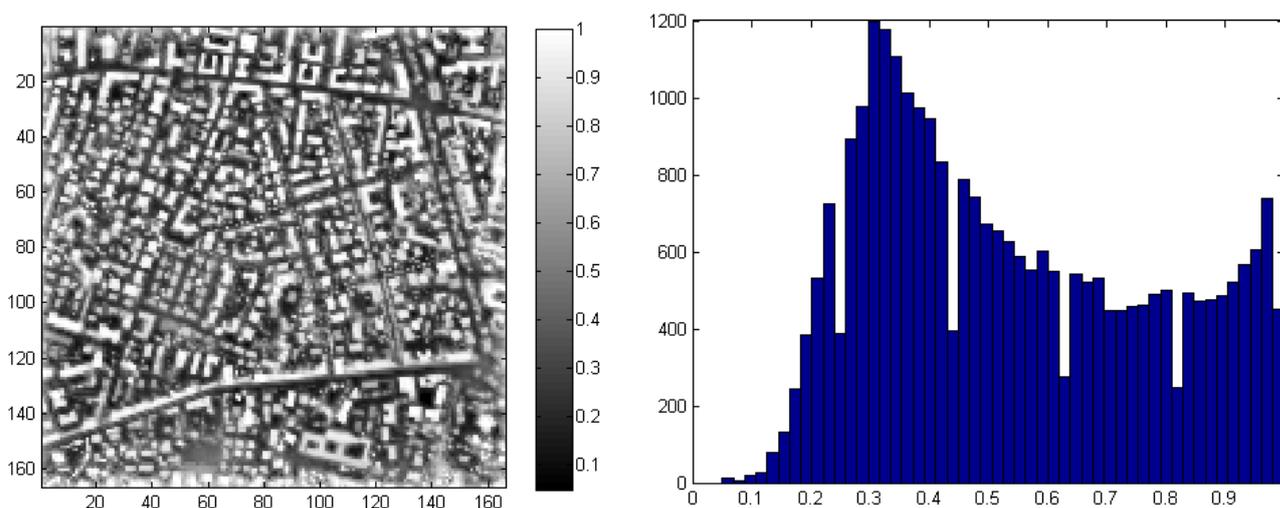


Figura 3.33. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 5 metri e relativo istogramma dell'immagine.

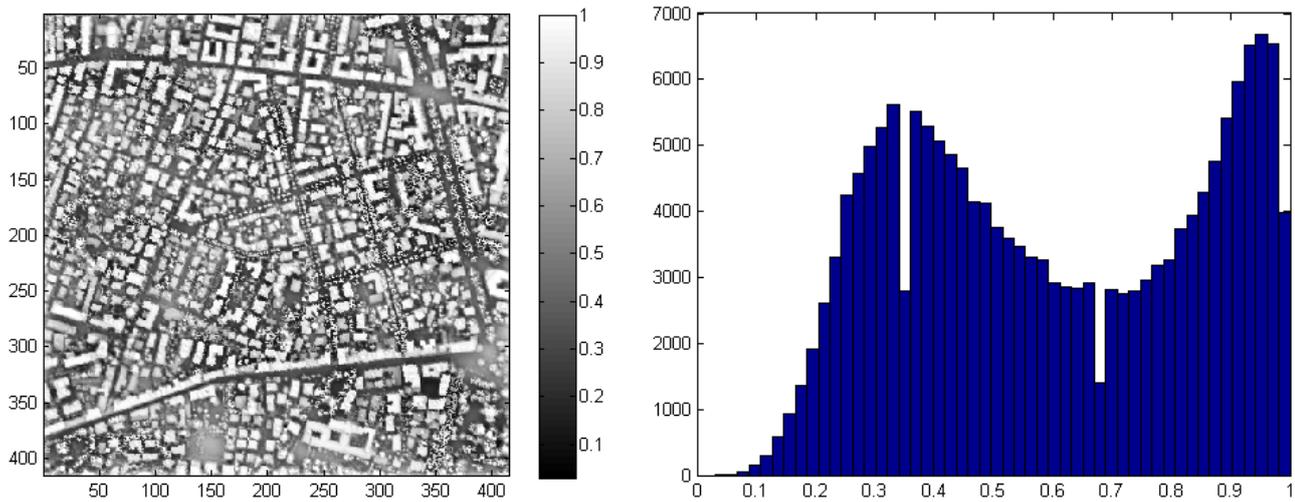


Figura 3.34. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 2 metri e relativo istogramma dell'immagine.

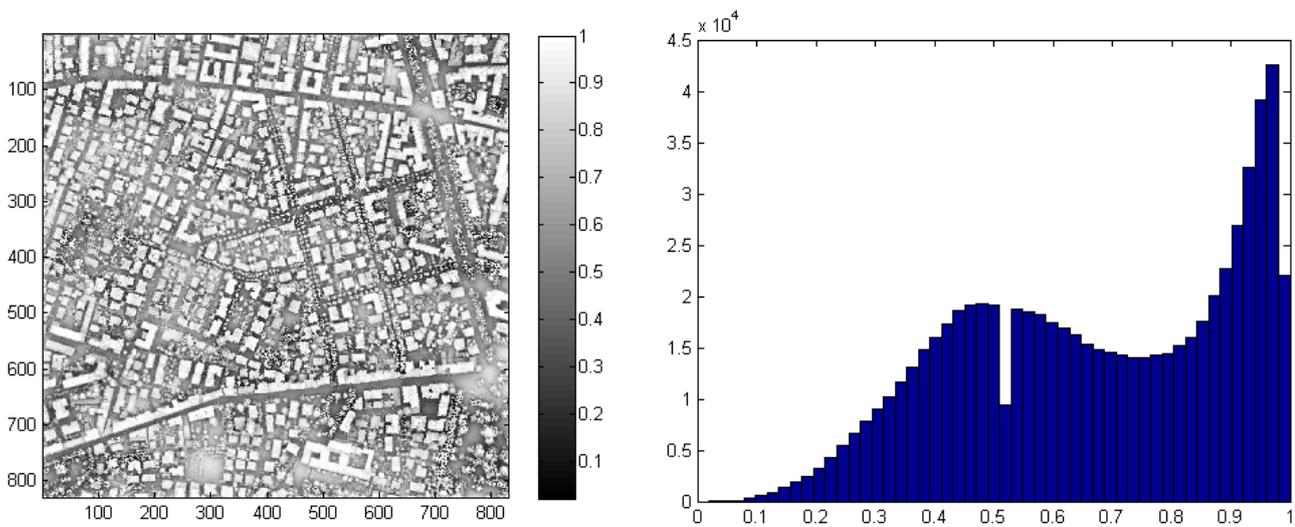


Figura 3.35. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 1 metro e relativo istogramma dell'immagine.

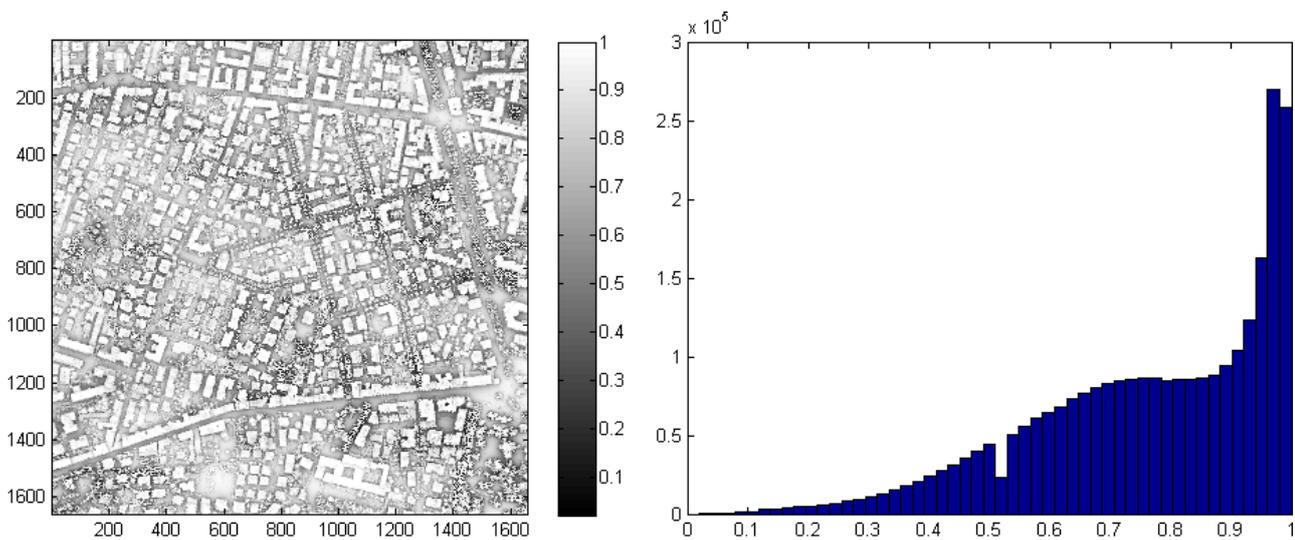


Figura 3.36. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 0.5 metro e istogramma dell'immagine.

In Figura 3.37 si riportano i parametri statistici fondamentali per un primo confronto di sensibilità tra i risultati.

Risoluzione	Minimo SVF	Massimo SVF	Media SVF	Dev. standard
5 m	0.0500	1	0.5396	0.2380
2 m	0.0300	1	0.5980	0.2540
1 m	0.0200	1	0.6730	0.2298
0.5 m	0.0200	1	0.7663	0.1957

Figura 3.37. Parametri statistici.

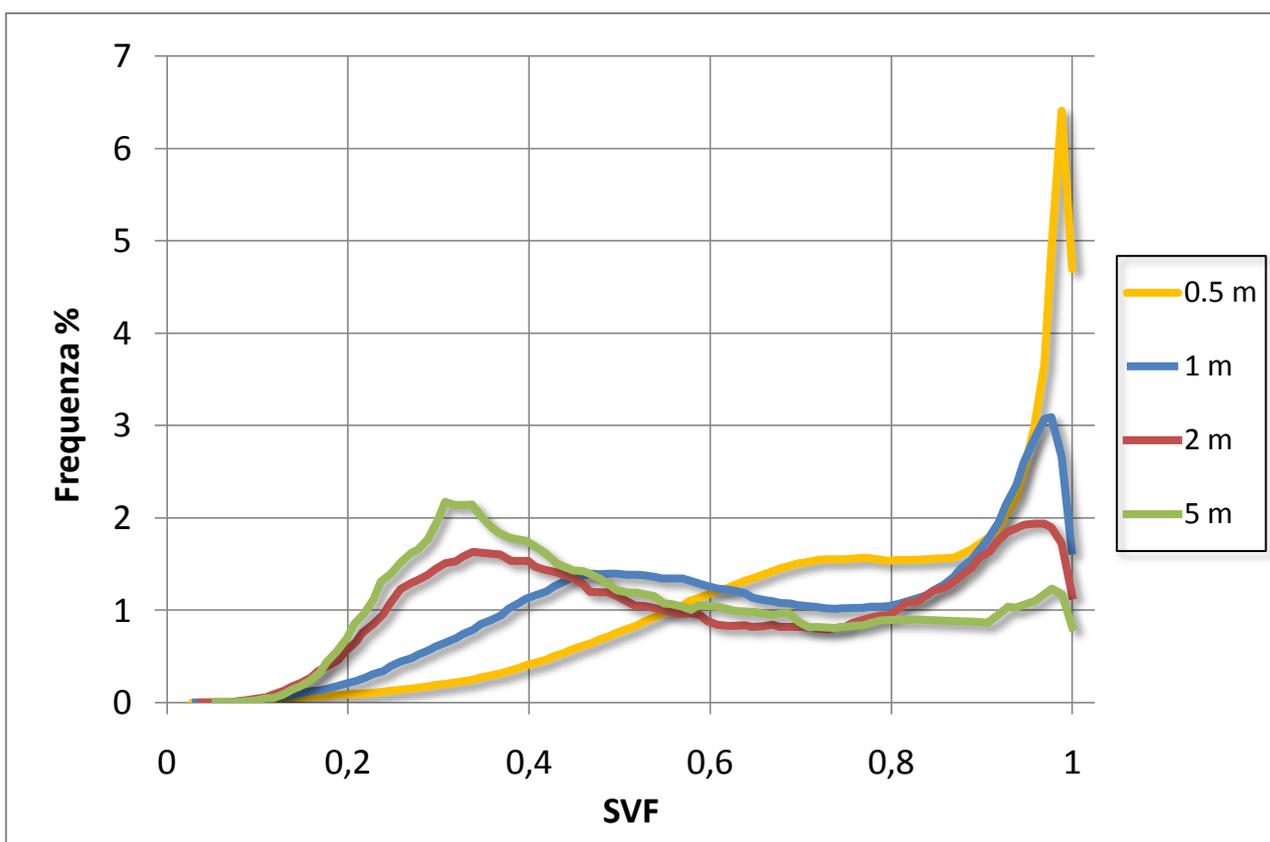


Figura 3.38. Istogrammi in funzione della frequenza dei valori di SVF.

Nella Figura 3.38 sono illustrati in termini assoluti (funzione della frequenza) gli istogrammi delle 4 immagini: si osserva che, per dimensioni dei pixel decrescenti, in corrispondenza di valori dello *SVF* tendenti a 1 si ha un rapido aumento di frequenza, mentre per *SVF* inferiori a 0.5 avviene una diminuzione. Ciò si traduce in uno spostamento del picco di massima frequenza che passa da un valore attorno a 0.3 ad uno poco inferiore a 1, evidenziato da un aumento della media; è importante sottolineare che nei risultati di *SOLWEIG* si ottiene un comportamento completamente opposto.

L'effetto di stretching dell'istogramma è molto lieve, come sottolinea il valore della deviazione standard che oscilla stabilmente tra 0.20 e 0.25.

	0.5 m	1 m	2 m	5 m
Sito 1	0.938	0.820	0.588	0.310
Sito 2	0.916	0.742	0.549	0.230
Sito 3	0.993	0.999	0.996	0.990
Sito 4	0.547	0.399	0.363	0.350

Figura 3.39. Valori di *SVF* estratti sui siti caratteristici.

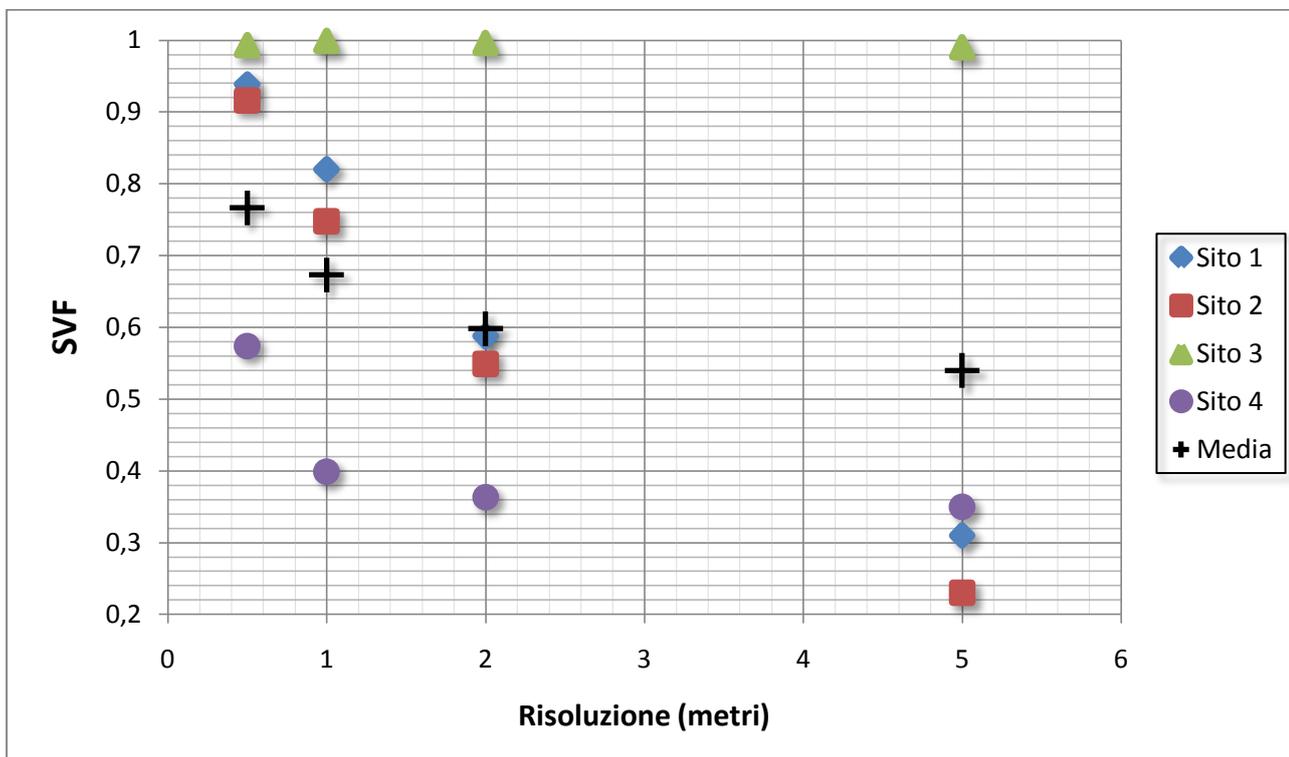


Figura 3.40. Andamento dello *SVF* alle varie risoluzioni su diversi siti caratteristici confrontati con la media.

L'estrazione dello *SVF* in corrispondenza dei siti caratteristici riassunti in Figura 3.39 ha fornito risultati inaspettati: il grafico in Figura 3.40 l'effetto di proporzionalità inversa tra la dimensione del pixel e lo *Sky View Factor* osservato nell'andamento della media e dall'analisi degli istogrammi. Il sito 4 presenta un comportamento inaspettato in corrispondenza della risoluzione geometrica di 5 metri: lo *SVF* in quel punto è il secondo più elevato tra i siti considerati, nonostante la categoria

morfologica di appartenenza (il canyon) farebbe presupporre un fattore di vista più basso. La causa di questo fenomeno è stata trovata andando a confrontare l'anteprima della proiezione *fisheye* generata dal software sul Sito 4 con i modelli digitali della superficie a 1 metro (Figura 3.41) e 5 m (Figura 3.42): l'immagine *fisheye* generata dal *DSM* a 1 m appare congrua alla morfologia del sito, mentre in quella creata dal *DSM* a 5 m si manifestano anomali artefatti che inducono una sovrastima del fattore di vista del cielo.

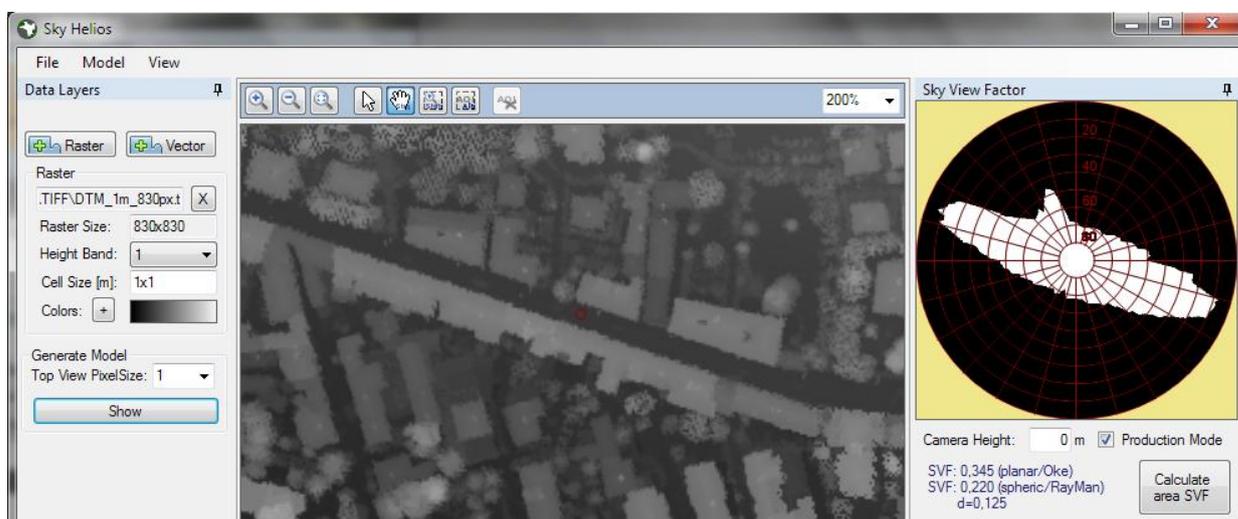


Figura 3.41. Generazione immagine *fisheye* in *DSM* a 1 metro al centro del canyon.

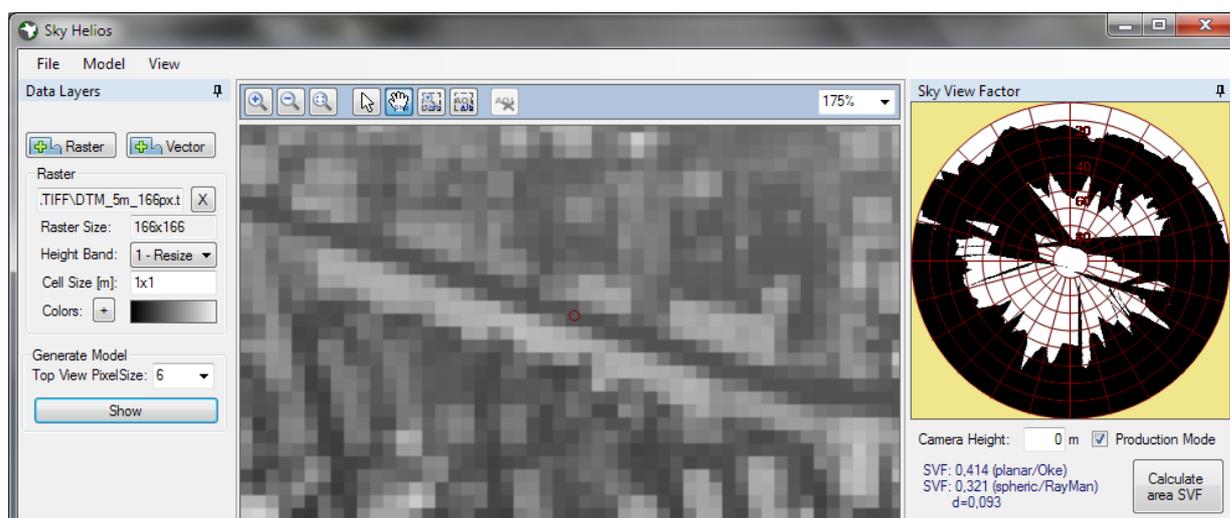


Figura 3.42. Generazione immagine *fisheye* in *DSM* a 5 metri al centro del canyon.

Nella Figura 3.43 si pongono a confronto i tempi di calcolo in relazione al numero complessivo di pixel nell'immagine.

Risoluzione	Numero punti	Tempo di calcolo	Tempo ogni pixel
5 m	27556	3,6 minuti	0.0078
2 m	172225	100 minuti	0.0348
1 m	688900	800 minuti	0.0670
0.5 m	2755600	7500 minuti	0.1633

Figura 3.43. Numero punti e tempo di calcolo (incertezza del 10% sul tempo di calcolo).

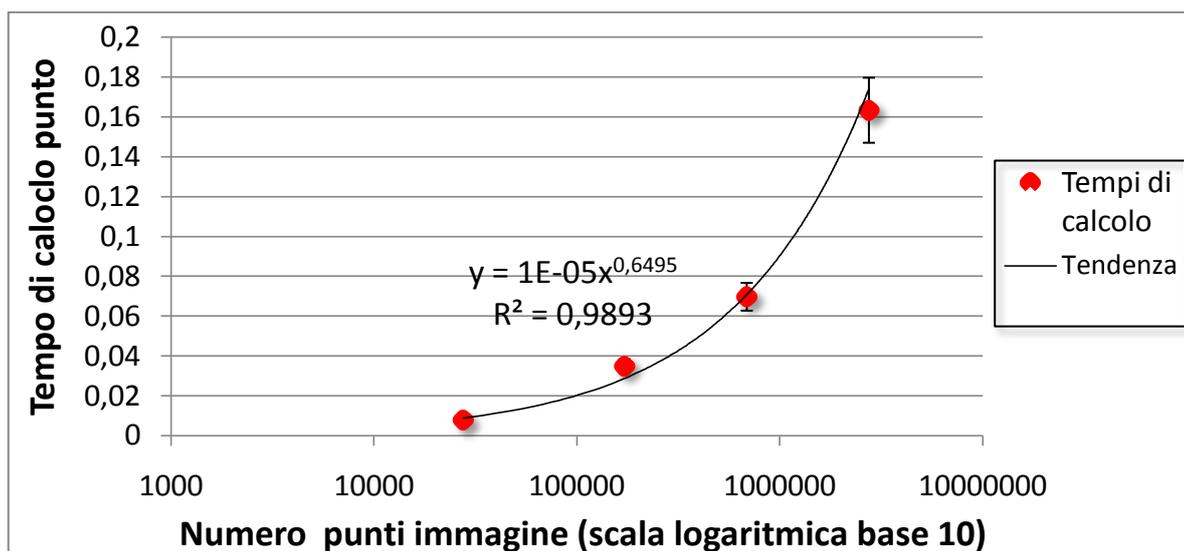


Figura 3.44. Variazione del tempo di calcolo per singolo punto (evidenziata un'incertezza del 10%) e la funzione di regressione di tipo esponenziale.

In Figura 3.43 e Figura 3.44 è possibile apprezzare una caratteristica del modello di *SkyHelios* per il calcolo dello *Sky View Factor*: oltre all'atteso incremento del tempo complessivo in funzione dell'aumento del numero di pixel del file raster, la durata del calcolo è influenzata anche da un'altra componente temporale che comporta un'ulteriore ascesa del peso computazionale per un numero di pixel crescente: la funzione di regressione dei tempi di calcolo in un singolo pixel per i quattro casi analizzati è di tipo esponenziale. Confrontando gli estremi, si osserva che per un aumento del numero di punti pari a 100 volte tra la risoluzione 5 m e 0.5 m, il corrispondente tempo di calcolo per pixel aumenta di 20 volte. A differenza di *SOLWEIG*, in questo caso l'elaborazione è di tipo tridimensionale e compiuta dalla scheda grafica (*GPU*): si può ipotizzare che un aumento della definizione del *DSM* possa tradursi in un maggiore carico computazionale sulla *GPU*.

In conclusione, l'analisi di sensibilità alla ha mostrato come il software sia inadatto all'utilizzo per *DSM* di grandi dimensioni, con tempi di calcolo eccessivi già per piccole aree di studio. In prima

istanza si può consigliare questo modello per l'applicazione in contesti di analisi limitati, utilizzando modelli digitali della superficie ad alta precisione e sfruttando la peculiarità di questo software, che consiste nella capacità di generare immagini *fisheye* anche a partire da file raster.

3.3.4 Estensione ENVI

L'interfaccia del software, un'estensione scritta per *ENVI* che si appoggia a *IDL Virtual Machine*, è molto semplice (Figura 3.45) con poche ma fondamentali impostazioni richieste prima di avviare il modello. Dopo aver caricato il *DSM* in formato *TIFF*, il software richiede di impostare tre parametri di taratura dell'algoritmo: numero direzioni di ricerca degli ostacoli per ogni punto di calcolo, raggio di ricerca degli ostacoli ed il fattore verticale di esagerazione dei rilievi (Figura 3.45).

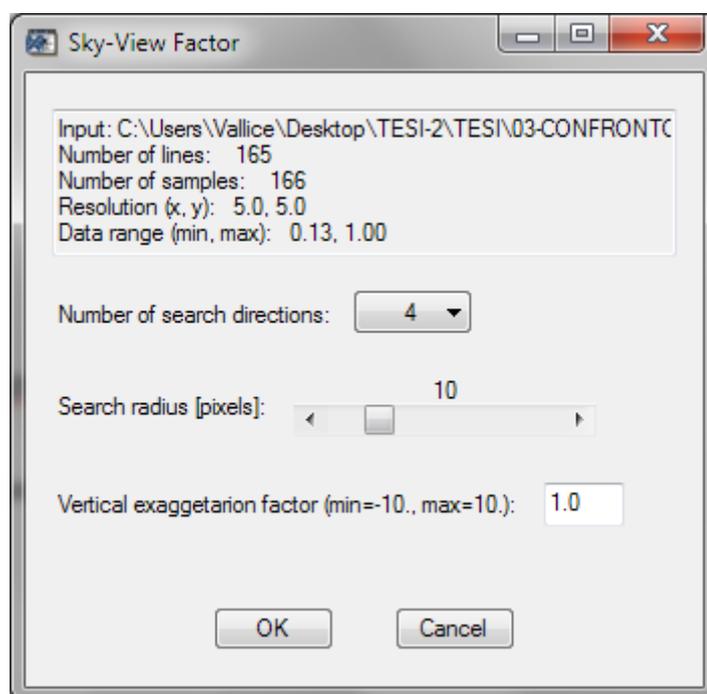


Figura 3.45. Schermata delle impostazioni.

Assegnando poche direzioni di ricerca, ad esempio 4, l'effetto ottenuto nella mappatura dello *SVF* presenterà delle forme di "interferenza" assimilabili proiezione dell'ombra su quattro direzioni ortogonali tra loro, come è visibile nella Figura 3.46 generata a partire dal *DSM* a 1 metro.

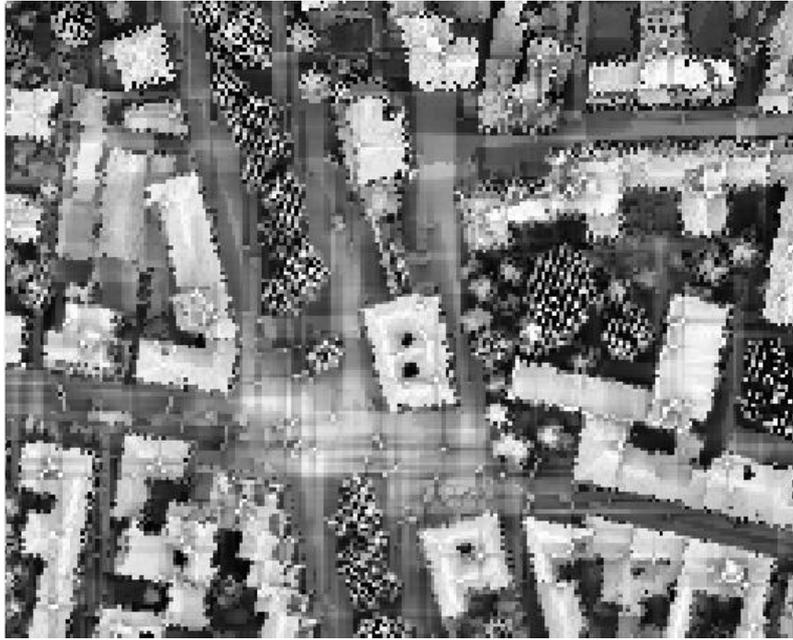


Figura 3.46. Mappatura SVF con 4 direzioni di ricerca.

Aumentando il numero a 20 direzioni l'effetto tende a svanire, ma si osserva ancora qualche disturbo (Figura 3.47).

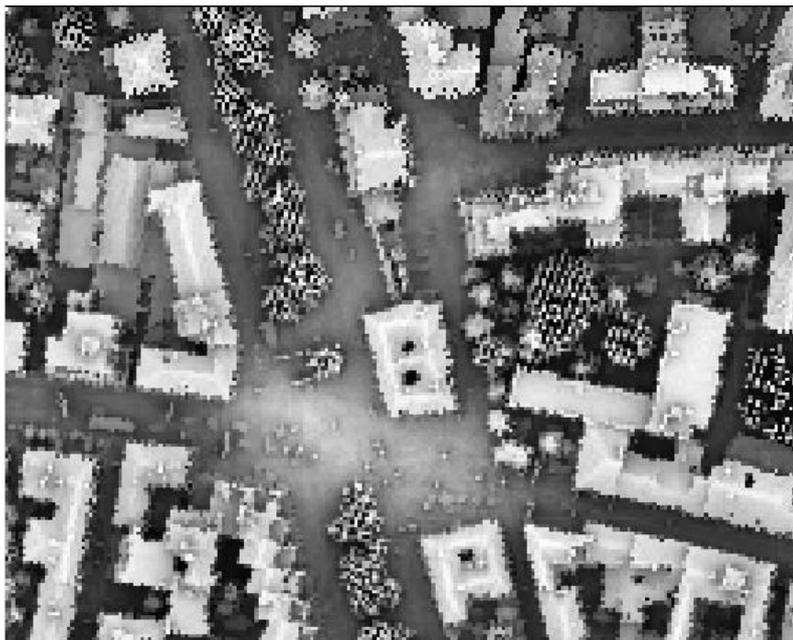


Figura 3.47. Mappatura SVF con 20 direzioni di ricerca.

In Figura 3.48 e Figura 3.49 sono mostrati i risultati ottenuti con 60 e 180 direzioni, quest'ultimo considerato dall'autore molto elevato.

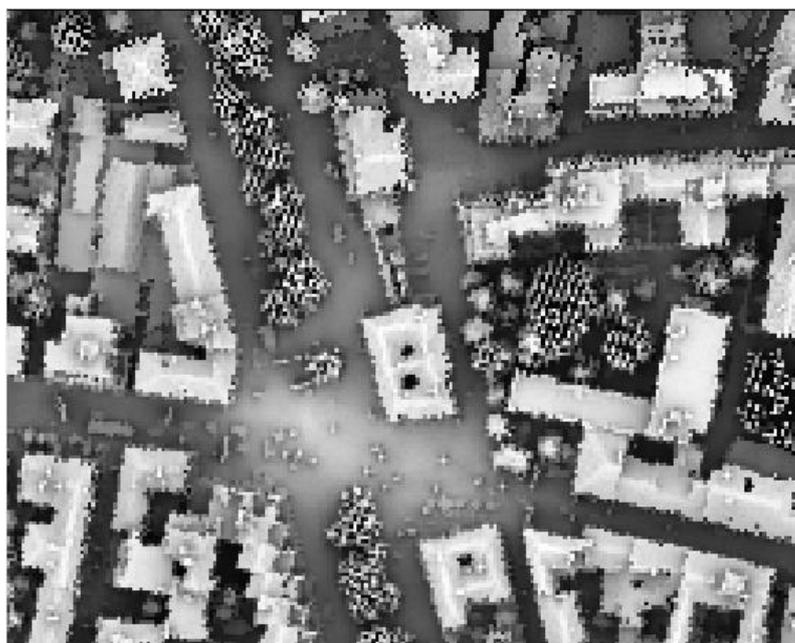


Figura 3.48. Mappatura SVF con 60 direzioni di ricerca.

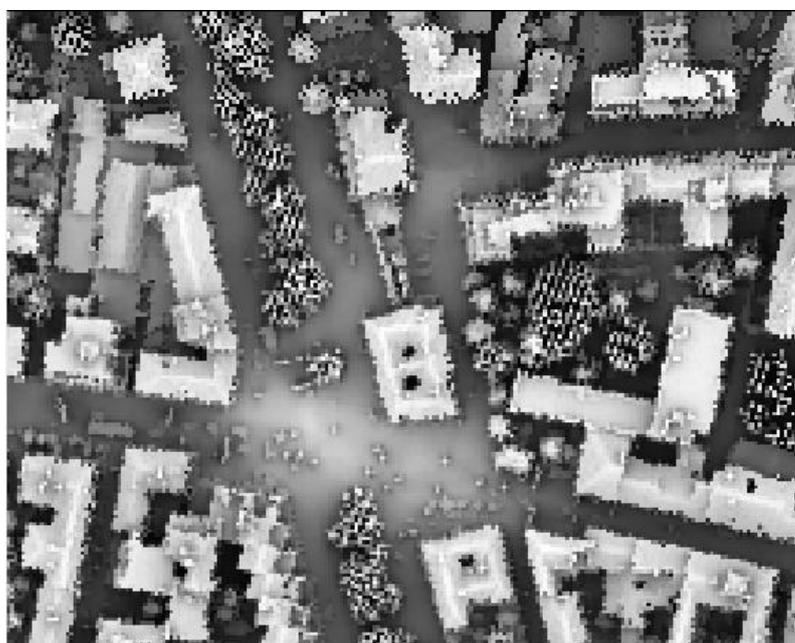


Figura 3.49. Mappatura SVF con 4 direzioni di ricerca..

Un'operazione di sottrazione tra bande eseguita con *ENVI* tra le due immagini precedenti, ha confermato che gli scarti sono trascurabili, caratterizzati da una media di 0.000154 e una deviazione standard di 0.004556. Certamente significativa invece è la differenza di tempo di calcolo (si ricorda che in questo esempio il *DSM* è a 1 metro): 26 secondi per l'immagine a 60 direzioni e 80 secondi per l'immagine a 180 direzioni, ovvero un tempo di computazione ridotto del 68% ma con difetti pressoché trascurabili. Il numero delle direzioni nelle prove successive sarà impostato a 60, soprattutto per evidenziare le potenzialità del software dal punti di vista delle velocità di calcolo. Più delicata è stata la scelta di un raggio di ricerca appropriato: in una prima fase si è scelto di

applicare il modello ai casi notevoli, ossia il canyon di lunghezza infinita e la vasca circolare, quindi per tentativi è stato cercato il valore del raggio che fornisce il minimo scarto con lo *SVF* calcolato analiticamente con le formule di Oke. Il risultato, computato su file raster con dimensione dei pixel 0.5 metri e rapporto *H/W* unitario per canyon e vasca circolare, è illustrato nella Figura 3.50.

Raggio in metri	SVF Canyon	SVF Basin
10 (20 pixel)	1	1
12,5 (25 pixel)	0.901001	0.315764
13 (26 pixel)	0.802875	0.119141
20 (40 pixel)	0.513356	0.109542
25 (50 pixel)	0.416087	0.109542
30 (60 pixel)	0.394874	0.109542
40 (80 pixel)	0.356356	0.109542
80 (160 pixel)	0.314044	0.109542

Figura 3.50. Risultati *SVF* per i due casi notevoli.

Secondo le formule di Oke, lo *SVF* nel punto centrale di un canyon di lunghezza infinita e di una vasca circolare caratterizzati da $H/W = 1$ sono rispettivamente 0.45 e 0.2. Dalla Figura 3.50 quindi si conclude che questo test non offre una convergenza verso un unico valore di raggio, per cui è stato deciso di confrontare il valore dello *SVF* dei siti caratteristici e della media sull'area di studio con i risultati ottenuti in *SOLWEIG* (ritenuto il più affidabile in letteratura) per trovare l'ampiezza di raggio migliore. Il risultato finale di quest'ultimo test, applicato sul modello digitale della superficie a risoluzione 2 metri, è mostrato in Figura 3.51 dove sono riportati gli scarti tra i valori determinati con *SOLWEIG* e l'estensione per *ENVI*. Il raggio che offre gli scarti inferiori è 20 metri.

Raggio in metri	Media	Sito 1	Sito 2	Sito 3	Sito 4
10 (5 pixel)	-0.035221	0.11932	0.162538	-0.037126	0.066626
20 (10 pixel)	-0.100345	0.012562	-0.08764	-0.037959	-0.00381
30 (15 pixel)	-0.120291	-0.1215	-0.158488	-0.031106	-0.09257
40 (20 pixel)	-0.128362	-0.17567	-0.194419	-0.030927	-0.09722
80 (40 pixel)	-0.136494	-0.21648	-0.199917	-0.031106	-0.11122
120 (60 pixel)	-0.137984	-0.2178	-0.200478	-0.034863	-0.11231

Figura 3.51. Scarti tra i valori determinati con *SOLWEIG* e l'estensione per *ENVI*.

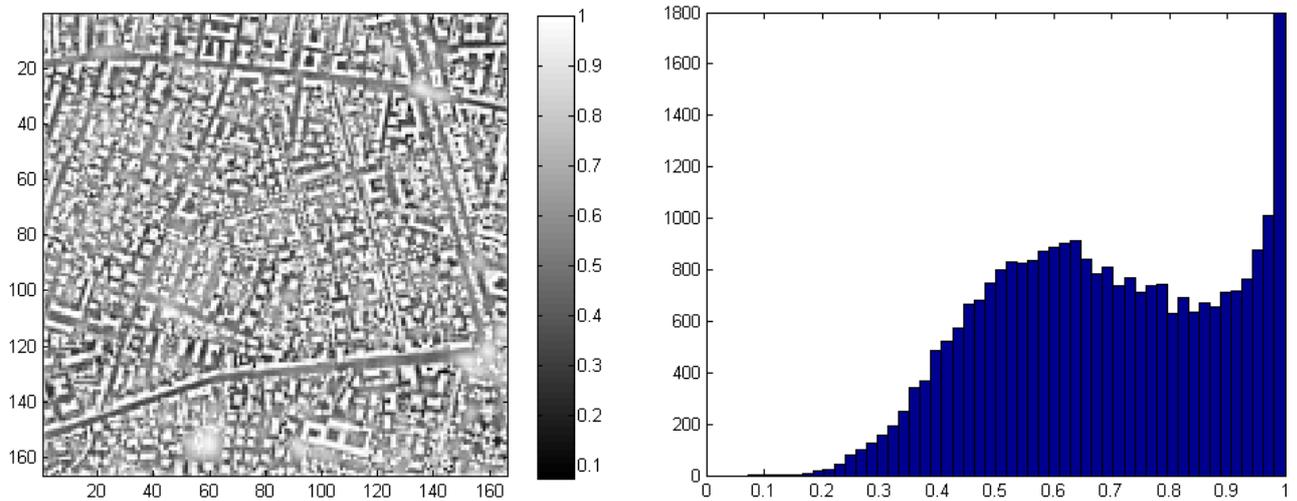


Figura 3.52. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 5 metri e relativo istogramma dell'immagine.

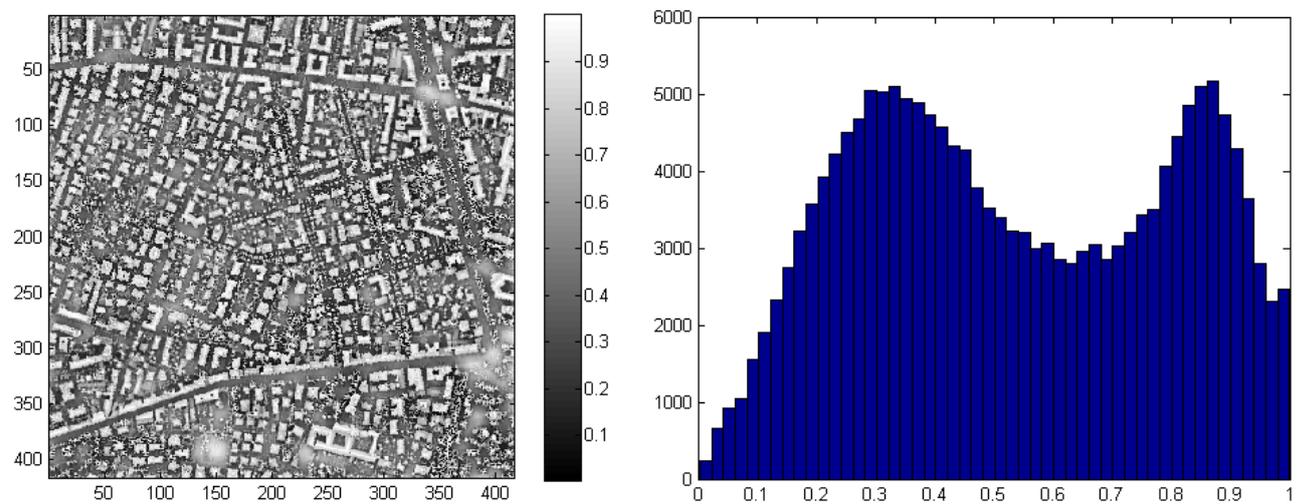


Figura 3.53. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 2 metri e relativo istogramma dell'immagine.

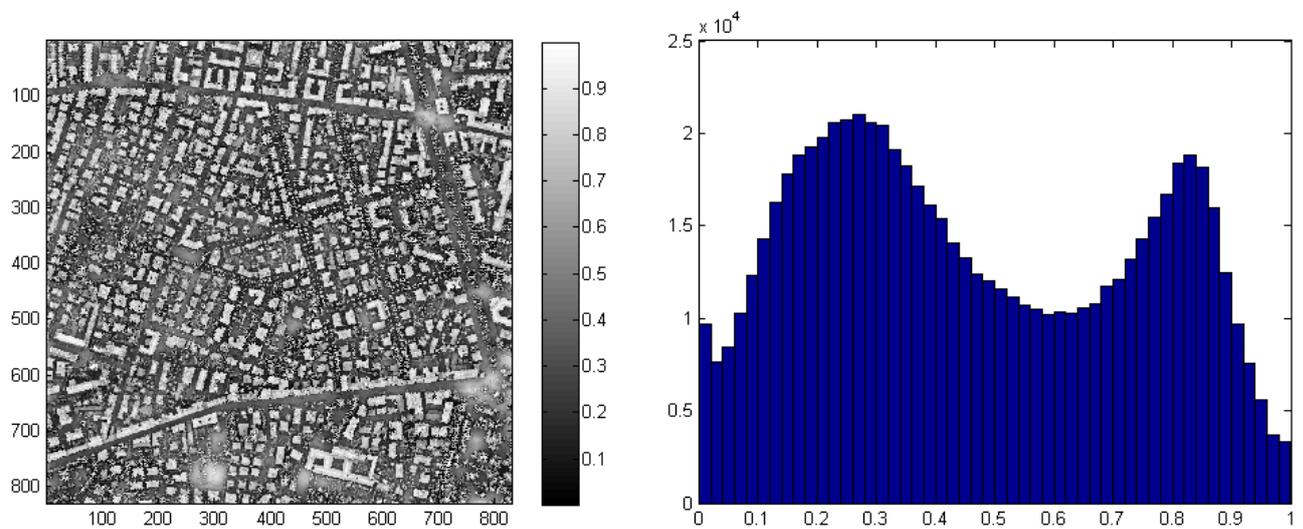


Figura 3.54. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 1 metro e relativo istogramma dell'immagine.

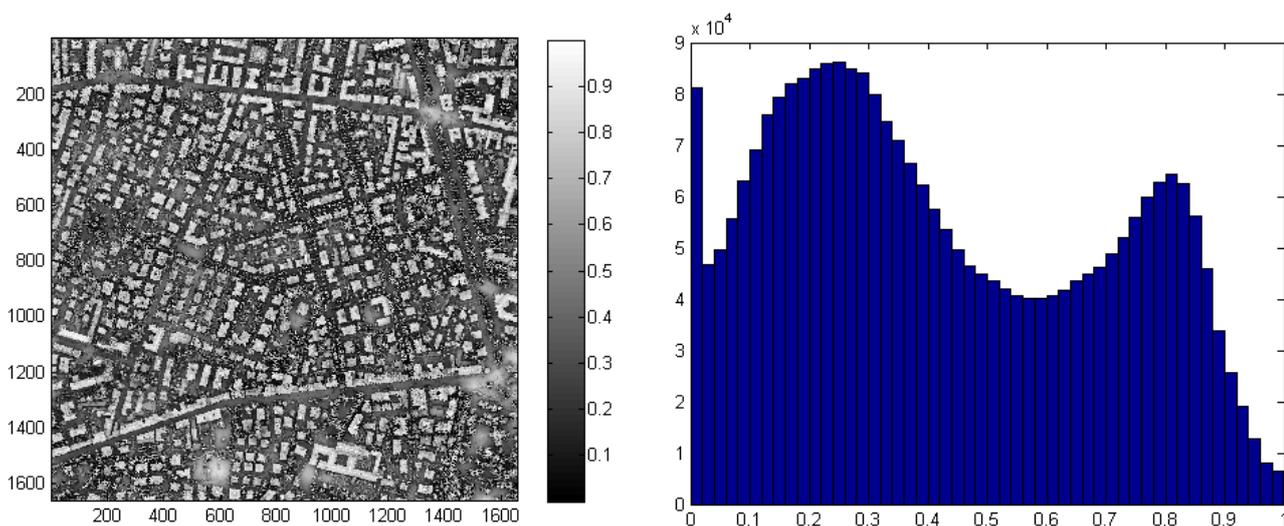


Figura 3.55. Risultato di mappatura dello SVF con risoluzione 0.5 metri e istogramma dell'immagine.

In Figura 3.52, Figura 3.53, Figura 3.54 e Figura 3.55 sono riportati i risultati di mappatura per le diverse risoluzioni geometriche con il numero direzioni di ricerca impostato a 60, raggio di ricerca 20 metri e fattore verticale di esagerazione dei rilievi unitario (ovvero nessun effetto di alterazione della quota).

In Figura 3.56 si riportano i parametri statistici fondamentali per un primo confronto di sensibilità tra i risultati.

Risoluzione	Minimo SVF	Massimo SVF	Media SVF	Dev. standard
5 m	0.0732	1	0.6882	0.1967
2 m	0.0038	1	0.5349	0.2613
1 m	0.0008	1	0.4661	0.2698
0.5 m	0.0002	1	0.4246	0.2678

Figura 3.56. Parametri statistici.

Nella Figura 3.57 sono illustrati in termini assoluti (funzione della frequenza) gli istogrammi delle 4 immagini: da una prima disamina dei risultati, le considerazioni già fatte per *SOLWEIG* sono applicabili anche a questo modello, ovvero si nota un effetto di appiattimento dell'istogramma (*stretching*) molto marcato aumentando la precisione del *DSM*, passando da 5 m a 2 m come evidenziato dalla diminuzione della media ma soprattutto dall'aumento della deviazione standard. Con l'immagine a 1 m la deviazione standard aumenta ulteriormente ma in modo meno significativo, mentre in quella a 0.5 m presenta un lievissimo calo. Da un'analisi più approfondita si

osserva, per dimensioni del pixel decrescenti, una rapida diminuzione di frequenza per valori dello SVF tendenti a 1, mentre per SVF tendente a 0 un piccolo incremento (evidente solo per la risoluzione massima). Gli effetti di stretching e le variazioni concentrate alle estremità dell'istogramma appaiono direttamente correlate all'attenuazione del dislivello tra punti adiacenti nei DSM, soprattutto con elevate dimensioni geometriche dei pixel: questo fenomeno è evidenziato dall'evidente diminuzione del contrasto all'aumentare della risoluzione del *DSM*, parallelamente alla diminuzione della precisione geometrica; per questo motivo lo Sky View Factor avrà, di conseguenza, valore mediamente più elevato.

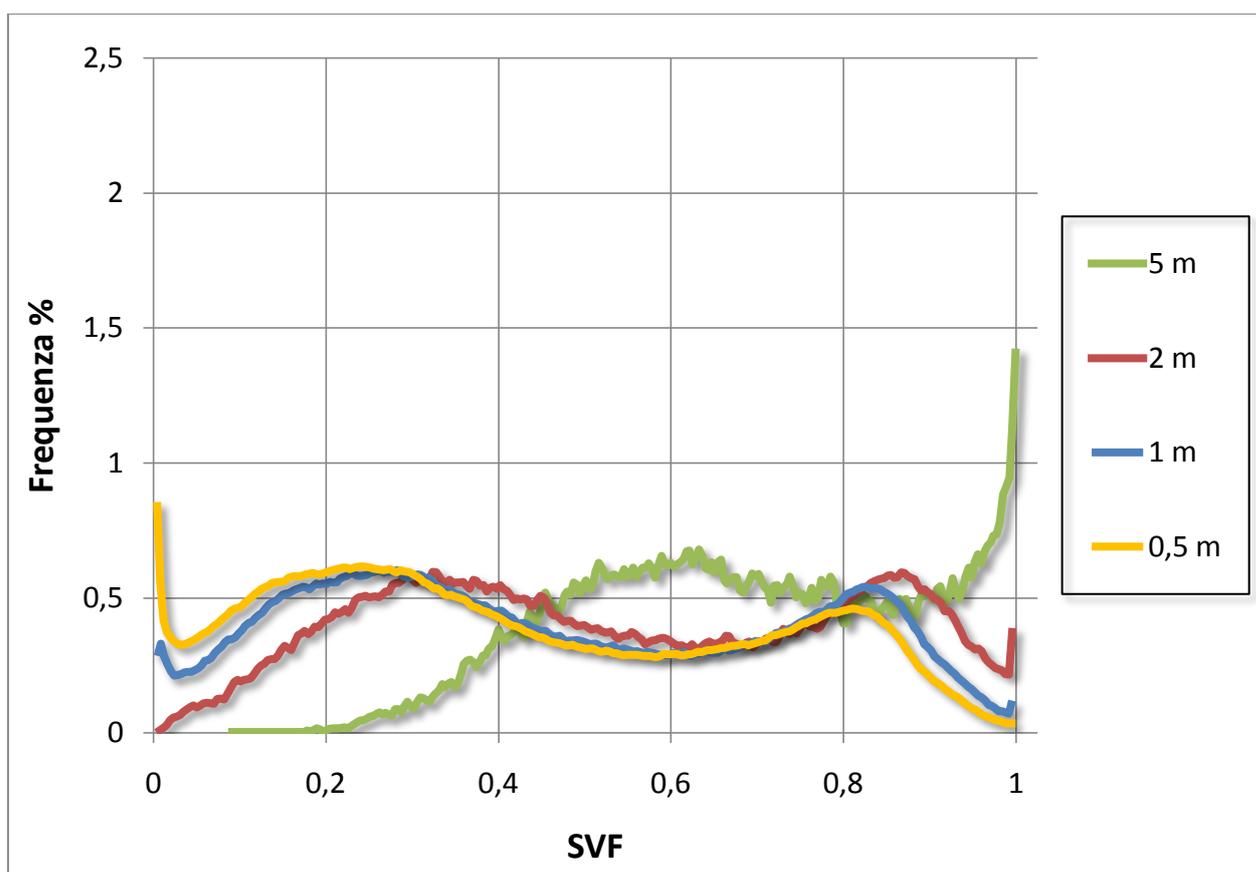


Figura 3.57. Iistogrammi in funzione della frequenza dei valori di SVF.

L'estrazione del valore dello *SVF* in corrispondenza dei siti caratteristici riassunti in Figura 3.58 ha sostanzialmente confermato le osservazioni colte finora: il grafico in Figura 3.59 conferma l'effetto di proporzionalità diretta tra la dimensione del pixel e lo *Sky View Factor* calcolato per ogni sito, evidenziando una regressione lineare per ogni gruppo di valori.

	0.5 m	1 m	2 m	5 m
Sito 1	0.799	0.810	0.838	0.926
Sito 2	0.611	0.642	0.688	0.789
Sito 3	0.929	0.939	0.959	0.994
Sito 4	0.263	0.306	0.347	0.429

Figura 3.58. Valori di SVF estratti sui siti caratteristici.

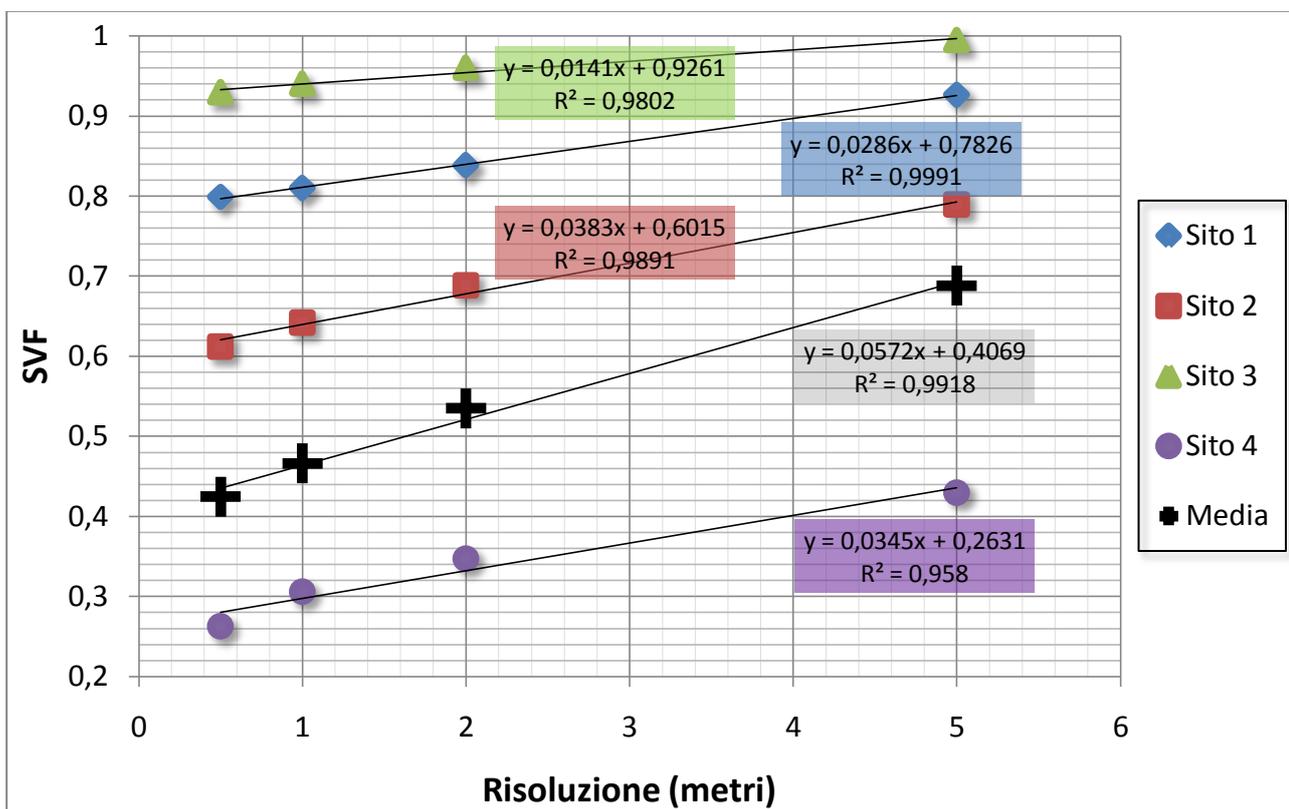


Figura 3.59. Andamento dello SVF alle varie risoluzioni su diversi siti caratteristici

Da questi dati si conclude che la degradazione dei risultati nella stima dello *SVF* al variare del dettaglio nella riproduzione della geometria urbana è di tipo lineare, con un errore medio stimabile attorno a 0.0572 per ogni metro di dimensione del pixel (retta di regressione dei valori medi in Figura 3.59), mentre le analisi puntuali mostrano che il coefficiente di variazione dipende del

contesto morfologico (canyon, tetto, strada, ecc.), ma per valori di *Sky View Factor* inferiori a 0.9 i coefficienti sono quasi congruenti.

Nella Figura 3.60 si pongono a confronto i tempi di calcolo in relazione al numero complessivo di pixel nell'immagine.

Risoluzione	Numero punti	Tempo di calcolo	Tempo ogni pixel
5 m	27556	< 1 secondo	-
2 m	172225	4.2 secondi	0.0000244 secondi
1 m	688900	26 secondi	0.000038 secondi
0.5 m	2755600	192 secondi	0.00007 secondi

Figura 3.60. Numero punti e tempo di calcolo.

La peculiarità di questo algoritmo consiste nell'offrire tempi elaborativi 2 ordini di grandezza inferiori a quelli ottenibili con l'algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens, grazie alle caratteristiche del suo modello di calcolo che opera la stima dello *SVF* per piccole porzioni di *DSM*.

3.3.5 Estensione ArcGIS

Come anticipato nel paragrafo sulle operazioni preliminari di processing, per procedere con il calcolo dello *Sky View Factor* a partire da un file vettoriale tramite *SVF extension* per *ArcGIS* è necessario fornire come input uno *shapefile* contenente una rete di punti, ognuno dotato dell'attributo relativo alla quota di calcolo che l'algoritmo andrà a considerare per la stima dello *Sky View Factor*. Il modello digitale della superficie è stato usato come fonte per impostare automaticamente la quota dei punti con un valore pari al *Digital Number* del *DSM*. I parametri di taratura del modello sono stati impostati come quelli consigliati dall'autore nel manuale, ovvero 200 metri per il raggio di ricerca degli edifici e 1 grado per l'angolo di rotazione.

In Figura 3.61 è riportato il risultato di mappatura per una griglia di punti con distanza reciproca di 5 metri. Questo metodo ha limitate possibilità di applicazione a causa dell'elevatissima durata della computazione, compresa tra 3 e 5 secondi per punto: ottenere la mappatura dello *SVF* sull'area di studio con una risoluzione geometrica di 5 metri ha comportato un tempo di calcolo di circa 36 ore.

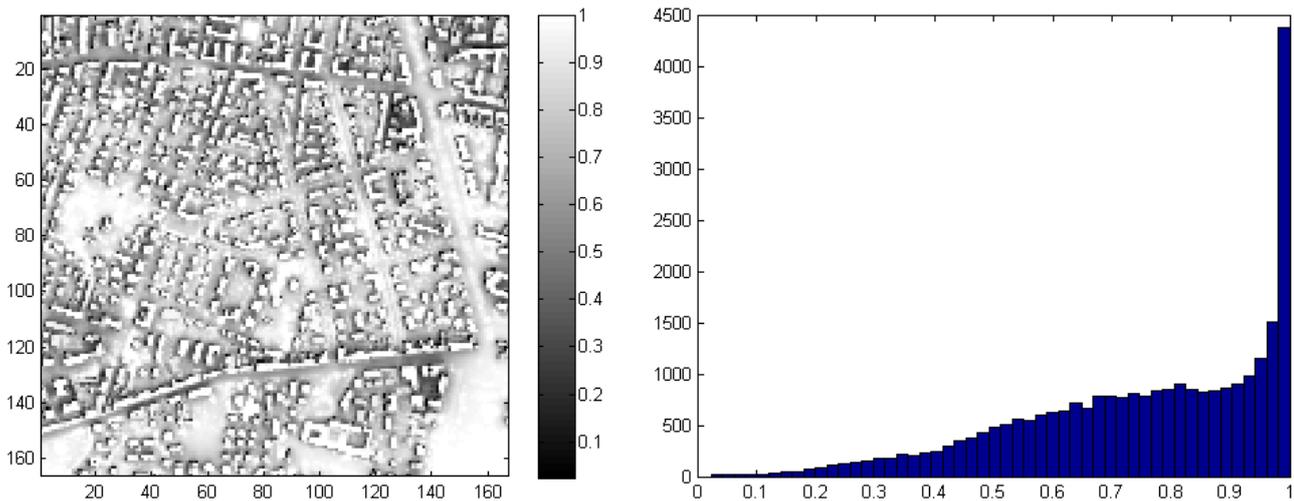


Figura 3.61. Risultato di mappatura dello SVF con punti a distanza reciproca di 5 metri e relativo istogramma dell'immagine.

Tenendo in considerazione il tempo di computazione, che raggiunge livelli proibitivi con mappature ad alta definizione (è stimato un periodo di elaborazione pari a 150 giorni per una distanza reciproca di 0.5 m tra i punti), per questo metodo è stata compiuta un'analisi di sensibilità selezionando una piccola area di studio (evidenziata nel *DSM* in Figura 3.62) e per quest'ultima è stata creata una griglia di punti di calcolo con risoluzione 0.5 metri. Il risultato è un'immagine di mappatura dello *SVF* di 200x200 pixel (100x100 metri) riportata in Figura 3.63 sulla destra, messa a confronto con l'estrazione della stessa area dall'immagine a 5 m sulla sinistra.

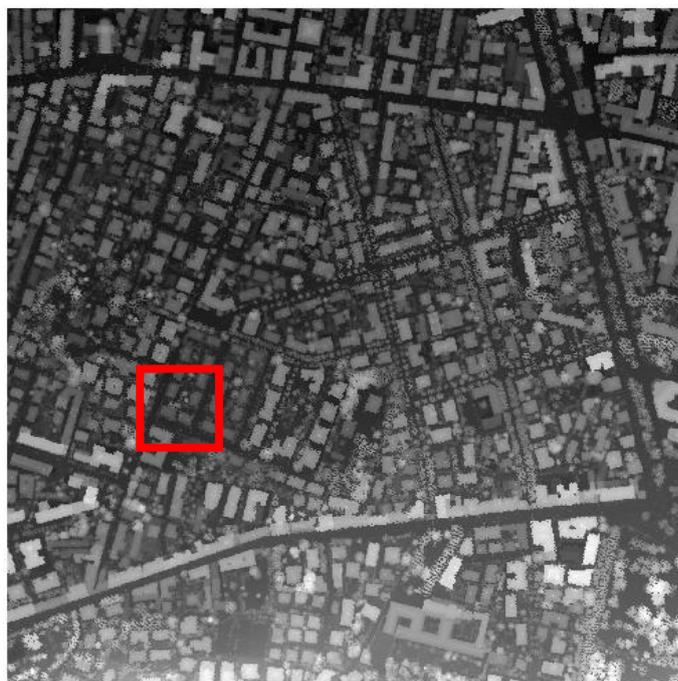


Figura 3.62. Selezione di una piccola area di calcolo.

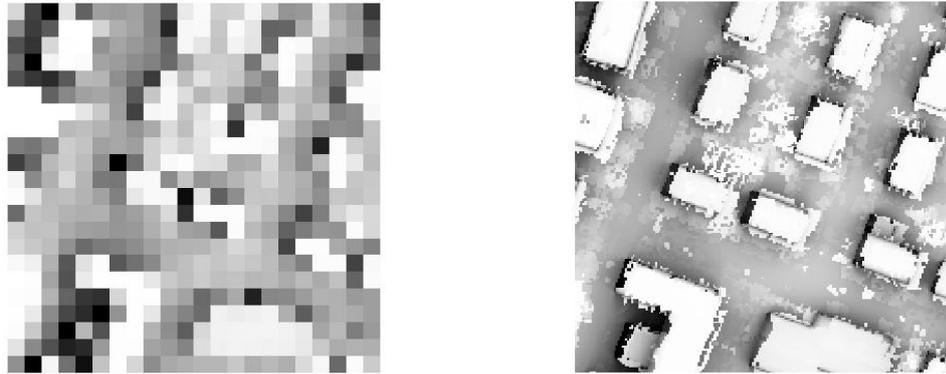


Figura 3.63. Mappatura dello SVF per una porzione di aria di studio con risoluzione di 5m a sinistra e 0.5 metri a destra.

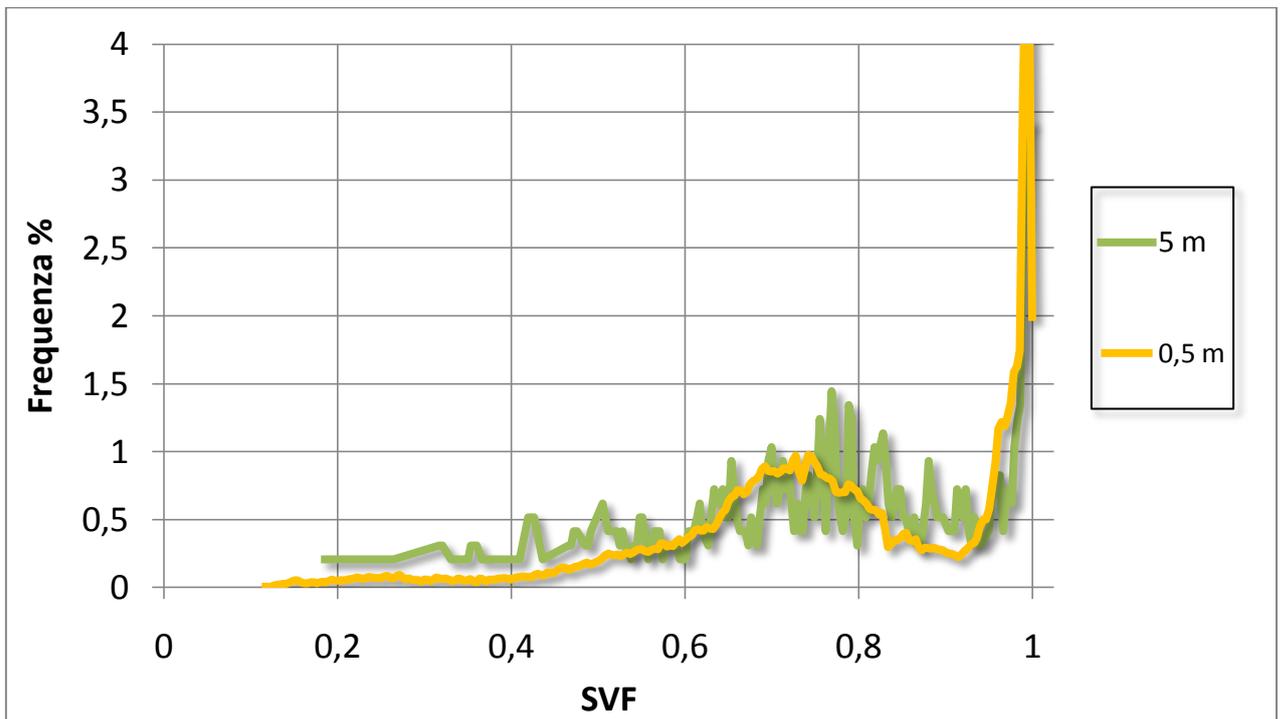


Figura 3.64. Istogrammi in funzione della frequenza dei valori di SVF.

Risoluzione	Minimo SVF	Massimo SVF	Media SVF	Dev. standard
5 m	0.1589	0.9992	0.762219	0.1823
0.5 m	0.0981	0.9999	0.771908	0.1877

Figura 3.65. Parametri statistici.

Dal confronto tra gli istogrammi in termini assoluti (funzione della frequenza) in Figura 3.65 e tenendo conto che la media e la deviazione standard non presentano cambiamenti significativi nonostante la notevole differenza di risoluzione geometrica, si conclude che questo metodo risulta poco sensibile alle variazioni di densità dei punti di calcolo. In ogni caso dall'analisi delle immagini appare evidente come l'incremento nella risoluzione spaziale nella distribuzione dei punti di calcolo in input si traduca in un'immagine di SVF con dettaglio notevolmente più elevato.

3.3.6 Confronti con metodo analitico

Per ottenere un'analisi di sensibilità completa e valutare quale soluzione di calcolo si avvicina ai valori ideali determinati con il metodo analitico di Oke (1987), spesso citato in letteratura, si riportano i valori dello *SVF* ricavati dai software nel punto centrale in un canyon di lunghezza infinita ed al centro di una vasca circolare (*basin*), caratterizzati da $H/W = 1$ (altezza e larghezza 24 metri).

	Analitiche				Raster					
	H	W/2	H/W	SVF Oke	SVF SOLWEIG			Scarto SOLWEIG-Oke		
					0.5 m	1 m	2 m	0.5 m	1 m	2 m
Canyon	24	12	1	0.4472	0.4501	0.4531	0.4657	0.0029	0.0059	0.0185
Basin	24	12	1	0.2	0.21	0.2316	0.2317	0.01	0.0316	0.0317

Figura 3.66. Confronto tra metodo analitico ed il modello di *SOLWEIG*.

	Analitiche				Raster					
	H	W/2	H/W	SVF Oke	SVF SkyHelios			Scarto SkyHelios-Oke		
					0.5 m	1 m	2 m	0.5 m	1 m	2 m
Canyon	24	12	1	0.4472	0.51	0.31	0.17	0.0628	-0.137	-0.277
Basin	24	12	1	0.2	0.21	0.232	0.232	0.01	0.0316	0.0317

Figura 3.67. Confronto tra metodo analitico ed il modello di *SkyHelios*.

	Analitiche				Vettoriale	
	H	W/2	H/W	SVF Oke	SVF ArcGIS	Scarto ArcGIS-Oke
Canyon	24	12	1	0.4472	0.4474	0.00019
Basin	24	12	1	0.2	0.1999	-0.0001

Figura 3.68. Confronto tra metodo analitico ed il modello dell'estensione per *ArcGIS*.

Questi dati confermano la sensibilità dei modelli riscontrata nell'analisi effettuata per l'area di studio: gli scarti con il metodo analitico tendono ad annullarsi per livelli di dettaglio crescenti nei modelli digitali della superficie; l'errore minimo infatti si riscontra per tutti i casi in corrispondenza del *DSM* a 0.5 metri. Il metodo vettoriale invece consente di ottenere un errore ancora più basso, un ordine di grandezza inferiore a quello minimo riscontrato con *SOLWEIG*: è un risultato coerente con il livello di dettaglio molto elevato nella rappresentazione geometrica degli ostacoli ottenibile con un file vettoriale. Non sono stati riportati i risultati dell'estensione di *ENVI* poiché, come è stato dimostrato durante il test di scelta del raggio di ricerca appropriato, i valori calcolati per i casi notevoli sono risultati poco significativi.

3.4 Analisi di affidabilità dei software

In questo paragrafo saranno presentati i risultati del confronto prestazionale tra i diversi software, adottando come riferimento di massima precisione (come ipotizzato all'interno della letteratura presa in esame) i risultati ottenuti da *SOLWEIG*.

Sono state effettuate delle operazioni tra bande in *ENVI* per immagini alla stessa risoluzione geometrica, ottenendo file raster degli scarti tra i valori ricavati con *SOLWEIG* ed i restanti software oggetto di studio; per ogni immagine sono stati estratti l'istogramma ed i principali parametri statistici. Infine per completare l'analisi, sono stati creati scatterogrammi che evidenziano la correlazione tra i valori. Le osservazioni tratte a seguito di queste elaborazioni sono presenti alla fine del paragrafo.

3.4.1 Analisi di affidabilità su SkyHelios

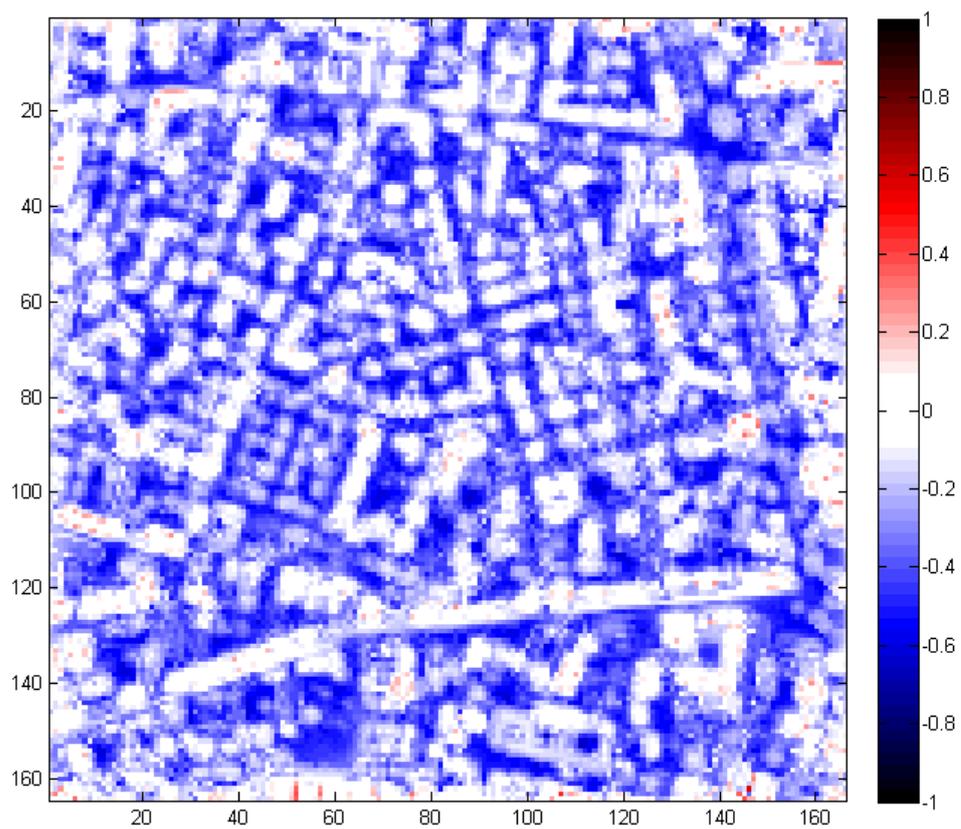


Figura 3.69. Scarti a risoluzione 5 metri.

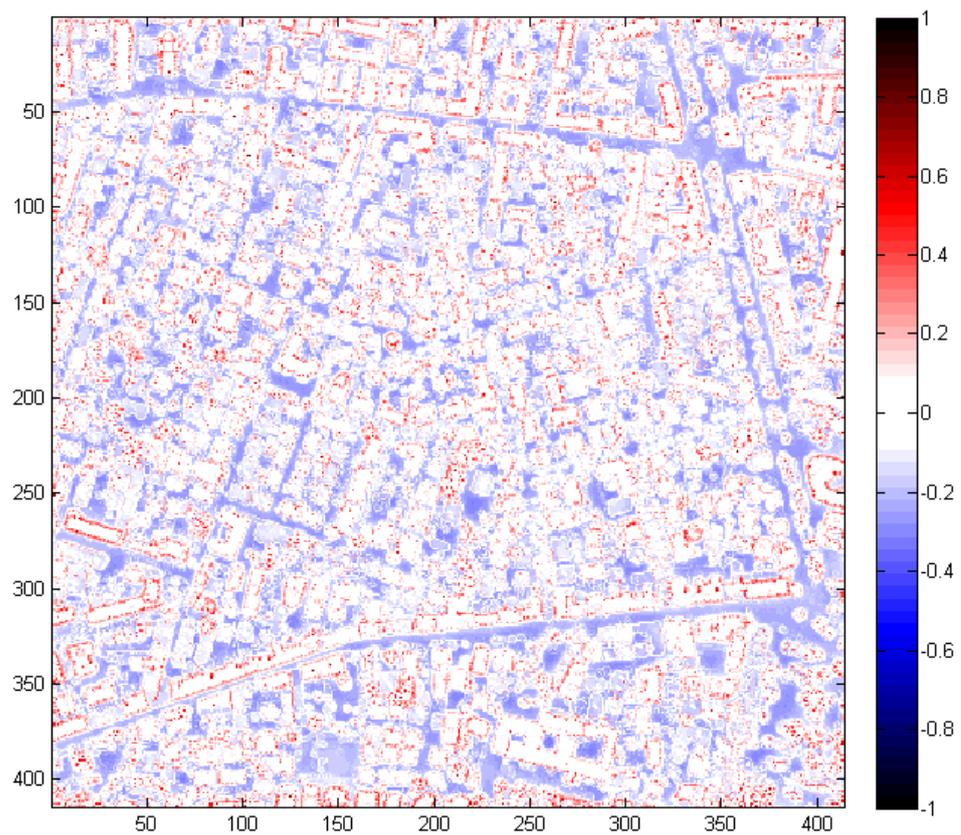


Figura 3.70. Scarti a risoluzione 2 metri.

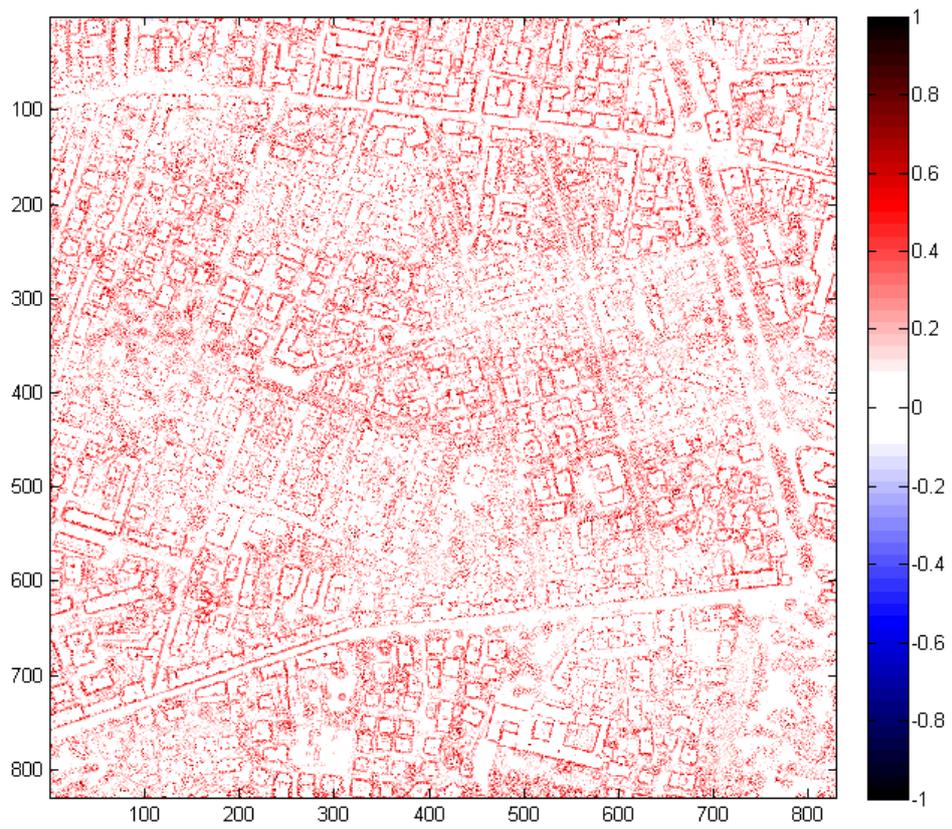


Figura 3.71. Scarti a risoluzione 1 metro.

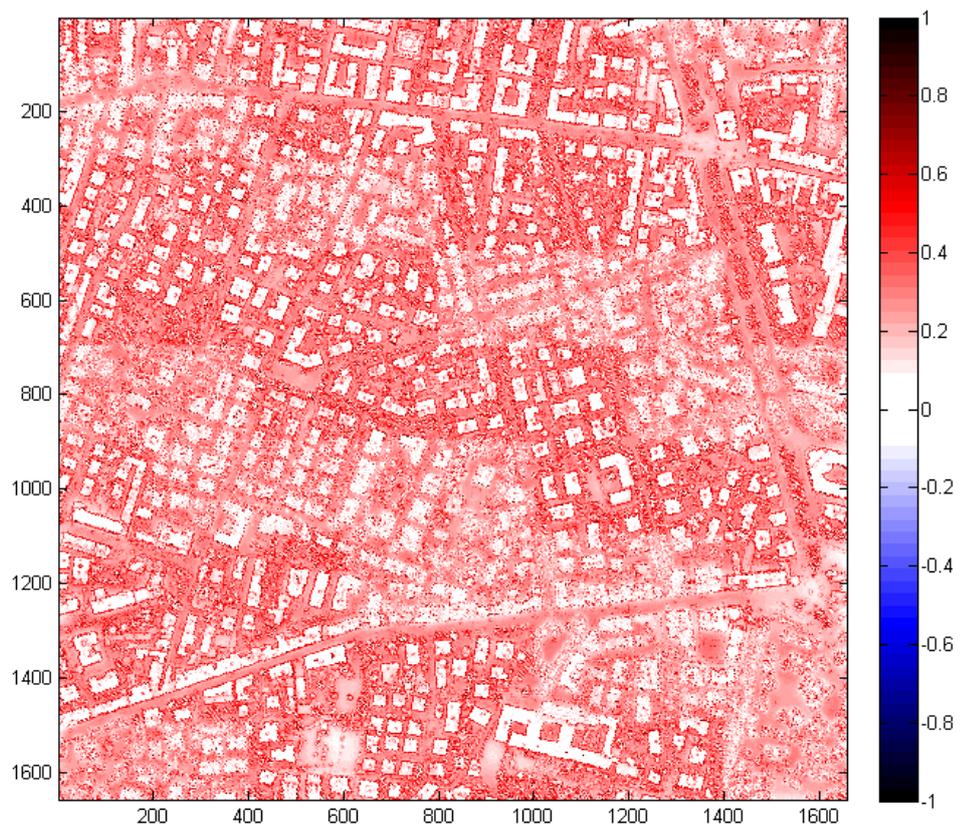


Figura 3.72. Scarti a risoluzione 0.5 metri.

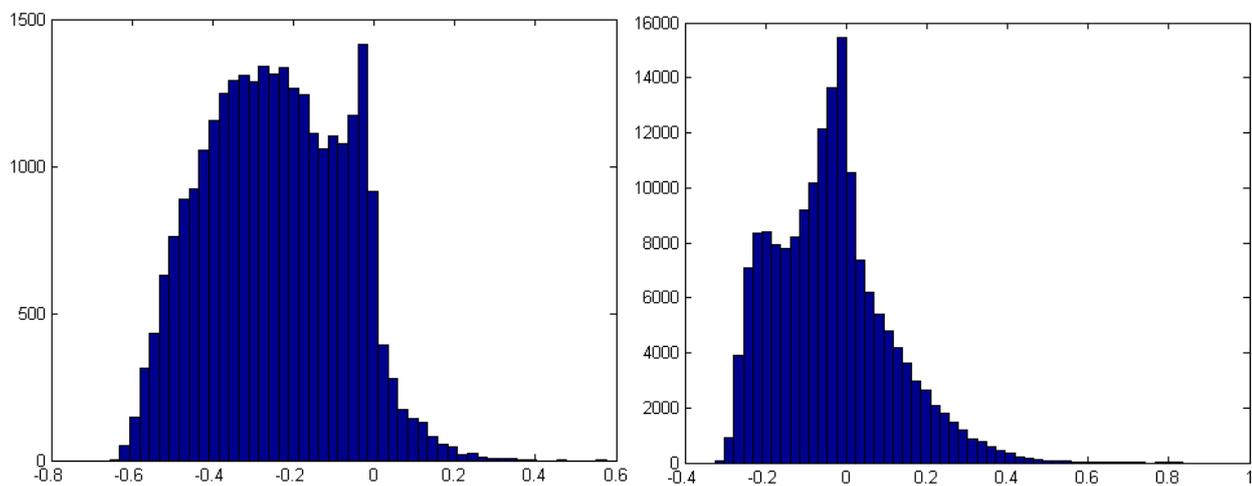


Figura 3.73. Distribuzione degli scarti tra le immagini con risoluzione di 5 e 2 metri. Alla risoluzione geometrica massima (5 metri) dominano gli scarti positivi. Diminuendo la dimensione del pixel, i valori positivi aumentano di frequenza.

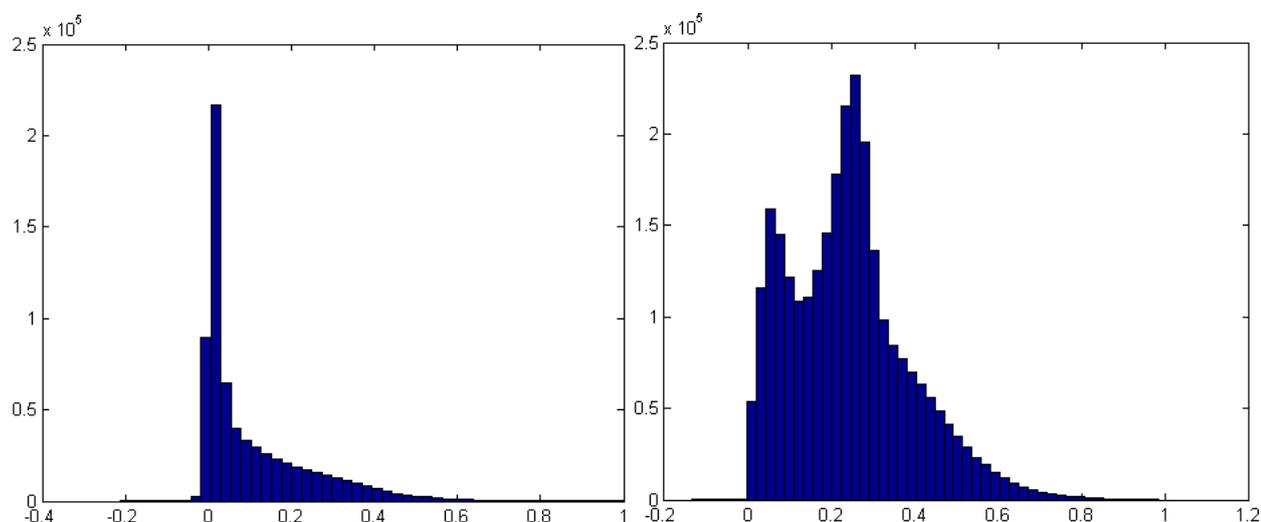


Figura 3.74. Distribuzione degli scarti nelle immagini a 1 e 0.5 metri. Alla risoluzione di 1 metro la maggior frequenza degli scarti si riscontra attorno allo zero; il modello in queste condizioni operative raggiunge massima affidabilità. Diminuendo la dimensione dei pixel i risultati degradano velocemente, con prevalenza di scarti positivi.

Risoluzione	Minimo scarto	Massimo scarto	Media scarto	Dev. standard
5 m	-1	1	-0.241308	0.1927
2 m	-0.3246	0.8349	-0.0373	0.1428
1 m	-0.2114	1	0.1068	0.1345
0.5 m	-0.1348	0.9843	0.2423	0.1449

Figura 3.75. Parametri statistici degli scarti.

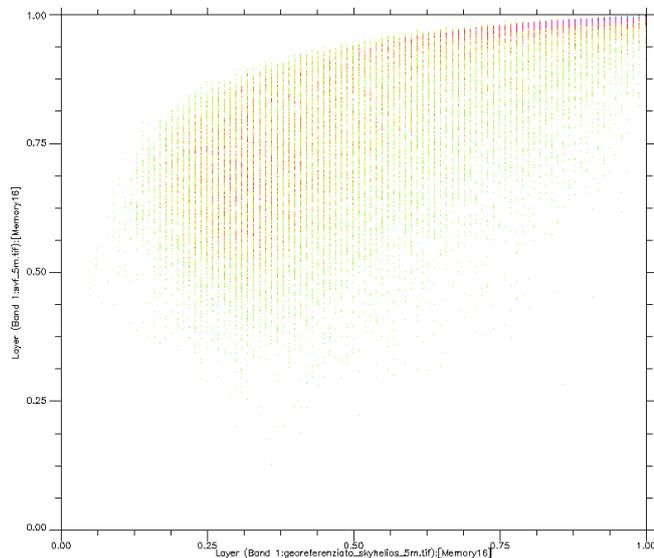


Figura 3.76. Scattergramma tra risultati di mappatura di *SkyHelios* e *SOLWEIG*. Risoluzione 5 metri.

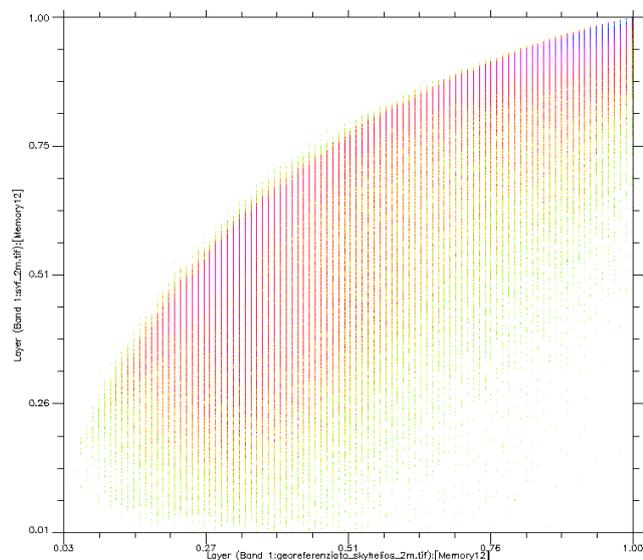


Figura 3.77. Scattergramma tra la mappatura di *SkyHelios* e *SOLWEIG*. Risoluzione 2 metri.

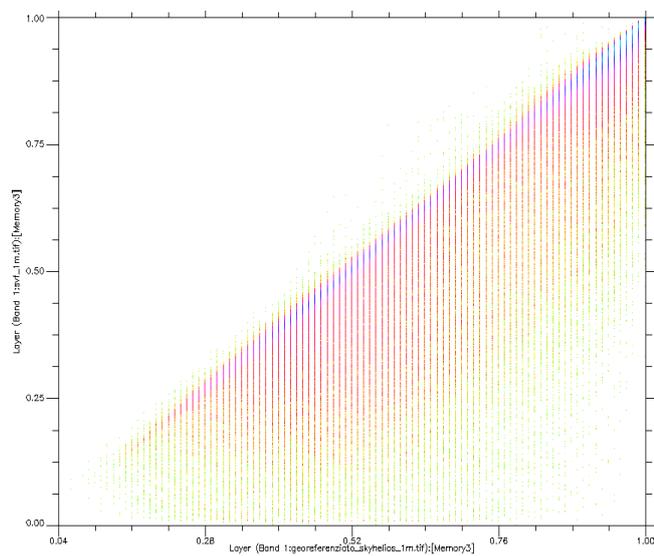


Figura 3.78. Scattergramma tra la mappatura di *SkyHelios* e *SOLWEIG*. Risoluzione 1 metro.

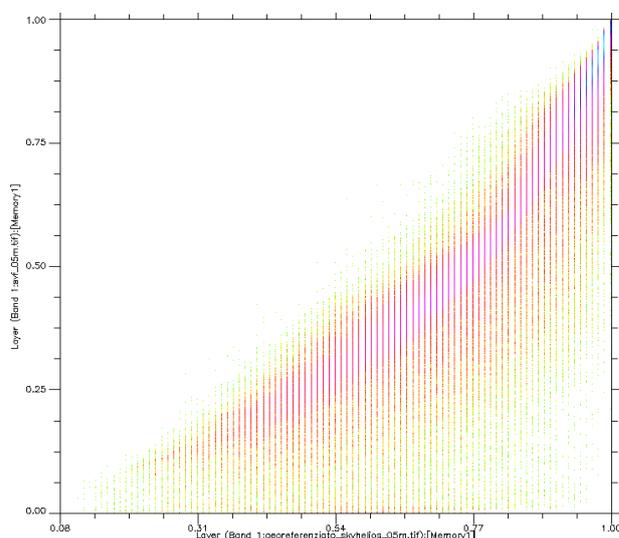


Figura 3.79. Scatterogramma tra la mappatura di SkyHelios e SOLWEIG. Risoluzione 0.5 metri.

Correlazione	SkyHelios	Risoluzione
SOLWEIG	0.604709	5 m
	0.839894	2 m
	0.866015	1 m
	0.873935	0.5 m

Figura 3.80. Indice di correlazione tra i valori calcolati dell'estensione per ENVI e SOLWEIG.

Covarianza	SkyHelios	Risoluzione
SOLWEIG	0.024511	5 m
	0.053534	2 m
	0.054921	1 m
	0.048168	0.5 m

Figura 3.81. Indice di covarianza tra i valori calcolati dell'estensione per ENVI e SOLWEIG.

Dall'analisi condotta su scarti e scatterogrammi tra le immagini di mappatura generate da SOLWEIG e SkyHelios, si conclude che quest'ultimo, alle alte risoluzioni geometriche, ha scarse performance (indice di correlazione 0.6), sottostimando il valore dell'*SVF* nei settori a medio e basso fattore di vista del cielo, come si evince dalle immagini dello scarto. Diminuendo la dimensione del pixel i risultati migliori si ottengono alla risoluzione di 1 metro che presenta gli scarti minimi. Diminuendo ulteriormente la dimensione dei pixel si osserva la tendenza ad una sovrastima, di nuovo nelle zone a basso fattore di vista del cielo, che appare subito marcata già a 0.5 m, con uno scarto medio in valore assoluto congruente a quello riscontrato nelle immagini a 5 m.

3.4.2 Analisi di affidabilità su estensione ENVI

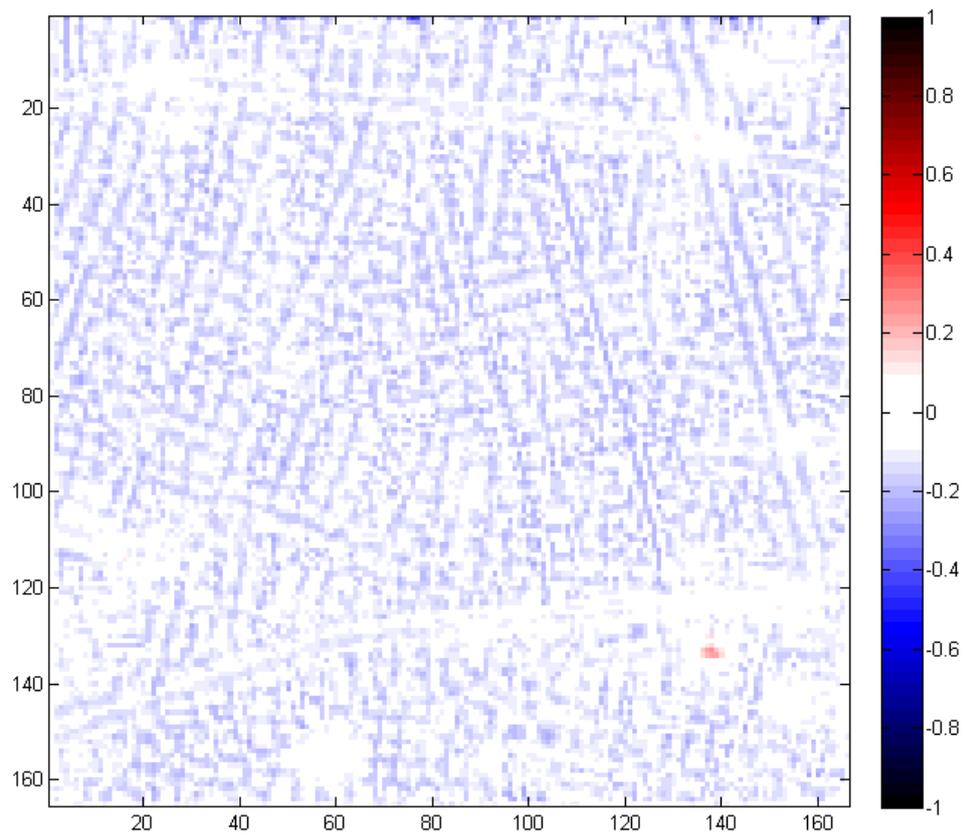


Figura 3.82. Scarti a risoluzione 5 metri.

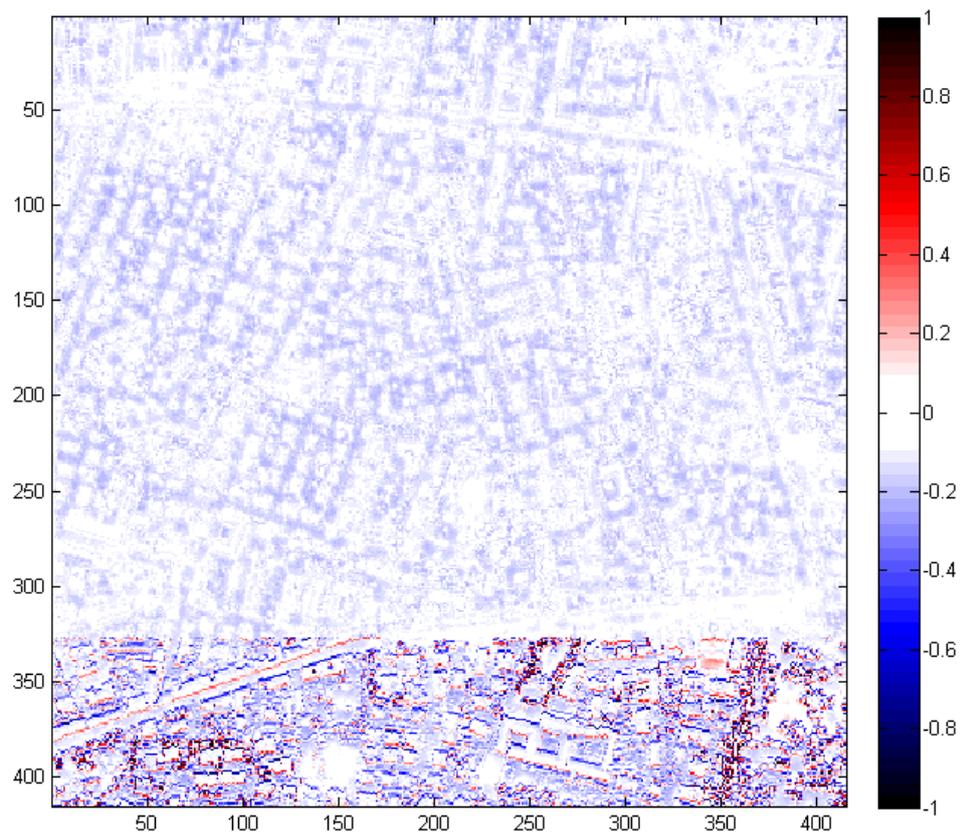


Figura 3.83. Scarti a risoluzione 2 metri (da notare l'anomalia nella parte inferiore dell'immagine).

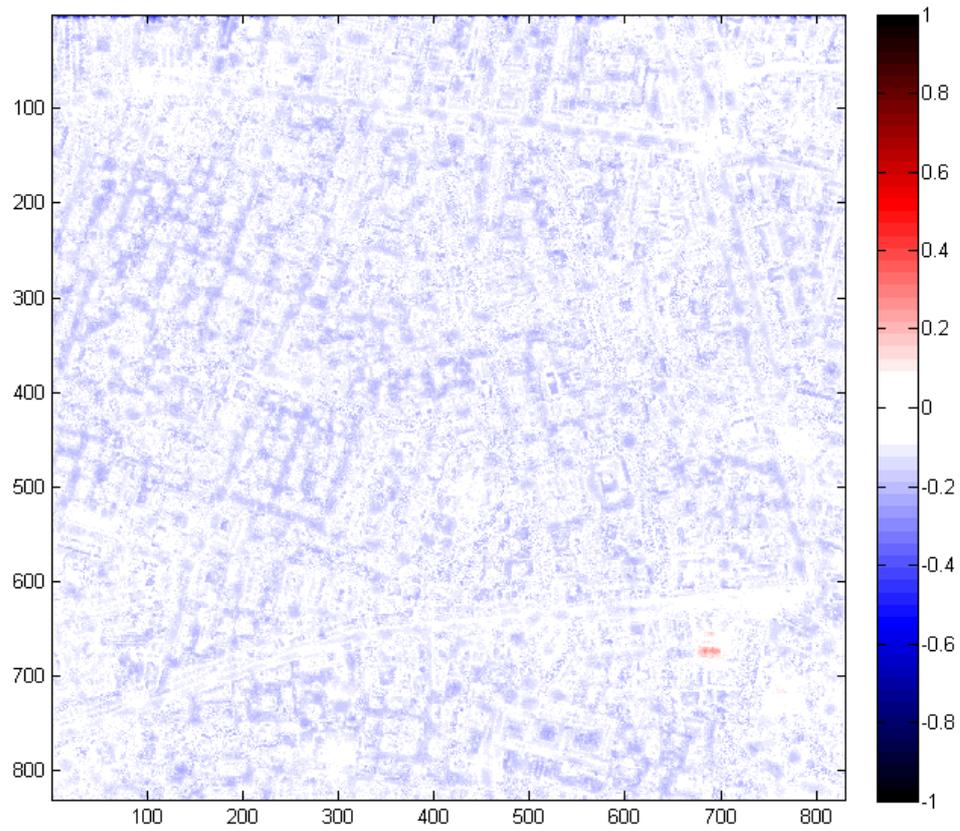


Figura 3.84. Scarti a risoluzione 1 metro.

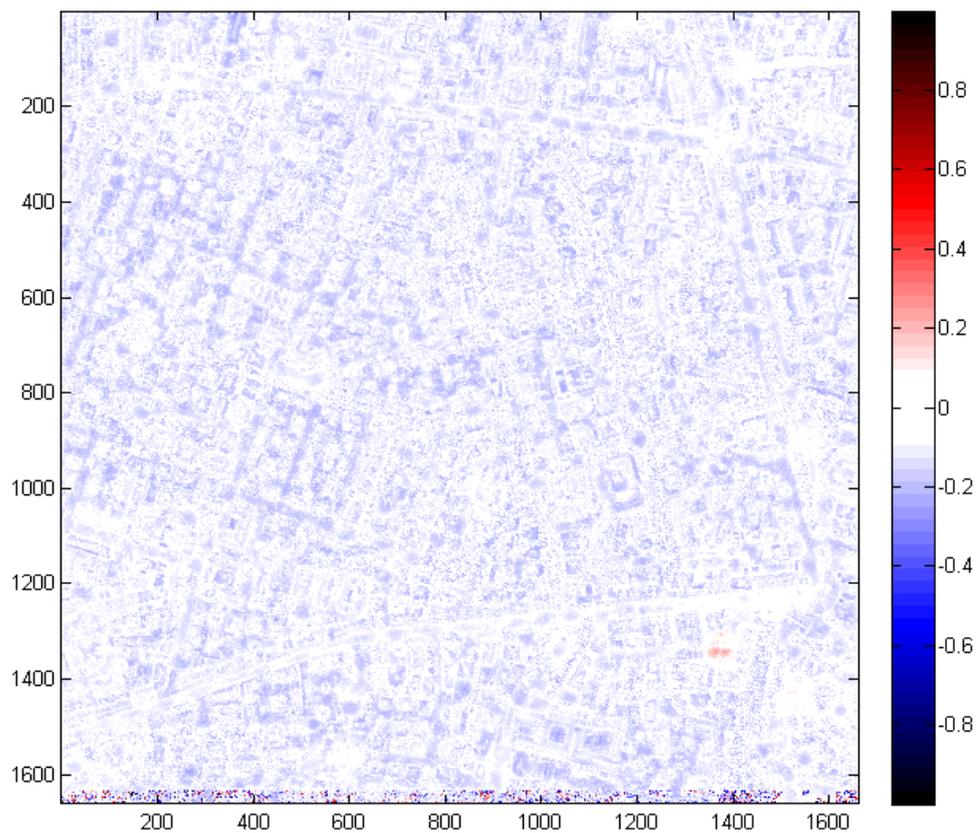


Figura 3.85. Scarti a risoluzione 0.5 metri.

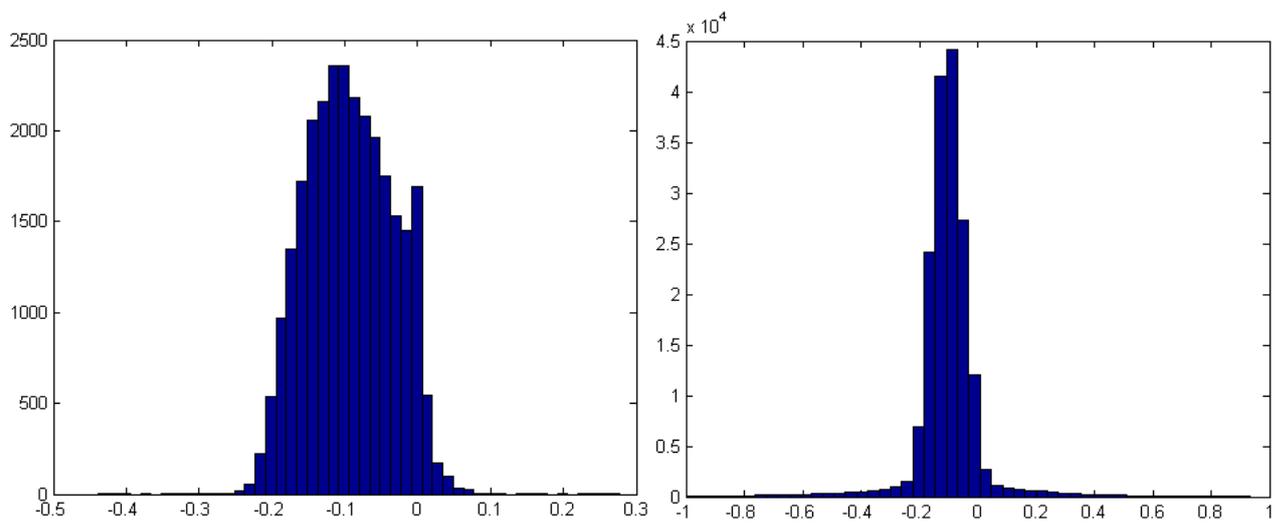


Figura 3.86. Distribuzione degli scarti nelle immagini a 5 e 2 metri.

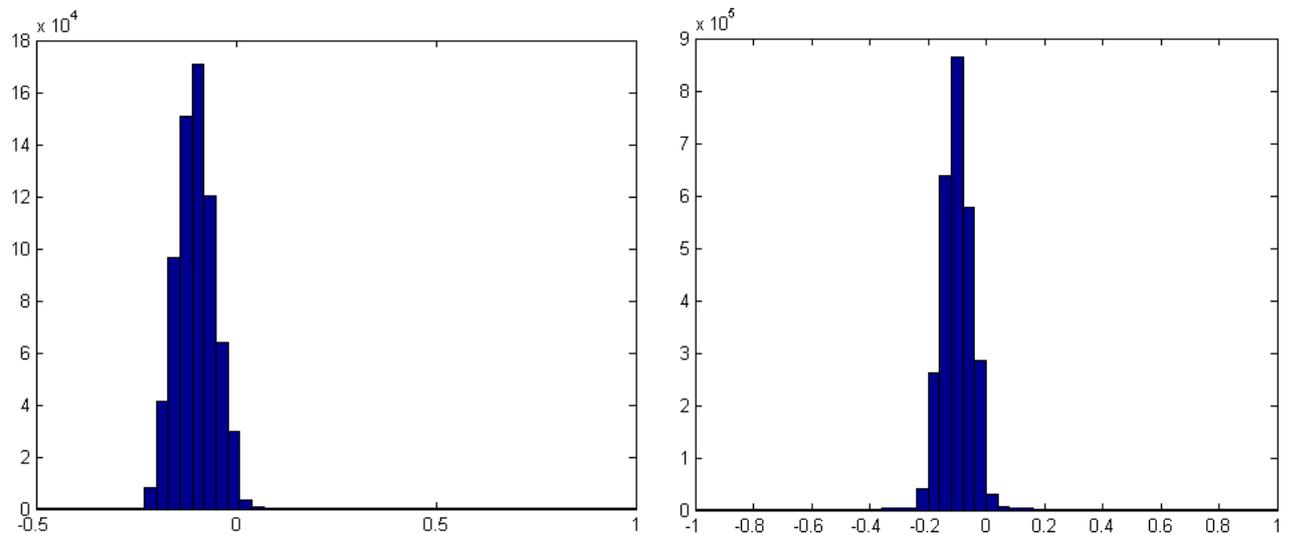


Figura 3.87. Distribuzione degli scarti nelle immagini a 1 e 0.5 metri.

Risoluzione	Minimo scarto	Massimo scarto	Media scarto	Dev. standard
5 m	-0.4375	0.2775	-0.0928	0.0592
2 m	-0.9919	0.9318	-0.1006	0.1146
1 m	-0.4995	1	-0.0992	0.0607
0.5 m	-0.9992	1	-0.0991	0.0623

Figura 3.88. Parametri statistici.

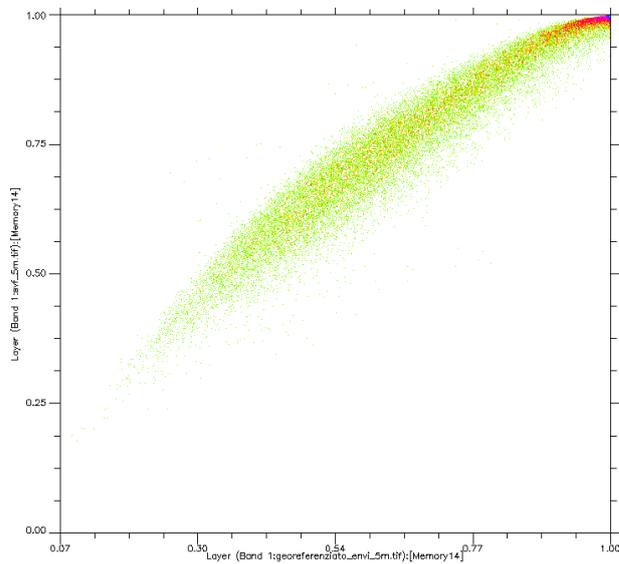


Figura 3.89. Scatterogramma tra la mappatura dell'estensione per ENVI e SOLWEIG. Risoluzione 5 metri.

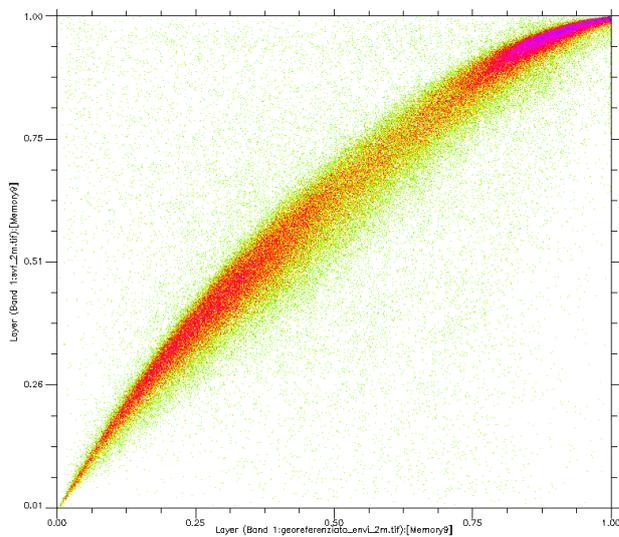


Figura 3.90. Scatterogramma tra la mappatura dell'estensione per ENVI e SOLWEIG. Risoluzione 2 metri.

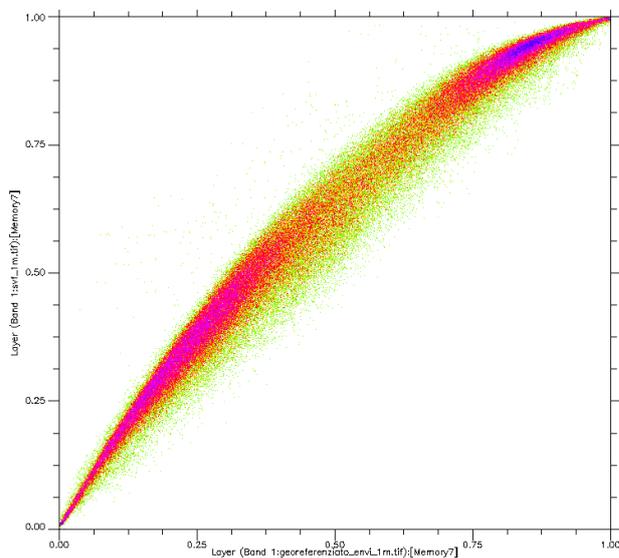


Figura 3.91. Scatterogramma tra la mappatura dell'estensione per ENVI e SOLWEIG. Risoluzione 1 metro.

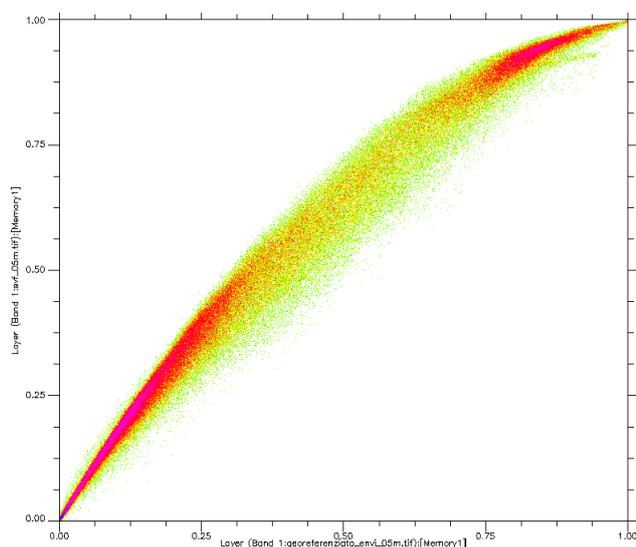


Figura 3.92. Scattergramma tra la mappatura dell'estensione per ENVI e SOLWEIG. Risoluzione 0.5 metri.

Correlazione	Estensione ENVI	Risoluzione
SOLWEIG	0.889005	5 m
	0.900656	2 m
	0.975194	1 m
	0.975561	0.5 m

Figura 3.93. Indice di correlazione tra i valori calcolati dell'estensione per ENVI e SOLWEIG.

Covarianza	Estensione ENVI	Risoluzione
SOLWEIG	0.038691	5 m
	0.059024	2 m
	0.072468	1 m
	0.073713	0.5 m

Figura 3.94. Indice di covarianza tra i valori calcolati dell'estensione per ENVI e SOLWEIG.

Dall'analisi condotta su scarti e scattergrammi, si conclude che l'estensione per *ENVI* contiene un algoritmo di calcolo che fornisce risultati coerenti con quelli di *SOLWEIG* (indice di correlazione elevato) ma con una leggera sottostima (media degli scarti -0.1) in particolare nelle zone caratterizzate da fattore di vista medio - basso come si evince dalle immagini dello scarto. La deviazione standard degli scarti è pari a 0.06 in tutti i casi tranne per il calcolo con *DSM* a 2 metri, per il quale si sono verificate evidenti anomalie di calcolo (non eliminabili tramite una seconda elaborazione con gli stessi dati).

3.4.3 Analisi di affidabilità su estensione ArcGIS

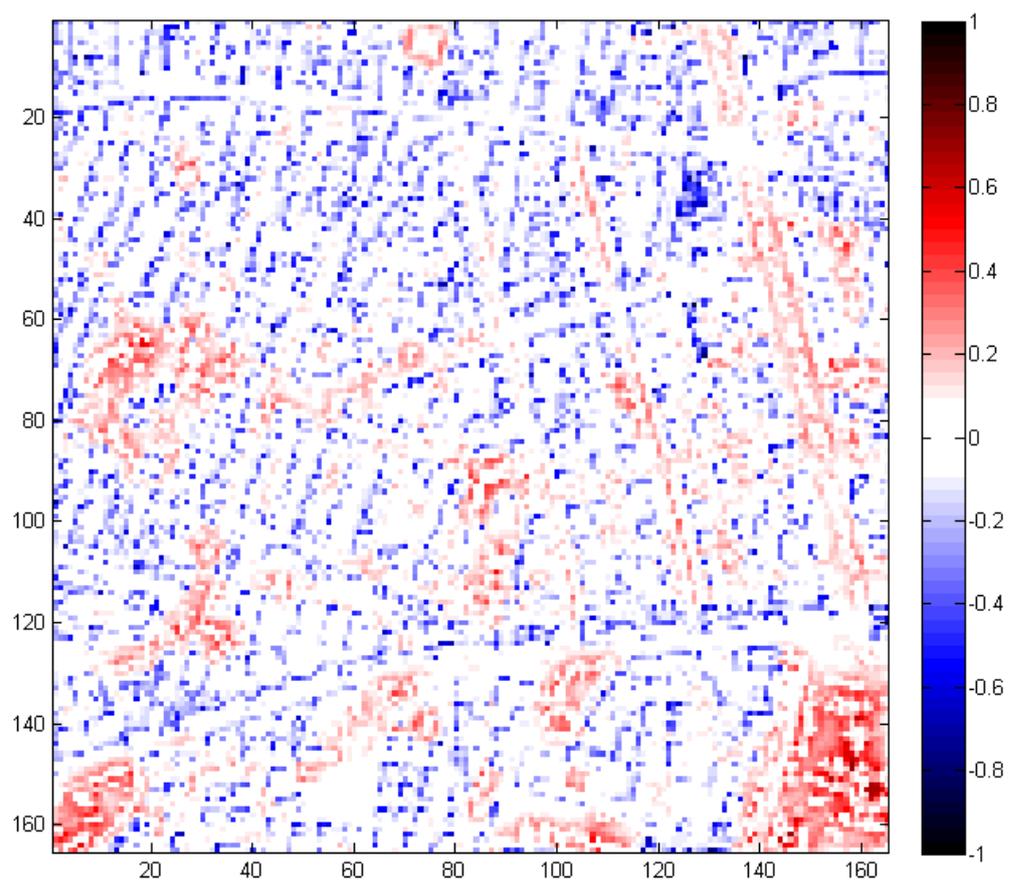


Figura 3.95. Scarti a risoluzione dei punti di calcolo 5 metri.

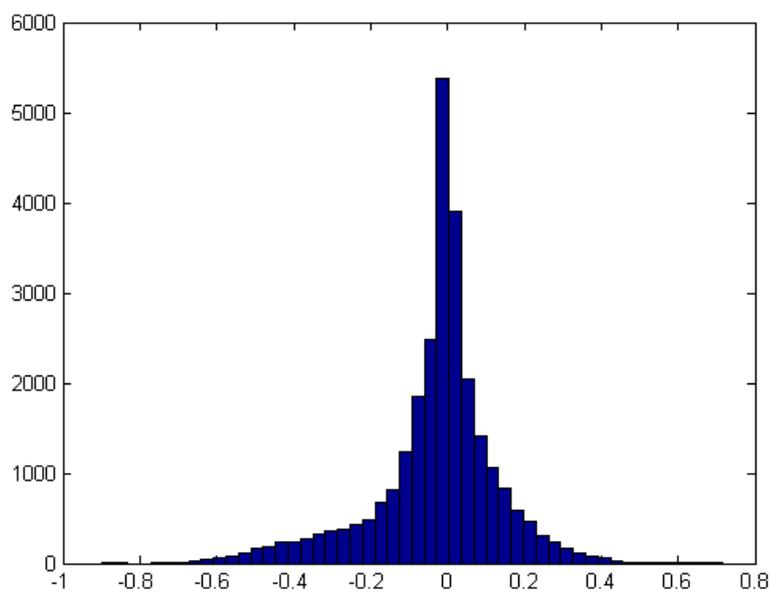


Figura 3.96. Distribuzione degli scarti.

Risoluzione	Minimo scarto	Massimo scarto	Media scarto	Dev. standard
5 m	-0.8984	0.7142	-0.0928	0.1612

Figura 3.97. Parametri statistici.

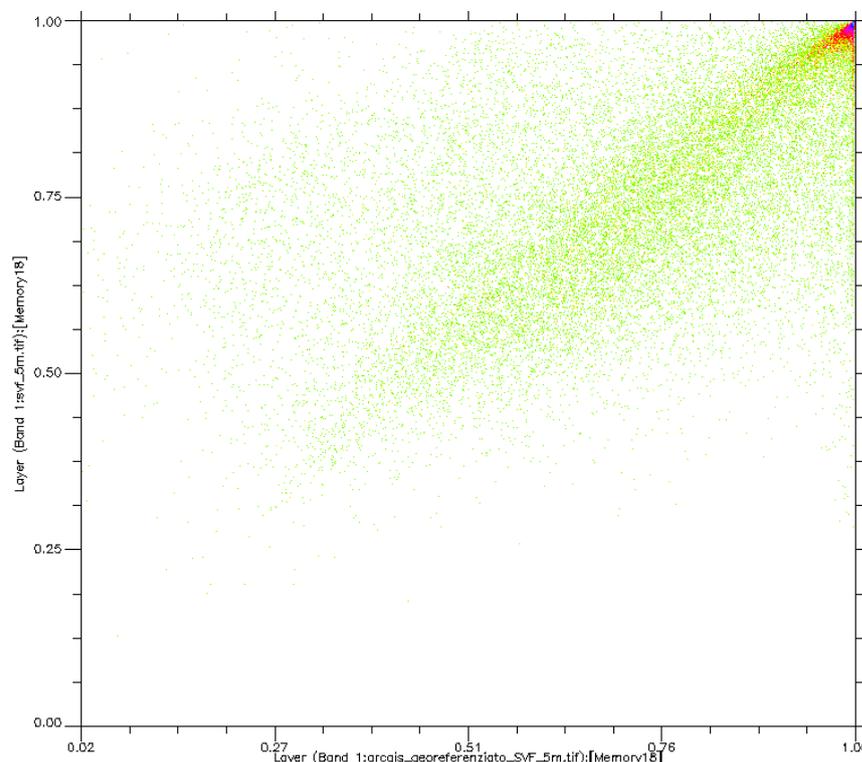


Figura 3.98. Scatterogramma tra la mappatura dell'estensione per ArcGIS e SOLWEIG.

Correlazione	Estensione ArcGIS	Risoluzione
SOLWEIG	0.576200	5 m

Figura 3.99. Indice di correlazione tra i valori calcolati dell'estensione per ArcGIS e SOLWEIG.

Covarianza	Estensione ArcGIS	Risoluzione
SOLWEIG	0.021700	5 m

Figura 3.100. Indice di covarianza tra i valori calcolati dell'estensione per ENVI e SOLWEIG.

Gli indici descrivono una condizione di scarsa affidabilità di questo software. Dall'immagine dello scarto si evince una sorta di "polarizzazione" tra valori positivi, localizzati quasi esclusivamente in zone dove è presente vegetazione (alberi ad alto fusto), e negativi, situati nei pressi degli edifici. La presenza di una sovrastima nei pressi di alberature era stata ampiamente prevista per un semplice motivo: il database vettoriale *shapefile* contiene esclusivamente informazioni sugli edifici, a

differenza del modello digitale della superficie che rappresenta il risultato di un'acquisizione con *Laser Scanner* non depurato dalla vegetazione. Invece per comprendere le cause delle zone di sottostima, distribuite principalmente lungo il perimetro esterno degli edifici, si analizzano i risultati ottenuti per la piccola area di studio che, si ricorda, è stata creata impostando una griglia di punti di calcolo con risoluzione 0.5 metri e dotando ogni punto di un attributo quota con valore pari al *Digital Number* estratto dal modello digitale della superficie. In Figura 3.101 è mostrata l'immagine dello scarto con *SOLWEIG*.

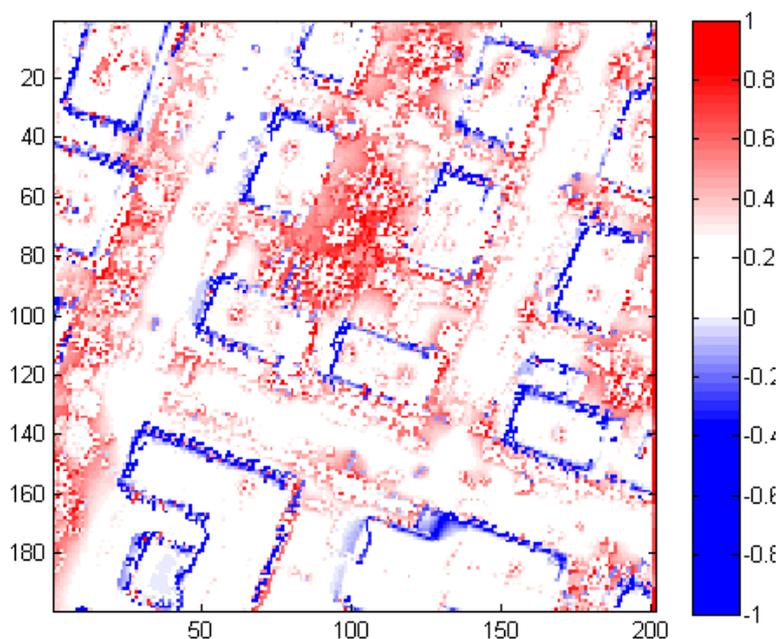


Figura 3.101. Scarto a risoluzione dei punti di calcolo 0.5 metri.

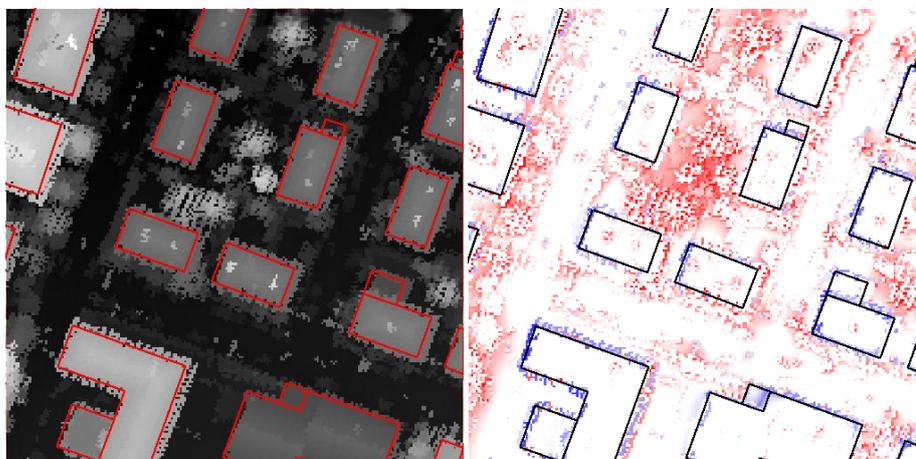


Figura 3.102. Dettaglio sovrapposizione di edifici in formato vettoriale su *DSM*, sulla sinistra, e risultato di mappatura *SVF*, sulla destra.

Sovrapponendo un livello relativo ai poligoni vettoriali degli edifici al *DSM* ed al risultato di mappatura (Figura 3.102), si nota una registrazione non rigorosa tra gli edifici tracciati secondo le

coordinate contenute nello *shapefile* e le coperture individuate sul modello digitale della superficie (probabilmente a causa della natura del dato LIDAR, che non consente una rappresentazione accurata come quella vettoriale in corrispondenza di variazioni nette di quota); queste ultime occupano delle superfici solo leggermente più ampie, ma sufficienti a determinare queste anomalie nei risultati.

Quindi si conclude che gli errori rilevati nell'estensione per *ArcView* dipendono in primo luogo dall'impossibilità di tenere in considerazione la vegetazione all'interno del database vettoriale degli edifici. Invece i problemi di sottostima si possono risolvere adottando una griglia dei punti di calcolo con un'adeguata distribuzione rispetto agli edifici. Un'eventuale applicazione di questo software potrebbe concentrarsi sulla stima del fattore di vista sulle superfici dei tetti, dove l'influenza della vegetazione è marginale, impostando il valore della quota della griglia di punti di calcolo pari a quella estrapolata dalla quota di gronda nello *shapefile* degli edifici.

3.4.4 Scarti in corrispondenza dei siti caratteristici

Nelle figure seguenti si riportano i risultati degli scarti ricavati in corrispondenza dei siti caratteristici, sottraendo il valore determinato da ogni software con quello calcolato da *SOLWEIG*, per ogni livello di definizione geometrica. Per evidenziare le soluzioni di calcolo che comportano il maggiore errore, si riportano i valori assoluti dello scarto.

Scarti SkyHelios-SOLWEIG	0.5 m	1 m	2 m	5 m
Sito 1	0.1387	0.012625	0.0267	0.5532
Sito 2	0.176725	0.005825	0.226825	0.5984
Sito 3	0.000225	0.003015	0.0017	0.0091
Sito 4	0.2145875	0.055375	0.012075	0.0658
Media	0.13255938	0.01921	0.066825	0.306625

Figura 3.103. Scarti sui siti specifici tra *SkyHelios* e *SOLWEIG*.

Scarti ENVI-SOLWEIG	0.5 m	1 m	2 m	5 m
Sito 1	0.048138	0.002625	0.012562	0.063175
Sito 2	0.127377	0.110902	0.08764	0.039103
Sito 3	0.063708	0.055904	0.037959	0.004334
Sito 4	0.0695095	0.037553	0.003808	0.013936
Media	0.07718313	0.051746	0.035492	0.030137

Figura 3.104. Scarti sui siti specifici tra l'estensione per ENVI e SOLWEIG.

Scarti ArcGIS-SOLWEIG	0.5 m
Sito 1	0.0207
Sito 2	0.050725
Sito 3	0.006175
Sito 4	0.1095875
Media	0.04679688

Figura 3.105. Scarti sui siti specifici tra l'estensione per ArcGIS e SOLWEIG (da risoluzione 0.5 metri).

3.5 Considerazioni

a) Analisi di sensibilità

SOLWEIG e l'estensione per ENVI risultano i software dal comportamento più prevedibile da questo punto di vista. Al diminuire della dimensione geometrica dei pixel la conseguenza più vistosa che si osserva nella distribuzione dei valori dello *Sky View Factor* è un effetto di *stretching*, accompagnato da un'attenuazione del picco di frequenza presente per *SVF* poco inferiori all'unità, determinando un aumento del contrasto. Questo comportamento appare direttamente correlato all'attenuazione del dislivello tra punti adiacenti nei *DSM*, soprattutto con elevate dimensioni geometriche dei pixel: questo fenomeno è evidenziato dalla diminuzione del dislivello massimo all'interno dei modelli digitali della superficie, parallelamente alla diminuzione della precisione geometrica.

L'analisi in corrispondenza dei siti caratteristici ha evidenziato un effetto di proporzionalità diretta tra la dimensione del pixel e lo *Sky View Factor* calcolato per ogni sito, evidenziando una regressione di tipo lineare per ogni gruppo di valori, con variazioni del coefficiente di variazione in funzione del contesto morfologico (canyon, tetto, strada, ecc.).

Nei risultati di *SkyHelios* si ottiene un comportamento opposto a quello riscontrato nell'estensione per *ENVI* e *SOLWEIG*. Variando la risoluzione geometrica l'effetto di *stretching* è molto lieve e si osserva una proporzionalità inversa tra la dimensione del pixel e lo *Sky View Factor*. Per elevate dimensioni del pixel, si possono osservare risultati inaspettati in alcuni contesti morfologici particolari (nel nostro caso un canyon urbano), apparentemente a causa di un errore nel software che determina la creazione di proiezioni *fisheye* incongruenti con il *DSM*.

b) Analisi di affidabilità del modello di calcolo

La precisione dei modelli di calcolo è stata valutata adottando come riferimento i risultati di *SOLWEIG*, come ipotizzato all'interno della letteratura presa in esame.

ENVI contiene un algoritmo che fornisce risultati coerenti a quelli di *SOLWEIG*, con un leggero effetto di sottostima in particolare nelle zone caratterizzate da fattore di vista medio – basso.

SkyHelios con risoluzioni geometriche moderate con risoluzioni geometriche elevate (5 metri) offre delle performance piuttosto scarse, tendendo a sottostimare il valore dell'*SVF* nei settori a medio e basso fattore di vista del cielo; diminuendo la dimensione del pixel i risultati migliori si ottengono alla risoluzione di 1 metro che presenta gli scarti minimi. Diminuendo ulteriormente la dimensione dei pixel si osserva la tendenza ad una sovrastima, di nuovo nelle zone a basso fattore di vista del cielo, che appare subito marcata già a 0.5 m, con uno scarto medio in valore assoluto congruente a quello riscontrato nelle immagini a 5 m.

Gli errori rilevati nell'estensione per *ArcView* dipendono in primo luogo dall'impossibilità di tenere in considerazione la vegetazione all'interno del dato vettoriale di input, contenente soltanto gli edifici. Invece i problemi di sottostima si possono risolvere adottando una griglia dei punti di calcolo con quote distribuite correttamente in funzione della dislocazione degli edifici.

c) Peculiarità dei software

L'estensione per *ENVI* permette tempi di calcolo molto bassi, dell'ordine di pochi minuti ogni km² di modello digitale della superficie. La peculiarità di questo algoritmo consiste nell'offrire tempi di elaborazione inferiori di 2 ordini di grandezza a quelli di *SOLWEIG* grazie alle caratteristiche del

suo modello di calcolo, che opera la computazione dello *SVF* per piccole porzioni di *DSM*. Appare di sicuro interesse l'opportunità di utilizzare l'estensione per *ENVI* ed il software *SOLWEIG* in modo congiunto: il primo sfruttato per un'indagine veloce, mentre il secondo per ottenere risultati di calcolo accurati e significativi, ma con tempi di calcolo notevolmente superiori.

SkyHelios si è dimostrato inadatto all'utilizzo per *DSM* di grandi dimensioni, con tempi di calcolo eccessivi (20 volte superiori a *SOLWEIG*) già per piccole aree di studio. Si può consigliare questo modello per l'applicazione in contesti di analisi limitati, utilizzando modelli digitali della superficie a bassa risoluzione geometrica dei pixel e sfruttando la peculiarità di questo software, che consistono anche nella capacità di generare immagini *fisheye* anche a partire da file raster.

L'estensione per *ArcGIS* ha possibilità applicative solo di tipo puntuale a causa dell'elevatissima durata della computazione, compresa tra 3 e 5 secondi per punto. Inoltre la necessità di preparare uno *shapefile* contenente una rete di punti, ognuno dotato dell'attributo relativo alla quota di calcolo, ne rende difficoltosa l'applicazione in caso di contesti con dislivelli non trascurabili. In piccole aree di studio (pochi metri) ed in assenza di vegetazione può essere utilizzato con profitto, essendo molto accurato nei risultati. Un'eventuale applicazione di questo software potrebbe concentrarsi sulla stima del fattore di vista sulle superfici dei tetti, dove l'influenza della vegetazione è marginale e la quota dei punti di calcolo può essere determinata facilmente dallo *shapefile* degli edifici.

Creazione script MATLAB per mappatura SVF

Nel tentativo di apportare eventuali miglioramenti nei modelli che sfruttando le informazioni geometriche contenute all'interno di database vettoriale degli edifici (*shapefile*) e per comprendere a fondo la dinamica di funzionamento per questo tipo di algoritmi, è stato creato uno *script* (Appendice A) tramite il linguaggio di programmazione *MATLAB* per la simulazione del metodo fotografico ed il calcolo del fattore di vista del cielo dalla proiezione stereografica ottenuta. I software esistenti di questa tipologia, principalmente implementati come estensione negli applicativi *GIS ArcView*, da quanto appreso in letteratura non hanno subito ulteriori aggiornamenti negli anni, soprattutto per una questione di tempi di calcolo eccessivi. Come base di partenza per lo sviluppo dello *script*, sono stati presi come riferimento i modelli di Souza et al. (2003) e Gál et al. (2007). Il tempo di calcolo, anche considerando la potenza computazionale attualmente disponibile, resta comunque molto elevato e quindi il metodo è adatto esclusivamente per contesti puntuali di analisi; per ampie aree di studio rimangono consigliati i software che fanno uso dei modelli digitali della superficie come *SOLWEIG* e l'estensione per *ENVI*.

4.1 Presentazione dello Script

Verranno illustrati i passaggi fondamentali che vengono eseguiti dallo *script* per creare una immagine *fisheye* in proiezione stereografica sul punto di calcolo all'interno di un database degli edifici di tipo vettoriale *shapefile*; segue successivamente la stima dello *Sky View Factor* con un metodo ispirato alle tecniche fotografiche sulla proiezione creata. Si sottolinea che tra gli attributi dei poligoni devono essere inclusi la quota al piede e la quota di gronda: in questo script, come si evincerà in seguito, se le coordinate selezionate ricadono all'interno di un poligono significa che il fattore di vista del cielo sarà calcolato sul tetto di un edificio (perciò viene selezionata la quota di gronda del poligono corrispondente) altrimenti significa che è stato scelto un punto sul terreno (per cui sarà estratta la quota al piede dell'edificio più vicino). Questo è un vantaggio rispetto all'estensione di *ArcGIS*, che richiede di creare una griglia di punti aventi come attributo la quota di

calcolo, soprattutto come nel caso analizzato nel capitolo precedente in cui l'area di studio presenta dislivelli non trascurabili.

4.1.1 Formazione della proiezione stereografica

a) *Caricamento file vettoriale: lettura coordinate X, Y e disegno dei poligoni in una finestra*

Tramite il comando `shaperead` *MATLAB* è in grado di trasformare in una struttura di matrici un archivio in formato *shapefile*. Tramite il comando `line` vengono plottati tutti i poligoni in una nuova finestra (Figura 4.1)

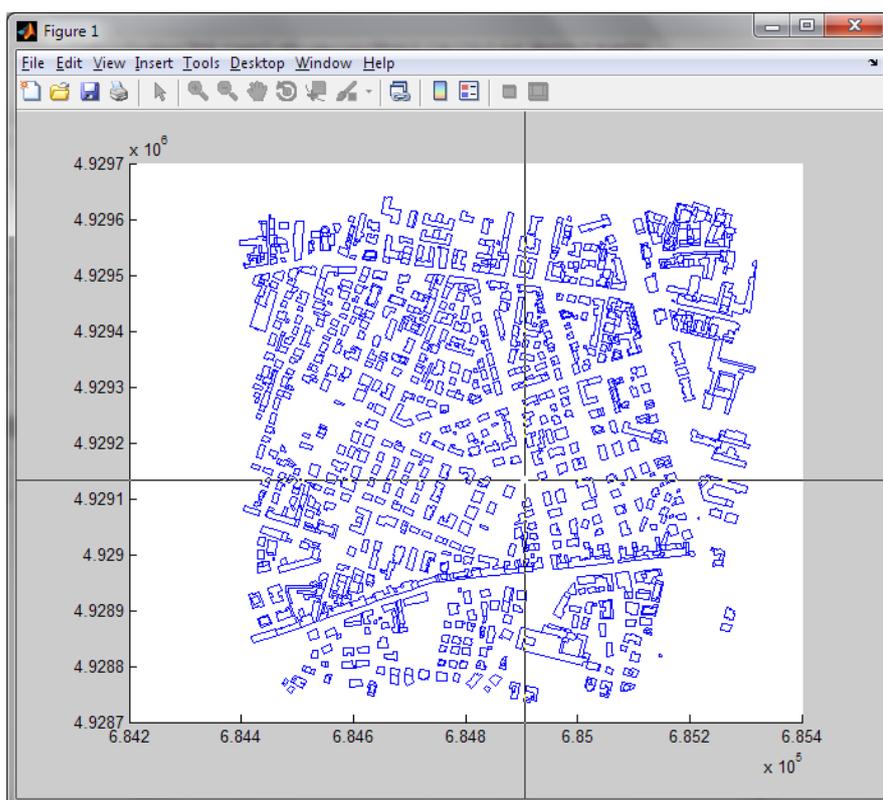


Figura 4.1. Nuova finestra con il plot dello *shapefile*.

b) *Selezione del punto di calcolo*

Il comando `ginput` permette di selezionare manualmente tramite una selezione del mouse il punto di calcolo sul disegno del file vettoriale (Figura 4.1). Altrimenti per fornire le coordinate è necessario dare manualmente un comando nella *shell* del programma del tipo $x_{SVF} = 684500$ per la coordinata Est e $y_{SVF} = 4929400$ per la coordinata Nord; in questo caso lo *script* nella fase di avvio chiederà se usare il punto precedentemente caricato oppure selezionarne uno nuovo tramite un menù di selezione (Figura 4.2)



Figura 4.2. Schermata di selezione punto di calcolo.

c) Identificazione quota del punto di calcolo

La quota di calcolo dello *Sky View Factor* nel punto selezionato è estrapolata automaticamente dalla tabella degli attributi dello *shapefile*: se le coordinate selezionate ricadono all'interno di un poligono significa che punto oggetto di calcolo fa parte della copertura di un edificio (per cui viene selezionata la quota di gronda del poligono corrispondente), altrimenti significa che è stato scelto un punto sul terreno (per cui sarà estratta la quota al piede dell'edificio più vicino). Il comando `inpolygon` è di fondamentale importanza in questo caso, poiché riesce a determinare se le coordinate selezionate ricadano o meno nell'area di un poligono chiuso.

d) Discretizzazione dei poligoni

Durante la stesura di questo *script* (Appendice A.2) è emersa la necessità di aumentare il numero di punti che delimitano il perimetro di un edificio per ottenere un valore dello *Sky View Factor* più accurato. Per ottenere ciò è stata creata una funzione apposita che interpone nuovi punti sul perimetro del poligono. L'effetto è mostrato in Figura 4.3 e Figura 4.4 su un singolo edificio.

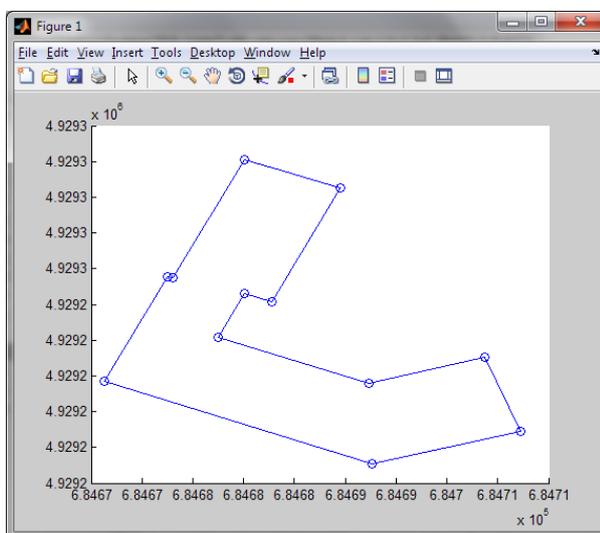


Figura 4.3. Vertici del poligono.

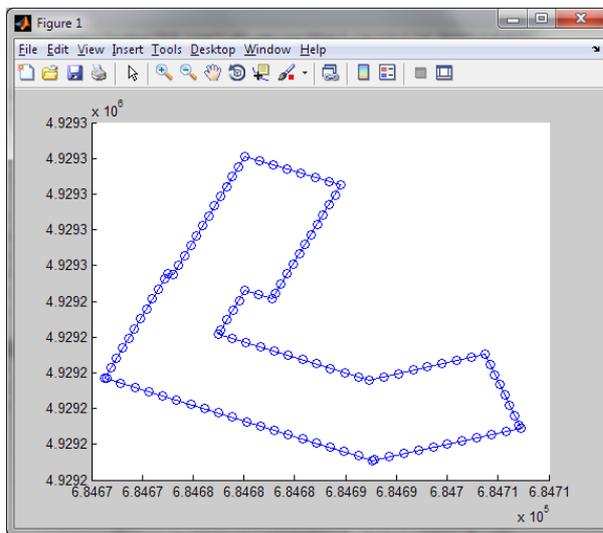


Figura 4.4. Nuovi vertici aggiunti con il comando discretizzazione.

La distanza reciproca tra i punti influenza il tempo di calcolo, per cui è un parametro modificabile prima dell'avvio dell'algoritmo. La distanza consigliata per non incrementare eccessivamente il peso computazionale e ottenere buoni risultati è compresa tra 1.5 e 2 metri. In Figura 4.5 e Figura 4.6 si anticipa l'effetto della discretizzazione dei poligoni sulla proiezione stereografica finale: il caso riportato localizzato nel punto in figura è estremo, ma l'assenza di punti intermedi può causare una sottostima della porzione di cielo visibile.

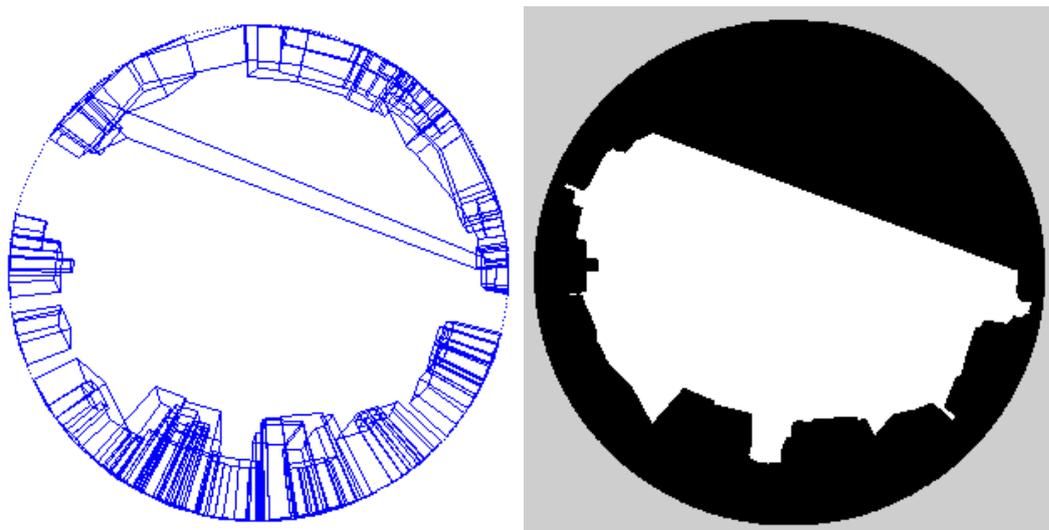


Figura 4.5. Proiezione stereografica senza discretizzazione.

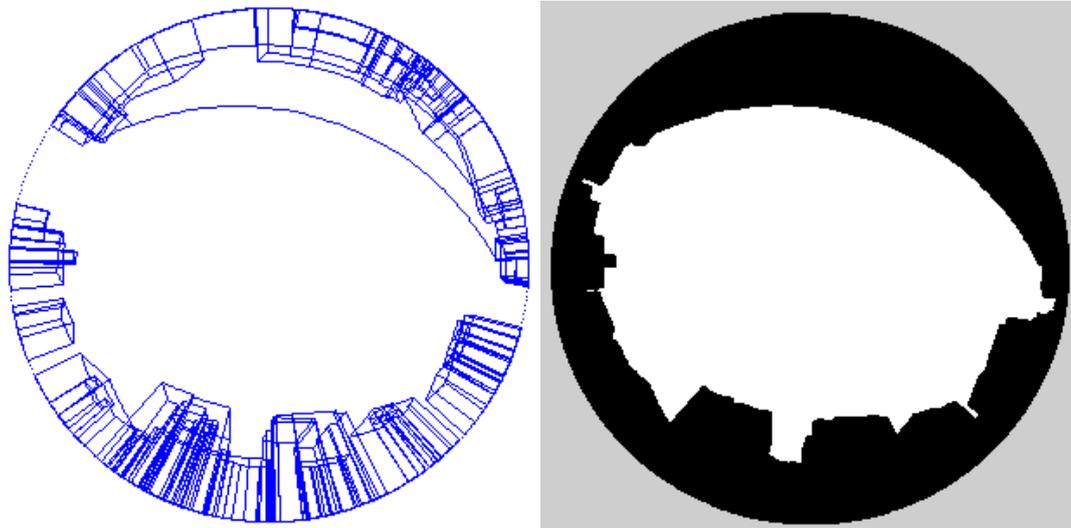


Figura 4.6. Proiezione stereografica con discretizzazione

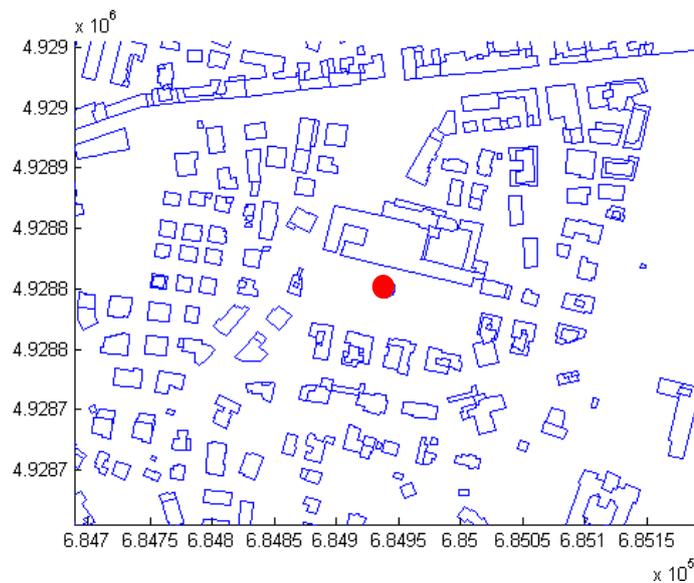


Figura 4.7. Localizzazione del punto di calcolo per l'esempio di discretizzazione.

e) Selezione degli edifici sopra un angolo di elevazione minimo

Questa fase mira a ridurre il numero complessivo di poligoni da sottoporre alla creazione della proiezione stereografica, alleggerendo il calcolo complessivo. Viene quindi effettuata una ricerca selettiva degli edifici da inserire nella computazione in base alla distanza dal punto: come primo passo, entro un raggio di ricerca da impostare all'inizio del calcolo, si esegue una selezione di tutti i poligoni con angolo di elevazione superiore a zero. All'esterno di questo raggio, si andrà ad includere nel calcolo solo gli edifici con un angolo di elevazione pari o superiore a un valore minimo impostabile come parametro iniziale; per file vettoriali di ampie dimensioni, impostare quest'angolo di elevazione pari a 7-9° si traduce in un tempo di calcolo ridotto almeno del 30%, con un errore trascurabile nella stima dello *Sky View Factor*.

f) Creazione della proiezione stereografica

Seguendo il metodo applicato da Souza et al. (2003) nell'algoritmo di calcolo dell'estensione per *ArcView GIS*, è stata scritta una funzione (Appendice A.3) deputata alla creazione in proiezione stereografica delle pareti appartenenti agli edifici selezionati sopra l'angolo di elevazione minimo. Il processo consiste nel calcolo di un nuovo set di coordinate associate ad un sistema di riferimento piano contenuto nel piano equatoriale dell'emisfero di riferimento centrato nel punto di calcolo, secondo le formule della proiezione stereografica (vedi paragrafo 2.3.1 - 3DSkyView extension per ArcGIS (Souza et al. 2003)). Nella Figura 4.8 è illustrato un esempio di proiezione stereografica per due edifici

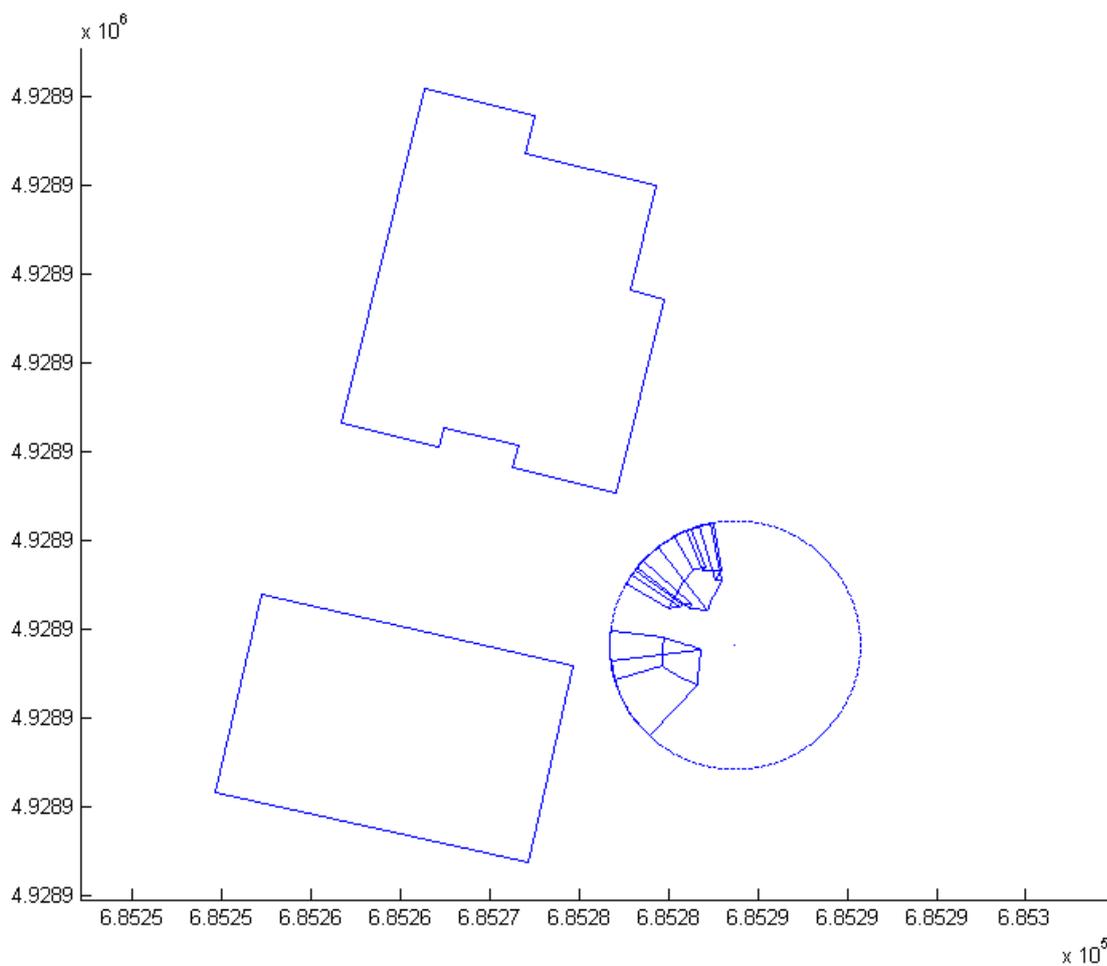


Figura 4.8. Esempio di proiezione stereografica per due edifici.

g) Creazione dell'immagine fisheye

Come ultimo passaggio per la formazione dell'immagine che simula l'effetto di una lente *fisheye*, si applica una *patch* di colore nero alle pareti in proiezione, rendendo così netta la linea di demarcazione dell'orizzonte visibile da un punto. Il risultato è mostrato un Figura 4.9.

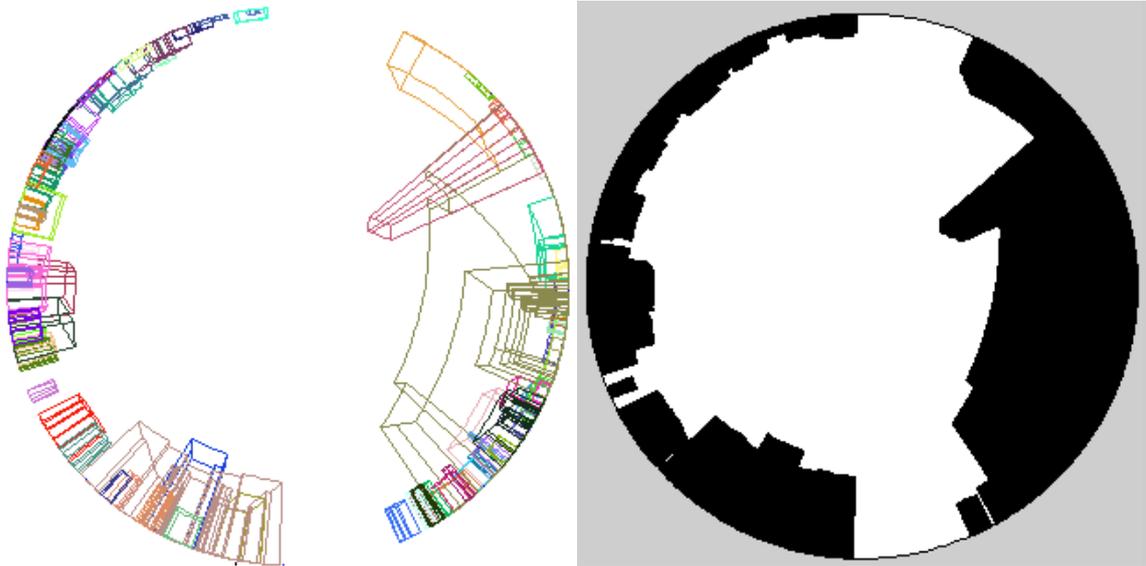


Figura 4.9. Applicazione *patch* di colore nero alla proiezione stereografica.

4.1.2 *Calcolo dello Sky View Factor*

a) Creazione immagine anelli concentrici

Per determinare il valore dello *SVF* avendo a disposizione la proiezione *fish-eye* della scena, si applica un metodo derivato dalle tecniche fotografiche di Steyn (1980). La prima fase consiste nella creazione di una serie di anelli concentrici di riferimento, successivamente trasformati in proiezione stereografica per adattare a questo caso il metodo di Steyn (1980); quest'ultimo infatti è riferito ad una proiezione equiangolare con anelli ad intervalli di raggio costanti. Nella proiezione stereografica invece gli anelli sono proiettati dall'emisfero alla circonferenza con intervalli di angolo azimutale costanti. Un esempio con anelli ogni 15° è riportato in Figura 4.10, ma visto che secondo le fonti di letteratura per ottenere una stima precisa dello *SVF* è necessario usarne un numero più elevato (almeno 36), per cui durante il calcolo ne verranno considerate 60, con intervallo azimutale di $1,5^\circ$ (Figura 4.11).

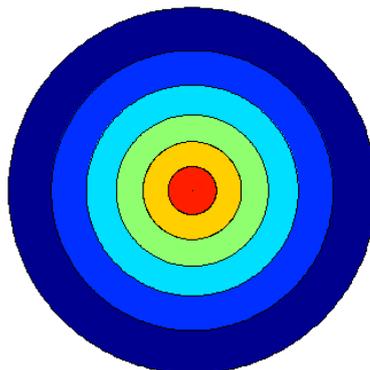


Figura 4.10. Anelli per il calcolo dello Sky View Factor con il metodo fotografico di Steyn (1980).

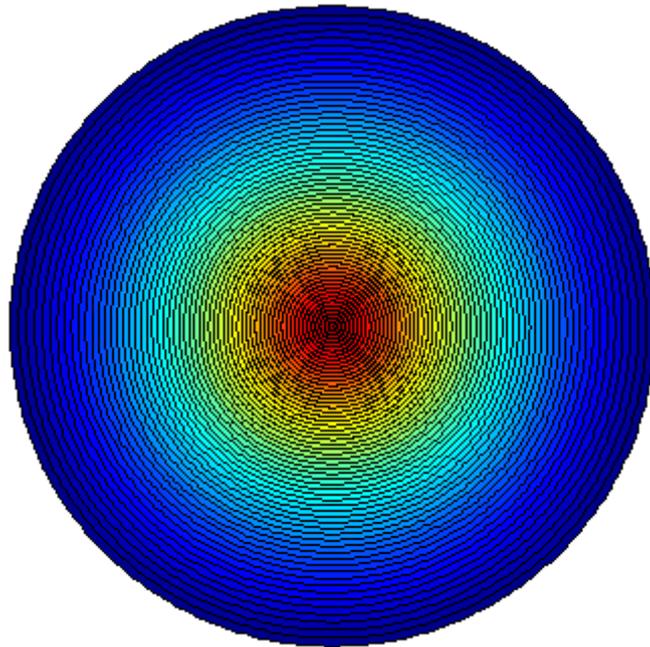


Figura 4.11. Anelli con intervallo azimutale di 1.5° per il calcolo dello Sky View Factor con il metodo fotografico di Steyn (1980).

b) Conteggio dei pixel

Per ottenere il conteggio complessivo dei pixel all'interno di ogni anello, è stata assegnata una mappa di colore *RGB* con blu e verde nulli, mentre il rosso è stato impostato con un numero di sfumature pari al numero degli anelli. In questo modo, dopo aver convertito in matrice l'immagine, il conteggio dei pixel sarà semplificato: gli elementi della matrice interni all' i -esimo anello avranno un valore pari all'indice i dell'anello stesso.

c) Sovrapposizione ostacoli agli anelli

All'immagine della proiezione equiangolare è applicata una mappa di colore in modo che dalla conversione in matrice si ottenga un valore degli elementi pari a 1 per i pixel appartenenti al cielo ed un valore nullo per i pixel che contrassegnano gli ostacoli. Per la sovrapposizione tra l'immagine fisheye e gli anelli si esegue una moltiplicazione tra matrici, elemento per elemento. Il risultato è mostrato in Figura 4.12 e Figura 4.13.

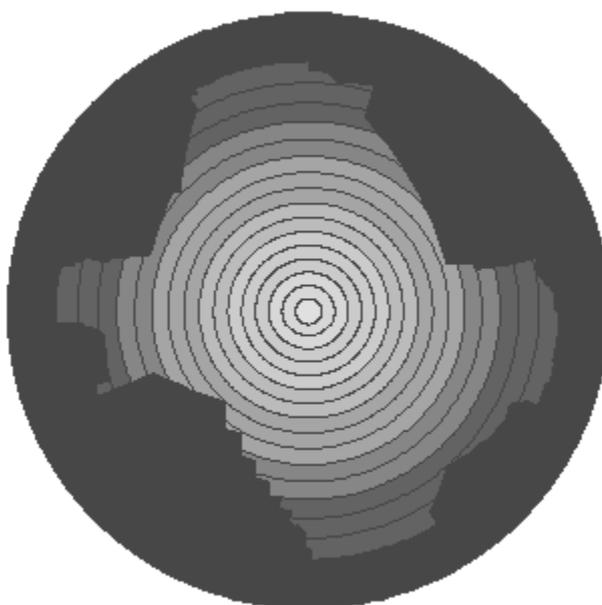


Figura 4.12. Sovrapposizione degli ostacoli agli anelli (intervallo azimutale 6°).

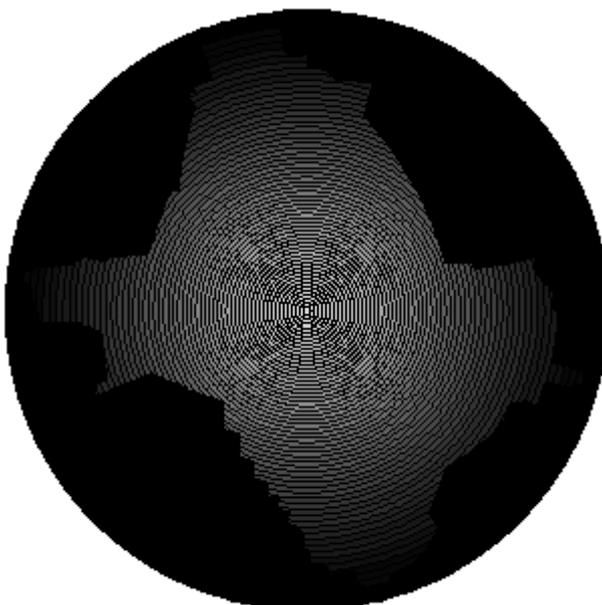


Figura 4.13. Sovrapposizione degli ostacoli agli anelli (intervallo azimutale 1.5°).

d) Valore dello Sky View Factor

Per il calcolo si adotta la formula di BROWN et al (2001), derivata dal metodo di Steyn e già utilizzata per la determinazione dello *SVF* in immagini *fish-eye* scattate con fotocamera digitale (1980), che utilizza un ciclo ripetuto per il calcolo dello *SVF* parziale di ogni anello *i*-esimo secondo la seguente formula:

$$SVF_i = \sin\left(\frac{\pi(2i - 1)}{2n}\right) \alpha_i$$

dove:

i = indice dell' i -esimo anello

n = il numero degli anelli

α_i = l'estensione angolare della porzione di cielo visibile per ogni anello.

Avendo noto il numero di pixel appartenenti al cielo ($pixel_{cielo}$) ed i pixel totali dell' i -esimo anello, è stato determinato α_i con la formula:

$$\alpha_i = \frac{pixel_{cielo}}{pixel_{tot}} 2\pi$$

Lo *Sky View Factor* del punto è quindi calcolato tramite l'equazione:

$$SVF = \frac{1}{2\pi} \sin \frac{\pi}{2\pi} \sum_{i=1}^n SVF_i$$

4.2 Applicazione e confronto con altri software

Per valutarne la validità, lo script è stato applicato sia sui 4 siti caratteristici all'interno della zona di calcolo (definiti nel Capitolo 3) e contraddistinti da caratteri morfologici salienti, che per i 2 casi ideali (il centro di una conca circolare e la mezzeria di un canyon di lunghezza infinita) con l'obiettivo di confrontare i modelli con il valore ideale offerto dal metodo analitico di Oke (1987).

Nella Figura 4.14 sono presentati i valori ottenuti per i siti caratteristici, mostrati in proiezione stereografica in Figura 4.15 e Figura 4.16.

	SVF MATALB
Sito 1 (piazza)	0.8321 (x=685111.6098 y=4929463.491)
Sito 2 (tetto)	0.7871 (x=685159.4301 y=4929573.467)
Sito 3 (tetto)	0.9993 (x=684477.0217 y=4929062.722)
Sito 4 (canyon)	0.4247 (x=684651.4369 y=4928912.83)

Figura 4.14. Sky View Factor in corrispondenza dei siti caratteristici dell'area di studio.

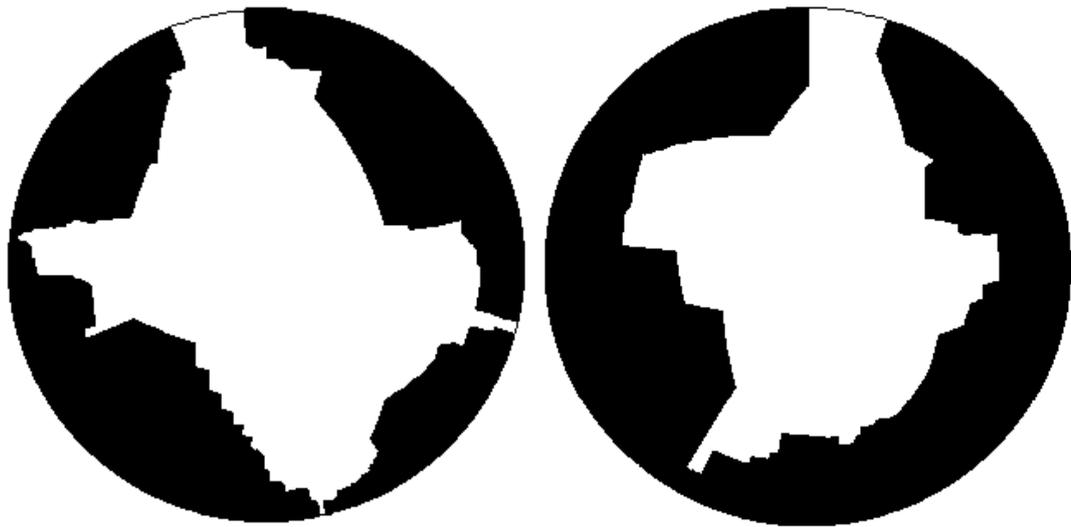


Figura 4.15. Proiezione stereografica fisheye per i siti 1 e 2.

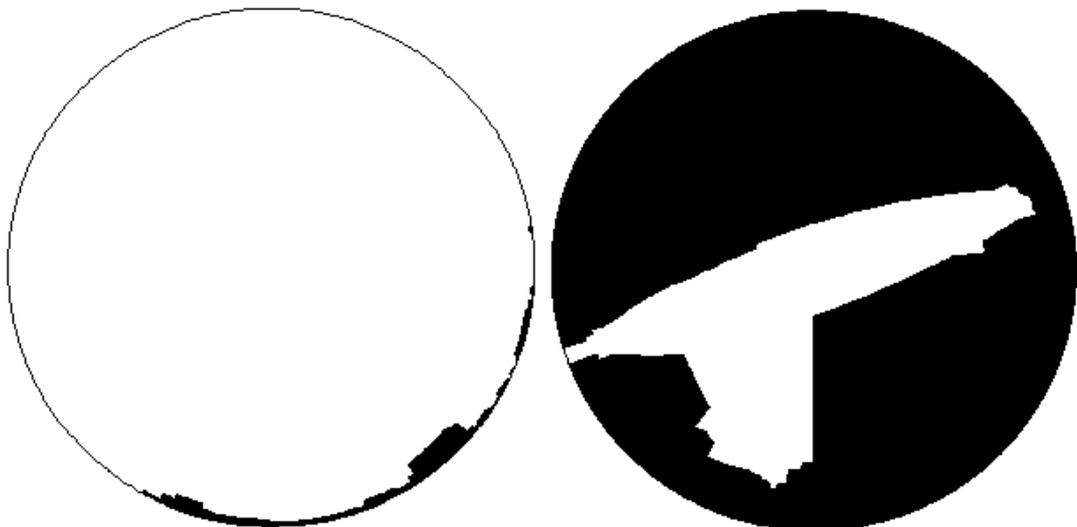


Figura 4.16. Proiezione stereografica fisheye per i siti 3 e 4.

	Analitiche				Vettoriale
	H	W/2	H/W	SVF Oke	SVF MATLAB
Canyon	24	12	1	0.447	0.437
Basin	24	12	1	0.2	0.195

Figura 4.17. *Sky View Factor* per i casi notevoli.

	Scarti MATLAB-ArcGIS	Scarti MATLAB-SOLWEIG
Sito 1	0.012	0.033
Sito 2	-0.003	0.048
Sito 3	0	0.006
Sito 4	-0.017	0.092
Media	-0.002	0.0447

Figura 4.18. Scarti con i software più affidabili

L'analisi degli scarti di Figura 4.18 rispetto ai valori ottenuti dai software ritenuti più affidabili (ovvero l'estensione per *ArcGIS* per dati vettoriali e il software *SOLWEIG* con *DSM* a 0.5 metri per i dati raster) confermano l'affidabilità del metodo di calcolo adottato in questo algoritmo. Lo *script* è tutt'ora in fase di sviluppo, principalmente con l'obiettivo di ridurre sensibilmente i tempi computazionali, che attualmente sono confrontabili con quelli dei metodi già esistenti rinvenuti in letteratura.

Conclusioni

Durante il lavoro di tesi è stato esaminato un ampio numero di metodologie sviluppate per il calcolo dello *Sky View Factor*, ognuna con i propri vantaggi e svantaggi; non è emersa una tecnica standard approvata globalmente, sebbene il metodo fotografico di Steyn e le formule analitiche di Oke siano stati adottati come riferimenti di fatto per il controllo della validità dei numerosi software di mappatura. Questi ultimi, che hanno gradualmente sostituito negli ultimi 10 anni le tecniche fotografiche estendendo il calcolo del valore dello *Sky View Factor* da contesti puntuali ad ampie superfici urbane, sono classificabili in due categorie principali a seconda del tipo di informazione geometrica utilizzata come input all'interno nell'algoritmo di calcolo, che può essere un database vettoriale degli edifici oppure un modello digitale delle superfici in formato raster.

Una base cartografica vettoriale aggiornata rappresenta, apparentemente, l'opzione migliore per limitare l'incertezza nella stima dello *Sky View Factor* di un'ampia superficie urbana, ma l'elevatissima durata della computazione che caratterizza questa tipologia di calcolo rende impraticabile l'utilizzo della tecnica in molti casi; per piccole aree di studio ed in assenza, ovviamente, di alberature urbane o altri ostacoli non registrati all'interno del database vettoriale, la base cartografica può essere utilizzata con profitto, ad esempio nella stima del fattore di vista sulle superfici dei tetti, dove l'influenza della vegetazione è marginale, ottenendo precisioni molto elevate. I risultati dello *script*, (visionabile in Appendice A) creato tramite il linguaggio di programmazione *MATLAB*, confermano un considerevole tempo di calcolo ma allo stesso tempo un'elevata precisione nella stima del fattore di vista del cielo

E' stato ricordato che i modelli digitali delle superfici (*DSM*), rappresentando congiuntamente sia l'elevazione del terreno che quella degli oggetti posti su di esso, consentono di calcolare lo *Sky View Factor* riferendosi alla superficie effettiva, mentre con il dato vettoriale cartografico classico l'informazione è limitata: oltre a mancare alcuni componenti del paesaggio (vegetazione, ecc.) la rappresentazione della quota del terreno, quando presente, è meno accurata rispetto ai *DSM*. Se si escludono i più accurati *3D City Model*, che consistono in una rappresentazione dettagliata della realtà in forma vettoriale, nel caso dei file in formato *shapefile* utilizzati in questo studio ogni edificio è semplicemente rappresentato tramite poligoni tridimensionali di forma semplice con facce

inferiori e superiori ad elevazione costante. La recente disponibilità di modelli di superfici ad alta risoluzione, realizzati con tecniche quali l'aerofotogrammetria ed il metodo *LIDAR aerotrasportato*, permettono di ottenere dati di elevazione ad alta precisione su ampie aree, offrendo l'opportunità di stimare valori dello *Sky View Factor* confrontabili con quelli ottenibili tramite formule analitiche e tecniche fotografiche. Naturalmente, per ottenere un valore attendibile dello *SVF* è necessaria una conoscenza teorica della sua definizione nonché un'abilità pratica nell'utilizzo dei software.

In sintesi, i vantaggi dei metodi che sfruttano i modelli digitali della superficie in formato raster risiedono nella velocità di calcolo (mediamente 10 volte più rapidi delle tecniche vettoriali), nella migliore rappresentazione dell'andamento altimetrico e nell'inclusione di una maggiore quantità di ostacoli, oltre agli edifici, che possono influenzare lo *SVF*.

Nel corso di questo studio, sono emersi due software particolarmente affidabili e, al contempo, veloci: *SOLWEIG* di Lindberg et al. (2008) e un'estensione sviluppata per *ENVI* di Zakšek et al. (2011), entrambi basati su *DSM*.

Il modello di Lindberg et al. (2008), una versione migliorata dell'algoritmo di proiezione delle ombre di Ratti e Richens (1999), secondo diversi ricercatori risulta uno degli applicativi più affidabili per la mappatura dello *Sky View Factor*. La peculiarità dell'algoritmo di Zakšek et al. (2011) invece consiste nell'offrire tempi computazionali di pochi minuti per km² (2 ordini di grandezza inferiori a quelli ottenibili con *SOLWEIG*) grazie alle caratteristiche del suo modello di calcolo che opera la computazione dello *SVF* per piccole porzioni di *DSM*, al costo di una leggera sottostima dello *Sky View Factor* in alcuni contesti morfologici (in particolare quelli con fattore di vista del cielo medio - basso). L'estensione per *ENVI* ed il software *SOLWEIG* possono essere usati in modo congiunto profittevolmente: il primo sfruttato per un'indagine veloce, mentre il secondo per ottenere risultati più accurati ma con tempi di calcolo superiori.

Bibliografia

ANDERSON MC (1964) Studies of the woodland light climate. *J. Appl. Ecol.* 52:27-41.

BOTTYÁN Z, UNGER J (2003) A multiple linear statistical model for estimating the mean. *Theor. Appl. Climatol.* 75:233–243.

BRADLEY AV, THORNES JE, CHAPMAN L (2001) A method to assess the variation of urban canyon geometry from sky view factor transects. *Atmospheric Science Letters* 2:155–165.

BRIVIO PA, LECHI G, ZILIOLI E (2006) *Principi e metodi di Telerilevamento*. Città Studi Edizioni.

BROWN MJ, GRIMMOND CSB, RATTI C (2001) Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environment. Internal Report Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-01-4107.

CHAPMAN L, THORNES JE (2004) Real-time sky-view factor calculation and approximation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 21:730–741.

CHAPMAN L, THORNES JE, BRADLEY AV (2001) Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. *International Journal of Climatology* 22:615–621.

CHAPMAN L, THORNES JE, BRADLEY AV (2002) Sky-view factor approximation using GPS receivers. *International Journal of Climatology* 22:615–621.

ESRI Shapefile Technical Description (1998) An ESRI White Paper.

FURUTI CA (1997) Map projections: summary.

www.progonos.com/furuti/MapProj/Dither/ProjTbl/projTbl.html

GÁL T, LINDBERG F, UNGER J (2008) Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theor Appl Climatol* 95:111-123.

GÁL T, RZEPA M, GROMEK B, UNGER J (2007) Comparison Between Sky View Factor Values Computed By Two Different Methods In An Urban Environment. *Acta Climatologica Et Chorologica* 17-26.

GÁL T, LINDBERG F, UNGER J (2009) Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theor Appl Climatol* 95:111-123.

SANTOS IG, LIMA HG, ASSIS ES (2003) A comprehensive approach of the sky view factor and building Mass in an urban area of the City of Belo Horizonte, Brazil. The Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

GRIMMOND CSB, POTTER SK, ZUTLER HN, SOUCH C (2001) Rapid methods to estimate sky view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology* 21:903–913.

HÄMMERLE M, GÁL T, UNGER J, MATZARAKIS A (2011) Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theor Appl Climatol* 105:521–527.

HÄMMERLE M, GÁL T, UNGER J, MATZARAKIS A (2011) Introducing a script for calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Acta Climatologica Et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 44-45:83-92

HOLMER B (1992) A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs. *Meteorologische Zeitschrift*, N.F. 1:236–239.

HOLMER B, POSTGÅRD U, ERIKSSON M (2001) Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology* 68:33–40.

JOHNSON GT, WATSON ID (1984) The determination of view-factors in urban canyons. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:329-335.

JOHNSON GT, WATSON ID (1985) Calculating view-factors using video imagery. School of Mathematics and Physics, Macquarie University. Tech. Rep. No. 85-10:25.

KASTENDEUCH PP (2013) A method to estimate sky view factors from digital elevation models. *Int. J. Climatol.* 33:1574–1578.

KREITH F (1965) *Principles of Heat Transfer*, 2nd edition. International Textbook Company. 620.

LI W (2005) Using sky view factor as an indicator for gis-based analysis. A thesis submitted for the degree of master of arts (architecture). Department of architecture. School of design and environment. National university of Singapore.

LI W, PUTRA SY, YANG PPJ (2004) GIS Analysis for the Climatic Evaluation of 3D Urban Geometry. 7th International Conference on GIS for Developing Countries (GISDECO 2004), University Teknologi, Johor Malaysia.

LINDBERG F (2004) Towards the use of local governmental 3-D data within urban climatology studies. *Mapping and Image Science* 2:4–9.

LINDBERG F, GRIMMOND CSB (2010) Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models. *Climate research* (Open Access for articles 4 years old and older) 42.3:177.

LINDBERG F, THORSSON S, HOLMER B (2008) SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *Int J Biometeorol* 52:697-713.

MANLEY G (1958) On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society* 84:70-72.

MATZARAKIS A (2012) RayMan and SkyHelios Model - Two Tools for Urban Climatology. *Fachtagung des Ausschusses Umweltmeteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft*. Leipzig. 5:1-6

MATZARAKIS A (2012) Linking urban micro scale models - The models RayMan and SkyHelios. *ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates*, UCD, Dublin Ireland.

MATZARAKIS A, MATUSCHEK O (2009) Estimation of Sky View Factor in urban environments. METTOOLS VII, Hamburg.

MATZARAKIS A, MATUSCHEK O (2011) Sky View Factor as a parameter in applied climatology – Rapid estimation by the SkyHelios Model. Meteorologische Zeitschrift 20:39-45.

MATZARAKIS A, RUTZ F, MAYER H (2007) Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. Int. J. Biometeor. 51:323–334.

MATZARAKIS A, RUTZ F, MAYER H (2010) Modeling radiation fluxes in simple and complex environments – basics of the RayMan model. Int J Biometeorol 54:131-139.

NUNEZ M, OKE TR (1977) The Energy Balance of an Urban Canyon. Journal of Applied Meteorology 16:11 19.

OKE TR (1981) Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. Journal of Climatology 1(1-4):237-254.

RATTI CF (1999) Urban analysis for environmental prediction. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Cambridge Department of Architecture. 5:95-135

RATTI CF, RICHENS P (1999) Urban texture analysis with image processing techniques. Proceedings of the CAAD Futures 99, Atlanta, GE.

RATTI CF, RICHENS P (2004) Raster analysis of urban form. Environ Plann B 31:297–309

REFSCHNEIDER WE (1967) Radiation geometry in the measurement and interpretation of radiation balance. Agric. Meteor. 4:255-265.

RICHENS P (1997) Image processing for urban scale environmental modelling. Proc 5th International IBPSA Conference: Building Simulation 97. University of Bath 163-171.

RZEPA M, GROMEK B (2006) Variability of sky view factor in the main street canyon in the center of Łódź. Preprints Sixth Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden. 854-857.

SOLWEIG User manual for version 2. Urban Climate Group. Department of Earth Sciences. University of Gothenburg . Sweden (2011).

SOUZA LCL, PEDROTTI FS, LEME FT (2004) Urban geometry and electrical energy consumption in a tropical city. Proceedings Fifth Conference on Urban Environment, AMS Meeting, Vancouver, CD 4.10.

SOUZA LCL, RODRIGUES DS, MENDES JFG (2003a) The 3DSkyView extension: an urban geometry access tool in a geographical information system. Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate, Vol. 2, University of Lodz, Lodz, Poland 413–416.

SOUZA LCL, RODRIGUES DS, MENDES JFG (2003b) A 3d-gis extension for sky view factors assessment in urban environment.

SOUZA LCL, RODRIGUES DS, MENDES JFG (2003c) Sky view factors estimation using a 3d-gis extension. Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands 1227-1234.

SOUZA LCL, RODRIGUES DS AND MENDES JFG (2003) The 3DSkyView extension: an urban geometry access tool in a geographical information system, in K. Klysik, T.R. Oke, K. Fortuniak, C.S.B. Grimmond and J. Wibig (Eds). Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate, Vol. 2, University of Lodz, Lodz, Poland 413–416.

STEYN DG (1980) The calculation of view factors from fisheye-lens photographs. Atmosphere-Ocean 18(3):254-258.

STEYN DG, WATSON ID, JOHNSON GT, AND HAY JE (1986) The determination of sky-view factors in urban environments using video imagery. Journal of Atmospheric Oceanic Technology 3:759–764.

TOUPS KA (1965) A general computer program for the determination of radiant interchange configuration and form factors - CONFAC I. North American Aviation Inc., Space and Information Systems Division SID 65-1043-1 169.

UNGER J (2004) Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Res* 27:253-264.

UNGER J (2009) Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Int. J. Environment and Pollution* 36:59-80.

WATSON D, JOHNSON GT (1987) Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology* 7:193–197.

WOOD RW (1911) *Physical Optics*. The Macmillan Company, New York. 66-68.

ZAKŠEK K, OŠTIR K, KOKALJ Z (2011) Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sens.* 3:398-415.

Appendice A

Script *MATLAB* per il calcolo della proiezione equiangolare e dello *Sky View Factor* a partire da una cartografia vettoriale degli edifici in formato *shapefile*.

A.1 SCRIPT PRINCIPALE

```
%% INTERFACCIA PER CARICARE LO SHAPEFILE
%cancella tutte le variabili tranne il nome del file e le coordinate del
%punto di calcolo per determinare lo SVF eventualmente nello stesso punto

close all;

clearvars -except nome percorso xSVF ySVF;
exist nome;
%se non esiste il nome del file allora apre finestra per caricarlo
if ans==0
    clear all;
    [nome,percorso]=uigetfile('.shp');
%se la variabile con il nome del file esiste ma è nulla allora apre nuova
%finestra per caricarlo
elseif ans==1 & nome==0
    clear all;
    [nome,percorso]=uigetfile('.shp');
else
end

%% INPUT DI BASE

% RAGGIO DELLA PROIEZIONE EQUIANGOLARE (da aumentare se la proiezione
% finale presenta delle incongruenze)
r=70; %metri
% PRECISIONE PROIEZIONE DISCRETIZZAZIONE LATI
dist=1.5; %metri
% ANGOLO ELEVAZIONE MINIMO
angolo_elevazione=1*(pi/180);
%RAGGIO DI RICERCA DI MASSIMA PRECISIONE
dist_aggiunta=350;
%DISTANZA AZIMUTALE ANELLI STEYN
dist_azi=1.5;

display(' ');display(' ');display(' ');display(' ');display(' ');display(' ');
display('****INPUT DI BASE**** ');
display(' ');
display('Precisione della proiezione equiangolare, ovvero la lunghezza dei
segmenti');
display('in cui sono discretizzati i lati dei poligoni.');
```

```
disp(dist);
display('Angolo di elevazione minimo sotto al quale gli edifici più lontani');
```

```

display('della distanza di massima precisione verranno esclusi dal calcolo');
disp(angolo_elevazione*(180/pi));
display('Raggio di ricerca di massima precisione entro cui si considerano ');
display('gli edifici con angolo di elevazione maggiore di zero');
disp(dist_aggiunta);
display('Distanza azimutale anelli di Steyn per il calcolo dello Sky View
Factor');
disp(dist_azi);

```

```

display('DIGITA 1 per modificarli altrimenti premi INVIO');
display(' ');
set = input('...');
display(' ');
display(' ');
display(' ');
display(' ');
if set==1
display('Digita la precisione della proiezione equiangolare [metri]');
dist= input('Precisione (2 metro consigliato): ');
    display(' ');
    display(' ');
display('Digita angolo di elevazione minimo [deg]');
angolo_elevazione = input('Angolo (consigliato 3 gradi): ');
angolo_elevazione = angolo_elevazione*(pi/180);
    display(' ');
    display(' ');
display('Digita distanza di massima precisione [metri]');
dist_aggiunta= input('Distanza max precisione (consigliato 250 metri): ');
    display(' ');
    display(' ');
display('Digita distanza azimutale anelli di Steyn [deg]');
dist_azi= input('Angolo (3 è appropriato): ');
    display(' ');
    display(' ');
else
end

```

```

%% APERTURA FILE VETTORIALE: LEGGE LE COORDINATE X,Y E LE PLOTTA

```

```

display('Plot del file in corso...');
%apre shapefile e crea delle strutture per gli attributi dei poligoni
%le variabili sono quelle impostate all'inizio dello script
[q,w]=shaperead([percorso nome]);

```

```

% "q" è un array di strutture contenete le coordinate di ogni vertice
% "w" contiene la tabella degli attributi di ogni poligono

```

```

%depura la struttura dagli edifici con quote nulle

```

```

numero=numel(q);
quota_non_nulla=1;
for edificio=1:numero
    if w(edificio).QUOTA_P>0
        s(quota_non_nulla)=q(edificio);
        a(quota_non_nulla)=w(edificio);
        quota_non_nulla=quota_non_nulla+1;
    else
end

```

```

end

```

```

%plotta tutti gli edifici
for edificio=1:numel(s)
    %legge la struttura alla riga relativa all'edificio per ricavare le
    %coordinate cartesiane dei vertici incluse negli array X e Y
    %(esempio: la coordinata del primo punto sarà X(1), Y(1))
    X_semplice=s(edificio).X;
    Y_semplice=s(edificio).Y;

    dim=numel(X_semplice)-1; %toglie l'ultima cella che è sempre NaN

    line (X_semplice, Y_semplice);
end

%% PUNTO DI CALCOLO SVF (INPUT)

%se il valore xSVF esiste allora fornisce ans=1
exist xSVF;

%chiede se vuoi usare lo stesso punto SVF del calcolo precedente o
%cambiarlo
if ans==1
    menu('Punto di calcolo SVF', 'Usa il punto precedente', 'Usa un nuovo
punto');
    if ans==2
        %selezione manuale del punto di calcolo sulla carta
        [xSVF, ySVF]= ginput(1);
        daspect([1 1 1])
    else
        end
else

%funzione per selezionare manualmente punto di calcolo con mouse
    [xSVF, ySVF]= ginput(1);
    daspect([1 1 1])

end

%% DEFINISCE SE È STATO SELEZIONATO UN EDIFICIO OPPURE IL TERRENO, QUINDI
%% ASSEGNA zSVF alla quota al piede o di gronda

for edificio=1:numel(s)

    X_semplice=s(edificio).X;
    Y_semplice=s(edificio).Y;

    %crea un vettore di zeri con dimensione pari agli edifici controllati
    % e se trova che il punto SVF è dentro un edificio mette pone un valore
    %1, altrimenti sono tutti zeri
    vettore_ricerca(edificio)=inpolygon (xSVF, ySVF, X_semplice, Y_semplice);

end

```

```

%ciclo che crea un array con 2 righe: nella prima la distanza "segmento"
%tra il punto e tutti i punti del file.
%nella seconda il numero di edificio per ogni segmento
search=1;
for edificio=1:numel(s)

    X_semplice=s(edificio).X;
    Y_semplice=s(edificio).Y;

    for i=1:numel(s(edificio).X)-1

        DX=s(edificio).X(i)-xSVF;
        DY=s(edificio).Y(i)-ySVF;
        segmento(1,search)=sqrt(DX^2 + DY^2);
        segmento(2,search)=edificio;
        search=search+1;
    end
end

%se il vettore_ricerca è tutto nullo allora è stato selezionato un punto
%del terreno, quindi la quota zSVF è posta pari alla quota al piede QUOTA_P
%dall'edificio più vicino al punto selezionato
if sum(vettore_ricerca)==0
    %cerca il vertice più vicino per assegnare al punto di calcolo dello
    %SVF la quota al piede dello stesso edificio
    vertice_vicino=find(segmento(1,:)==min(segmento(1,:)));

    %edificio selezionato per il calcolo della quota:
    min_edificio=segmento(2,vertice_vicino(1));
    zSVF=a(min_edificio(1)).QUOTA_P;
    tetto=0;

% se presente un elemento unitario nel vettore ricerca significa che il
% punto è all'interno di un poligono
elseif sum(vettore_ricerca)==1
    poligono=find(vettore_ricerca==1);
    zSVF=a(poligono).QUOTA_G;
    tetto=1;

end

%plotta il punto dello SVF
%line(xSVF,ySVF,zSVF);

%% NUOVE COORDINATE X,Y,Z DEI LATI DEGLI EDIFICI CON UNA MAGGIORE QUANTITA'
%% DI PUNTI RICAVATI TRA I VERTICI CHE RENDERA' LA PROIEZIONE FISHEYE PIU'
%% ADERENTE ALLA REALTA'

display(' ');
display(' ');
display('Discretizzazione file in corso...');

for edificio=1:numel(s)

    S(edificio)=FUNZIONE_DISCRETIZZAZIONE_LATI(edificio,s,a,dist);

end

```

```

display(' ');
display(' ');
display('Inizio calcolo proiezione FISHEYE...');

close all

%% CREA UNA MATRICE DI PIXEL COMPOSTA DA ANELLI CONCENTRICI IN PROIEZIONE
%% STEREOGRAFICA PER ASSECONDARE L'EFFETTO DI QUESTO SCRIPT NELLA
%% NELLA SIMULAZIONE DI IMMAGINE FISHEYE IN PROIEZIONE STEREOGRAFICA

%Per ottenere il conteggio complessivo dei pixel all'interno di ogni anello,
%è stata assegnata una mappa di colore RGB con blu e verde nulli, mentre
%il rosso è stato impostato con un numero di sfumature pari al numero
%degli anelli. In questo modo, dopo aver convertito in matrice l'immagine,
%il conteggio dei pixel sarà semplificato: gli elementi della matrice
%interni all'i-esimo anello avranno un valore pari all'indice i dell'anello
%stesso.

figure

%definisce un delta zenit (creare effetto stereografico)
delta_ZENIT= dist_azi;
n=90/delta_ZENIT;
numero_anelli=n;
%il ciclo è negativo in modo da disegnare prima l'anello più grande poi i
%più piccoli per questioni di disegno
anello=1;
for i=0:n
i=abs(i);

zen= delta_ZENIT*i;
teta=(90-zen)/2;
OB=r*tand(teta);

%disegna il cerchio per ogni anello
for alfa=1:361

xCER_anelli(alfa)=cosd(90-alfa)*OB + xSVF;
yCER_anelli(alfa)=sind(90-alfa)*OB + ySVF;
%line(xCER(i),yCER(i),zCER);

end

%crea una mappa di colore in cui ci sono solo n livelli di rosso in modo
%che ogni anello abbia un valore compreso tra 1 e n
%nota che la mappa è [R G B]
map(anello,:)=[(anello/numero_anelli)*(numero_anelli/256) 0 0];

patch(xCER_anelli,yCER_anelli, i )
anello=anello+1;

end

colormap(map);
daspect([1 1 1]);
axis off
C=getframe; %cattura l'immagine
close all

```

```

raster_anelli=C.cdata;

raster_anelli=double(raster_anelli(:,:,1));

%inizio cronometro
t1=clock;

%% ARRAY CHE CONTIENE LA SELEZIONE DEGLI EDIFICI VISIBILI AL DI SOPRA DI UN
%% MINIMO ANGOLO DI ELEVAZIONE IMPOSTATO ALL'INIZIO
%alleggerisce il calcolo selezionando le X(1) e Y(1) entro un certo angolo di
%elevazione rispetto al punto di calcolo dello SVF, quindi crea una matrice
%con la lista degli edifici da considerare. Inoltre esclude l'edificio che
%eventualmente è stato cliccato per il calcolo dell SVF

% 1) QUESTO PRIMO CICLO AUMENTA LA PRECISIONE CONSIDERANDO GLI EDIFICI CON UN
% ANGOLO DI ELEVAZIONE ALMENO DI ZERO ENTRO UNA DISTANZA MINIMA INDICATA
% COME INPUT
ed=1;
for edificio=1:numel(s)

%se lo SVF è calcolato sul tetto, esclude l'edificio corrispondente
if tetto==1 && poligono==edificio
niente=1;
else
%altrimenti controlla che l'edificio sia nel raggio della distanza
%di max precisione
%la variabile "segmento" contiene tutte le distanze tra il primo
%vertice di ogni edificio ed il punto SVF
zeta=a(edificio).QUOTA_G;
if segmento(edificio)<= dist_aggiunta && zeta> zSVF;
%quindi controlla che l'edificio abbia un'altezza almeno pari
%ad un certo angolo di elevazione BETA, altrimenti lo esclude
Dx=s(edificio).X(1)-xSVF;
Dy=s(edificio).Y(1)-ySVF;
Dz=a(edificio).QUOTA_G-zSVF;
%FUNZIONE DISTANZA OC (cateto adiacente)
OC=sqrt(Dx^2+Dy^2);
%CATETO OPPOSTO CA
CA=Dz;
BETA=atan(CA/OC);
if BETA >= 0
edifici_vicini(ed)=edificio;
ed=ed+1;
else
end
else
end
end
end

%2) questo secondo ciclo seleziona gli edifici con angolo di elevazione maggiore
% di quello impostato

exist edifici_vicini;
if ans==1
ed= numel(edifici_vicini)+1;
else
ed=1
end
end

```

```

for edificio=1:numel(s)

%se lo SVF è calcolato sul tetto, esclude l'edificio corrispondente
if tetto==1 && poligono==edificio
niente=1;
else
%altrimenti seleziona gli edifici al di fuori della distanza
%minima
zeta=a(edificio).QUOTA_G;
if segmento(edificio)> dist_aggiunta && zeta> zSVF;
%quindi controlla che l'edificio abbia un'altezza almeno pari
%ad un certo angolo di elevazione BETA, altrimenti lo esclude
Dx=s(edificio).X(1)-xSVF;
Dy=s(edificio).Y(1)-ySVF;
Dz=a(edificio).QUOTA_G-zSVF;
%FUNZIONE DISTANZA OC (cateto adiacente)
OC=sqrt(Dx^2+Dy^2);
%CATETO OPPOSTO CA
CA=Dz;
BETA=atan(CA/OC);
if BETA > angolo_elevazione
edifici_vicini(ed)=edificio;
ed=ed+1;
else
end
else
end
end
end

t3=clock;

tempo_previsto_max=0.007*numel(edifici_vicini);
tempo_previsto_min=0.005*numel(edifici_vicini);
display 'Tempo previsto massimo secondi: ';
disp(round(tempo_previsto_max)+1);
display 'Tempo previsto minimo secondi: ';
disp(round(tempo_previsto_min)-1);
menu('Continuare?', 'Si', 'No');
if ans==1
else
fine
end

t4=clock;

%% CALCOLO PROIEZIONE EQUIANGOLARE DELLE PARETI VISIBILI DAL PUNTO (xSVF,
%% ySVF, zSVF)

%plotta la circonferenza di raggio "r" del piano circolare della proiezione
for i=1:361;
ang = i*(pi/180);
xCER(i)=sin(ang)*r + xSVF;
yCER(i)=cos(ang)*r + ySVF;
zCER= zSVF;
%line(xCER(i),yCER(i),zCER);
end

```

```

patch(xCER, yCER, 'w');
daspect([1 1 1]);

for edif=1:numel(edifici_vicini)

    display 'Percentuale avanzamento: ';
    disp(round(edif/numel(edifici_vicini)*100));
    %waitbar(edif/numel(edifici_vicini));

    edificio=edifici_vicini(edif);

    numero_pareti=numel(S(edificio).punti_intermedi);

    p=1;
    for nu=1:numero_pareti
        conteggio_punti_parete=S(edificio).punti_intermedi(nu);

        p1=p;
        p2=p1+conteggio_punti_parete+1;

        %creazione delle coordinate per ogni muro in proiezione
        %equiangolare

muro(nu)=FUNZIONE_CALCULO_SVF_PARETE(S,edificio,r,conteggio_punti_parete,xSVF,yS
VF,zSVF,p1,p2);
        dim=numel(muro(nu).X);
        x=[muro(nu).X];
        y=[muro(nu).Y];
        patch(x,y, 'k');
        p=p2;

    end

end

%% PROIEZIONE EQUIANGOLARE DEL TETTO PIU' VICINO AL PUNTO AGGIUNTA ALLA
%% PROIEZIONE DELLE PARETI: EVITA UN BUG PER CUI SE IL PUNTO è
%% MOLTO VICINO A UNA PARETE, ALLORA IL TETTO NON VIENE CONSIDERATO

    if tetto==0
        roof(1)=FUNZIONE_CALCULO_TETTO(S,min_edificio,xSVF,ySVF,zSVF,r);
        x=[roof.X];
        y=[roof.Y];
        patch(x,y, 'k');
    else
    end

daspect([1 1 1]);
axis off
F=getframe;

%% CALCOLO DELLO SKY VIEW FACTOR: Si adotta la formula di BROWN et al
%% (2001), utilizzata per la determinazione dello SVF in immagini fisheye
%% scattate con fotocamera digitale e derivata dal metodo di Steyn (1980)

```

```

% crea il profilo degli edifici in una matrice dove gli elementi con valore
% nullo sono gli edifici e il cielo ha calore unitario
raster_cielo=F.cdata;

%double trasforma da mappa di colore 8 bit a matrice con numeri reali
raster_cielo=double(raster_cielo(:,:,3))/255;

%crea una matrice con gli edifici sovrapposti agli anelli
prodotto_cielo_per_anelli=(raster_cielo.*raster_anelli);

%si adotta la formula di BROWN et al (2001)
parziale(numero_anelli)=sin((pi/2)*(2*numero_anelli-1)/(numero_anelli))*2*pi;
for i=1:numero_anelli-1

    %pixel totali dell'i-esimo anello
    pixel_tot(i)=numel(find(raster_anelli==(i)));

    %pixel del cielo visibile per l'i-esimo anello
    pixel_cielo(i)=numel(find(prodotto_cielo_per_anelli==(i)));

    %SVF parziale
    parziale(i)=sin((pi/2)*(2*i-
1)/(numero_anelli))*(pixel_cielo(i)/pixel_tot(i))*2*pi;

end

% SVF totale
SVF=(1/(2*pi))*sin(pi/(2*numero_anelli))*sum(parziale);

t2=clock;

imagesc(prodotto_cielo_per_anelli);

imagesc(raster_cielo);
daspect([1 1 1])
axis off
colormap(gray);

display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display
' ';display ' ';
display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display
' ';display ' ';
display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display
' ';display ' ';
display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';display ' ';
display('Tempo di calcolo FISHEYE:');
disp(etime(t2,t1)-etime(t4,t3));

display('Sky View Factor nel punto selezionato');
disp(SVF);
SVF_senza_formula_steyn=sum(pixel_cielo)/sum(pixel_tot)

display('PER CAMBIARE FILE DIGITA clear');

```

A.2 FUNZIONE DISCRETIZZAZIONE LATI

```
function S=FUNZIONE_DISCRETIZZAZIONE_LATI(edificio,s,a,dist);
X_semplice=s(edificio).X;
Y_semplice=s(edificio).Y;

dim=numel(X_semplice)-1; %rimuove ultima cella(sempre NaN)

%toglie le celle NaN negli gli array di
for i=1:(dim);
    if isnan(X_semplice(i))==1 | isnan(Y_semplice(i))==1
        X_semplice=[X_semplice(1:i-1) X_semplice(i-1) X_semplice(i+1:dim)];
        Y_semplice=[Y_semplice(1:i-1) Y_semplice(i-1) Y_semplice(i+1:dim)];
    else
        end
end

end

%% ASSEGNARE NUOVI PUNTI LUNGO IL PERIMETRO DELL'EDIFICIO PER CREARE
%% SUCCESSIVAMENTE UNA PROIEZIONE PIU' REALISTICA. SENZA QUESTE OPERAZIONI
%% IL PERIMETRO APPARE CON LATI RETTILINEI ANCHE IN PROIEZIONE, DIMINUENDO
%% NOTEVOLMENTE LA PRECISIONE DEL CALCOLO DELLO SVF

% PROCEDIMENTO. Ogni segmento è j-esimo

% 1) calcola i j-1 delta tra le coordinate j del poligono
for j=2:dim
    DX(j-1)=X_semplice(j)-X_semplice(j-1);
    DY(j-1)=Y_semplice(j)-Y_semplice(j-1);
end

% 2) lunghezza segmento tra 2 vertici
for j=2:dim
    L_seg(j-1)=sqrt(DX(j-1)^2 + DY(j-1)^2);
end

% 3)trova numero di punti, uno ogni distanza in metri definita sopra, sulla
%lunghezza di ogni segmento
for j=2:dim
    punti_decimali(j-1)=(L_seg(j-1)/dist);
    punti_arrotondato(j-1)=round(L_seg(j-1)/dist);

    %controlla che l'arrotondamento non dia un numero maggiore del decimale
    if punti_arrotondato(j-1)<=punti_decimali(j-1);
        punti(j-1)=punti_arrotondato(j-1);
    else
        punti(j-1)=punti_arrotondato(j-1)-1;
    end

    punti(j-1)=abs(punti(j-1)); % rimuove ultimo punto che deve essere la
                                % coordinata originale del vertice di X_semplice e
                                %Y_semplice

end
```

```

% 4) angolo azimutale AZI (con correzione k) per ogni segmento j-esimo
% relativamente ad asse polare orientato a nord (credo sia nord)
for j=2:dim
    % controllo per correzione quadrante del calcolo arco tangente
    if DX(j-1)<0 && DY(j-1)>0
        k=2*pi;
    elseif DX(j-1)<0 && DY(j-1)<0
        k=pi;
    elseif DX(j-1)>0 && DY(j-1)<0
        k=pi;
    elseif DX(j-1)>0 && DY(j-1)>0
        k=0;
    elseif DX(j-1)==0 && DY(j-1)==0
        DX(j-1)=0.00001;
        DY(j-1)=0.00001;
        k=0;
    elseif DX(j-1)>0 && DY(j-1)==0
        DY(j-1)=0.00001;
        k=0;
    elseif DX(j-1)<0 && DY(j-1)==0
        DY(j-1)=0.00001;
        k=2*pi;
    elseif DX(j-1)==0 && DY(j-1)>0
        DX(j-1)=0.00001;
        k=0;
    elseif DX(j-1)==0 && DY(j-1)<0
        DX(j-1)=0.00001;
        k=pi;
    end

    AZI(j-1)=(atan(DX(j-1)/DY(j-1)))+k;
end

% 5) coordinate intermedie lungo ogni segmento j-esimo

c=0; %contatore inizio intervallo delle matrici X e Y estese

d=1; %contatore di fine intervallo

%ciclo dal primo punto al penultimo punto del poligono
for j=1:dim-1

%solo se presente almeno un punto intermedio trova coordinate intermedie
if punti(j)>0
    clear X_intermedio %ad ogni ciclo elimina i vettori delle coordinate
    clear Y_intermedio %intermedie del ciclo precedente
    % trova i punti di coordinate X_intermedio e Y_intermedio lungo
    % segmento j-esimo
    for i=1:punti(j)
        X_intermedio(i)=sin(AZI(j))*dist*i + X_semplice(j);
        Y_intermedio(i)=cos(AZI(j))*dist*i + Y_semplice(j);
        %line (X_intermedio(i), Y_intermedio(i))
    end
    d=(c+1)+i; %contatore fine intervallo dei nuovi vettori X e Y estesi con
                %i pari al numero di punti intermedi trovati per il
                %segmento
end

```

```

%creazione di nuovi array X e Y contenenti le coordinate originali più le nuove
%coordinate intermedie poste in modo ordinato lungo il perimetro del poligono
    if j<dim-1 %se il vertice del poligono non è l'ultimo allora...
        X(c+1:d)=[X_semplice(j) X_intermedio];
        Y(c+1:d)=[Y_semplice(j) Y_intermedio];
    elseif j==dim-1 %altrimenti se il ciclo è all'ultimo vertice aggiunge il
punto alla fine del nuovo array X e Y
        X(c+1:d+1)=[X_semplice(j) X_intermedio X_semplice(j+1)];
        Y(c+1:d+1)=[Y_semplice(j) Y_intermedio Y_semplice(j+1)];
    end
c=d; %aumenta contatore per il segmento j successivo

else %se punti(j)<0 allora il segmento è troppo corto e non sono stati trovati
punti intermedi
    X(c+1)=X_semplice(j);
    Y(c+1)=Y_semplice(j);
    c=c+1;
    d=d+1;

end

end

%nuova dimensione dell'array di coordinate dell'edificio
dim=numel(X);
X(dim+1)=X_semplice(1);
Y(dim+1)=Y_semplice(1);

%crea un array Z con l'altezza dell'edificio replicando l'altezza letta
%dalla struttura "a" per un array della stessa dimensione di X e Y
z=a(edificio).QUOTA_G; % legge quota di gronda edificio
Z=ones (1,dim+1)*z;

%% CREAZIONE DELLA STRUTTURA S CON LE NUOVE COORDINATE DI TUTTO IL FILE

S.X=X;
S.Y=Y;
S.Z=Z;
S.punti_intermedi=punti;
end

```

A.3 FUNZIONE PROIEZIONE EQUANGOLARE PARETE

```
function
muro=FUNZIONE_PROIEZIONE_PARETE(S,edificio,r,conteggio_punti_parete,xSVF,ySVF,zS
VF,p1,p2);

    al=1;
    for i=p1:p2;

        [ALFA(al), OC ]=cart2pol(S(edificio).X(i)-xSVF, S(edificio).Y(i)-ySVF);

        BETA=atan((S(edificio).Z(i)-zSVF)/OC);

        TETA= ((pi/2)-BETA)/2;

        OB=r*tan(TETA);
        xFISHEYE(al)=cos(ALFA(al))*OB + xSVF;
        yFISHEYE(al)=sin(ALFA(al))*OB + ySVF;
        zFISHEYE(al)=zSVF;
        al=al+1;
    end

    for i=1:numel(ALFA);
        xR(i)= cos(ALFA(i))*r + xSVF;
        yR(i)= sin(ALFA(i))*r + ySVF;
    end

    m=numel(xR);
    for n=1:m;
        xRin(n)= xR(m);
        yRin(n)= yR(m);
        m=m-1;
    end

    plot1=1;
    plot2=plot1+conteggio_punti_parete+1;

        muro.X=[xRin(plot1:plot2) xFISHEYE(plot1:plot2) xRin(plot1)];
        muro.Y=[yRin(plot1:plot2) yFISHEYE(plot1:plot2) yRin(plot1)];
        muro.Z=ones(1,numel(muro.X))*zSVF;

end
```

