

Università degli Studi di Palermo
Facoltà di Ingegneria di Palermo

DREAM
Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali

Corso di Dottorato di Ricerca in
Fisica Tecnica Ambientale

Ciclo XXII
Anno 2010

Tesi di Dottorato di Ricerca

UN METODO FOTOGRAFICO PER LA STIMA DELL'EFFETTO
OMBREGGIANTE DOVUTO ALLE OSTRUZIONI.

DOTTORANDA

Di Gangi Alessandra

COORDINATORE

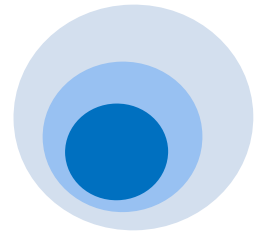
Professore

Gianfranco Rizzo

TUTOR

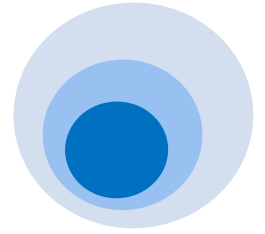
Professore

Aldo Orioli



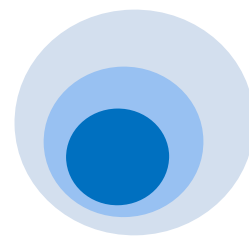
SOMMARIO

Si propone un nuovo metodo che consente di utilizzare l'immagine fotografica di ostacoli ombreggianti per valutarne l'effetto oscurante nei confronti della radiazione solare diretta incidente su di una superficie. Il metodo descritto è simile a quello che prevede l'impiego del diagramma cilindrico dei percorsi solari, calcolati in funzione dell'azimut e dell'altezza solare, e la sovrapposizione su di esso del poligono raffigurante l'oggetto ostruente costruito in base alle coordinate cilindriche dei suoi punti più significativi. La nuova procedura prevede invece la sovrapposizione sulla fotografia del percorso solare opportunamente trasformato secondo le regole della prospettiva. E' così possibile tracciare direttamente sulla foto la posizione assunta dal sole agli orari richiesti per qualunque giorno dell'anno e località, utilizzando a tale scopo la conoscenza di un numero estremamente limitato di dati, peraltro facilmente reperibili. Le porzioni del percorso intercettate dal contorno degli ostacoli rappresentati nell'immagine fotografica indicano le fasce orarie durante le quali il punto della superficie ricevente risulta ombreggiato. Viceversa i restanti tratti del percorso solare evidenziano la presenza della componente diretta radiazione. Sono presentati, inoltre, i risultati del confronto tra i dati calcolati e quelli sperimentali condotti presso il Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali (DREAM) di Palermo.



ABSTRACT

A new, simplified photographic method is proposed to estimate the shading effects of obstructions. In spite of the complex mathematical background of the new tool, its practical application is very simple, and only requires the measurements of three angles for each photograph. The proposed method is particularly useful for overcoming the difficulties caused by the need to accurately describe surrounding objects to estimate shading effects. The new method uses the information contained in a picture and allows one to draw daily solar paths directly on the photograph. The procedure is useful to verify the suitability of a generic site for solar exploitation; its main benefit is the simplicity of use and the transparency of the obtained results. This simple method is also particularly suitable to evaluate the technical feasibility of small solar equipment, which would not require complex software to define the daily solar path.



INDICE

INQUADRAMENTO.....	6
Il ruolo degli ombreggiamenti.....	6
FINALITA', OBIETTIVI, RISULTATI ATTESI.....	8
CAPITOLO 1	
1.1 Le procedure attualmente impiegate per la valutazione degli ombreggiamenti:.....	9
1.2 1° approccio: le assonometrie solari.....	9
1.3 2° approccio: i diagrammi solari.....	10
CAPITOLO 2	
IL METODO FOTOGRAFICO PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO OMBREGGIANTE..	15
2.1 Analogia tra prospettiva e fotografia.....	15
CAPITOLO 3	
IL METODO FOTOGRAFICO A QUADRO PROSPETTICO VERTICALE.....	19
3.1 La posizione del sole in fotografia:.....	19
Azimut e altezza solare φ_s e β_s	21
3.2 Le regole del metodo fotografico utilizzando il centro della fotografia e un punto sull'asse verticale passante per il centro:.....	24
Il fattore di riduzione RF	24
CAPITOLO 4	
IL METODO FOTOGRAFICO A QUADRO PROSPETTICO OBLIQUO.....	28
4.1 La posizione del sole in fotografia.....	28
4.2 Le regole del metodo fotografico utilizzando il centro della fotografia e un punto sull'asse verticale passante per il centro:.....	36
L'angolo γ	36
Il fattore di riduzione RF	36
4.3 Applicazione del metodo fotografico utilizzando il centro della fotografia e un punto sull'asse verticale passante per il centro:.....	42
Immagine 1.....	42
Immagine 2.....	47

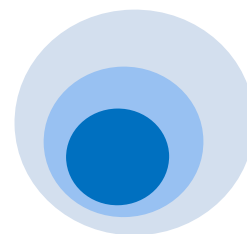
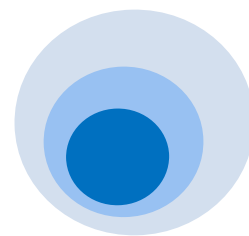


Immagine 3.....	50
4.4 Le regole del metodo fotografico utilizzando due punti sull'asse verticale passante per il centro il centro della fotografia.....	54
L'angolo γ	54
Il fattore di riduzione RF	57
4.5 Applicazione del metodo fotografico utilizzando due punti sull'asse verticale passante per il centro della fotografia.....	59
Immagine 4.....	59
Immagine 5.....	64
CAPITOLO 5	
CONFRONTO TRA IL METODO FOTOGRAFICO E QUELLO TRADIZIONALE.....	68
Immagine 1.....	71
Immagine 2.....	72
Immagine 3.....	73
Immagine 4.....	74
RISULTATI E CONCLUSIONI.....	75
Nomenclatura.....	89
Bibliografia.....	91



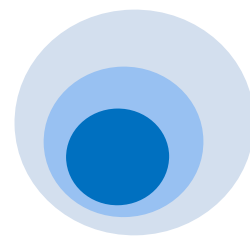
INQUADRAMENTO

Il ruolo degli ombreggiamenti.

La corretta valutazione della quantità di energia solare che raggiunge una superficie costituisce l'aspetto determinante in tutti quegli studi finalizzati sia al controllo della radiazione solare all'interno degli edifici per il raggiungimento del comfort ambientale, che alla stima della producibilità dei collettori solari quali i pannelli fotovoltaici. In tal senso, gli ombreggiamenti ricadenti sui componenti di riferimento rivestono un ruolo decisivo in quanto condizionano le scelte progettuali e possono inficiare i dati ricercati.

Sovente, la resa energetica prodotta dagli impianti fotovoltaici è fortemente penalizzata dalle perdite provocate da tutte quelle ostruzioni comunemente presenti in un contesto urbano che non soltanto condizionano pesantemente le modalità di inserimento dei pannelli fotovoltaici negli edifici, ma rischiano di comprometterne persino l'installazione. Talvolta, l'inconsapevolezza dei reali effetti arrecati dagli ombreggiamenti, specialmente in presenza di coperture poste a quote differenti, in cui l'adiacenza degli edifici nonché la larghezza della strada giocano un ruolo determinante, induce a sovrastimare le aree per l'alloggiamento dei pannelli fotovoltaici, con conseguente maggiorazione dei costi dell'impianto, da un lato, e una considerevole riduzione della quantità di energia elettrica prodotta, dall'altro e on relativa delusione delle attese aspettative economiche.

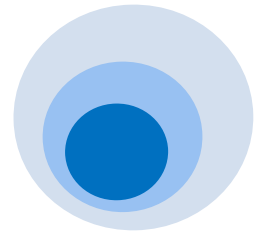
E' noto, infatti, quanto solo un parziale ombreggiamento di una cella fotovoltaica comprometta la produttività delle altre celle fotovoltaiche collegate in serie, anche se completamente irraggiate, e influisca drasticamente sulla corrente complessivamente prodotta dalla componente solare. L'ombreggiamento di appena il 5% della superficie del pannello può addirittura incidere sulla riduzione della produzione di energia elettrica in misura pari al 50% (Karatepe, 2008).



Molteplici sono le procedure impiegate per la definizione della quantità di energia associata alle componenti diretta e diffusa della radiazione solare (Gueymard, 1987, 2001, 2003a,b; Hay and Davies, 1980; Klucher, 1979; Muneer, 1997; Perez et al., 1986, 1987, 1990; Reindl et al., 1990a,b), nonché la loro applicazione in svariati contesti urbani (Jensen, 1994) recentemente convalidate (Loutzenhiser et al., 2007) e ulteriormente affinate (Torres et al., 2006, 2008), comprese le ultime proposte (Chang, 2009; Torres et al., 2010), e quelle più moderne basate sulle reti neurali (Chaabene e Ben Ammar, 2008; Lopez et al., 2005; Mellit et al., 2010).

Ma l'applicabilità di tali procedure in presenza di ostruzioni presuppone una particolare cura e attenzione nella **definizione degli oggetti** schermanti la componente diretta della radiazione solare a cui, peraltro, è associato l'apporto energetico più rilevante. Di fatto, ciò si traduce sempre e comunque in una **rappresentazione grafica** degli elementi ombreggianti, sia essa di tipo bidimensionale mediante diagrammi cartesiani o tridimensionale in forma di volumi. Questa soluzione univoca del problema nonostante gli approcci antitetici delle metodologie proposte dalla letteratura specializzata per la stima dell'energia ricevuta da una superficie, obbliga al reperimento delle informazioni necessarie alla descrizione geometrica di oggetti ostruenti che spesso sono particolarmente articolati quali edifici complessi, montagne, alberi, camini, antenne paraboliche, costringendo ad inevitabili imprecisioni nonché a lungaggini esecutive eccessive. L'alternativa che ovvia a tale inconveniente, sovente adottata, comporta l'assimilazione degli oggetti a figure o volumi semplificati compromettendo l'affidabilità dei risultati. La constatazione di come l'efficacia delle analisi mirate alle valutazioni energetiche dipenda dal valore attribuito alle superfici ombreggianti e alla loro corretta interpretazione, impone una riflessione.

Alla luce di quanto esposto, il contenuto di questa tesi mira ad affrontare e approfondire l'argomento tentando di apportare un contributo utile alla risoluzione del problema. In relazione alle premesse, l'intento è quindi quello di superare i vincoli a cui si è costretti nell'individuazione degli oggetti ostruenti e, contestualmente, comprenderne gli effetti



arrecati. A partire proprio dallo studio delle metodologie attualmente adottate e dall'individuazione dei limiti e delle potenzialità ad esse connesse, si vuole proporre un metodo alternativo per il calcolo degli effetti ombreggianti causati da ostruzioni.

FINALITA'

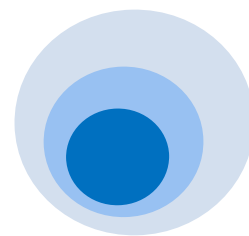
Definire un metodo innovativo che valuti l'ombreggiamento su una superficie di riferimento in presenza di ostruzioni.

OBIETTIVI

- 1) Individuare una procedura alternativa per la lettura degli oggetti ostruenti;
- 2) Identificare le modalità esecutive per stimarne l'effetto ostruente;
 - Analisi delle metodologie attualmente impiegate per la rappresentazione degli oggetti ostruenti e della loro incidenza e, segnatamente, dei limiti e potenzialità ad esse connesse.

RISULTATI ATTESI

- 1) Fornire uno strumento utile ai progettisti impegnati negli studi inerenti alle problematiche ambientali connesse all'efficienza energetica degli edifici e al raggiungimento del comfort;
- 2) fornire flessibilità nelle procedura esecutiva del metodo;
- 3) garantire semplicità esecutiva mediante l'utilizzo di un ridotto numero di dati e immediatezza nella loro elaborazione.



CAPITOLO 1

1.1 Le procedure attualmente impiegate per la valutazione degli ombreggiamenti

Le procedure attualmente utilizzate per la descrizione degli ombreggiamenti nel contesto urbano presuppongono una descrizione che risulta tanto più attendibile quanto più accurata è la descrizione geometrica di tutti i potenziali elementi ostruenti presenti nel campo visivo. Ciò richiede l'identificazione esatta non solo di oggetti normalmente presenti in un contesto urbano quali alberi, edifici, pali, antenne, comignoli posti nelle vicinanze del sistema fotovoltaico, ma anche di colline, montagne situate a distanza considerevole dall'edificio in cui è ubicato l'impianto.

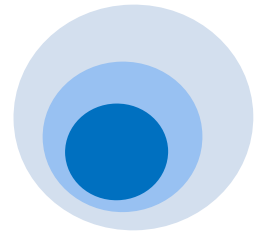
Sostanzialmente, affrontare questa problematica comporta l'applicazione di due metodologie che tengono conto del punto di vista da cui si osserva l'orizzonte. Più precisamente:

- 1) il punto di vista del sole in un dato giorno, ora e latitudine;
- 2) il punto di vista della superficie ricevente.

Entrambe le procedure presuppongono un rilievo dettagliato degli oggetti schermanti.

1.2 Il primo approccio (il punto di vista del sole)

Il primo approccio prevede la costruzione di un modello tridimensionale in cui si pone una telecamera virtuale nel punto occupato dal sole all'interno della volta celeste. Le parti visibili sono quelle direttamente irraggiate dal sole mentre quelle non visibili sono in ombra. Ai fini di una puntuale descrizione della geometria delle ombre portate su una superficie di riferimento, il metodo richiede una quantità notevole di informazioni relative, sia alla esatta ubicazione anche di oggetti posti a considerevole distanza dalla superficie analizzata, che alla forma degli oggetti stessi. La precisione dei modelli appare chiaramente vincolata all'accuratezza dei dettagli inseriti. E spesso, in un contesto



urbano la presenza di elementi difficilmente riproducibili fedelmente in un modello tridimensionale, vengono di conseguenza ricondotti a volumi semplici quali i parallelepipedi (Fig.1).

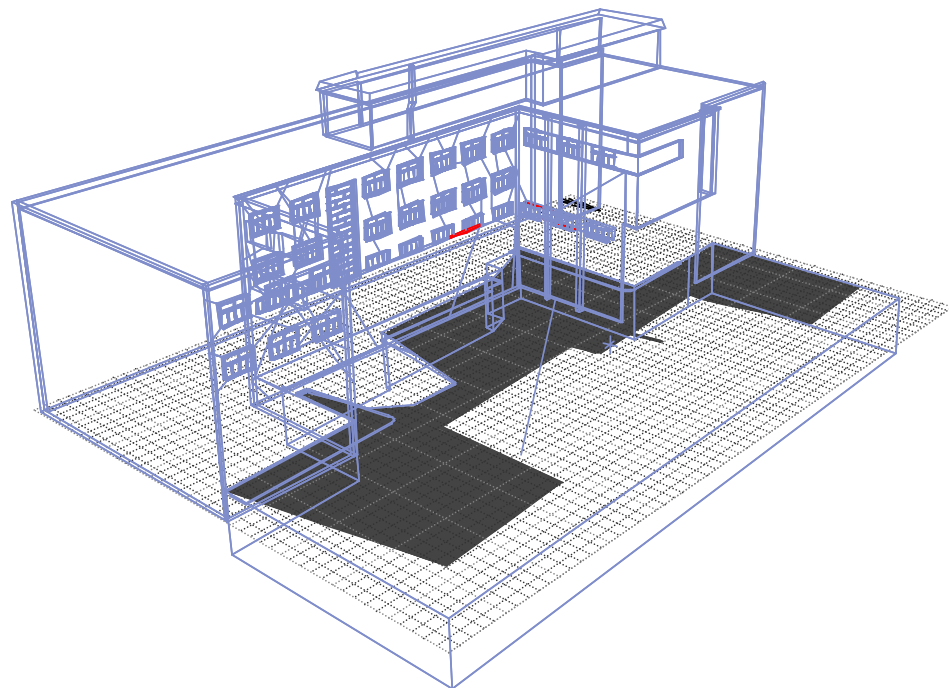


Fig.1 Esempio di modello tridimensionale (Edificio DREAM)

1.3 2° approccio (il punto di vista della superficie ricevente)

Il 2° approccio prevede, al contrario del precedente, di riportare la sagoma ostruente sul diagramma delle traiettorie del sole per una determinata località. Quando il tracciato solare è una proiezione delle traiettorie del sole sul piano orizzontale, si ottiene il diagramma solare polare assimilabile ad una fotografia della volta celeste scattata con una lente ad occhio di pesce a 180° e puntata verso lo zenit. La posizione del sole sul diagramma polare può essere letta direttamente in qualunque ora del giorno e dell'anno.

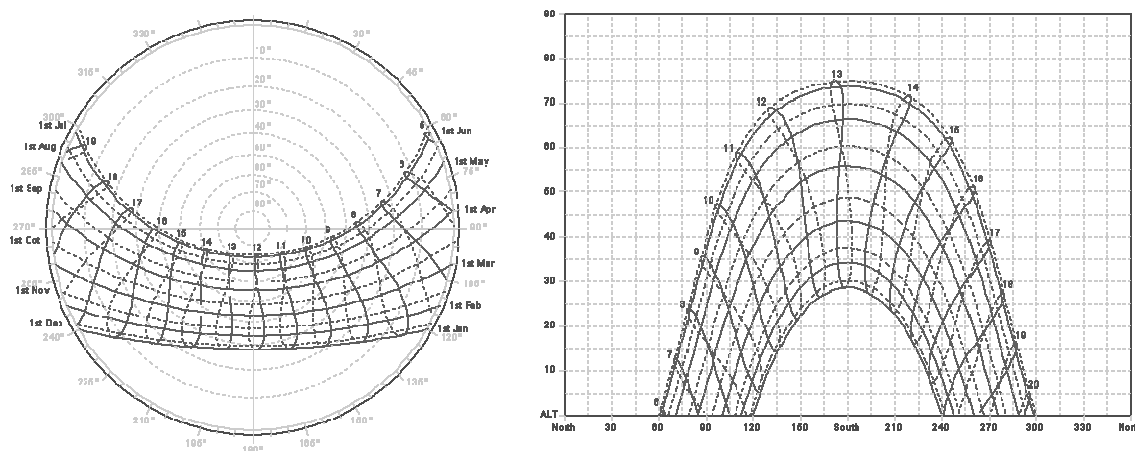
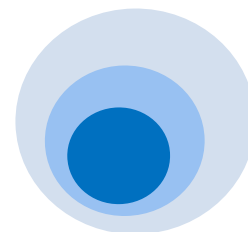


Fig.2 Diagramma solare polare e cilindrico alla latitudine di 38

Gli angoli azimutali sono leggibili lungo la circonferenza esterna con incrementi di 15° , mentre gli angoli zenitali sono rappresentati dalle circonferenze concentriche che a partire dal centro hanno incrementi di 10° da 0 a 90. Se il percorso solare viene proiettato su un piano verticale in coordinate cartesiane si ottiene un diagramma cilindrico in cui sono riportate in ordinata l'altezza solare e in ascissa l'azimut solare, per valori costanti della declinazione solare. La lettura degli eventuali ostacoli ombreggianti può essere effettuata disegnando direttamente sul diagramma polare o su quello cilindrico il loro profilo (Fig.2). Ciò richiede l'inserimento delle coppie di angoli (azimutale e zenitale) (Fig.3) di tutti i punti costituenti i vertici rilevanti del poligono ostruente.

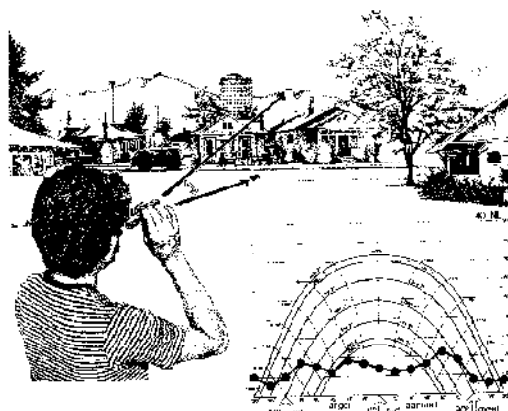
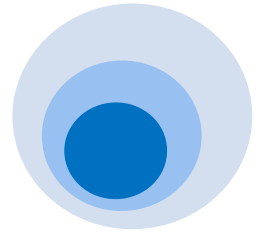


Fig.3. Rappresentazione di ostruzioni in un diagramma solare cilindrico



In particolare, dal punto del sito scelto per effettuare la verifica si procede nel seguente modo:

- 1) mediante una bussola o un teodolite si determina la posizione del sud;
- 2) con l'utilizzo di una livella si ricerca l'altezza dell'orizzonte;
- 3) si misurano verso est e verso ovest per i punti individuati gli angoli zenitali e i relativi angoli azimutali;
- 4) i punti sono quindi riportati sul diagramma del percorso solare relativo alla latitudine di riferimento e collegati con una linea.

Mediante questi diagrammi è possibile determinare graficamente i periodi di tempo nei quali un punto di una superficie rimane in ombra a causa di ostacoli che intercettano i raggi solari. Le porzioni del percorso solare intercettate dal contorno degli ostacoli indicano le fasce orarie durante le quali il punto della superficie ricevente risulta ombreggiato (Fig.4). Viceversa i restanti tratti del percorso solare evidenziano la presenza della componente diretta della radiazione.

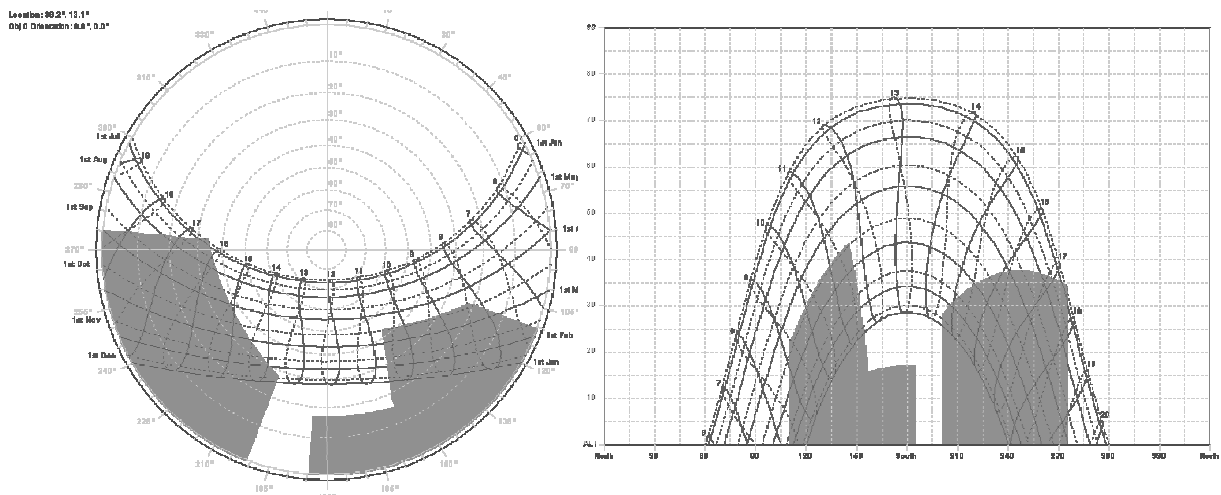
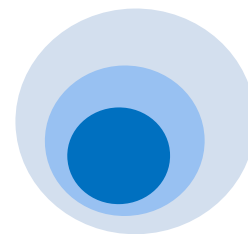


Fig.4. Visualizzazione della presenza di ombreggiamento nel diagramma solare polare e cilindrico



Anche in questo metodo la precisione e l'accuratezza della descrizione degli oggetti ostruenti dipendono dal numero di coppie di angoli misurati (angolo azimutale e angolo zenitale) per ciascun punto del contorno dell'ostacolo stesso. E' evidente come, in presenza di contesti particolarmente complessi e articolati, il metodo vincoli a tempi lunghi di esecuzione. Inoltre, poiché la raffigurazione degli oggetti ostruenti in coordinate cilindriche o polari determina un'alterazione delle forme, è impossibile risalire all'individuazione di eventuali errori nelle misurazioni dei punti scelti.

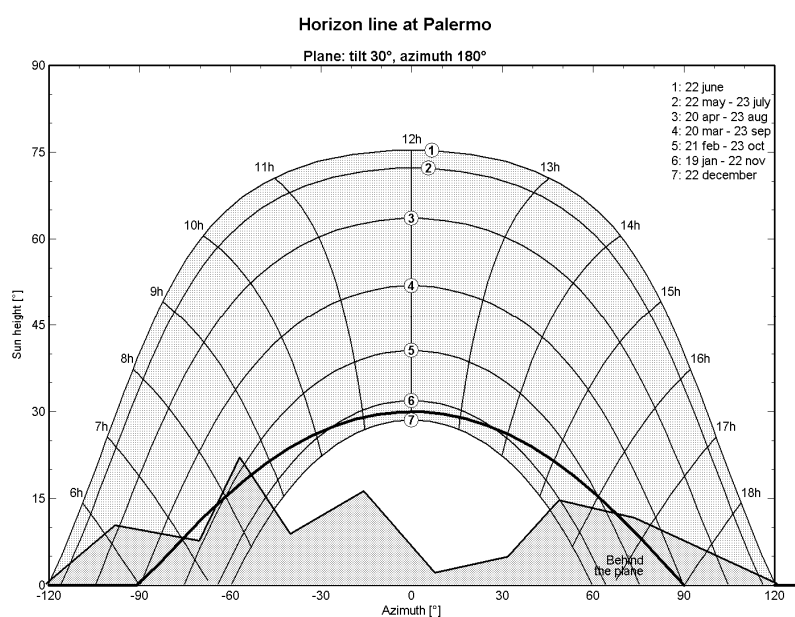
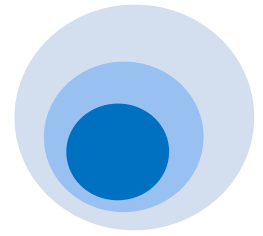


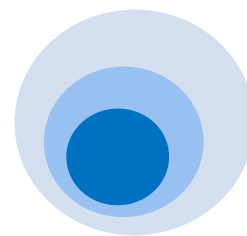
Fig.5. Visualizzazione del diagramma cilindrico utilizzato dal software PvSyst.

La rappresentazione degli oggetti ombreggianti mediante tali diagrammi è utilizzata anche da software per il calcolo della producibilità degli impianti fotovoltaici quali PvSyst (Fig.5).

Dall'analisi delle metodologie sopra illustrate risulta come, nell'uno e nell'altro approccio, la rappresentazione degli oggetti e la valutazione del loro effetto ombreggiante sulla superficie



di riferimento obblighi, preliminarmente, ad un rilievo. Per tale ragione, il superamento dei limiti imputabili all'applicazione delle procedure suddette che, peraltro, attualmente sono le uniche disponibili, necessita di una interpretazione differente del problema. Lo spunto illuminante è fornito dall'impiego della fotografia, o meglio, dell'immagine fotografica, che, per definizione, comprende istantaneamente tutti gli oggetti potenzialmente schermanti la radiazione solare diretta, ossia quelli visibili dalle immediate vicinanze della superficie di riferimento fino all'orizzonte. La scelta dell'utilizzo dell'immagine fotografica risolve, quindi, le problematiche insite nella riproduzione grafica degli elementi presenti nel contesto in cui ci si trova ad operare. Il passo successivo legato alla valutazione dell'incidenza degli effetti ombreggianti, comporta l'elaborazione di una procedura capace di essere intellegibile con le proprietà riscontrabili in un'immagine fotografica. Bisogna, cioè comprendere, in che modo potere effettuare attraverso l'immagine fotografica una lettura degli ombreggiamenti. Poiché gli oggetti fotografati obbediscono alle regole prospettiche, è necessario che anche la procedura attuata per riconoscere la presenza o meno della radiazione solare sulla superficie di riferimento, segua tali regole. Prendendo a riferimento le modalità esecutive del secondo approccio che impiega i diagrammi solari cilindrici, l'eventualità risolutiva del problema risiede nella possibilità di riproporre le traiettorie del sole durante l'anno sull'immagine fotografica. Convertendo le coordinate che identificano le posizioni del sole lungo il suo percorso da cilindriche a rettangolari, si ottiene una perfetta corrispondenza tra gli oggetti presenti nell'immagine fotografica e le posizioni del sole. Ciò consentirebbe di leggere direttamente sull'immagine fotografica i periodi di tempo nei quali la superficie considerata rimane in ombra e quelli nei quali riceve la componente diretta della radiazione solare. Di seguito si descrivono le caratteristiche del metodo fotografico.



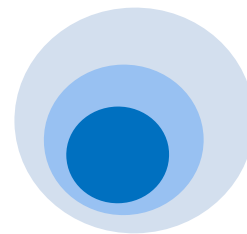
CAPITOLO 2

IL METODO FOTOGRAFICO PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO OMBREGGIANTE.

Il nuovo metodo fotografico, ovviando a tutti gli inconvenienti evidenziati, impiega l'immagine fotografica dell'orizzonte ostruente scattata dalla superficie di riferimento e ne riporta il percorso solare adeguatamente ridotto. Ciò implica il calcolo della posizione del sole in fotografia qualunque sia l'orientamento e l'inclinazione della macchina fotografica utilizzata. La procedura, invertendo le regole del metodo precedentemente descritto, consente di stimare la presenza di ombreggiamento o di radiazione solare diretta su un punto della superficie di riferimento per qualunque ora e giorno dell'anno in maniera precisa ed istantanea. Infatti, l'immagine fotografica, rappresentando per definizione una riproduzione fedele della realtà, comprende tutti gli oggetti presenti nell'orizzonte visibile e quindi, fornisce contestualmente la contemporanea complessità degli elementi vicini e a considerevole distanza dal punto di osservazione. Ciò consente di verificare con precisione se il sole ricada all'interno o all'esterno della sagoma ostruente e quindi se il punto della superficie considerata sia ombreggiata o riceva la componente diretta della radiazione solare. L'immediatezza esecutiva del metodo, oltre ad essere dovuta alla rapidità insita nello scatto fotografico in un qualsivoglia contesto, è legata all'esiguo numero di informazioni richieste. Infatti, il metodo necessita della misure di soli 3 angoli (un angolo azimutale e due angoli zenitali) relativi a due punti scelti sull'asse verticale passante per il centro della fotografia.

2.1 Analogia tra fotografia e prospettiva

Per definire le modalità esecutive del metodo è opportuno considerare l'analogia che intercorre tra la fotografia e la rappresentazione prospettica propria della geometria descrittiva che consente di rappresentare un oggetto dello spazio su un piano. Anche la prospettiva come la fotografia si avvale di un punto di vista e di un piano di proiezione, detto quadro, posto tra



l'oggetto e l'osservatore. I raggi luminosi riflessi da un oggetto investito dalla luce convergono verso l'occhio dell'osservatore dandogli la sensazione della forma dell'oggetto. La proiezione dei raggi di luce attraverso il quadro produce appunto l'immagine dell'oggetto (Fig.6). Per le caratteristiche della fotografia, l'immagine che passa attraverso l'obiettivo viene proiettata rovesciata e rimpicciolita sulla lastra retrostante. Considerando un piano tra l'oggetto e l'obiettivo posto ad una distanza pari a quella tra lastra e l'obiettivo, le due immagini risultano uguali. Se si immagina di sostituire all'obiettivo il punto di vista ed al piano il quadro, è evidente come la fotografia sia analoga alla prospettiva ed obbedisca alle sue regole di trasformazione geometrica (Fig.7).

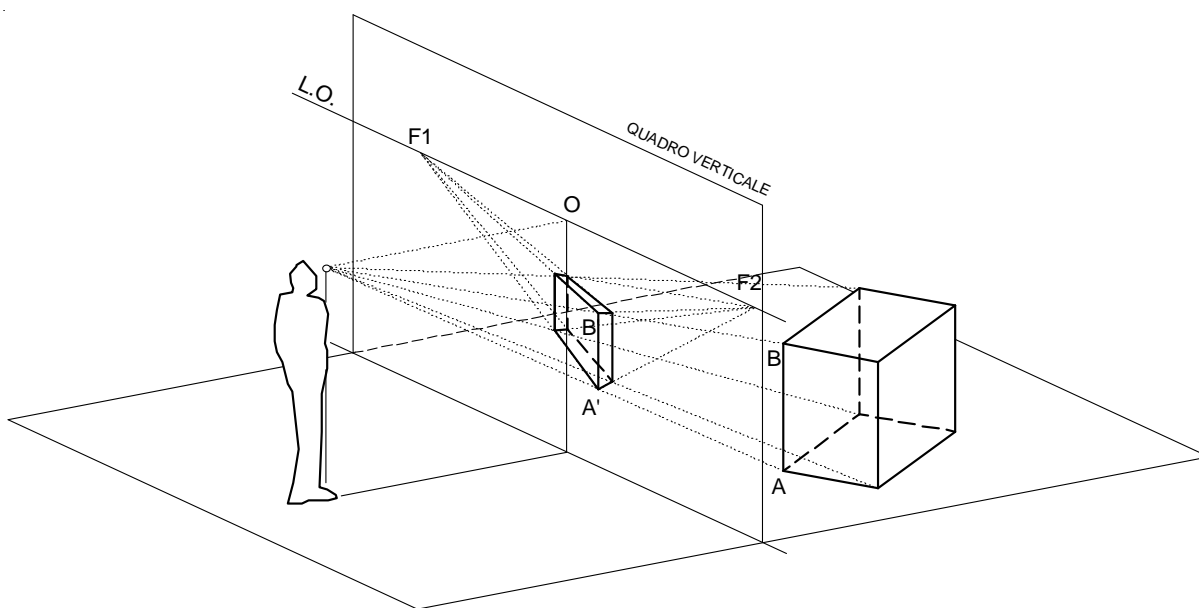


Fig.6. Schema della proiezione prospettica centrale

L'immagine risulta più piccola quando l'osservatore si allontana dal quadro mantenuto fermo, viceversa, aumenta se l'osservatore si avvicina al quadro. La rappresentazione prospettica può

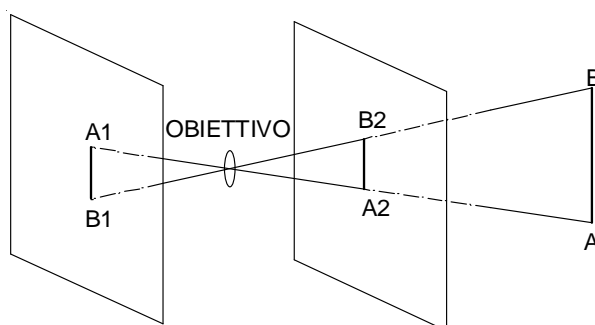
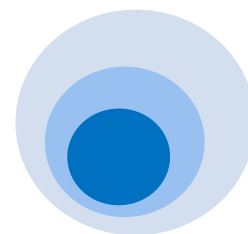


Fig.7. Schema delle regole della fotografia

avere uno o più punti di fuga (F) e il luogo delle fughe di tutte le rette orizzontali e non parallele al quadro, è costituito dalla linea d'orizzonte (L.O.), retta di intersezione tra il piano orizzontale contenente il punto di vista e il quadro.

La direzione del raggio visuale principale che passa attraverso l'occhio dell'osservatore ha un ruolo fondamentale perché la posizione del quadro è sempre perpendicolare a tale direzione.

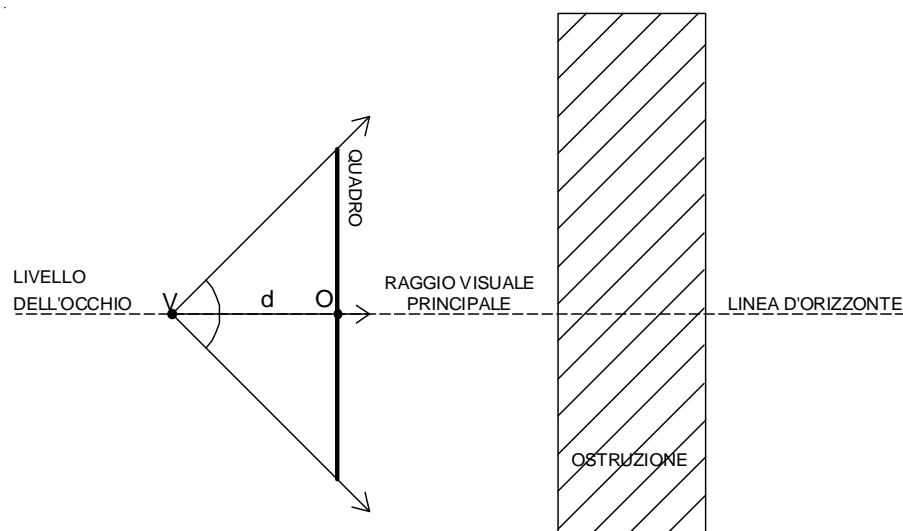
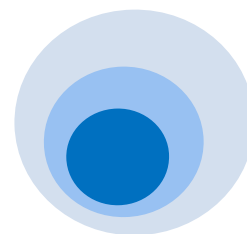


Fig.8. Vista laterale della prospettiva a quadro verticale



Quindi, come nella prospettiva, se la fotografia è ripresa con un raggio visuale principale orizzontale, cioè mantenendo la macchina fotografica parallela ad un piano orizzontale, l'immagine risulterà a piano prospettico verticale (Fig.8). se invece, è ripresa con un raggio visuale principale inclinato, cioè con la macchina inclinata rispetto al piano orizzontale, l'immagine fotografata sarà a piano prospettico obliquo (Fig.9).

In entrambe le condizioni, a piano prospettico verticale o obliquo, per individuare la posizione del sole sul piano fotografico durante tutta la sua traiettoria ci si avvale della geometria analitica nello spazio.

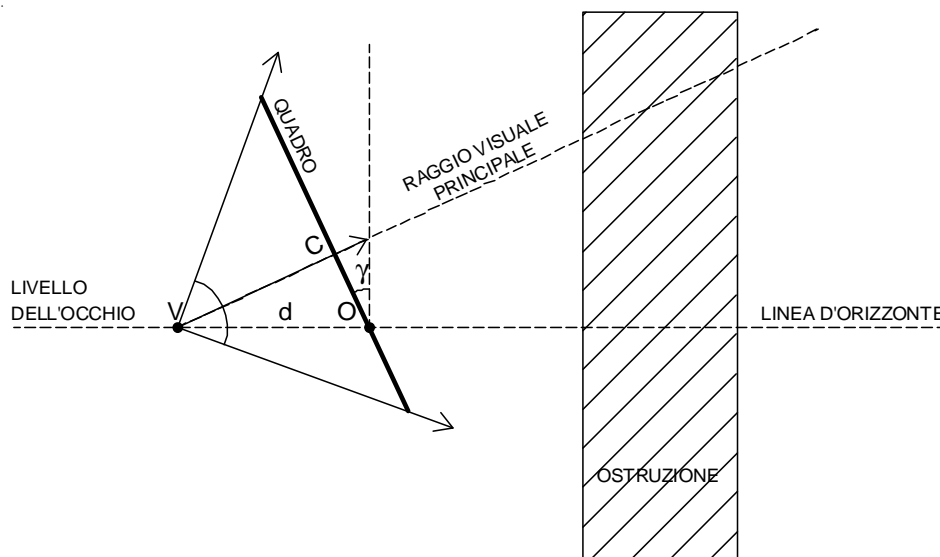
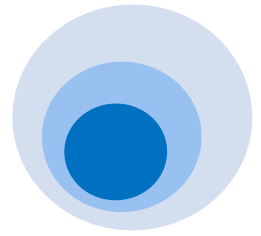


Fig.9. Vista laterale della prospettiva a quadro obliquo



CAPITOLO 3

IL METODO FOTOGRAFICO A QUADRO PROSPETTICO VERTICALE

3.1 La posizione del sole in fotografia

Quando la fotografia è scattata a piano prospettico verticale, la linea d'orizzonte L.O. risulta sempre passante per il centro della fotografia e la proiezione O del raggio visuale principale coincide con il centro C' dell'immagine fotografica individuato dall'intersezione delle sue diagonali. Una fotografia scattata in tale condizione, ha quindi una L.O. che divide in due parti uguali l'immagine fotografica (Fig.10).

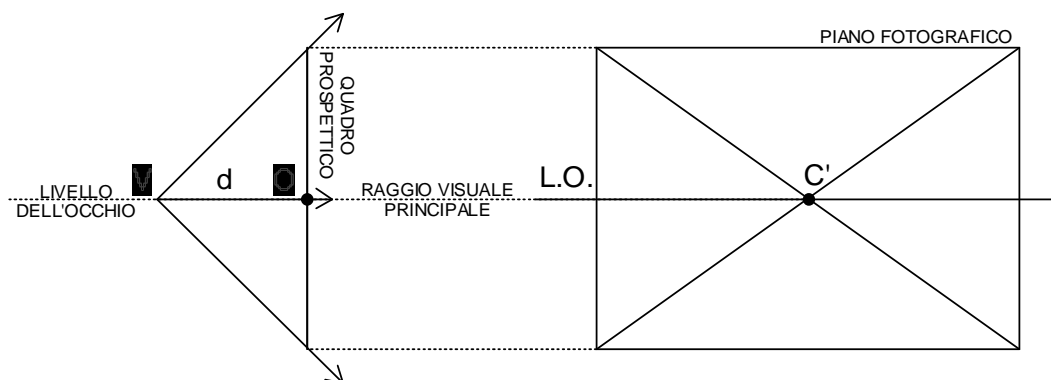


Fig.10. Analogia tra fotografia e prospettiva su quadro verticale.

In questo caso, se si considerano un piano orizzontale contenente il punto di vista e il piano ad esso perpendicolare in cui la L.O. è la loro intersezione (Fig.11), la posizione del sole può essere determinata utilizzando le seguenti equazioni:

$$\overline{OV} = d \quad \overline{OS'} = d \tan(\varphi) \quad \overline{SS'} = d \frac{\tan(\beta)}{\cos(\varphi)} \quad (1)$$

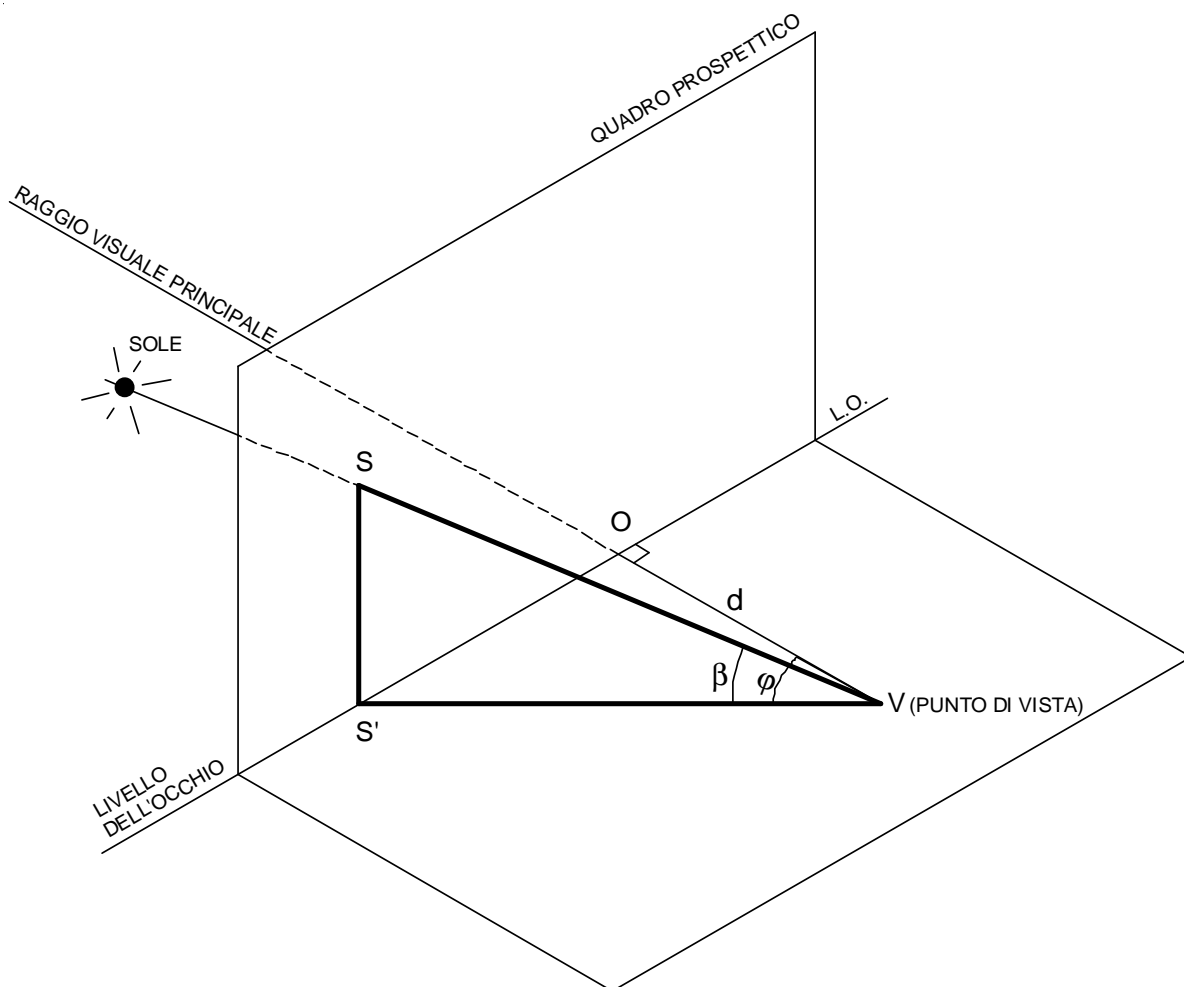
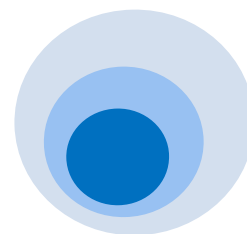
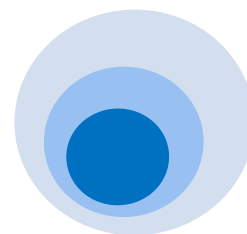


Fig.11. vista della posizione del sole su un piano verticale.

Osservando le due precedenti equazioni, la posizione del punto S del sole nella fotografia, dipende dall'azimuth ($\varphi = \varphi_s - \varphi_{cam}$), cioè la differenza tra l'azimuth solare φ_s e l'azimuth φ_{cam} del raggio visuale principale che è la direzione verso cui è puntata la macchina fotografica, dall'altezza del sole ($\beta = \beta_s$) nel generico sito, data e ora, e dalla **distanza d** .



- **Azimut e altezza solare φ_s e β_s**

L'azimuth (φ_s) è misurato a partire dalla direzione sud, mentre l'altezza solare (β_s) è misurata rispetto all'orizzonte. Convenzionalmente, l'azimuth positivo individua una posizione del sole a sud-ovest, mentre quello negativo identifica il sole a sud-est (Fig.12).

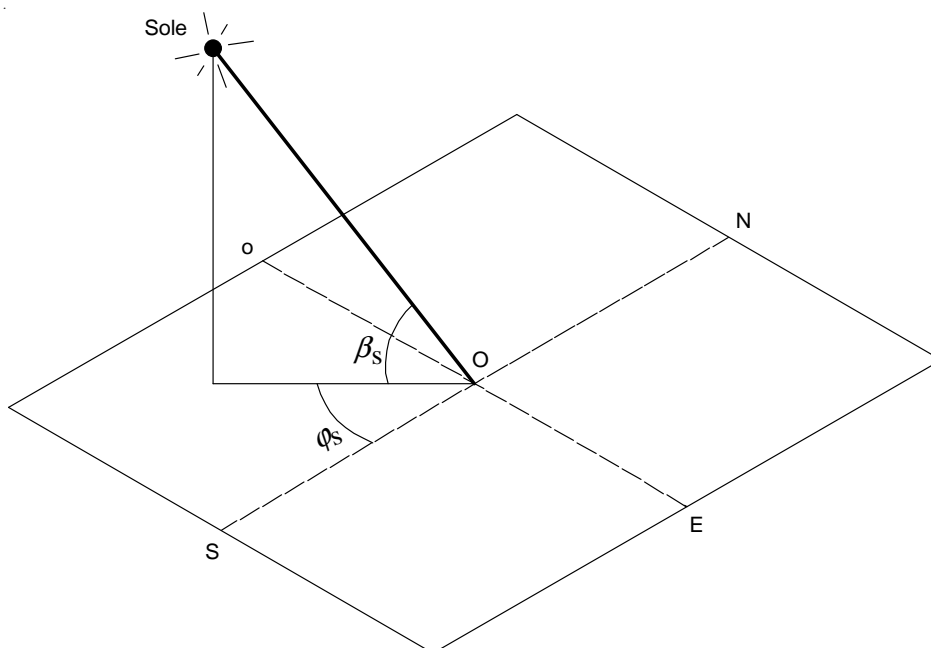


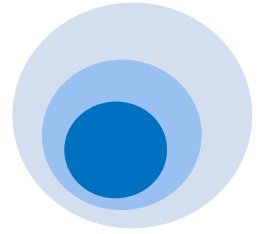
Fig.12. Angoli solari.

Questi angoli sono espressi in funzione della latitudine L del sito, della declinazione solare δ e dell'ora solare apparente, definita come angolo orario H , attraverso le seguenti relazioni:

$$\beta_S = \arcsin(\cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta) \tag{2}$$

$$\varphi_S = \arccos\left(\frac{\cos H \cos \delta \sin L - \sin \delta \cos L}{\cos \beta_S}\right) \tag{3}$$

l'angolo orario può essere calcolato con la seguente espressione:



$$H = 15(AST - 12) \quad (4)$$

dove l'ora solare apparente AST è:

$$AST = LST + ET / 60 + (LSM - LON) / 15 \quad (5)$$

in cui LST è riferita all'ora locale, ET è l'equazione del tempo, LSM è l'ora locale and LON è la longitudine. La declinazione solare e l'equazione del tempo possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$\delta = a_0 + a_1 \cos(t_\delta) + a_2 \cos(2t_\delta) + a_3 \cos(3t_\delta) + a_4 \sin(t_\delta) + a_5 \sin(2t_\delta) + a_6 \sin(3t_\delta) \quad (6)$$

in cui:

$$\begin{aligned} t_\delta &= 2\pi \frac{n_{day}}{366} & a_0 &= 0.322003 \\ a_1 &= -22.971 & a_2 &= -0.357898 \\ a_3 &= -0.14398 & a_4 &= 3.94638 \\ a_5 &= 0.019334 & a_6 &= 0.05928 \end{aligned}$$

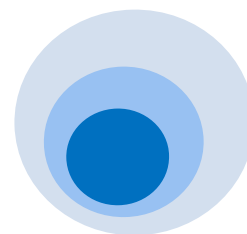
e

$$ET = b_0 + b_1 \sin(t_{ET}) + b_2 \sin(2t_{ET}) + b_3 \sin(3t_{ET}) + b_4 \sin(4t_{ET}) + b_5 \cos(t_{ET}) + b_6 \cos(2t_{ET}) + b_7 \cos(3t_{ET})$$

(7)

in cui:

$$\begin{aligned} t_{ET} &= \left[279.134 + (0.985647 \cdot n_{day}) \right] \frac{\pi}{180} \\ b_0 &= 5.0323 & b_1 &= -100.976 \\ b_2 &= -595.275 & b_3 &= 3.6858 \\ b_4 &= -12.47 & b_5 &= -430.847 \\ b_6 &= 12.5024 & b_7 &= 18.25 \end{aligned}$$



Come evidenziato precedentemente dalla Eq.(1) per definire la posizione del sole occorrerebbe anche la misura della distanza d , cioè l'effettiva posizione del quadro prospettico rispetto al punto di vista. Infatti, al variare di tale distanza, e rimanendo verticale il quadro prospettico, l'immagine fotografica apparirà con dimensioni più piccole ma proporzionali (Fig.13). Quindi, per determinare il rimpicciolimento degli oggetti è necessario conoscere il **fattore di riduzione RF** che permette di ricondurre la posizione del sole alla dimensione corretta, prescindendo così dalla distanza d . Tale fattore può essere ottenuto impiegando il centro della fotografia e un altro punto sull'asse verticale passante per il centro della fotografia.

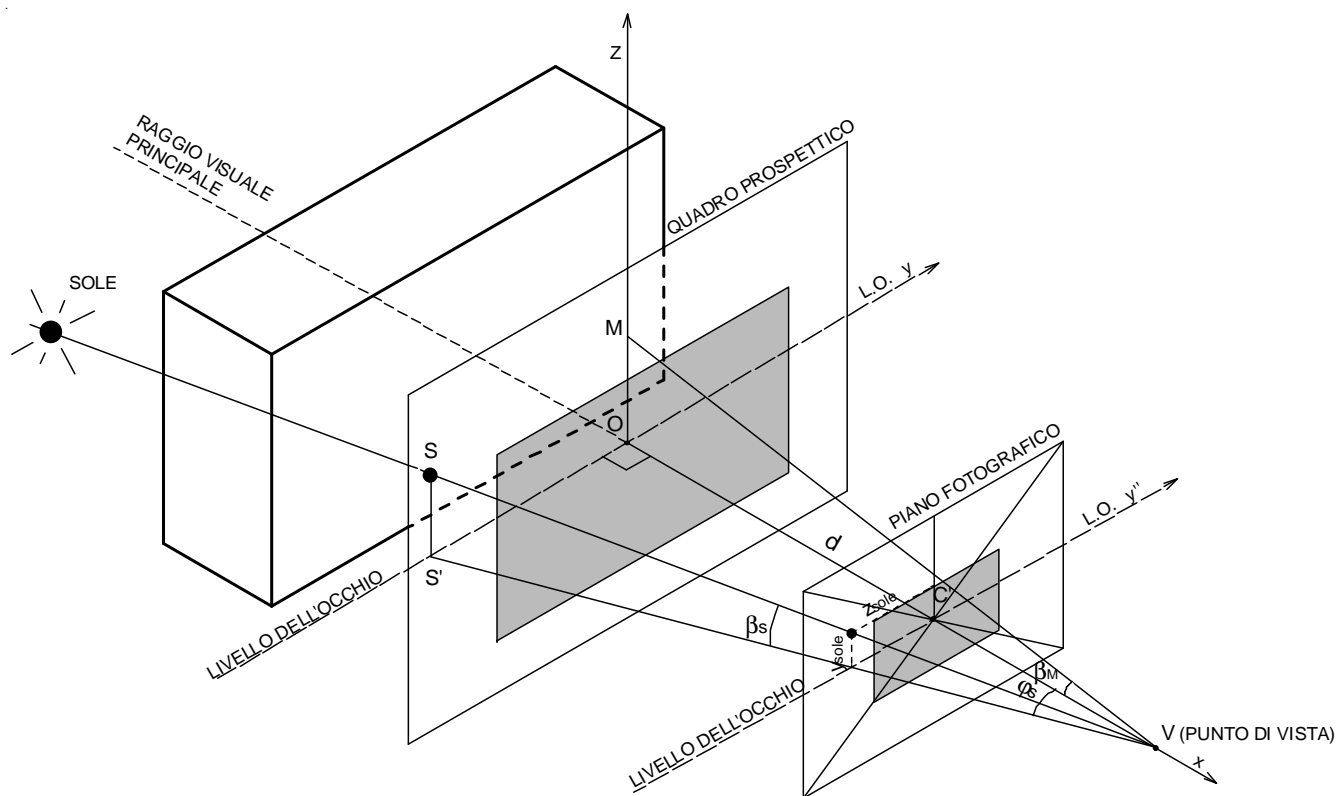
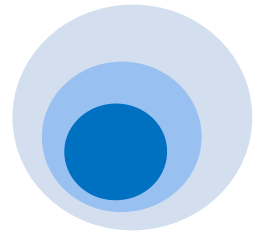


Fig.13. Vista della posizione del sole su un quadro prospettico verticale e sul piano fotografico: le dimensioni dell'immagine sul piano fotografico sono ridotte ma proporzionali.



3.2 Le regole del metodo fotografico utilizzando il centro della fotografia e un punto sull'asse verticale passante per il centro stesso.

- **Il fattore di riduzione RF**

Per valutare il fattore di riduzione si considerano nella Fig.15, che rappresenta una vista laterale della Fig.14 il punto C , centro della fotografia e un punto M scelto sull'asse verticale della fotografia passante per il centro. I suddetti punti si trovano su un piano virtuale mentre i corrispondenti C' e M' sono i corrispondenti in fotografia. Per determinare la posizione di C e

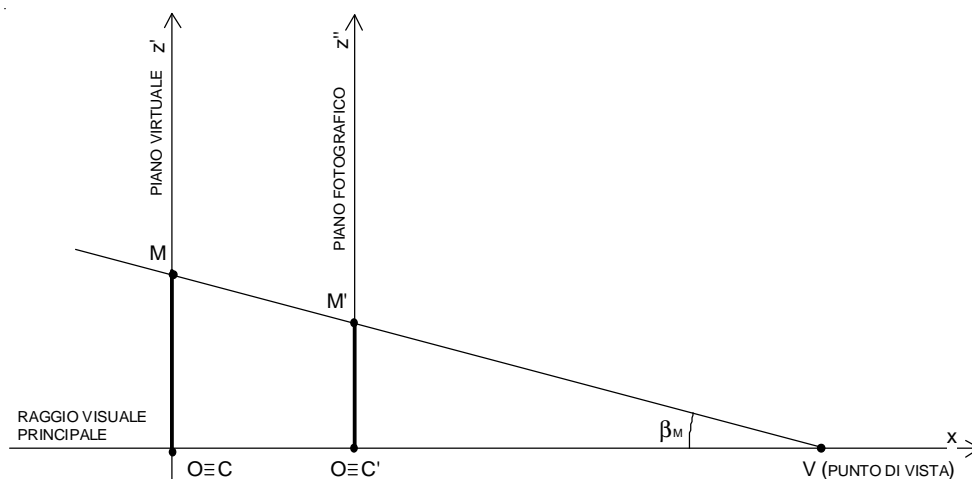
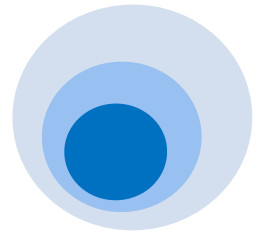


Fig.15. Vista laterale semplificata della Fig. 14

M è possibile come già detto, utilizzare le Eq. (1) dopo avere imposto le seguenti condizioni:

$$\overline{OV} = d \quad \beta = \beta_M \quad \varphi_C = 0 \quad \varphi_M = 0 \quad (8)$$



in cui φ_C and φ_M sono gli angoli azimutali dei punti C e M e β_M è l'angolo zenitale del punto M . Utilizzando un sistema di coordinate con l'origine posta sulla linea d'orizzonte, i punti C e M hanno le seguenti coordinate:

$$\begin{aligned} x_C &= 0 \\ y_C &= 0 \\ z_C &= 0 \end{aligned} \tag{9}$$

e

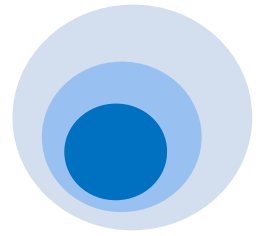
$$\begin{aligned} x_M &= 0 \\ y_M &= 0 \\ z_M &= d \tan(\beta_M) \end{aligned} \tag{10}$$

in cui β_M è l'angolo zenitale del punto M . Appartenendo allo stesso asse verticale la loro distanza coincide con l'ordinata del punto M . Quindi si ha:

$$\overline{CM} = d \tan(\beta_M) \tag{11}$$

In tale relazione, la quantità \overline{CM} dipende dalla distanza d . Infatti al variare di tale valore, pur mantenendosi inalterato l'angolo β_M , la misura \overline{CM} può risultare più grande o più piccola. Nel caso specifico, poiché l'immagine originaria è riportata su un piano fotografico ne consegue che si ottiene un rimpicciolimento delle misure iniziali. Poiché i triangoli CVM e $C'VM'$ sono simili è possibile, quindi, definire un fattore di riduzione (RF) che permette di ridurre l'immagine dal piano prospettico al piano della fotografia prescindendo dalla conoscenza della distanza d che rappresenta, conseguentemente, solo una misura virtuale. Tale fattore è dato dalla seguente relazione:

$$RF = \frac{\overline{C'M'}}{\overline{CM}} = \frac{\overline{C'M'}}{d \tan(\beta_M)} \tag{12}$$



La quantità $\overline{C'M'}$ rappresenta la distanza dal centro della fotografia di un generico punto M' posto sull'asse verticale passante per il centro C' . Il fattore di riduzione permette di identificare correttamente la posizione del sole sul quadro. Infatti, moltiplicando l'Eq. (1) per

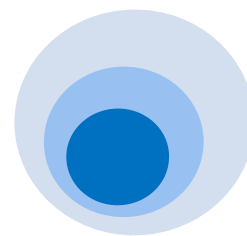
RF si può rappresentare la posizione del sole sulla fotografia utilizzando le seguenti coordinate y_{sole} e z_{sole} .

$$\begin{aligned} y_{sole} &= \tan(\varphi) \cdot \frac{\overline{C'M'}}{d \tan(\beta_M)} \\ z_{sole} &= \frac{\tan(\beta)}{\cos(\varphi)} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{\tan(\beta_M)} \end{aligned} \quad (13)$$

Tali coordinate sono espresse in millimetri e sono indipendenti dal valore della distanza virtuale d . La quantità $\overline{C'M'}$ cambia con le dimensioni della fotografia e questo consente di ridurre correttamente la vista prospettica.

In definitiva, per ottenere il fattore di riduzione che permette di ricavare la corretta posizione del sole in una fotografia a quadro prospettico verticale, il metodo richiede la misura, per ogni fotografia scattata, degli angoli zenitali e azimutali del centro della fotografia, e di un altro punto scelto arbitrariamente sull'asse passante per il centro della fotografia, nonchè la misura della loro distanza dal centro della foto. Affinchè la procedura sia svolta correttamente è necessario applicare le seguenti regole:

- 1) la fotografia va scattata con una macchina posta su un piano orizzontale (mediante utilizzo di una livella a bolla e di un treppiedi), perché la linea d'orizzonte nella fotografia deve risultare orizzontale così come nella vista prospettica reale.
- 2) Nella fotografia si individuano il suo centro, come intersezione delle due diagonali, e un altro punto M' posto sull'asse verticale passante per il centro, e che sia facilmente riscontrabile in situ sull'ostruzione fotografata.
- 3) Si procede, quindi, alla misurazione dell'angolo zenitale β_M e dell'angolo azimutale φ .



Quest'ultimo angolo rappresenta l'orientamento della macchina rispetto all'asse sud e può essere misurato con una bussola o letto nella planimetria del sito. L'accuratezza della loro misura influisce sul valore della riduzione. Tuttavia, è stato verificato che anche misurando gli angoli con una precisione di $\pm 0,5^\circ$, il metodo garantisce risultati sufficientemente affidabili. Per tali misure anche un semplice clinometro è pertanto da considerarsi adeguato.

- 4) Successivamente si misura la distanza $\overline{C'M'}$ direttamente sulla fotografia per calcolare il fattore di riduzione.
- 5) Infine, la posizione del sole è calcolata con l'Eq. (13) utilizzando i valori di altezza solare β_s e azimuth solare φ_s calcolati con l'Eq. (2) e l'Eq. (3). Particolare attenzione deve essere posta rispetto all'angolo φ che, come già osservato, è la differenza tra l'azimuth solare φ_s e l'azimuth della macchina fotografica φ_{cam} .

Il percorso solare sarà sempre visibile nella metà superiore della fotografia, in quanto sorge e tramonta in corrispondenza della linea d'orizzonte. Ma in questa condizione a quadro prospettico verticale, potrebbe accadere che non tutti gli oggetti ostruenti, soprattutto le parti sommitali maggiormente responsabili di eventuali ostruzioni della radiazione solare diretta risultino escluse dal calcolo, non siano contenuti all'interno della fotografia (Fig.16). Per questo è necessario ruotare la macchina fotografica verso l'alto determinando così un'immagine a quadro prospettico obliquo.

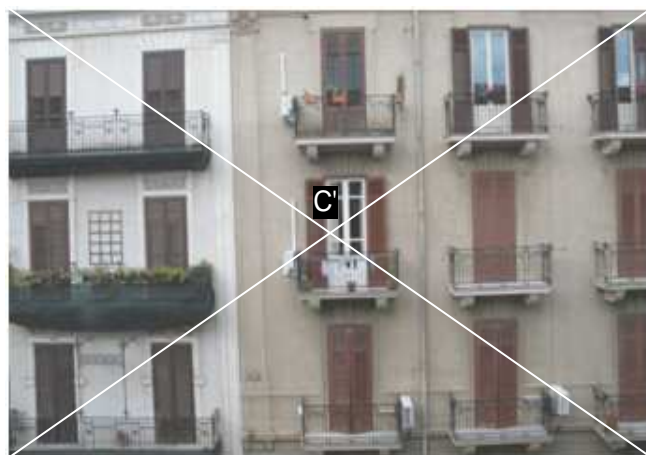
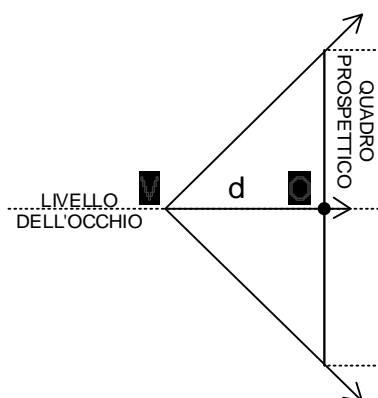
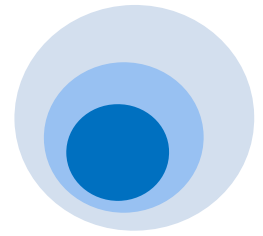


Fig.16. Vista di una fotografia scattata a quadro prospettico verticale: le informazioni non sono tutte contenute nell'immagine



CAPITOLO 4

IL METODO FOTOGRAFICO A QUADRO PROSPETTICO OBLIQUO

4.1 La posizione del sole nella fotografia

Quando la fotografia è scattata a quadro prospettico obliquo inclinato di un certo angolo γ , la L.O. non coincide più con il centro della fotografia, ma si troverà al di sotto di essa se la macchina fotografica è inclinata verso l'alto. Aumentando l'inclinazione della macchina fotografica e quindi l'angolo γ , può anche verificarsi che la L.O. fuoriesca dall'immagine fotografica (Fig.17)..

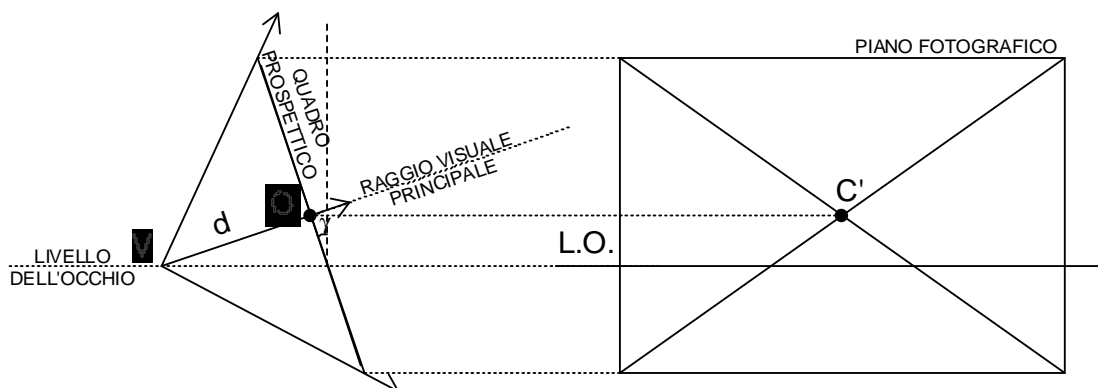


Fig.17. Analogia tra prospettiva e fotografia a piano prospettico obliquo.

In questo caso per definire la posizione del sole sulla fotografia si considerano il piano orizzontale contenente il punto di vista e il piano ruotato attorno alla L.O. di un angolo γ rispetto al piano verticale (Fig.18).

La posizione del sole è rappresentata dal punto T che corrisponde all'intersezione del raggio solare con il piano inclinato. Tale punto T può essere facilmente identificato mediante la geometria analitica nello spazio utilizzando un sistema di coordinate con l'origine posta sulla linea d'orizzonte. L'equazione generica di un piano nello spazio è:

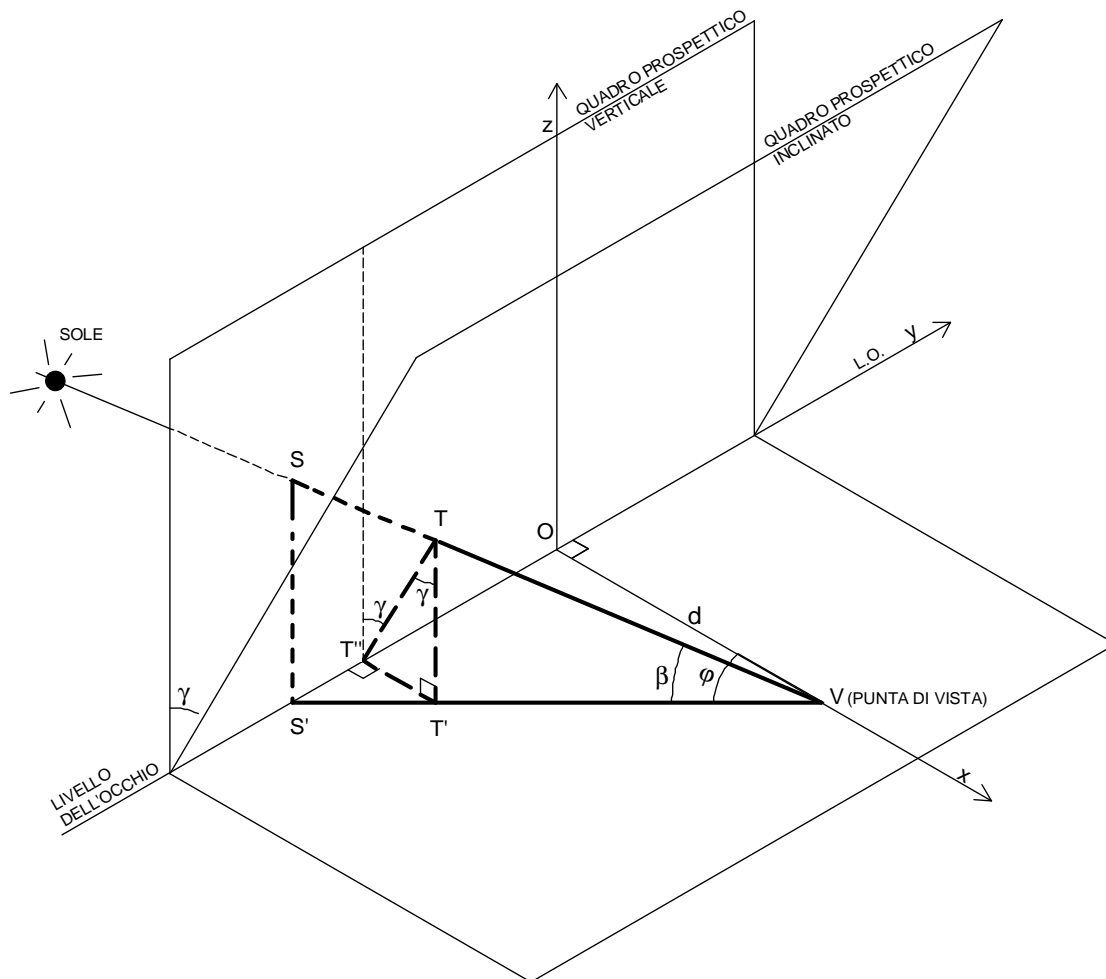
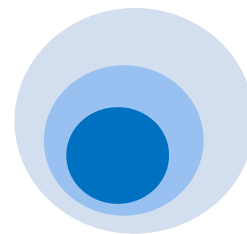


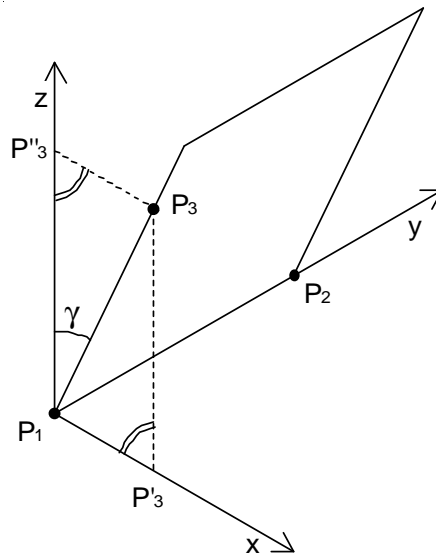
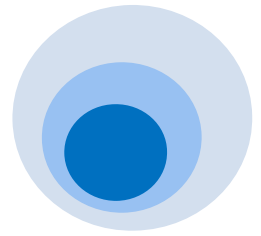
Fig.18. Vista della posizione del sole su quadro prospettico obliquo.

$$mx + ny + pz + q = 0$$

$$\frac{m}{p}x + \frac{n}{p}y + z + \frac{q}{p} = 0 \tag{14}$$

I coefficienti m , n , p and q possono essere determinati imponendo che i seguenti punti P_1 , P_2 and P_3 , di coordinate

$$P_1 \equiv (0,0,0) \quad P_2 \equiv (0,1,0) \quad P_3 \equiv (\sin \gamma, 0, \cos \gamma) \tag{15}$$



$$P_1P_3 = 1 \quad P_1P_3' = \sin \gamma \quad P_1P_3'' = \cos \gamma$$

Fig.19. Rappresentazione dei punti P_1, P_2, P_3 .

appartengano al piano (Fig.19). Ne deriva che:

- punto P_1 :

$$\frac{q}{p} = 0$$

- punto P_2 :

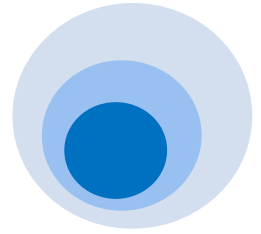
$$\frac{n}{p} + \frac{q}{p} = 0 \rightarrow \frac{n}{p} = 0$$

- punto P_3 :

$$\frac{m}{p} \sin \gamma + \cos \gamma = 0 \rightarrow \frac{m}{p} = -\frac{\cos \gamma}{\sin \gamma}$$

(16)

e, conseguentemente, l'equazione del piano ruotato attorno all'asse y dell'angolo γ è:



$$-\frac{\cos \gamma}{\sin \gamma} x + z = 0$$

$$-\frac{x}{\operatorname{tg} \gamma} x + z = 0 \quad (17)$$

$$\frac{x}{\tan \gamma} - z = 0$$

Per determinare il punto T , è necessario scrivere l'equazione della retta che contiene i punti V e S che, nel sistema di riferimento di Fig.18, hanno le seguenti coordinate:

$$V \equiv [d, 0, 0] \quad S \equiv \left[0, d \tan(\varphi), d \frac{\tan(\beta)}{\cos(\varphi)} \right] \quad (18)$$

L'equazione della retta è descritta dalla seguente relazione:

$$\frac{x - x_V}{x_S - x_V} = \frac{y - y_V}{y_S - y_V} = \frac{z - z_V}{z_S - z_V} \quad (19)$$

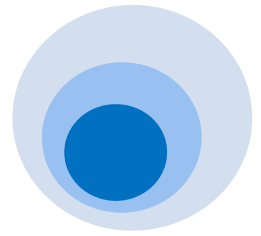
in cui x_V, y_V, z_V e x_S, y_S, z_S sono le coordinate dei punti V and S , rispettivamente. E quindi sostituendo si ha:

$$\frac{x-d}{0-d} = \frac{y-0}{d \operatorname{tg} \varphi - 0} \rightarrow x-d = -d \frac{y}{d \operatorname{tg} \varphi}$$

$$\frac{x-d}{0-d} = \frac{z-0}{\frac{d}{\cos \varphi} \operatorname{tg} \beta - 0} \rightarrow x-d = -d \frac{z}{\frac{d}{\cos \varphi} \operatorname{tg} \beta} \quad (20)$$

L'Equazione (20) corrisponde, quindi, alla seguente coppia di equazioni:

$$\begin{cases} x + \frac{1}{\tan(\varphi)} y - d = 0 \\ x + \frac{\cos(\varphi)}{\tan(\beta)} z - d = 0 \end{cases} \quad (21)$$



Risolviendo il sistema formato dall' Eq.(17), che definisce l'equazione del piano inclinato dell'angolo γ e dalle Eq.(21), è possibile determinare le coordinate del punto T :

$$\begin{cases} x + \frac{1}{\tan(\varphi)} y - d = 0 \\ x + \frac{\cos(\varphi)}{\tan(\beta)} z - d = 0 \\ -\frac{x}{\tan(\gamma)} + z = 0 \rightarrow z = \frac{x}{\tan(\gamma)} \end{cases} \quad (22)$$

Sostituendo il valore di z nella 2^a Eq. del sistema si ottiene:

$$x + \frac{\cos(\varphi)}{\tan(\beta)} \frac{x}{\tan(\gamma)} - d = 0$$

$$x \left[1 + \frac{\cos(\varphi)}{\tan(\beta) \tan(\gamma)} \right] = d$$

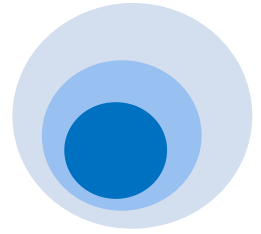
$$x \left[\frac{\text{tg}(\beta)\text{tg}(\gamma) + \cos(\varphi)}{\tan(\beta) \tan(\gamma)} \right] = d$$

$$x = d \frac{\text{tg}(\beta)\text{tg}(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)}$$

Sostituendo il valore di x così ottenuto nella 1^a Eq. del sistema si ha:

$$d \frac{\text{tg}(\beta)\text{tg}(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} + \frac{1}{\tan(\varphi)} y - d = 0$$

$$\frac{1}{\tan(\varphi)} y - d = \left[1 - \frac{\text{tg}(\beta)\text{tg}(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \right] 0$$



$$y = d \left[\frac{\operatorname{tg}(\beta)\operatorname{tg}(\gamma) + \cos(\varphi) - \operatorname{tg}(\beta)\operatorname{tg}(\gamma)}{\tan(\beta)\tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \right] \operatorname{tg}(\gamma)$$

$$y = \frac{\sin(\varphi)}{\tan(\beta)\tan(\gamma) + \cos(\varphi)} d$$

ne consegue che:

$$\frac{x}{\tan(\gamma)} = \frac{1}{\tan(\gamma)} \frac{\tan(\beta)\tan(\gamma)}{\tan(\beta)\tan(\gamma) + \cos(\varphi)} d = \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta)\tan(\gamma) + \cos(\varphi)} d$$

Quindi le coordinate del punto T sono così rappresentate:

$$\begin{aligned} x_T &= \frac{d \tan(\beta) \tan(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \\ y_T &= \frac{d \sin(\varphi)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \\ z_T &= \frac{d \tan(\beta)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \end{aligned} \quad (23)$$

La posizione del punto T sul quadro prospettico obliquo è definita dalle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} \overline{OT}'' &= y_T = \frac{\sin(\gamma)}{\tan(\beta)\tan(\gamma) + \cos(\varphi)} d \\ \overline{TT}'' &= \frac{\overline{TT}'}{\cos(\gamma)} = \frac{z_T}{\cos(\gamma)} = \frac{\operatorname{tg}(\beta)}{[\tan(\beta)\tan(\gamma) + \cos(\varphi)]\cos(\gamma)} d \end{aligned} \quad (24)$$

Osservando le due precedenti equazioni, la posizione del punto T del sole nella fotografia, è definita dall'azimuth solare ($\varphi = \varphi_s - \varphi_{cam}$) e dall'altezza del sole (β_s) nel generico sito, data e ora, dall'**angolo** γ e inoltre, dalla **distanza** d .

- φ_s e β_s

possono essere ottenuti mediante le relazioni (2) e (3) precedentemente descritte.

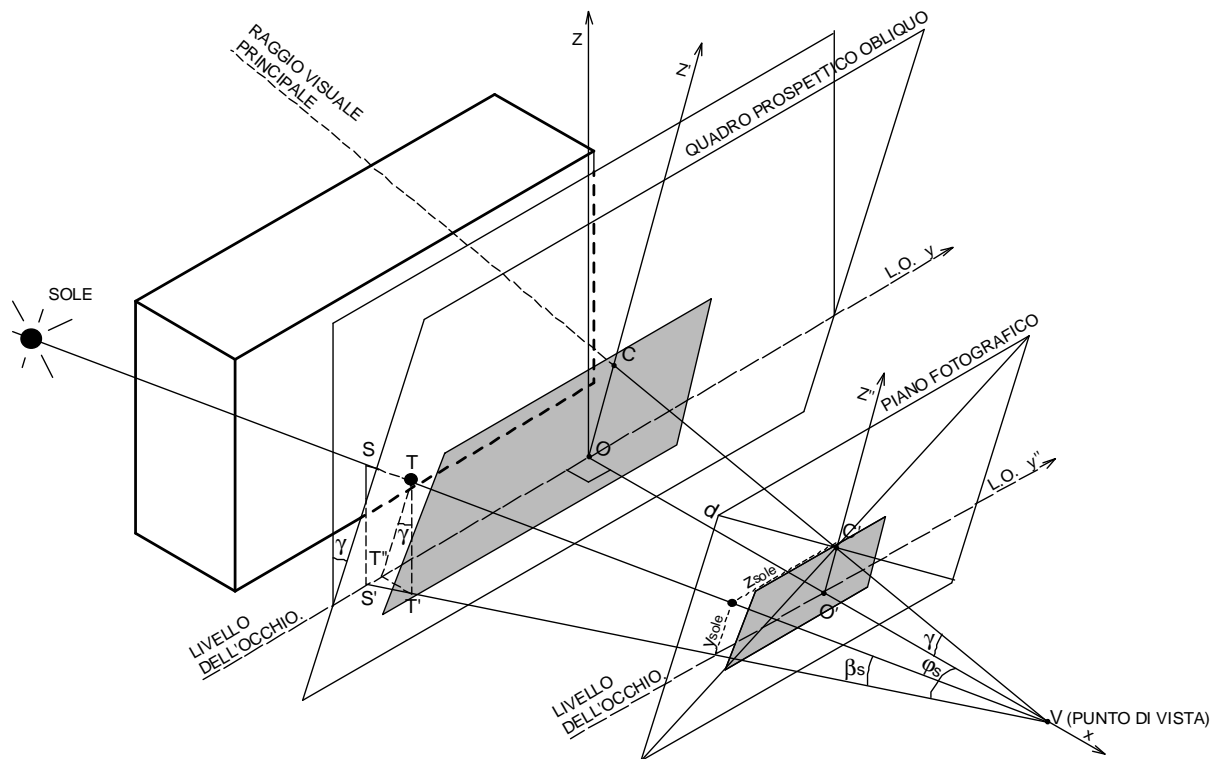
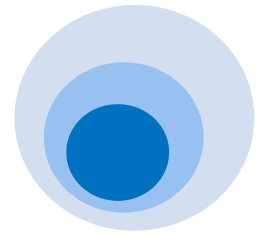
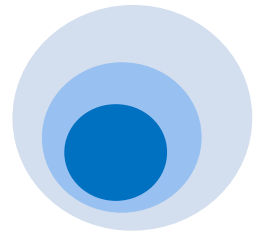


Fig.20. Vista della posizione del sole su un quadro prospettico obliquo e sul piano fotografico: le dimensioni dell'immagine sul piano fotografico appaiono ridotte ma proporzionali.

Come evidenziato precedentemente dalla Eq.(24) per definire la posizione del sole occorrerebbe anche la misura della distanza d , cioè l'effettiva posizione del quadro prospettico rispetto al punto di vista. Infatti, al variare di tale distanza, pur rimanendo immutato il cono visivo, e quindi γ , l'immagine fotografica apparirà più piccola ma proporzionale (Fig.20).

Tuttavia per determinare il rimpicciolimento dell'immagine si può prescindere dalla conoscenza della distanza d . Infatti, data la similitudine degli oggetti su quadri prospettici paralleli, è sufficiente conoscere il fattore di riduzione che deve essere applicato alle quantità $\overline{OT''}$ e $\overline{TT''}$ al fine di ottenerne la corretta misura.



Proseguendo, una volta stampata la fotografia, per calcolare i parametri che definiscono la posizione del sole T , ossia la misura **dell'angolo γ** e **il fattore di riduzione RF** , si può procedere seguendo due percorsi che impiegano rispettivamente:

- 1) il centro della fotografia e un altro punto sull'asse verticale passante per il centro della fotografia (Fig.21);

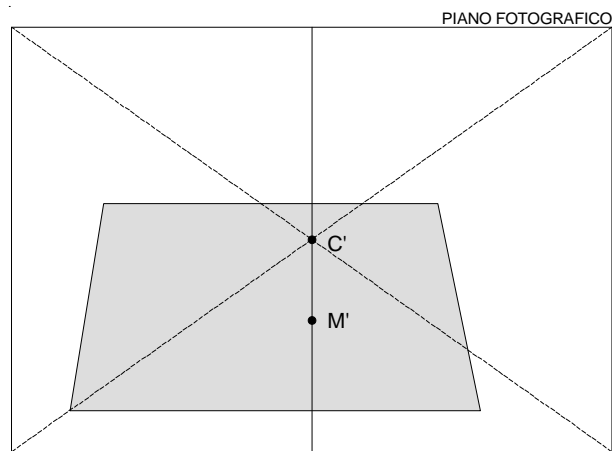


Fig.21. Individuazione sull'immagine fotografica a quadro prospettico obliquo del centro della fotografia e di un alto punto posto sull'asse verticale passante per il centro stesso.

- 2) due punti liberamente scelti sull'asse verticale passante per il centro della fotografia (Fig.22).

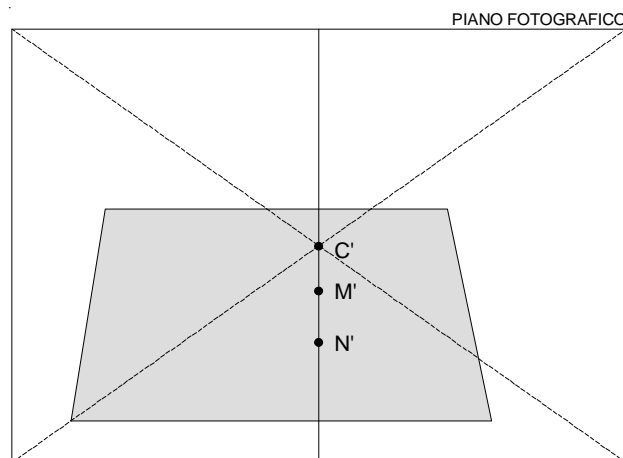
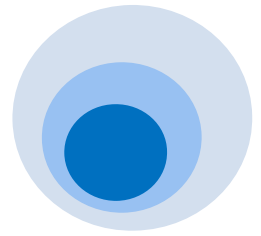


Fig.22. Individuazione sull'immagine fotografica a quadro prospettico obliquo del centro della fotografia e di punti posti sull'asse verticale passante per il centro stesso.



4.2 Le regole del metodo fotografico considerando il centro della fotografia e un altro punto posto sull'asse verticale passante per il centro stesso.

- **L'angolo γ**

Considerando il centro della fotografia, l'angolo γ corrisponde all'inclinazione del raggio visuale principale, ovvero alla rotazione della macchina fotografica rispetto al piano orizzontale.

Osservando la Fig.23 che rappresenta una vista laterale della Fig.20, per determinare γ , si individua il centro C' sulla fotografia stampata, come intersezione delle diagonali. Quindi si misura l'angolo γ del punto dell'ostruzione corrispondente al centro della fotografia.

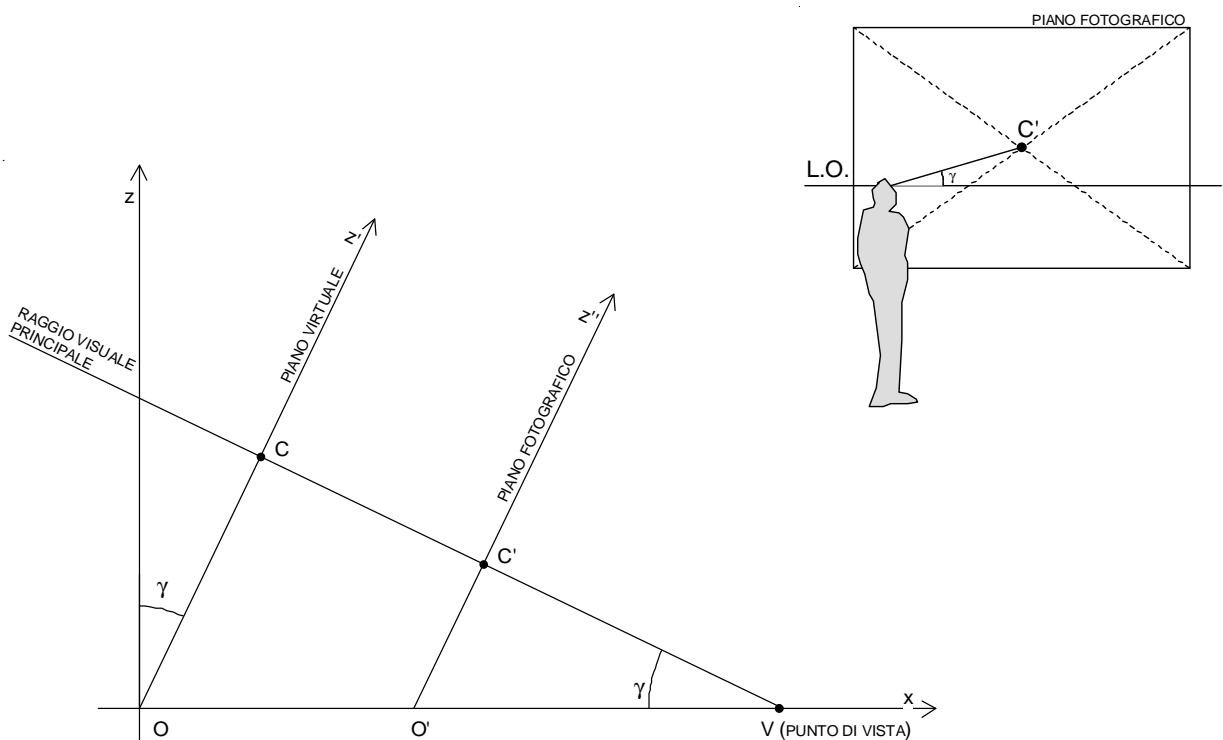


Fig.23. Vista laterale semplificata della Fig.20

- **Il fattore di riduzione (RF) dell'immagine fotografica**

Per valutare il fattore di riduzione si considerano nella Fig.25, che rappresenta una vista laterale della Fig.24 il punto C , centro della fotografia e un punto M scelto sull'asse verticale della fotografia passante per il centro.

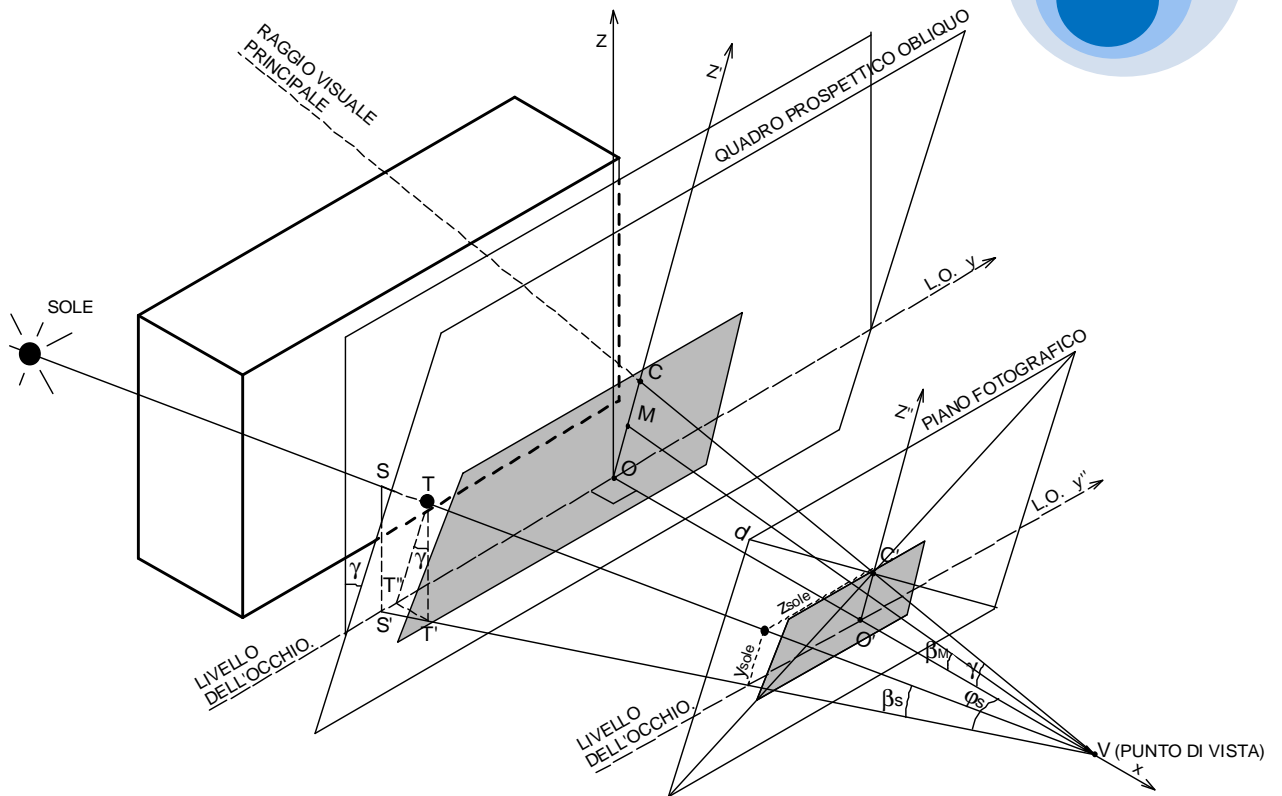
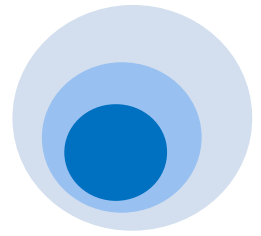


Fig.24. Vista della posizione del sole su un quadro prospettico obliquo e sul piano fotografico con i punti C e M .

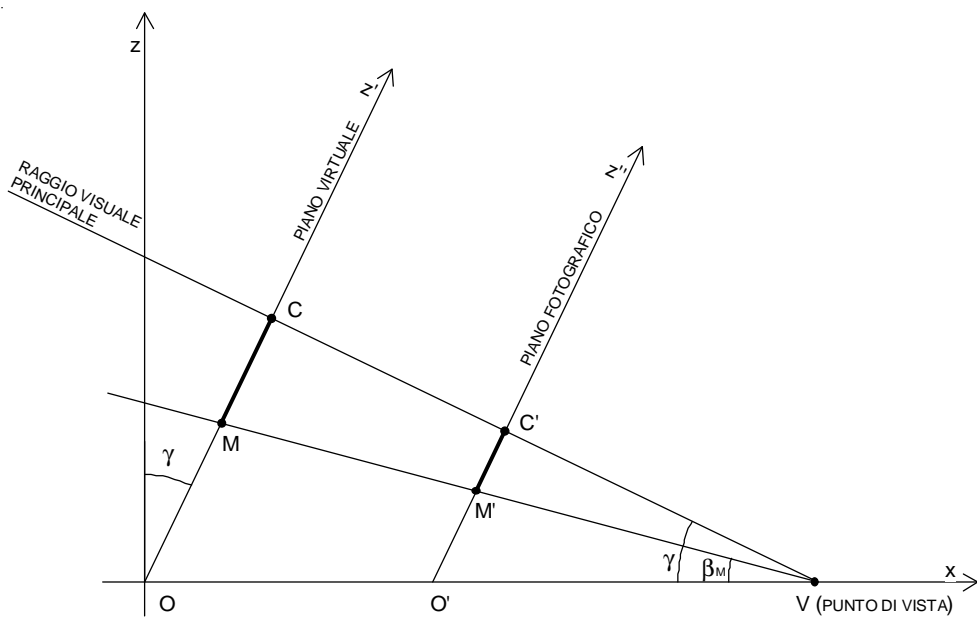
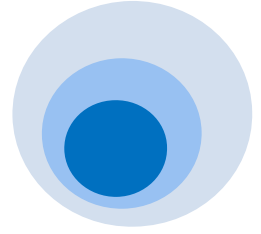


Fig.25. Vista laterale semplificata della Fig.24.



I suddetti punti si trovano su un piano virtuale mentre i corrispondenti C' e M' sono i corrispondenti in fotografia. Per determinare la posizione di C e M è possibile come già detto, utilizzare le Eq. (24) dopo avere imposto le seguenti condizioni:

$$\overline{OV} = d \quad \beta_C = \gamma \quad \varphi_C = 0 \quad \varphi_M = 0 \quad (25)$$

in cui φ_C and φ_M sono gli angoli azimutali dei punti C e M e β_C è l'angolo zenitale del centro dell'immagine corrispondente all'angolo di inclinazione del quadro. Per il punto C e M si ottengono rispettivamente:

$$\begin{aligned} x_C &= \frac{d \tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} \\ y_C &= 0 \\ z_C &= \frac{d \tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} \end{aligned} \quad (26)$$

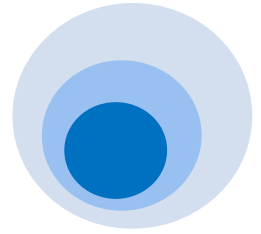
e

$$\begin{aligned} x_M &= \frac{d \tan(\beta_M) \tan(\gamma)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1} \\ y_M &= 0 \\ z_M &= \frac{d \tan(\beta_M)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1} \end{aligned} \quad (27)$$

in cui β_M è l'angolo zenitale del punto M . Con le coordinate dei due punti si ricava facilmente la loro distanza che vale:

$$\overline{CM} = \sqrt{(x_C - x_M)^2 + (z_C - z_M)^2} = d \cdot \sqrt{D_x^2 + D_z^2} = d \cdot D$$

$$\overline{CM} = d \sqrt{\left(\frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} - \frac{\tan(\beta_M) \tan(\gamma)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1} \right)^2 + \left(\frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} - \frac{\tan(\beta_M)}{\tan^2(\beta_M) \tan(\gamma) + 1} \right)^2}$$



$$D_x = \frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1} - \frac{\tan(\beta_M)\tan(\gamma)}{\tan(\beta_M)\tan(\gamma)+1}$$

$$D_z = \frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1} - \frac{\tan(\beta_M)}{\tan(\beta_M)\tan(\gamma)+1}$$

Poiché i triangoli CVM e $C'V'M'$ sono simili, è possibile definire un fattore di riduzione (RF) che permette di ridurre l'immagine dal piano prospettico al piano della fotografia. Tale fattore è dato da:

$$RF = \frac{\overline{C'M'}}{CM} = \frac{\overline{C'M'}}{d \cdot D} \quad (28)$$

La quantità $\overline{C'M'}$ rappresenta la distanza dal centro della fotografia di un generico punto M' posto sull'asse verticale passante per il centro C' . Se $\overline{C'M'}$ è misurato in millimetri e d in metri, il fattore di riduzione è espresso in mm/m perché D è adimensionale. Il fattore di riduzione permette di identificare correttamente la posizione del sole sul quadro. Infatti, moltiplicando l'Eq. (24) per RF si può rappresentare la posizione del sole sulla fotografia utilizzando le seguenti coordinate y_{sole} e z_{sole} .

$$y_{sole} = \frac{\tan(\beta)\tan(\gamma)}{\tan(\beta)\tan(\gamma)+\cos(\varphi)} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{D}$$

$$z_{sole} = \frac{\sin(\varphi)}{[\tan(\beta)\tan(\gamma)+\cos(\varphi)]\cos(\gamma)} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{D} \quad (29)$$

Tali coordinate sono espresse in millimetri e sono indipendenti dal valore della distanza virtuale d . La quantità $\overline{C'M'}$ cambia con le dimensioni della fotografia e questo consente di ridurre correttamente la vista prospettica; la quantità D dipende dagli angoli γ e β_M dei punti dell'ostruzione nella realtà corrispondenti ai punti C' e M' della fotografia.

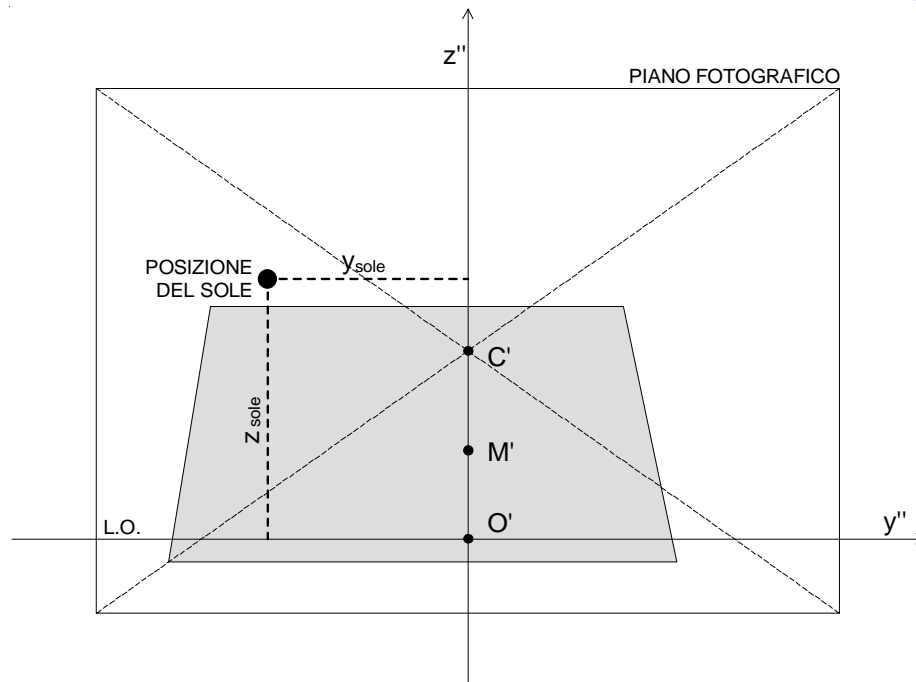
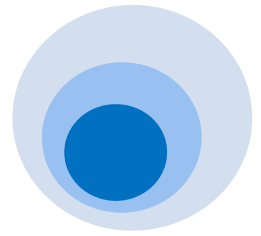


Fig. 26. Identificazione della posizione del sole nella fotografia

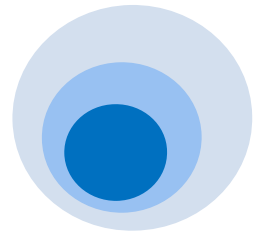
Nella Fig.26 è identificata la posizione del sole nella fotografia tramite le coordinate y_{sole} e z_{sole} . La coordinata z_{sole} è riferita all'asse y'' che corrisponde alla linea d'orizzonte della vista prospettica.

Per potere tracciare la linea d'orizzonte sulla fotografia è necessario conoscere la posizione del punto O' che corrisponde al punto O nel quadro. Il punto O è l'origine del sistema di coordinate ortogonali della Fig.24 e quindi, la sua distanza dal punto C può essere calcolata utilizzando le coordinate descritte dall'Eq. (24):

$$\overline{CO} = d \sqrt{\left(\frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2 + \left(\frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2} \quad (30)$$

Conseguentemente, la distanza di C' da O' è calcolabile tramite il fattore RF :

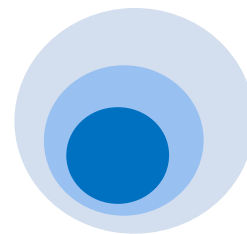
$$\overline{C'O'} = \sqrt{\left(\frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2 + \left(\frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{D} \quad (31)$$



e indica a quanti millimetri al di sotto del centro della fotografia si trova la linea d'orizzonte, o asse y'' .

Nonostante l'apparente complessità delle equazioni impiegate nella procedura, l'applicazione pratica del nuovo metodo è estremamente semplice e veloce. Preliminarmente è opportuno eseguire alcune regole per la corretta applicazione del metodo:

- 1) Si procede scattando la fotografia con una macchina posta su un piano orizzontale (a tal scopo possono essere utilizzati una livella a bolla e un treppiedi), per consentire che la linea d'orizzonte nella fotografia risulti orizzontale così come in una vista prospettica reale.
- 2) La macchina va ruotata, successivamente, verso l'alto attorno all'asse orizzontale in modo da includere nella fotografia la maggiore quantità di informazioni relative alle ostruzioni e alla sovrastante volta celeste.
- 3) Nell'immagine fotografica ottenuta, vengono individuati il suo centro, come intersezione delle due diagonali, ed un punto M' , posto sull'asse verticale passante per il centro, che sia facilmente identificabile in situ sull'oggetto ostruente corrispondente.
- 4) Si misurano gli angoli zenitali γ e β_M e il relativo angolo azimutale φ . Quest'ultimo angolo rappresenta l'orientamento della macchina rispetto all'asse sud e può essere misurato con una bussola o letto nella planimetria del sito. Poiché il termine D nel fattore di riduzione dipende dagli angoli γ e β_M , l'accuratezza della loro misura influisce sulla correttezza della riduzione e sulla valutazione dell'angolo di inclinazione del quadro prospettico. Tuttavia, è stato verificato che anche misurando gli angoli con una precisione di $\pm 0,5^\circ$, il metodo garantisce risultati sufficientemente affidabili. Per tali misure anche un semplice clinometro è pertanto da considerarsi adeguato.
- 5) Si misura, quindi, sulla fotografia la distanza $\overline{C'M'}$ direttamente sulla fotografia per calcolare il fattore di riduzione.
- 6) L'Eq. (28) restituisce la posizione di O' nella fotografia in modo da tracciare l'asse orizzontale del sistema di coordinate cartesiane.



- 7) La posizione del sole viene quindi calcolata con l'Eq. (29) utilizzando i valori di altezza solare β_s e azimuth solare φ_s calcolati con l'Eq. (2) e l'Eq. (3). Particolare attenzione deve essere posta rispetto all'angolo φ che, come già osservato, è la differenza tra l'azimuth solare φ_s e l'azimuth della macchina fotografica φ_{cam} .

4.3 Applicazione del metodo fotografico utilizzando il centro della fotografia e un punto sull'asse verticale passante per il centro stesso.

Per determinare le posizioni del sole ad intervalli regolari con il metodo fotografico che, in questo caso impiega il centro della fotografia ed un altro punto sull'asse verticale passante per il centro stesso, si sono utilizzate immagini fotografiche dell'edificio del DREAM scattate utilizzando una macchina fotografica digitale reflex "Canon Power Shot A480" con lunghezza focale di 50 mm. Tutte le immagini sono fortemente deformate a causa dell'inclinazione della macchina e della vicinanza all'edificio.

- **Immagine 1.**

I dati di calcolo relativi all'immagine in Fig.27 sono riassunti nella Tabella 1 mentre le coordinate angolari e rettangolari del sole alle differenti ore, valutate mediante una semplice routine implementata come macro VBA in Microsoft Excel, sono indicati nella Tabella 2. Dai calcoli effettuati, la linea d'orizzonte risulta essere ad una distanza di 17,15 cm al di sotto del centro della fotografia. Tale valore corrisponde a quello della fotografia riportata in Fig.27. La Fig.27, in cui la posizione del sole calcolata è raffigurata in forma di piccoli cerchi, consente una immediata lettura delle ore in cui l'edificio ostruisce la radiazione solare diretta. A partire dalle 11.30 e fino alle 14.00 l'edificio non apporta alcun ombreggiamento al punto della superficie di riferimento.

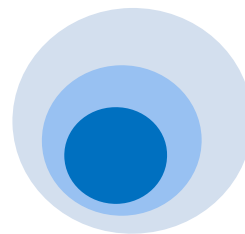


Tabella 1. Immagine 1: dati per calcolare la posizione del sole

DATI LOCALITA'		DATI FOTOGRAFIA	
Data	20.01.2010	Misura [mm]	181 x 131
Città	Palermo	Azimuth macchina φ_{cam}	10.00°
Longitudine	13°21'0"E	Angolo zenitale del punto C γ	22.75°
Latitudine	38°7'0"N	Angolo zenitale del punto N β_N	6.00°
LSM	+1	$C'M'$ [mm]	57,0

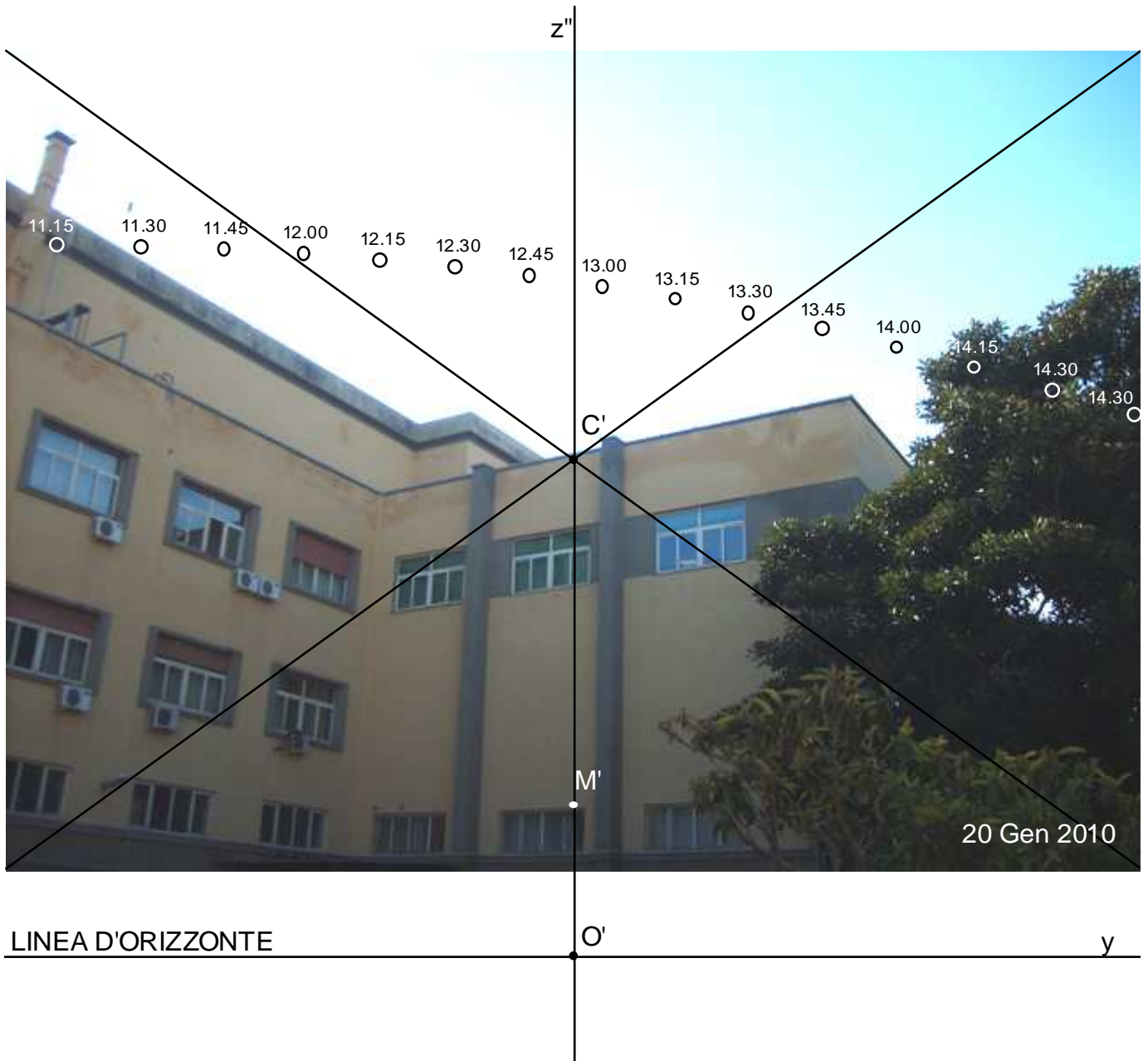
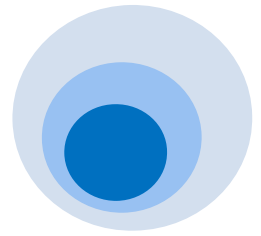


Fig. 27. Immagine 1: posizioni del sole calcolate ad intervalli di 15 minuti.

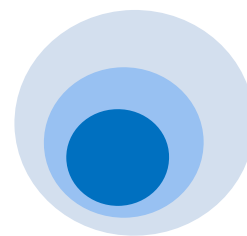


Tabella 2. Immagine 1: Coordinate della posizione del sole nella foto rispetto alla L.O.

Ora locale [ore]	Azimuth φ_s [°]	Altezza β_s [°]	y_{sole} [mm]	z_{sole} [mm]
11:00	29.08	-20.98	-9.69	11.36
11:15	30.04	-17.08	-8.25	11.37
11:30	30.81	-13.09	-6.89	11.35
11:45	31.37	-9.03	-5.58	11.31
12:00	31.73	-4.92	-4.31	11.24
12:15	31.88	-0.77	-3.09	11.14
12:30	31.81	3.37	-1.89	11.02
12:45	31.53	7.50	-0.71	10.88
13:00	31.04	11.58	0.45	10.71
13:15	30.35	15.60	1.62	10.51
13:30	29.46	19.54	2.78	10.28
13:45	28.38	23.37	3.96	10.03
14:00	27.12	27.09	5.15	9.74
14:15	25.70	30.69	6.38	9.42
14:30	24.11	34.16	7.64	9.06
14:45	22.39	37.50	8.95	8.66
15:00	20.53	40.72	10.32	8.20

Una verifica sperimentale delle posizioni del sole calcolate con il metodo proposto è stata effettuata mediante scatti fotografici del disco solare negli stessi intervalli di tempo calcolati. L'operazione è stata condotta dopo avere opportunamente schermato l'obiettivo della macchina fotografica con lenti scure. I risultati dell'analisi sono visualizzati in Fig.28. In Fig.29 gli effetti della posizione del sole calcolata alle 12:00 e 11:15 del 20 gennaio 2010.

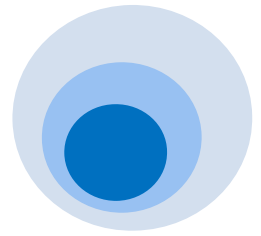


Fig. 28. Immagine 1: confronto tra la posizione del sole calcolata e quella fotografata il 20 Gen 2010.

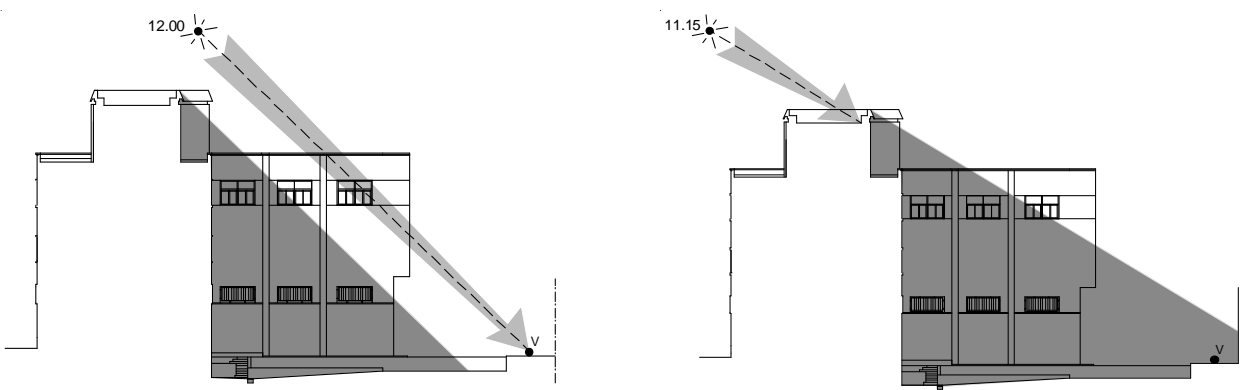
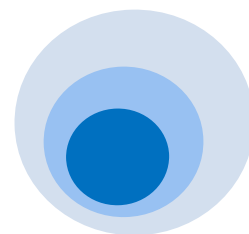


Fig. 29. Immagine 1: effetti della posizione del sole calcolata alle 12:00 e 11:15 del 20 Gen 2010.



- **Immagine 2.**

I dati di calcolo relativi all'immagine in Fig.30 sono riassunti nella Tabella 3 mentre le coordinate angolari e rettangolari del sole alle differenti ore, valutate mediante la stessa routine implementata come macro VBA in Microsoft Excel sono indicati nella Tabella 4. La posizione del sole calcolata, rappresentata dai piccoli cerchi, permette di leggere i periodi di tempo in cui l'edificio ostruisce la radiazione solare diretta. Tra le 16.45 e fino alle 17.00 l'edificio apporta ombreggiamento al punto considerato. Il lasso di tempo ridotto in cui si verifica tale condizione è prova di quanto il metodo fotografico utilizzato consenta di verificare gli effetti degli oggetti ostruenti con un elevato livello di precisione.

Tabella 3. Immagine 2: dati per calcolare la posizione del sole

DATI LOCALITA'		DATI FOTOGRAFIA	
Data	21.04.2010	Misura [mm]	170 x 128
Città	Palermo	Azimuth macchina φ_{cam}	68.50°
Longitudine	13°21'0"E	Angolo zenitale del punto C γ	36.50°
Latitudine	38°7'0"N	Angolo zenitale del punto N β_N	29.50°
LSM	+1	C'M' [mm]	23,3

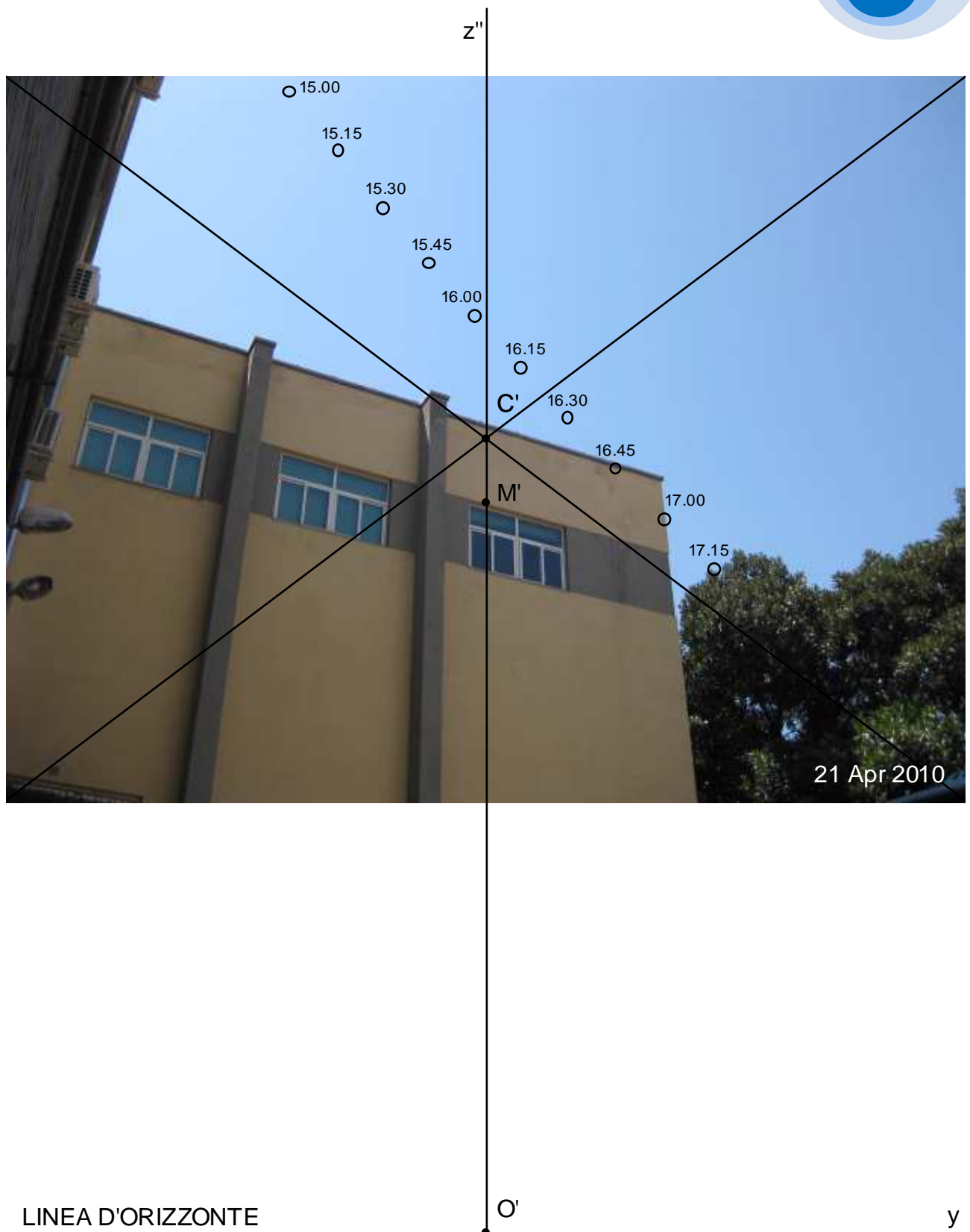
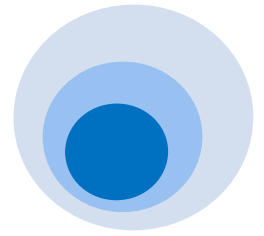


Fig. 30. Immagine 2: posizioni del sole calcolate ad intervalli di 15 minuti.

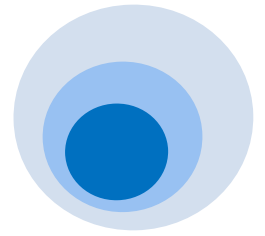
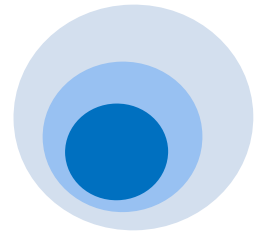


Tabella 4. Immagine 2: coordinate della posizione del sole nella foto rispetto alla L.O.

Ora locale [ore]	Azimuth φ_S [°]	Altezza β_S [°]	y_{sole} [mm]	z_{sole} [mm]
15:00	29.08	-20.98	--3.49	20.18
15:15	30.04	-17.08	-2.65	19.13
15:30	30.81	-13.09	-1.82	18.12
15:45	31.37	-9.03	-1.01	17.15
16:00	31.73	-4.92	-4.31	16.22
16:15	31.88	-0.77	-0.20	15.30
16:30	31.81	3.37	0.62	14.40
16:45	31.53	7.50	1.44	13.51
17:00	31.04	11.58	2.28	12.62
17:15	30.35	15.60	3.14	11.71

L'attendibilità del calcolo è stata ulteriormente verificata sperimentalmente mediante scatti fotografici del disco solare nei medesimi intervalli di tempo. I risultati sono evidenziati in Fig.31. Il maggiore scostamento, seppur minimo, è visibile in corrispondenza della posizione del sole alle ore 15:00, cioè alla distanza maggiore dall'asse della fotografia. Ciò condurrebbe ad attribuire tale inesattezza alle distorsioni provocate dalla lente nella macchina fotografica o ad un eventuale movimento della macchina fotografica in considerazione di una probabile instabilità del treppiedi adoperato. Per confermare tale ipotesi si è proceduto ad analizzare altre immagini fotografiche.



- **Immagine 3.**

L'immagine fotografica è stata effettuata il 27 aprile 2010 e i risultati del calcolo sono visibili in Fig.32. I dati di calcolo relativi sono leggibili in Tabella 5; le coordinate angolari e rettangolari del sole alle differenti ore, ottenute dalla stessa routine adoperata per le immagini precedenti, sono indicati nella Tabella 6.



Fig. 31. Immagine 2: confronto tra la posizione del sole calcolata e quella fotografata il 21 aprile 2010.

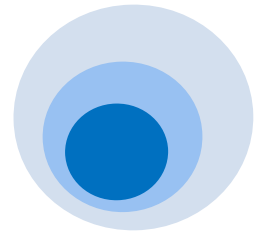


Tabella 5. Immagine 3: dati per calcolare la posizione del sole

DATI LOCALITA'		DATI FOTOGRAFIA	
Data	27.04.2010	Misura [mm]	170 x 128
Città	Palermo	Azimuth macchina φ_{cam}	-59.75°
Longitudine	13°21'0"E	Angolo zenitale del punto C γ	39.50°
Latitudine	38°7'0"N	Angolo zenitale del punto N β_N	22.00°
LSM	+1	C 'M' [mm]	60

Dalla Fig.32 emerge che l'edificio causa ombreggiamento sulla superficie di riferimento soltanto fino alle 9:00. Successivamente a tale ora la componente diretta della radiazione solare sarà sempre presente.

Tabella 6. Immagine 3: coordinate della posizione del sole nella foto rispetto alla L.O.

Ora locale [ore]	Azimuth φ_S [°]	Altezza β_S [°]	y_{sole} [mm]	z_{sole} [mm]
8:45	-85.51	28.14	-7.99	12.74
9:00	-83.02	31.07	-6.89	13.61
9:15	-80.44	33.99	-5.84	14.45
9:30	-77.73	36.89	-4.85	15.28
9:45	-74.86	39.75	-3.89	16.10
10:00	-71.80	42.58	-2.97	16.92
10:15	-68.52	45.26	-2.06	17.75
10:30	-64.97	48.07	-1.17	18.59
10:45	-61.09	50.70	-0.29	19.46
11:00	-56.83	53.22	0.60	20.35
11:15	-52.12	55.63	1.49	21.27

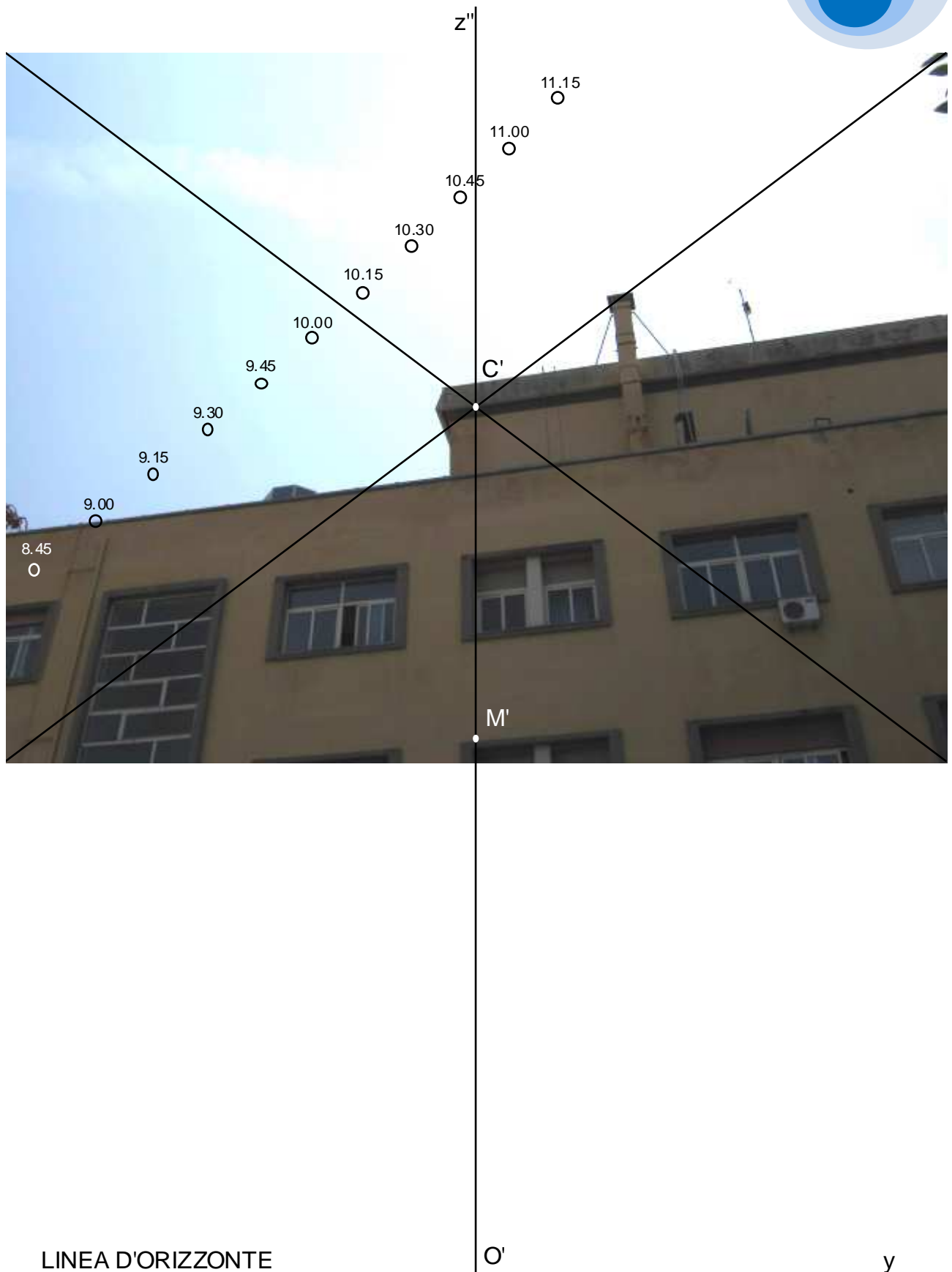
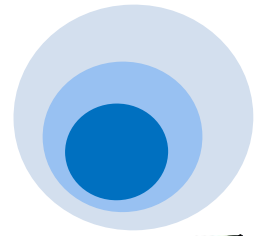
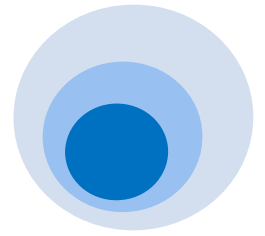


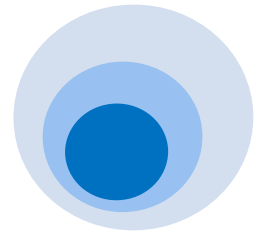
Fig. 32. Immagine 3: posizioni del sole calcolate ad intervalli di 15 minuti.



La verifica sperimentale con la sovrapposizione delle immagini della posizione del disco solare fotografato e calcolato, permette di constatare quanto precedentemente ipotizzato. Gli scarti tra le posizioni del sole nelle due condizioni prese in esame, sono anche per questa immagine fotografica irrisori in corrispondenza dei punti prossimi all'asse verticale passante per il centro della fotografia, mentre sono più marcati, seppur altrettanto minimi, man mano che ci si allontana da esso. La Fig.33 riassume i suddetti risultati.



Fig. 33. Immagine 3: confronto tra la posizione del sole calcolata e quella fotografata il 27 aprile 2010.



4.4 Le regole del metodo fotografico utilizzando due punti scelti sull'asse verticale passante per il centro della fotografia.

Il metodo esposto in precedenza implica l'identificazione precisa del centro della fotografia con la relativa misura dell'angolo zenitale. Talvolta può accadere che tale centro non corrisponda a un punto facilmente riconoscibile dell'oggetto ostruente, ovvero ricada su una porzione della volta celeste (Fig.34). In tali casi la misurazione dell'angolo γ può risultare imprecisa o addirittura impossibile. Per tale motivo la procedura viene impiegata scegliendo arbitrariamente due punti sull'asse passante per il centro della fotografia e misurandone i rispettivi angoli zenitali e azimutali, nonchè la loro distanza dal centro della foto.

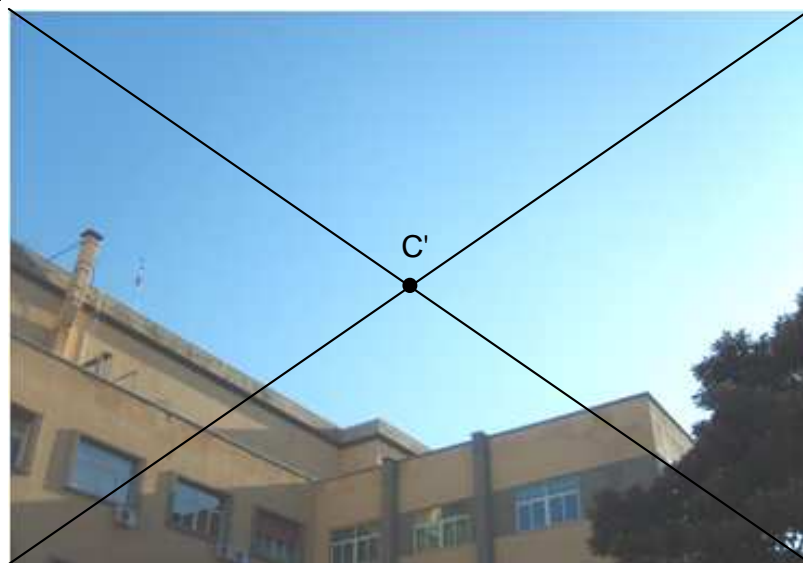


Fig.34. Vista fotografica nella condizione in cui il centro non è identificabile.

- **L'angolo γ**

L'angolo γ può essere determinato attraverso la misura degli angoli sotto cui sono visti i due punti M e N sull'asse passante per il centro della fotografia indicati nella Fig.36, vista laterale semplificata della Fig.35.

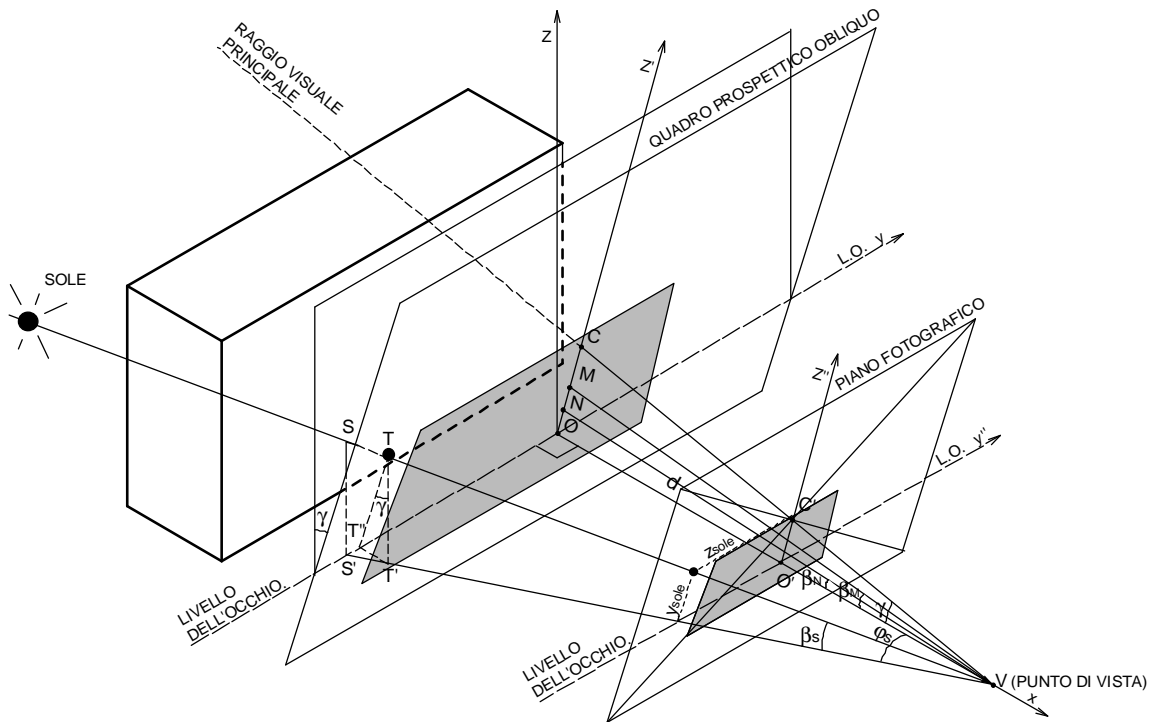
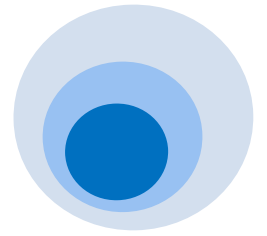


Fig.35. Vista della posizione del sole su quadro prospettico obliquo e sul piano fotografico con i punti C , M e N .

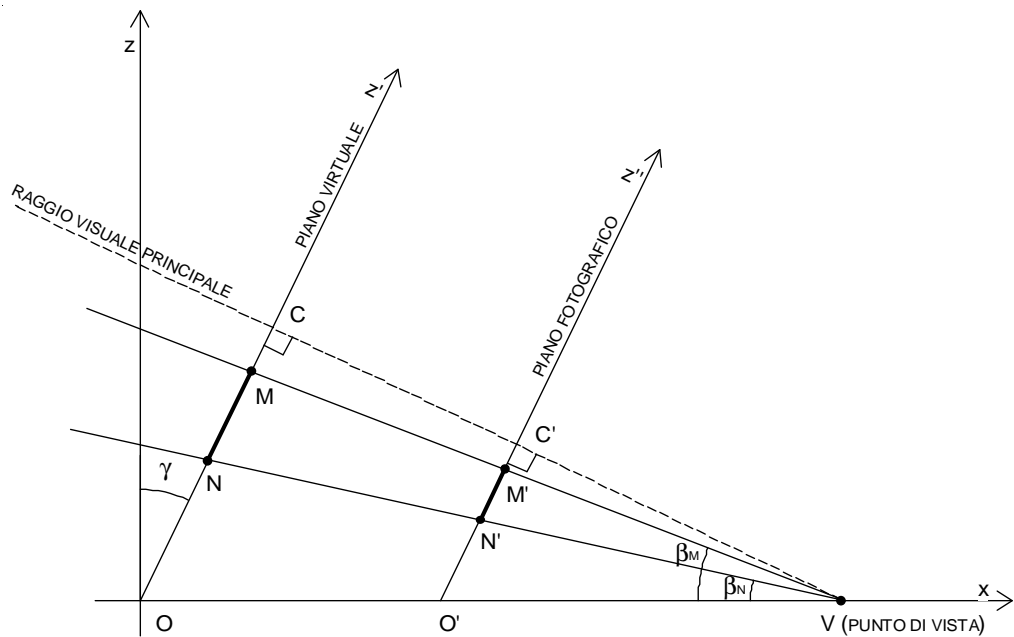
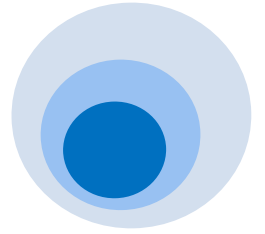


Fig.36. Vista laterale semplificata della figura 35.



I punti M e N sono due generici punti posti lungo l'asse del piano prospettico, al di sotto del centro C ; ad essi corrispondono i punti M' , N' sul quadro fotografico. Con riferimento ai triangoli $O'C'V$ e $M'C'V$ valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} \overline{C'V} &= \overline{O'V} \cos(\gamma) = d \cos(\gamma) & \overline{M'V} &= \frac{\overline{C'V}}{\cos(\gamma - \beta_M)} \\ \overline{C'M'} &= \overline{M'V} \sin(\gamma - \beta_M) = \frac{d \cos(\gamma)}{\cos(\gamma - \beta_M)} \cdot \sin(\gamma - \beta_M) = d \cos(\gamma) \tan(\gamma - \beta_M) \end{aligned} \quad (32)$$

ovviamente valide anche per il punto N' :

$$\begin{aligned} \overline{N'V} &= \frac{\overline{C'V}}{\cos(\gamma - \beta_N)} \\ \overline{C'N'} &= \overline{N'V} \sin(\gamma - \beta_N) = \frac{d \cos(\gamma)}{\cos(\gamma - \beta_N)} \cdot \sin(\gamma - \beta_N) = d \cos(\gamma) \tan(\gamma - \beta_N) \end{aligned} \quad (33)$$

Pertanto:

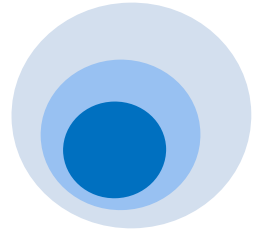
$$\frac{\overline{C'M'}}{\overline{C'N'}} = \frac{\tan(\gamma - \beta_M)}{\tan(\gamma - \beta_N)} = \frac{\frac{\tan(\gamma) - \tan(\beta_M)}{1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_M)}}{\frac{\tan(\gamma) - \tan(\beta_N)}{1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_N)}} = R \quad (34)$$

dove R misura il rapporto tra le lunghezze dei segmenti $\overline{C'M'}$ e $\overline{C'N'}$ misurati direttamente sulla fotografia. Dall' Eq. (34) è possibile ricavare il valore dell'angolo γ .

Infatti risolvendo si ottiene:

$$\frac{\tan(\gamma) - \tan(\beta_M)}{1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_M)} = R \frac{\tan(\gamma) - \tan(\beta_N)}{1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_N)}$$

$$[\tan(\gamma) - \tan(\beta_M)][1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_N)] = R [\tan(\gamma) - \tan(\beta_N)][1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_M)]$$



$$\tan(\gamma) + \tan^2(\gamma) \tan(\beta_N) - \tan(\beta_M) - \tan(\gamma) \tan(\beta_M) \tan(\beta_N) = \\ R \tan(\gamma) + R \tan^2(\gamma) \tan(\beta_M) - R \tan(\beta_N) - R \tan(\gamma) \tan(\beta_M) \tan(\beta_N)$$

$$[\tan(\beta_N) - R \tan(\beta_M)] \tan^2(\gamma) + [1 - \tan(\beta_M) \tan(\beta_N) - R + R \tan(\beta_M) \tan(\beta_N)] \tan(\gamma) - \tan(\beta_M) + R \tan(\beta_N) = 0$$

$$[\tan(\beta_N) - R \tan(\beta_M)] \tan^2(\gamma) + \{[1 - R - \tan(\beta_M) \tan(\beta_N)](1 - R)\} \tan(\gamma) - \tan(\beta_M) + R \tan(\beta_N) = 0$$

$$[\tan(\beta_N) - R \tan(\beta_M)] \tan^2(\gamma) + (1 - R)[1 - \tan(\beta_M) \tan(\beta_N)] \tan(\gamma) - \tan(\beta_M) + R \tan(\beta_N) = 0$$

posto:

$$\tan(\beta_N) - R \tan(\beta_M) = a$$

$$(1 - R)[1 - \tan(\beta_M) \tan(\beta_N)] = b$$

$$-\tan(\beta_M) + R \tan(\beta_N) = c$$

si ha che:

$$\tan(\gamma) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (34)$$

- **Il fattore di riduzione dell'immagine fotografica**

Vale la procedura utilizzata considerando il centro della fotografia e un punto sull'asse verticale passante per il centro. Si può quindi rappresentare la posizione del sole sulla fotografia utilizzando le coordinate y_{sole} e z_{sole} così come tracciare la linea d'orizzonte L.O (Fig.37).

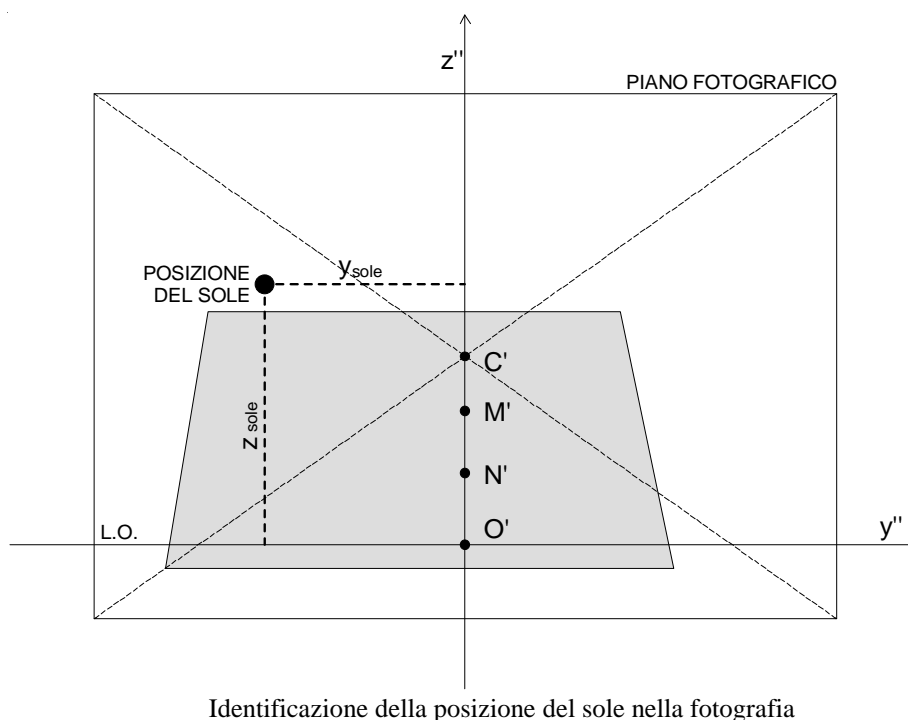
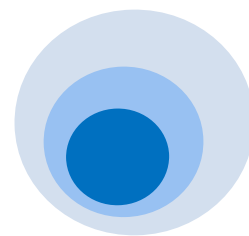
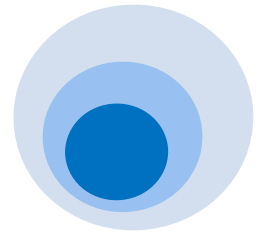


Fig.37.

In questa variante il metodo richiede la misura, per ogni fotografia scattata, degli angoli zenitali e azimutali di due punti, scelti arbitrariamente sull'asse passante per il centro della fotografia, nonchè la misura della loro distanza $\overline{C'M'}$ e $\overline{C'N'}$ dal centro della foto.

Ovviamente, anche in questa procedura valgono, per la corretta applicazione del metodo, i seguenti accorgimenti:

- 1) la fotografia va scattata con una macchina posta su un piano orizzontale (con l'utilizzo di una livella a bolla e di un treppiedi), perché la linea d'orizzonte nella fotografia deve risultare orizzontale così come nella vista prospettica reale.
- 2) La macchina fotografica va successivamente ruotata verso l'alto attorno all'asse orizzontale in modo da includere nella fotografia la maggiore porzione di ostruzione e la sovrastante volta celeste.
- 3) Nella foto, vengono individuati il suo centro, come intersezione delle due diagonali, e due punti M' e N' , posti sull'asse verticale passante per il centro, che siano facilmente riscontrabili in situ sulle ostruzioni fotografate.



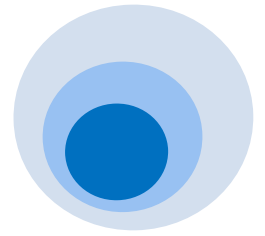
- 4) Si procede, quindi, alla misurazione dei due angoli zenitali β_M e β_N e dell'angolo azimutale φ . Quest'ultimo angolo rappresenta l'orientamento della macchina rispetto all'asse sud e può essere misurato con una bussola o letto nella planimetria del sito. Poiché il termine D nel fattore di riduzione dipende dagli angoli β_M e β_N , l'accuratezza della loro misura influisce sulla correttezza della riduzione e sulla valutazione dell'angolo di inclinazione del quadro prospettico. Anche in questo caso, il clinometro ha un adeguato grado di precisione.
- 5) Una volta acquisiti i dati angolari si può procedere alla misura delle due distanze $\overline{C'M'}$ e $\overline{C'N'}$ direttamente sulla fotografia per calcolare l'angolo di inclinazione del quadro ed il fattore di riduzione. La posizione del sole è calcolata con l'Eq. (29) utilizzando i valori di altezza solare β_s e azimuth solare φ_s , calcolati con l'Eq. (2) e l'Eq. (3).

4.5 Applicazione del metodo fotografico utilizzando due punti sull'asse verticale passante per il centro della fotografia.

Anche in questo caso, per calcolare la posizione del sole si sono utilizzate immagini fotografiche dell'edificio del DREAM scattate con la macchina fotografica digitale reflex "Canon Power Shot A480" con lunghezza focale di 50 mm.

- **Immagine 4.**

L'immagine fotografica mostrata in Fig.38 è chiarificatrice di come si possa prescindere dalla misurazione degli angoli riferibili al centro della fotografia. Vengono infatti scelti due punti sull'asse verticale garantendo, quindi, una flessibilità nell'applicazione del metodo. In particolare i punti sono ricercati in quelle porzioni della figura in cui sono maggiormente riconoscibili e identificabili per la misurazione degli angoli. I dati di calcolo relativi all'immagine in Fig.38 sono rappresentati nella Tabella 7, mentre le



coordinate angolari e rettangolari del sole alle differenti ore, valutate sempre con la routine implementata come macro VBA in Microsoft Excel, sono indicati nella Tabella 8.

Tabella 7. Immagine 4: dati per calcolare la posizione del sole.

DATI LOCALITA'		DATI FOTOGRAFIA	
Data	01.04.2010	Misura [mm]	180 x 130
Città	Palermo	Azimuth macchina φ_{cam}	-44.28°
Longitudine	13°21'0"E	Angolo zenitale del punto M β_M	32.20°
Latitudine	38°7'0"N	Angolo zenitale del punto N B_N	28.20°
LSM	+1	$C'M'$ [mm]	29,8
		$C'N'$ [mm]	44,2

Nella Fig.38, la posizione del sole calcolata consente di affermare che alle 8:30 la radiazione solare diretta viene ostruita dall'edificio. A partire dalle 8:45 il punto da cui è scattata la fotografia risulta irraggiato fino alle 11:30.

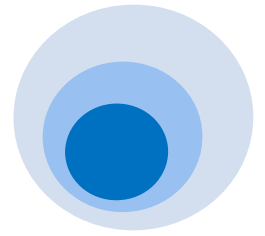


Tabella 8. Immagine 4: coordinate della posizione del sole nella fotografia

Ora locale [ore]	Azimuth φ_S [°]	Altezza β_S [°]	y_{sole} [mm]	z_{sole} [mm]
9:00	-64.28	35.16	-5.82	15.80
9:15	-60.96	37.78	-4.64	16.55
9:30	-57.42	40.31	-3.51	17.27
9:45	-53.62	42.74	-2.40	17.99
10:00	-49.54	45.06	-1.30	18.71
10:15	-45.15	47.23	-0.21	19.43
10:30	-40.41	49.23	0.89	20.16
10:45	-35.30	51.04	2.00	20.91
11:00	-29.82	52.63	3.13	21.68
11:15	-23.97	53.97	4.30	22.48
11:30	-17.79	55.02	5.52	23.33

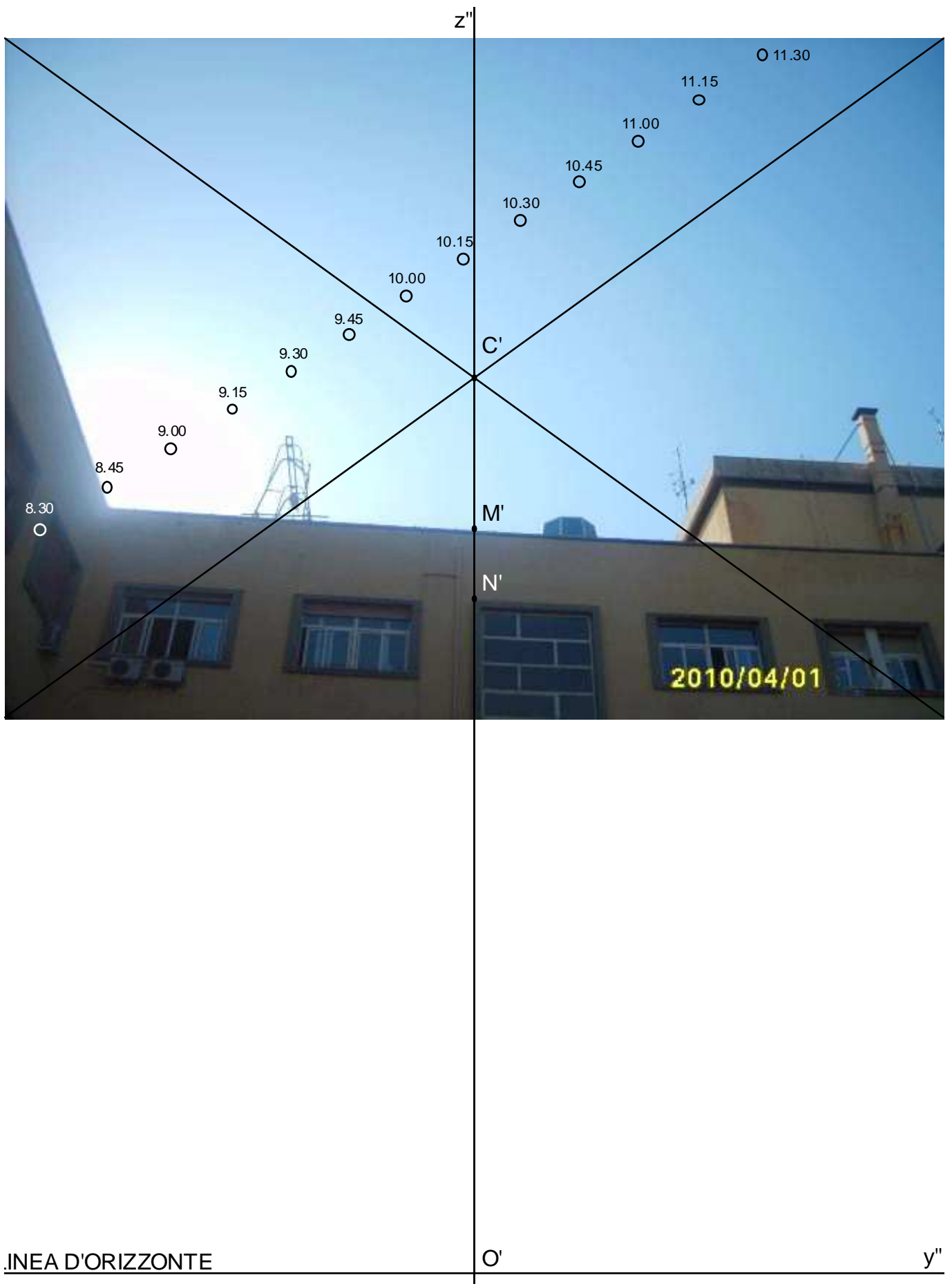


Fig. 38. Immagine 4: posizioni del sole calcolate ad intervalli di 15 minuti.

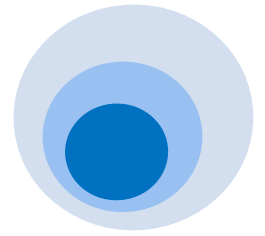
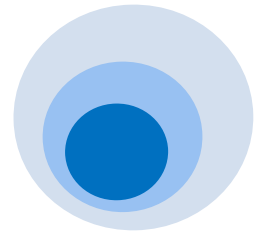


Fig. 39. Immagine 4: confronto tra la posizione del sole calcolata e quella fotografata il 1° aprile 2010.

Dalla verifica sperimentale emerge anche in questa immagine fotografica che i maggiori scostamenti tra le posizioni fotografate e quelle calcolate (Fig.39) sono riscontrabili in corrispondenza delle distanze più elevate dall'asse della fotografia. Tali differenze, riconducibili ad alcuni minuti di scarto nelle peggiori condizioni, considerata sono, quindi, imputabili, come precedentemente asserito, ad un possibile movimento della macchina fotografica o alle distorsioni cui è soggetta la ripresa fotografica. D'altro canto per verificare l'applicabilità pratica del metodo si sono volutamente impiegati degli



strumenti fotografici comuni. Ovviamente migliori risultati potrebbero ottenersi con l'ausilio di strumenti fotografici professionali. In più, la distorsione dell'immagine dovuta alle lenti dipende dalla lunghezza focale e dall'apertura dell'obiettivo della macchina fotografica. Gli effetti della distorsione dell'immagine si evidenziano a maggiore distanza dal centro di essa. Una lunghezza focale piccola, o un'apertura grande, producono un aumento della distorsione. Le fotografie scattate con obiettivi ad occhio di pesce, il cui angolo di apertura supera i 180° , costituiscono tipici esempi di immagine fotografica distorta. Le comuni macchine fotografiche digitali con una lunghezza focale di 50 mm apportano solo minime distorsioni, garantendo, quindi, l'agevole applicabilità del metodo, anche per la possibilità di interazioni con le procedure computerizzate.

- **Immagine 5.**

L'immagine fotografica illustrata in Fig.40 è stata effettuata con una taglio prospettico particolarmente significativo per testare l'affidabilità del metodo. I dati di calcolo sono inseriti in Tabella 9, mentre Tabella 10 mostra le coordinate della posizione del sole.

Tabella 9. Immagine 5: dati per calcolare la posizione del sole.

DATI LOCALITA'		DATI FOTOGRAFIA	
Data	09.06.2010	Misura [mm]	170 x 128
Città	Palermo	Azimuth macchina φ_{cam}	-90.70°
Longitudine	$13^\circ 21' 0'' E$	Angolo zenitale del punto M β_M	35.50°
Latitudine	$38^\circ 7' 0'' N$	Angolo zenitale del punto N β_N	26.40°
LSM	+1	$C'M'$ [mm]	13,0
		$C'N'$ [mm]	43,5

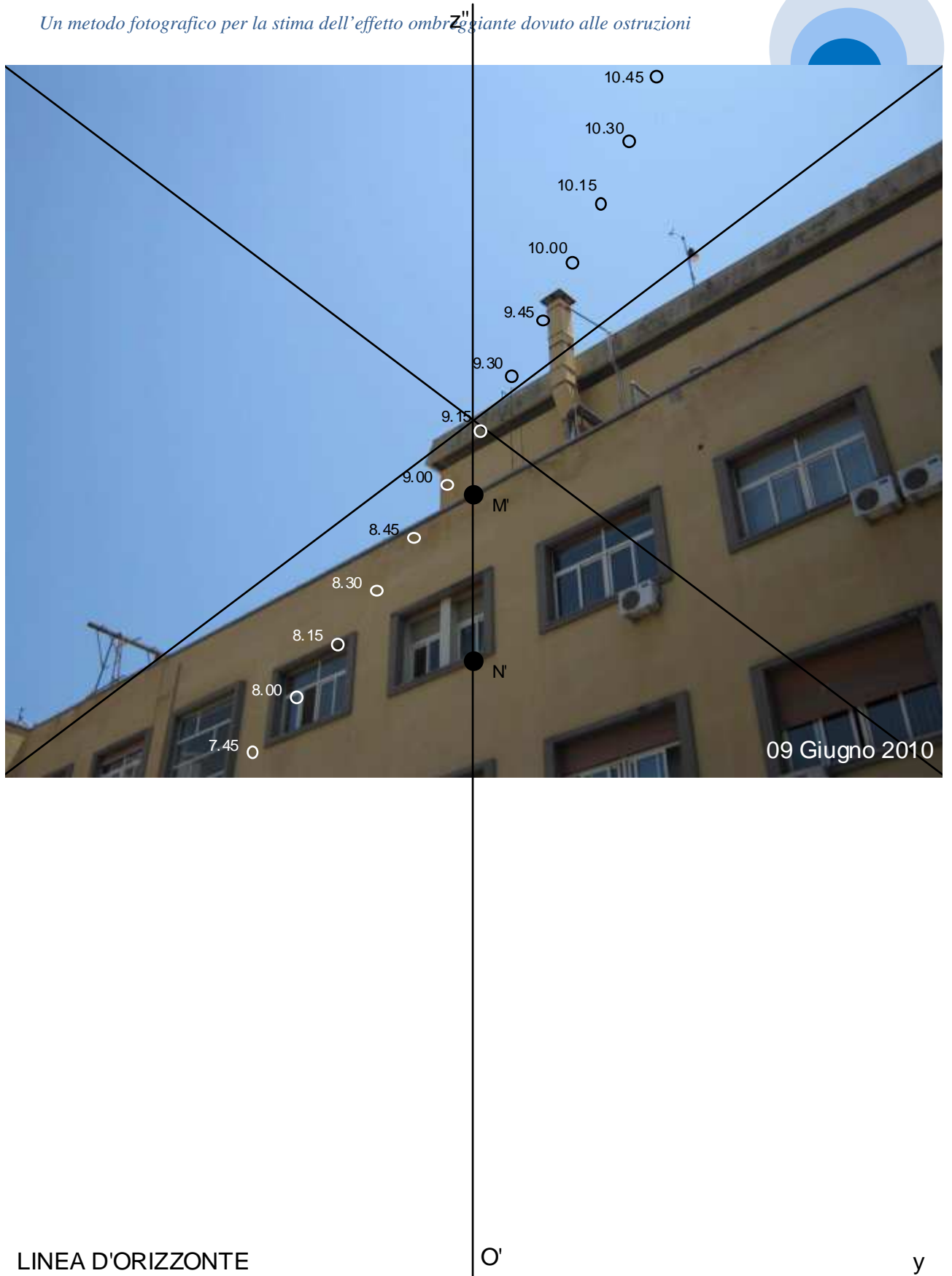


Fig. 40. Immagine 4: posizioni del sole calcolate ad intervalli di 15 minuti.

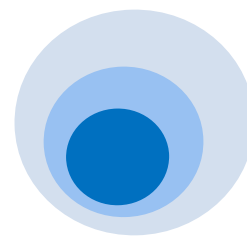


Tabella 10. Immagine 5: coordinate della posizione del sole nella fotografia

Ora locale [ore]	Azimuth φ_S [°]	Altezza β_S [°]	y_{sole} [mm]	z_{sole} [mm]
7:45	-94.59	32.99	-1.07	13.32
8:00	-92.40	35.94	-0.45	14.28
8:15	-90.13	38.89	0.14	15.24
8:30	-87.77	41.84	0.71	16.22
8:45	-85.29	44.78	1.26	17.22
9:00	-82.65	47.71	1.79	18.24
9:15	-79.81	50.63	2.31	19.30
9:30	-76.73	53.52	2.81	20.41
9:45	-73.33	56.37	3.31	21.56
10:00	-69.52	59.16	3.79	22.79
10:15	-65.19	61.89	4.28	24.09
10:30	-60.20	64.51	4.76	25.48
10:45	-54.34	66.99	5.24	26.98

L'intervallo breve di calcolo (15 minuti), è stato scelto in questa e nelle altre immagini precedentemente analizzate, per garantire un numero maggiore di punti da verificare. Nella Fig.40, ad esempio, le sei posizioni del sole dalle 9:30 alle 10:45, permettono di constatare la presenza di radiazione solare sul punto di vista da cui è scattata la fotografia. E' chiaro come l'infittimento di tale intervallo determini una precisione ulteriormente affinata. Si ritiene comunque già adeguato l'intervallo scelto, poiché garantisce un grado di informazione estremamente esaustivo. L'analisi può essere condotta riferendosi anche ad intervalli maggiori di 30 o 60 minuti. Sarà il contesto di riferimento da cui dipenderà tale scelta.

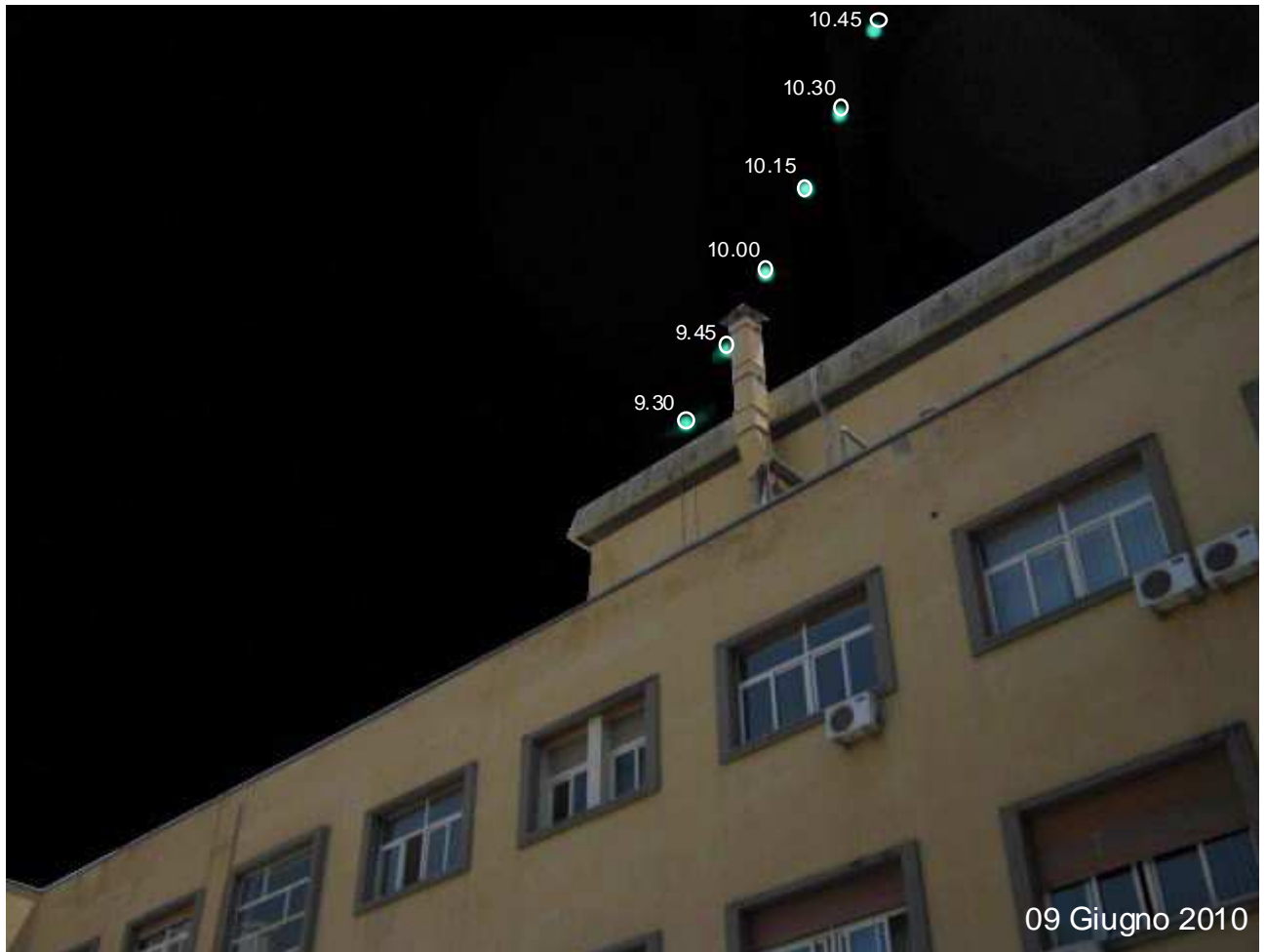
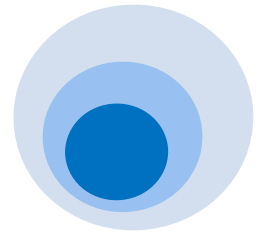
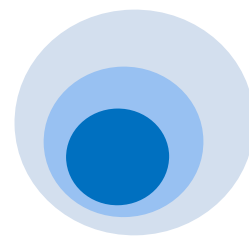


Fig. 41. Immagine 5: confronto tra la posizione del sole calcolata e quella fotografata il 9 giugno 2010.



CAPITOLO 5

CONFRONTO TRA IL METODO FOTOGRAFICO E QUELLO TRADIZIONALE

Come puntualmente descritto in questa tesi, il metodo fotografico si avvale dei percorsi solari tradotti in fotografia mediante le coordinate rettangolari. I diagrammi solari attualmente disponibili, adottati per il metodo proposto da Quaschnig, V., Hanitsch, R., 1998, viceversa, richiedono la misurazione delle coordinate cilindriche per localizzare le posizioni del sole. Entrambi i metodi affrontano l'analisi riconducendosi a quello che è stato definito "il punto di vista della superficie di riferimento". Tuttavia, si è approfonditamente rilevato il carattere innovativo del metodo fotografico non solo per la differente visione concettuale che propone, ma, inoltre, per le sue inedite modalità esecutive. Appare interessante mettere a confronto i due metodi, entrambi idonei a calcolare l'effetto dell'ostruzione, non soltanto per verificarne la corrispondenza delle informazioni fornite ma anche per evidenziare, praticamente, i limiti insiti nel metodo tradizionale. Quindi, preliminarmente, per 4 delle immagini fotografiche sin qui analizzate è stato effettuato il rilievo della sagoma ostruente (Fig.42-43-44-45), misurando gli angoli (azimuta e zenitale) dei punti più rappresentativi.

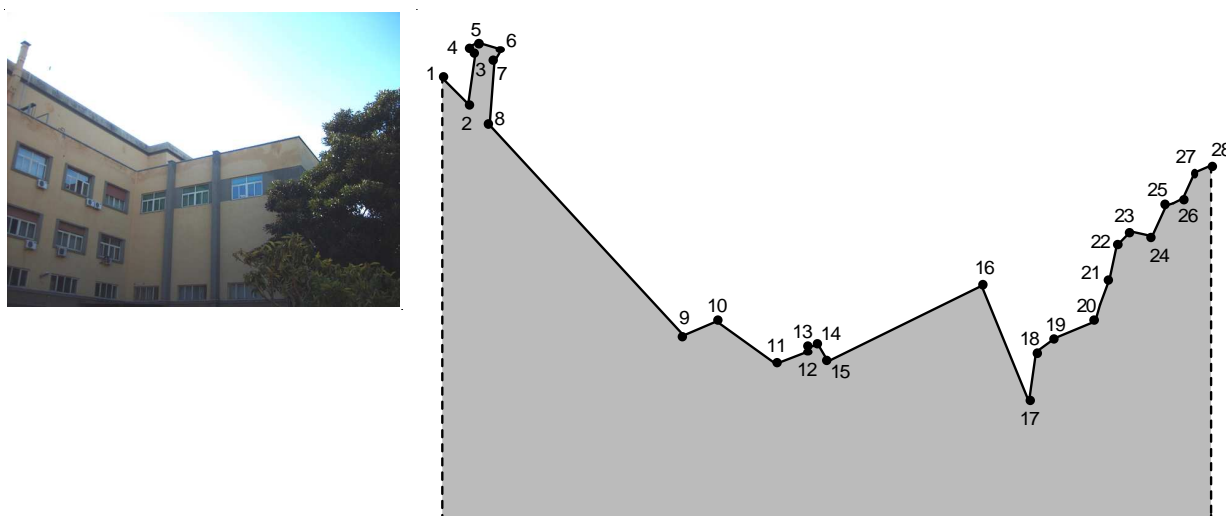


Fig. 42. Immagine1: sagoma ostruente in coordinate cilindriche (20 gennaio 2010)

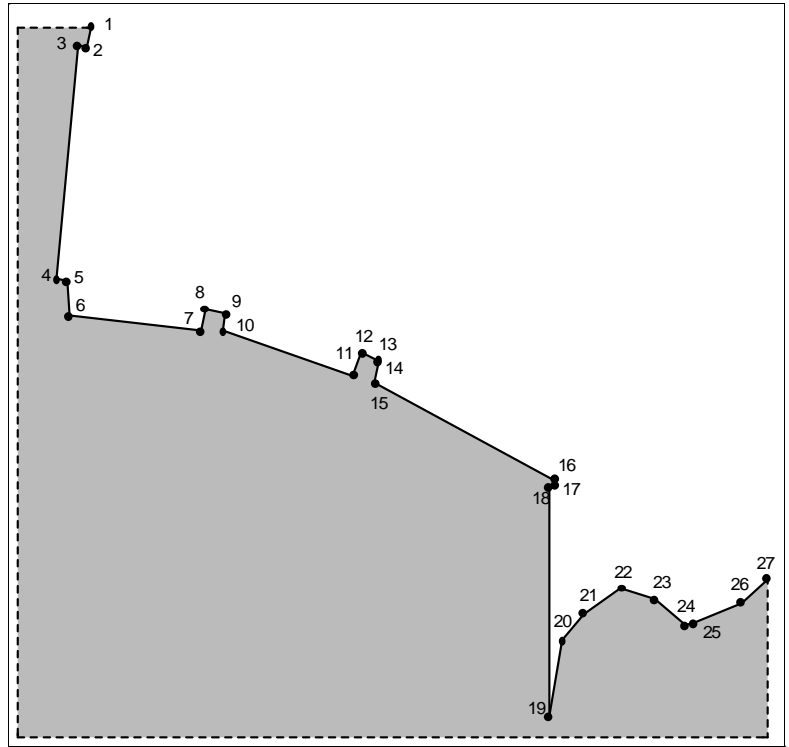
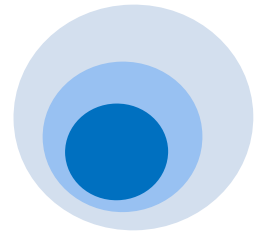


Fig. 43. Immagine2: sagoma ostruente in coordinate cilindriche (21 aprile 2010)

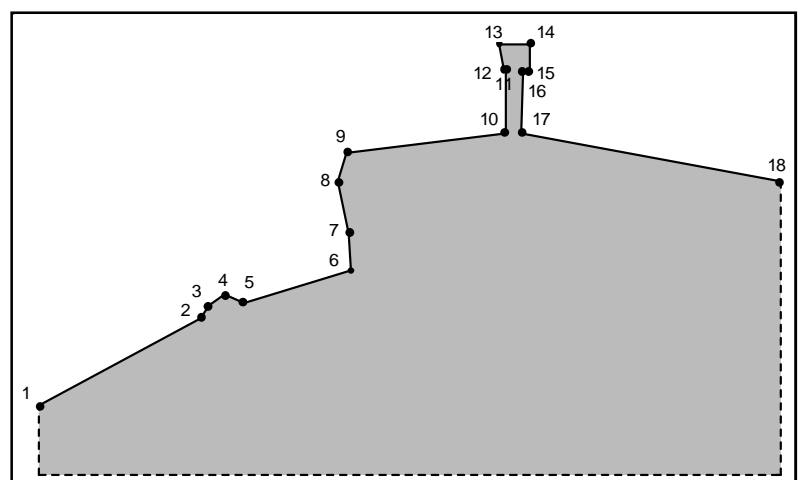


Fig. 44. Immagine3: sagoma ostruente in coordinate cilindriche (27 aprile 2010)

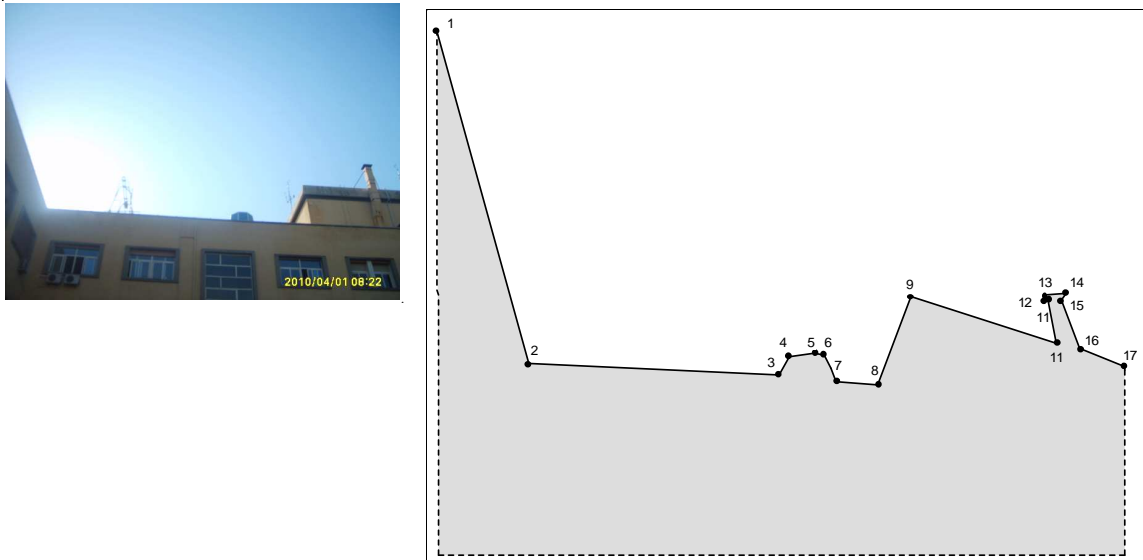
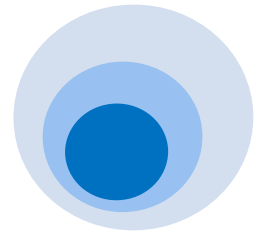
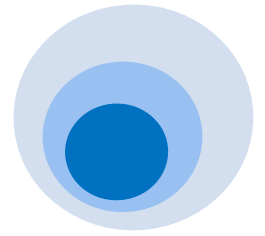


Fig. 45. Immagine4: sagoma ostruente in coordinate cilindriche (1° aprile 2010)

La necessità di descrivere con precisione la sagoma ha comportato la misura rispettivamente di 28, 27, 18, 17 coppie di angoli. Successivamente si sono sovrapposti i poligoni ostruenti al diagramma del percorso solare. Il raffronto tra le posizioni del sole identificate in coordinate cilindriche e quelle calcolate con il metodo fotografico (Fig.46-47-48-49), conferma la maggiore semplicità e immediatezza di esecuzione del metodo fotografico.



• Immagine 1

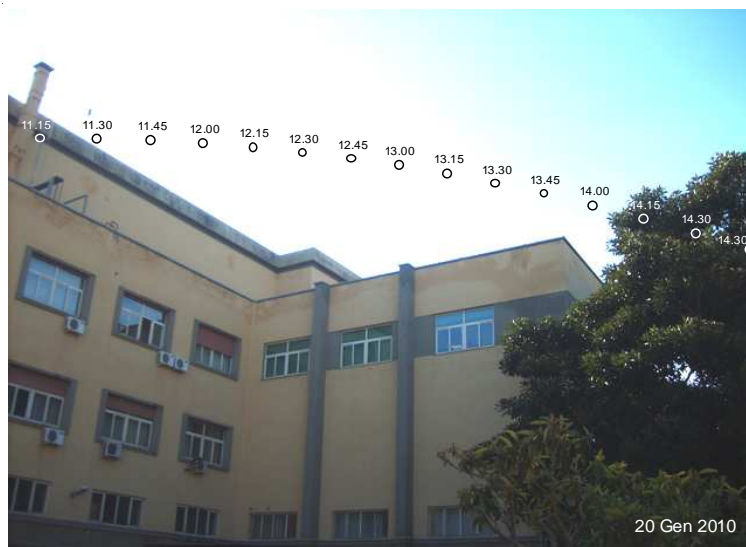
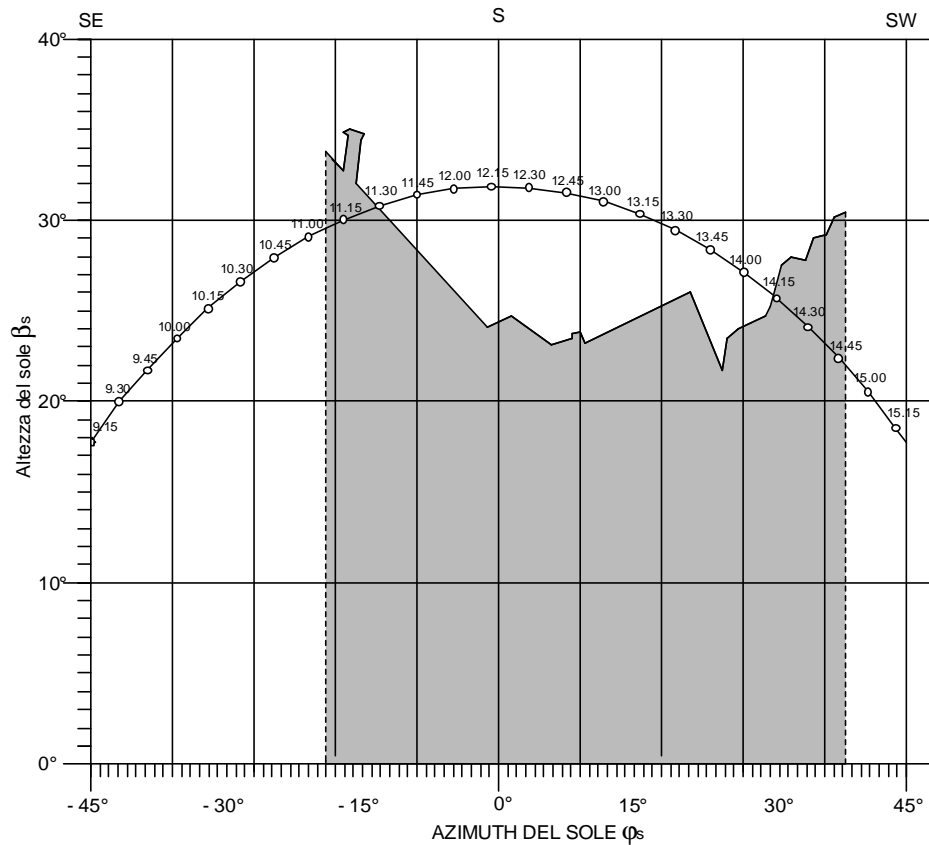
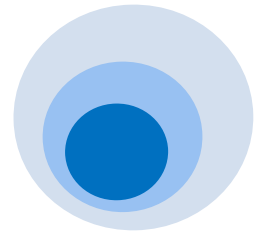


Fig.46. Confronto tra a) le posizioni del sole in coordinate cilindriche e b) quelle calcolate con il metodo fotografico il 20 gennaio 2010.



- **Immagine 2**

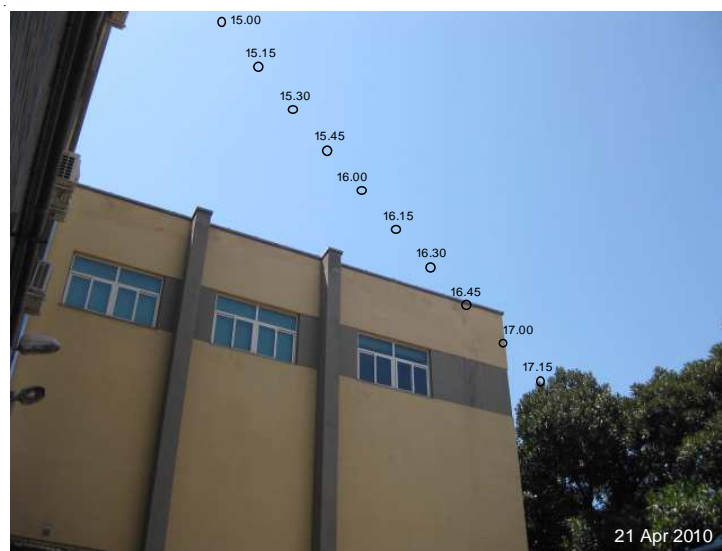
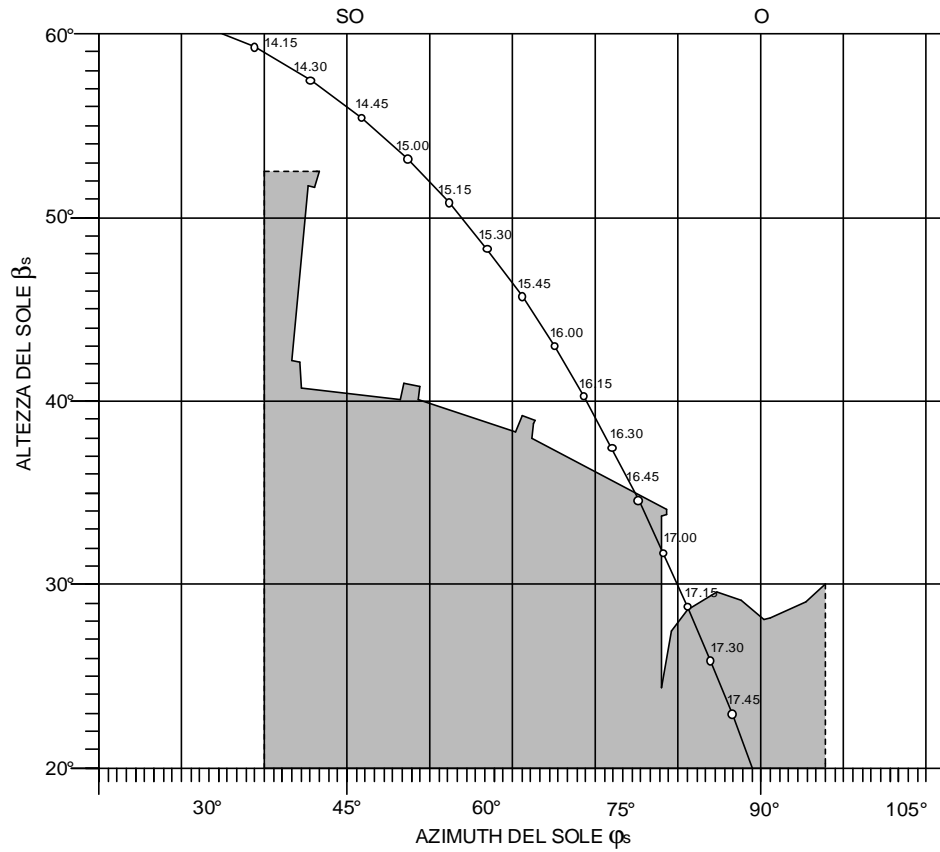
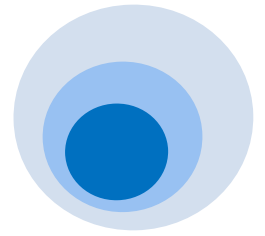


Fig.47. Confronto tra a) le posizioni del sole in coordinate cilindriche e b) quelle calcolate con il metodo fotografico il 21 aprile 2010.



- **Immagine 3**

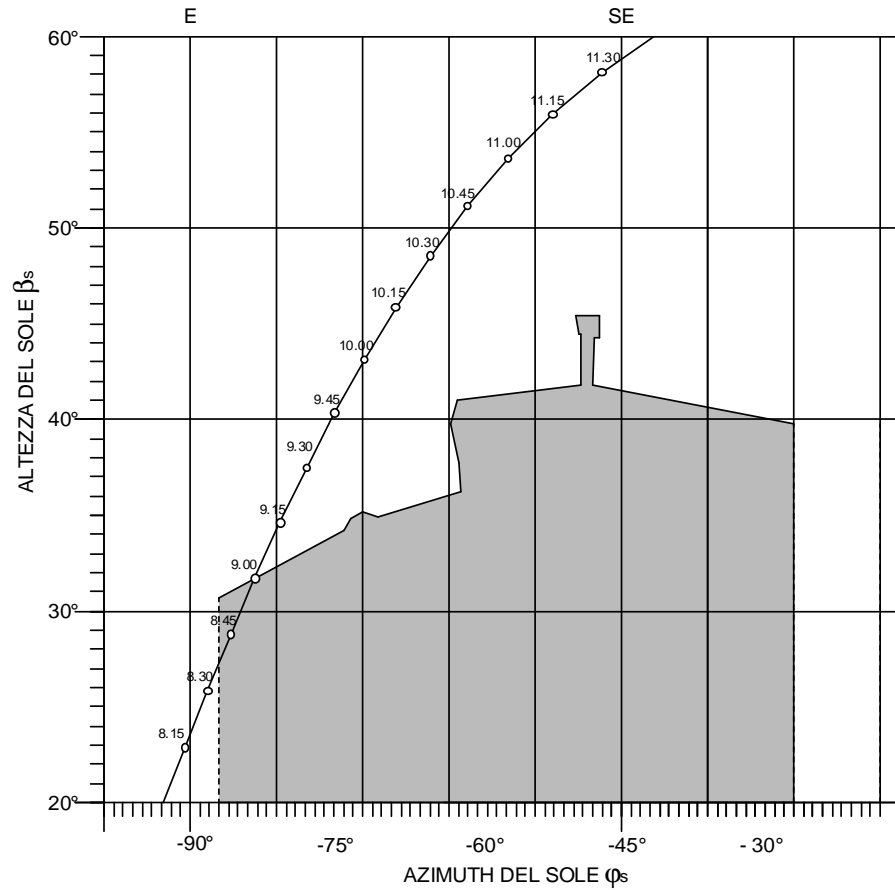
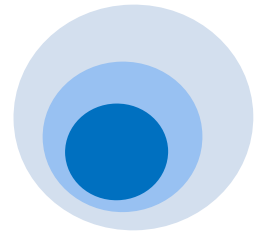


Fig.48. Confronto tra a) le posizioni del sole in coordinate cilindriche e b) quelle calcolate con il metodo fotografico il 27 aprile 2010.



• Immagine 4

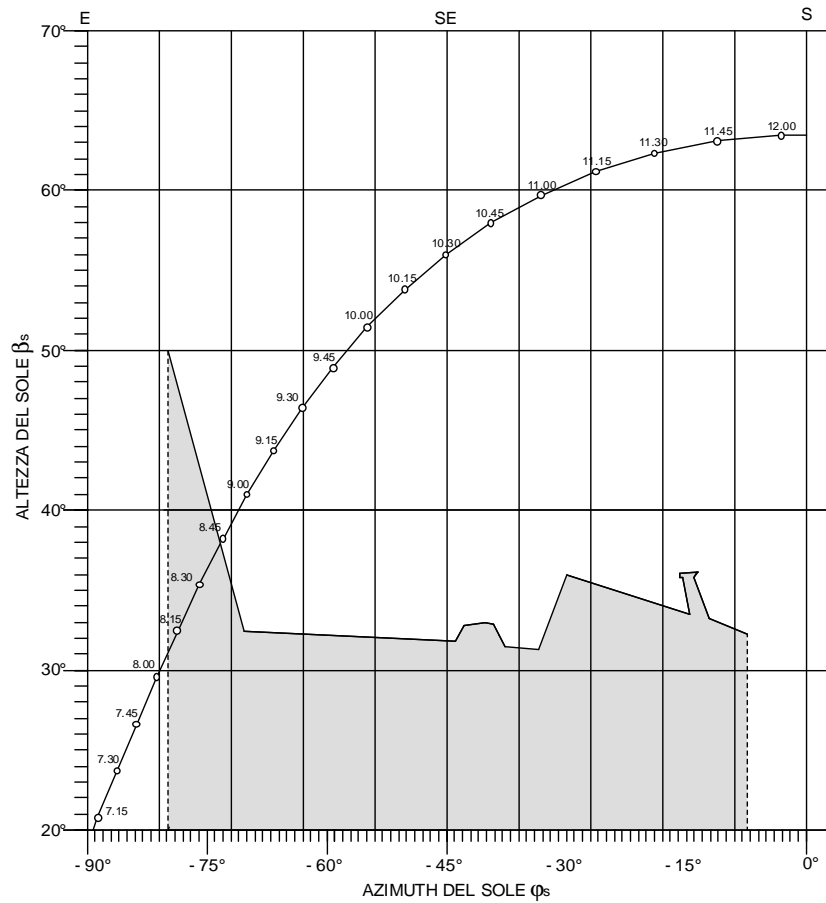
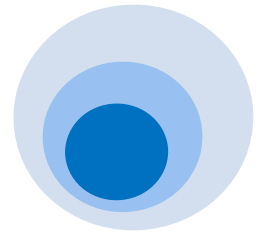


Fig.49. Confronto tra a) le posizioni del sole in coordinate cilindriche e b) quelle calcolate con il metodo fotografico il 1° aprile 2010.



RISULTATI E CONCLUSIONI

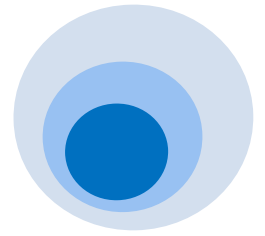
E' stato proposto un nuovo metodo per valutare la presenza di radiazione solare diretta su un punto di una superficie di riferimento parzialmente ombreggiata. La procedura impiega l'immagine fotografica dell'ostruzione e la sovrapposizione del percorso solare. I calcoli, validi per un solo punto della superficie considerata, possono fornire contestualmente informazioni relative a tutto l'arco dell'anno. La semplicità esecutiva, è riconducibile alla sola conoscenza di tre angoli garantendo precisione dei risultati anche in rapporto alle regole proprie della fotografia. Il metodo, infatti prevede i seguenti passaggi:

- 1) Individuazione del centro della fotografia:



- 2) Individuazione di due punti scelti sull'asse verticale passante per il centro della fotografia. Uno dei due punti può essere anche il centro stesso.

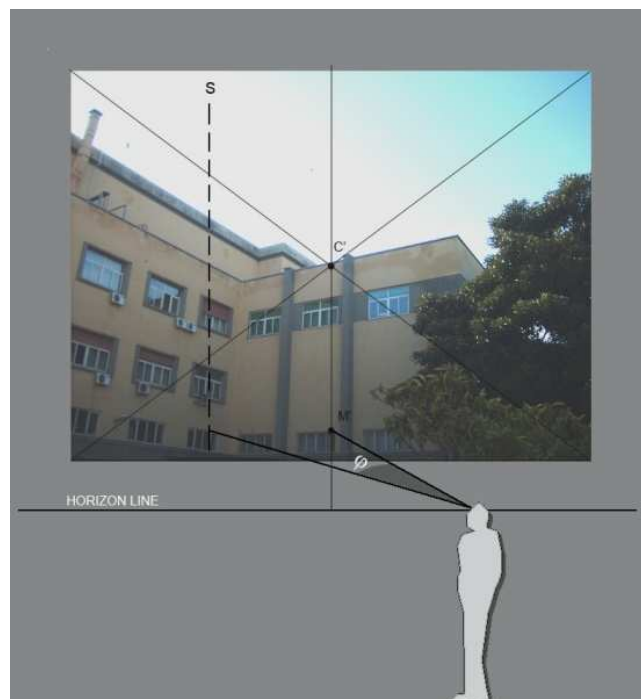


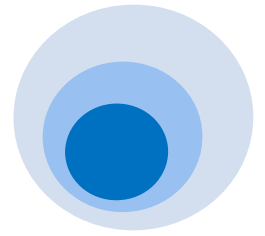


3) Misurazione della distanza dei due punti dal centro della fotografia.

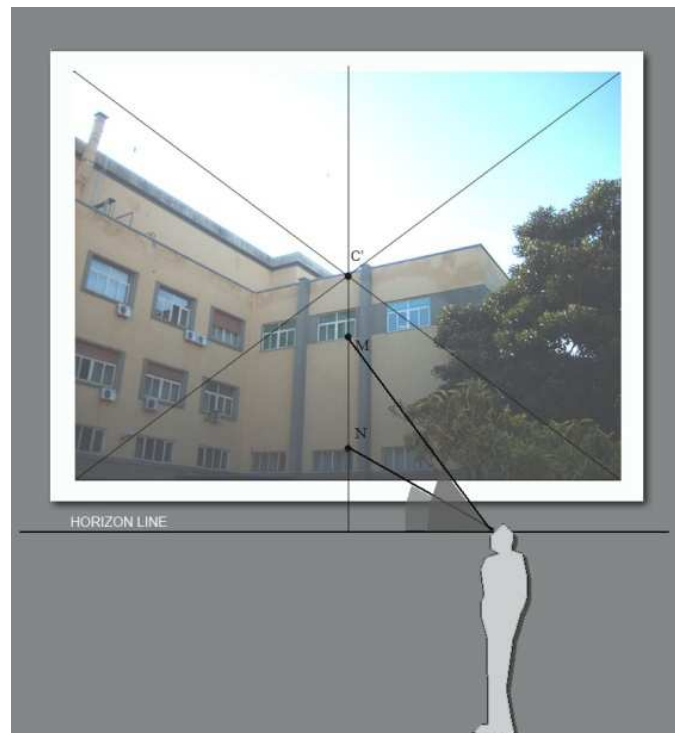


4) Misurazione dell'angolo azimutale dei due punti:

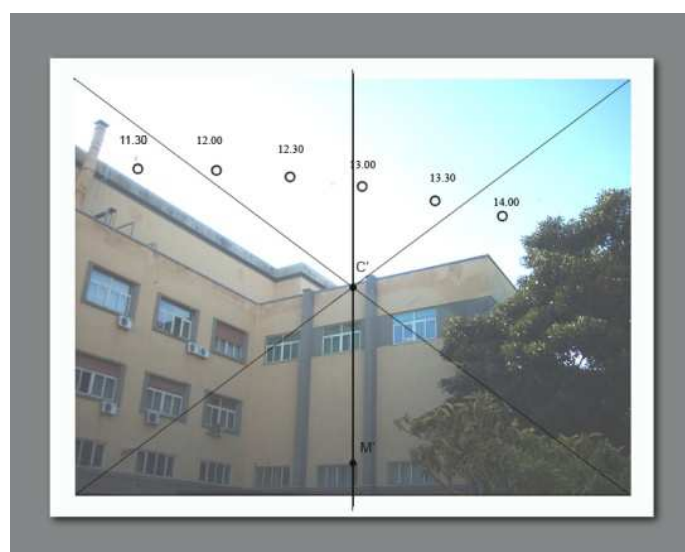


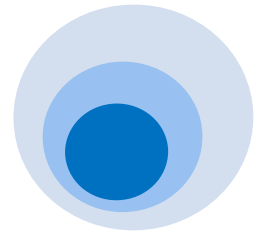


5) Misurazione degli angoli zenitali dei due punti:

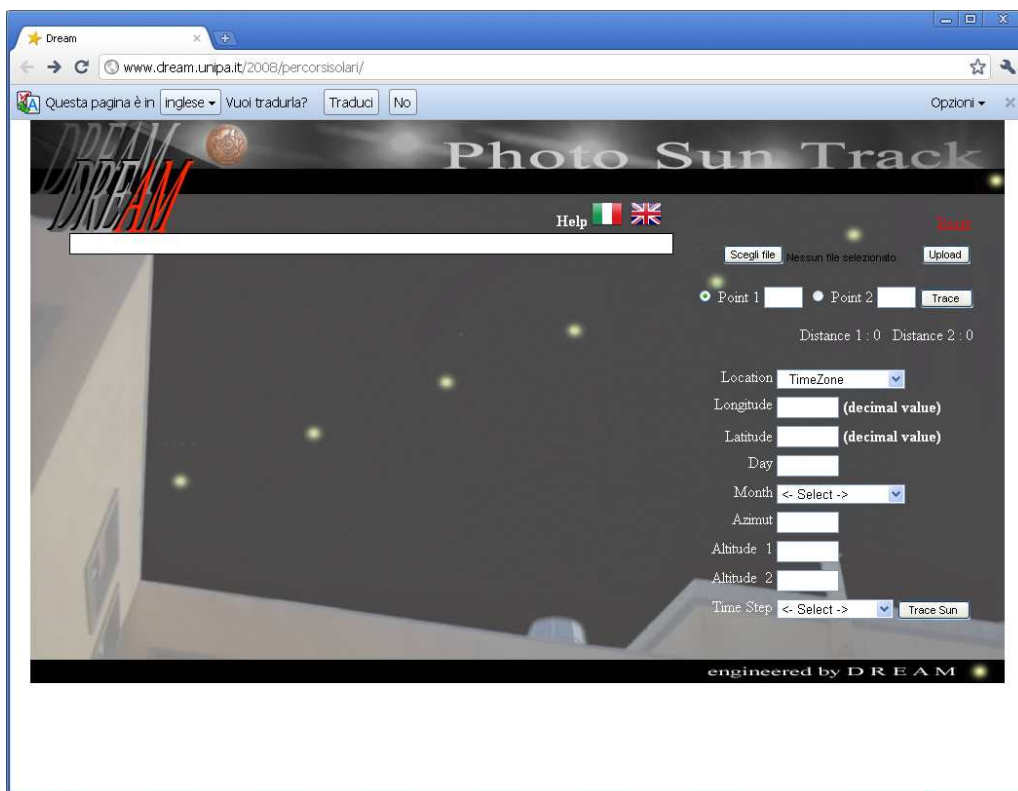


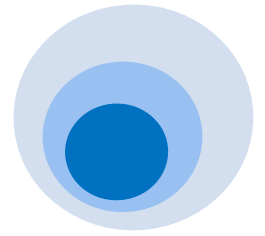
Implementato in una macro Excel, il metodo è in grado di fornire istantaneamente e per qualunque località e giorno dell'anno di riferimento la posizione del sole sulla fotografia secondo gli intervalli di tempo desiderati:





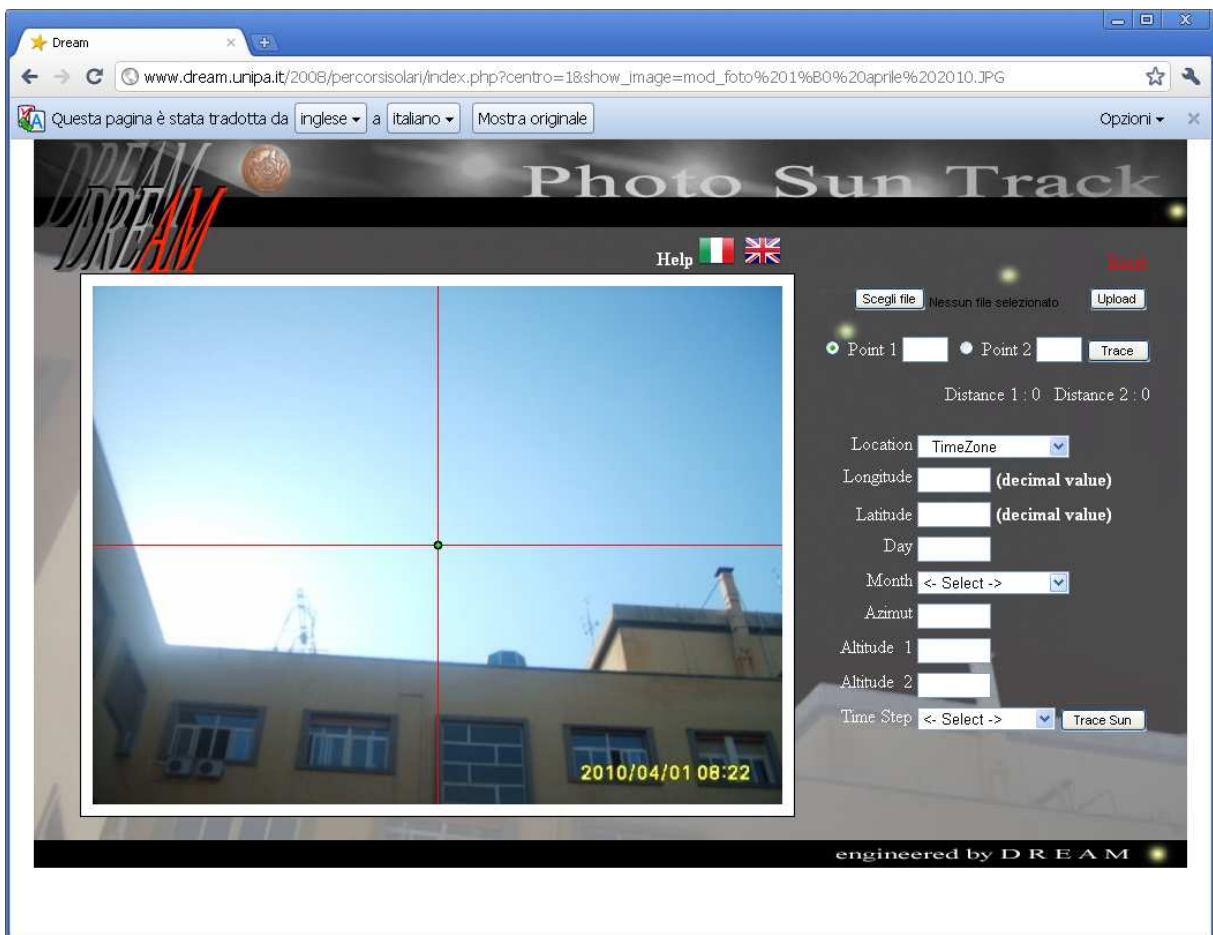
Gli scostamenti riscontrati tra le posizioni del sole calcolate e quelle fotografate, maggiormente evidenti agli estremi della fotografia, sono dovuti alla lunghezza focale e all'apertura dell'obiettivo della macchina fotografica. Nel caso specifico è stata utilizzata una macchina digitale reflex “Canon Power Shot A480” con lunghezza focale di 50 mm che ha determinato uno scarto tra i valori misurati e calcolati riconducibile ad alcuni minuti di differenza. In relazione, quindi, alla distorsione evidenziata ritenuta trascurabile, si può affermare che le prove sperimentali hanno confermato l'affidabilità della procedura e dei dati da essa forniti. Oltre all'efficacia dei risultati il metodo, confrontato con le procedure tradizionalmente impiegate, risulta particolarmente agile. E' stato, inoltre predisposto ed attualmente disponibile sul sito del Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali (DREAM) all'indirizzo www.dream.unipa.it/2008/percorsi_solari/, il programma denominato “Photo Sun Track La schermata iniziale si presenta con la veste grafica sotto visualizzata:

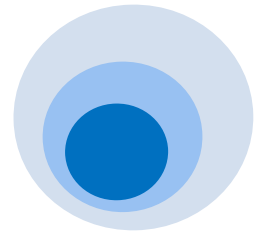




Il programma consente, dopo avere inserito i dati necessari per il calcolo della pozione del sole sulla fotografia, di visualizzare in pochi istanti gli effetti della radiazione. Si descrivono si seguito la fasi da eseguire per il corretto impiego:

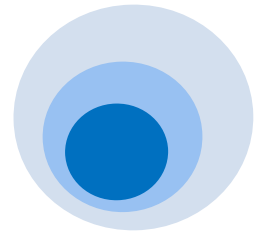
- 1) Inserire l'immagine premendo il tasto "Scegli file" e ed effettuare l'inserimento premendo il tasto "Upload";





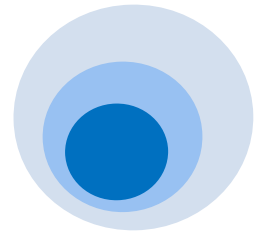
2) Cliccare sull'immagine i punti 1 e 2 scelti e premere il tasto "Trace";





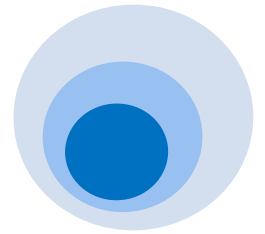
3) Compilare il campo relativo alla longitudine del sito di riferimento;





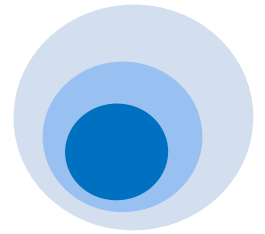
4) Compilare il campo relativo alla latitudine del sito;





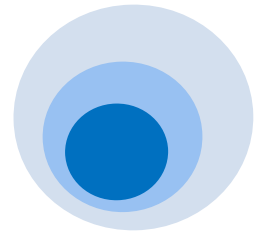
5) Inserire il giorno in cui è stata effettuata la fotografia;



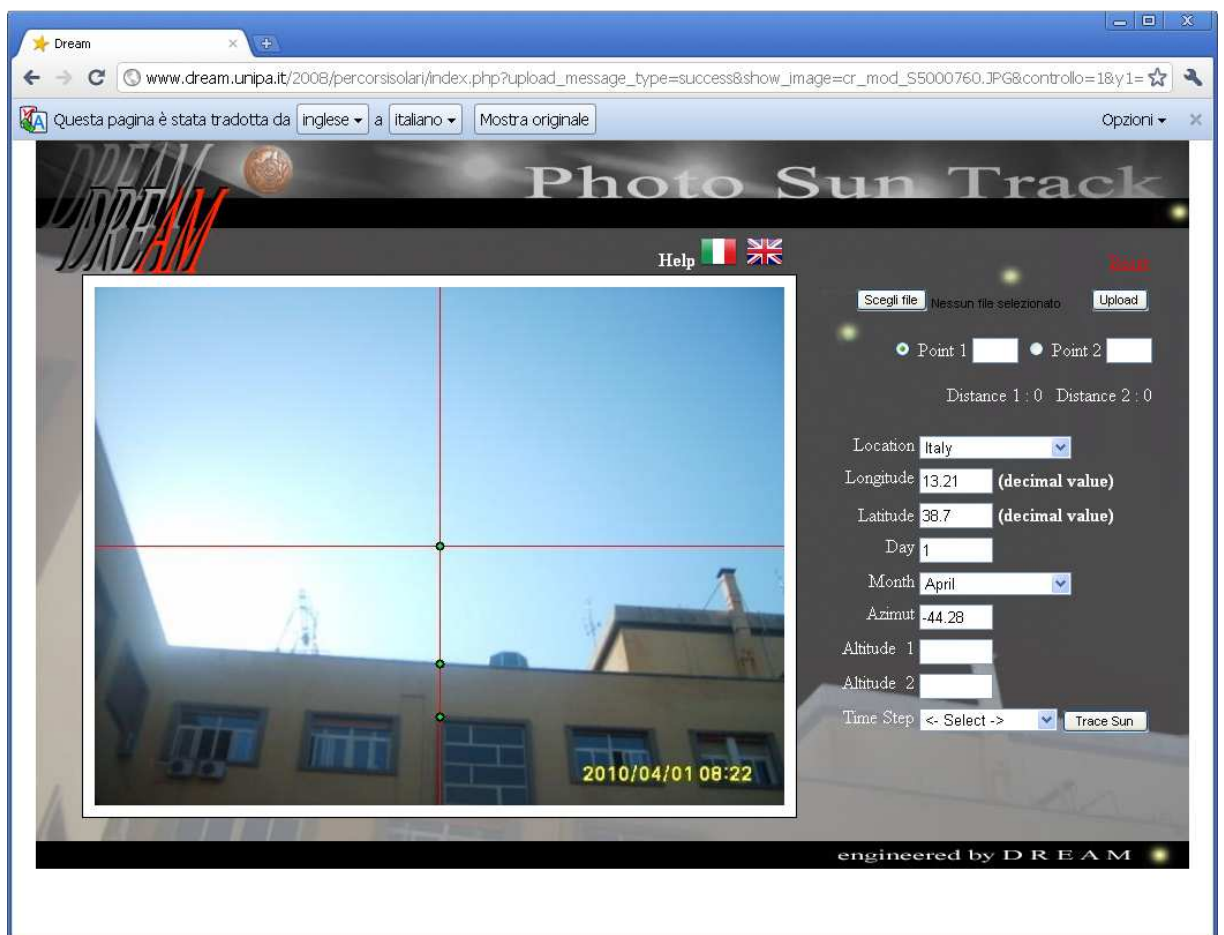


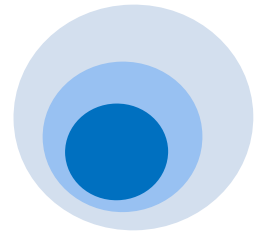
6) Inserire il mese in cui è stata effettuata la fotografia;





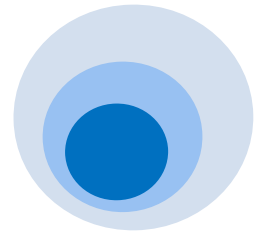
7) Compilare il campo relativo all'azimut della macchina fotografica;



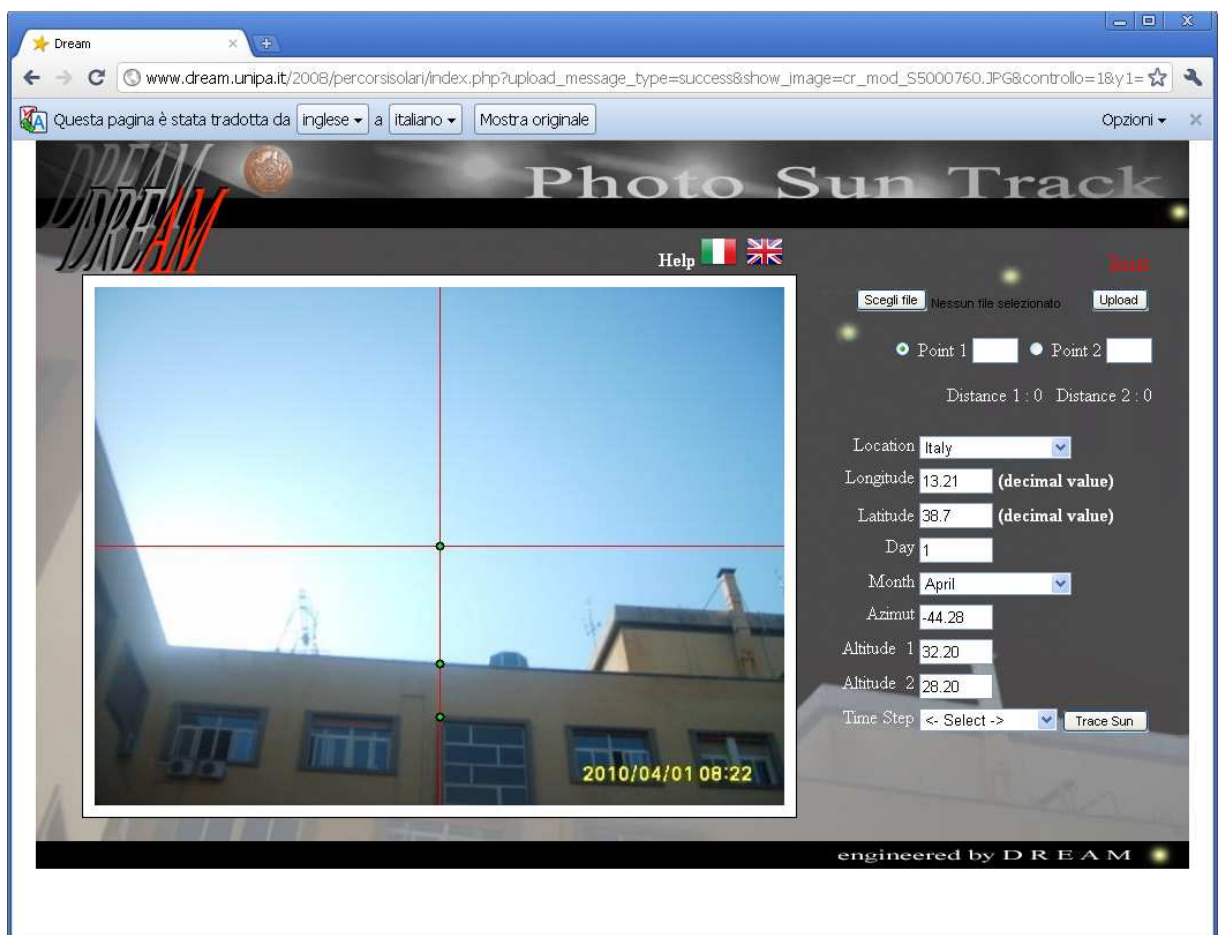


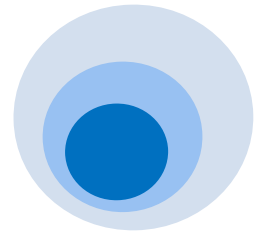
8) Compilare il campo relativo all'angolo zenitale del punto 1;



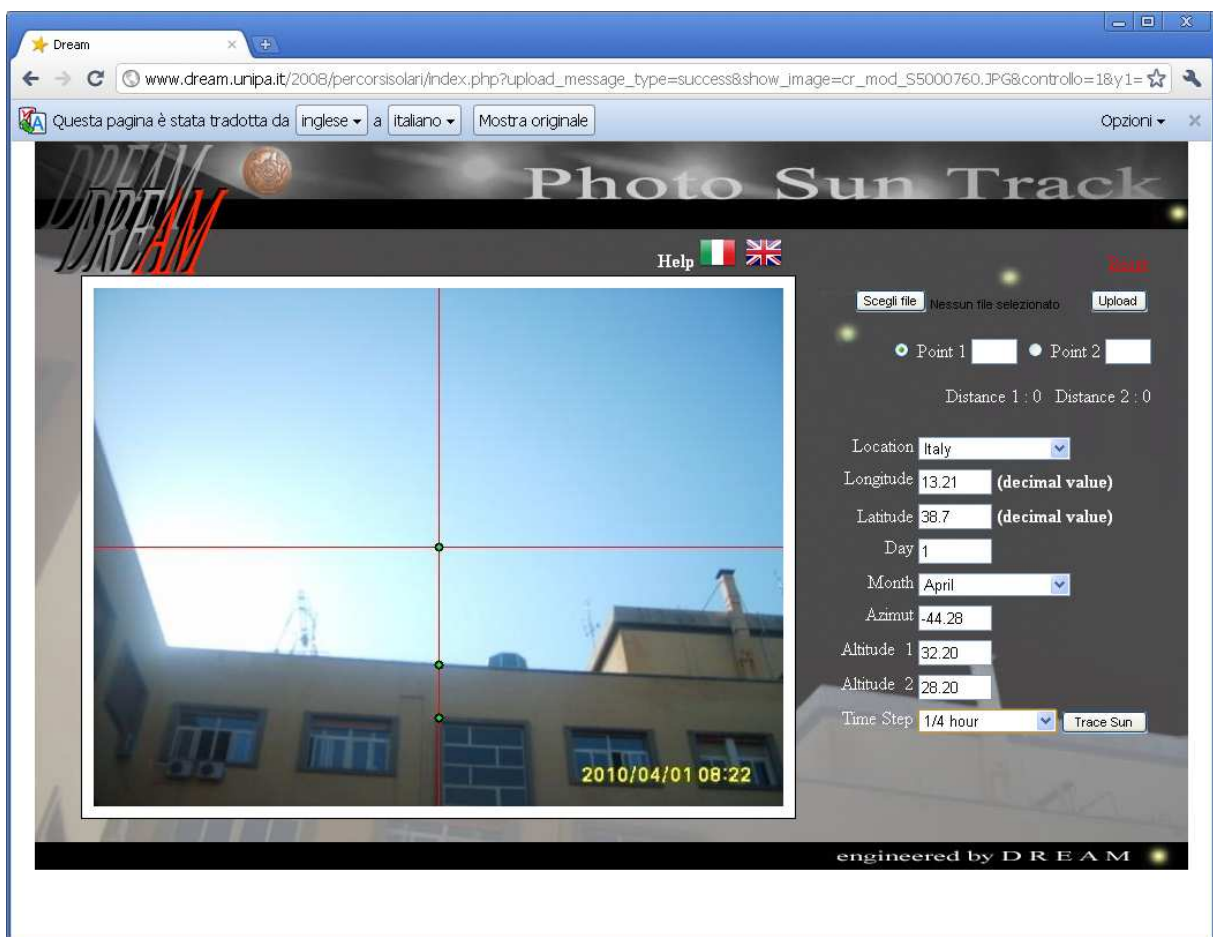


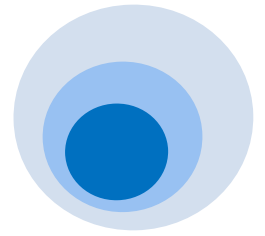
9) Compilare il campo relativo all'angolo zenitale del punto 2;





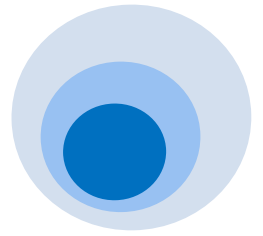
- 10) Compilare il campo relativo all'intervallo secondo il quale visionare nella fotografia le posizioni del sole e premere il tasto "Trace Sun";



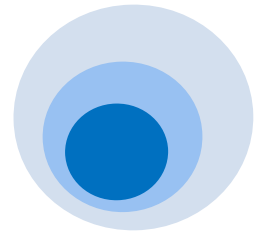


NOMENCLATURA

AST	ora solare apparente [ore]
d	distanza orizzontale tra punto di vista e quadro [m]
ET	equazione del tempo [min]
H	angolo orario [°]
L	latitudine [°]
LON	longitudine [°]
LST	ora locale [ore]
LSM	local standard time meridian [°]
m, n	coefficienti dell'equazione del piano
n_{day}	giorno dell'anno
P_1, P_2, P_3	punti sul piano obliquo
p, q	coefficienti dell'equazione del piano
x_C, y_C, z_C	coordinate del punto C [m]
x_M, y_M, z_M	coordinate del punto M [m]
x_S, y_S, z_S	coordinate della posizione del sole sul quadro verticale [m]
$x_{sole}, y_{sole}, z_{sole}$	coordinate della posizione del sole nella fotografia [mm]
x_T, y_T, z_T	coordinate della posizione del sole sul quadro obliquo [m]
x_V, y_V, z_V	coordinate del punto di vista [m]
β	angolo zenitale [°]
β_C	angolo zenitale del centro del quadro [°]
β_M	angolo zenitale del generico punto M [°]
β_N	angolo zenitale del generico punto M [°]

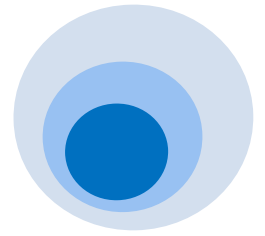


β_S	altezza solare [°]
γ	angolo di inclinazione del quadro [°]
δ	declinazione solare [°]
φ	azimuth [°]
φ_S	azimuth solare [°]
φ'	azimuth solare relativo [°]
φ_C	angolo azimutale del centro del quadro [°]
φ_{cam}	azimuth del raggio visuale principale [°]
φ_M	azimuth del generico punto M [°]



BIBLIOGRAFIA

- [1] Karatepe, E., Hiyama, T., Boztepe, M., Çolak, M., 2008. Voltage based power compensation system for photovoltaic generation system under partially shaded insolation conditions. *Energy Conversion and Management* 49 (8), 2307-2316.
- [2] Gueymard, C.A., 2003a. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74 (5), 335-379.
- [3] Gueymard, C.A., 2003b. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* 74 (5), 381-395.
- [4] Hay, J.E., Davies, J.A. 1980. Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay J.E., Won, T.K. (Eds), *Proc. Of First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, 59. Ministry of Supply and Services, Canada.
- [5] Klucher, T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23 (2), 111-114.
- [6] Reindl, D.T., Beckmann, W.A., Duffie, J.A., 1990a. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* 45 (1), 1-7.
- [7] Reindl, D.T., Beckmann, W.A., Duffie, J.A., 1990b. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy* 45 (1), 9-17.
- [8] Loutzenhiser, P.G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P.A., Frank, T., Maxwell, G.M., 2007. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy* 81 (2), 254-267.
- [9] Torres, J.L., De Blas, M., Garcia, A., De Francisco, A., 2010. Comparative study of various models in estimating hourly diffuse solar irradiance. *Renewable Energy* 35 (6), 1325-1332.
- [10] *Ashrae Handbook – Fundamentals*, 2009. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA USA.



[11] Carruthers, D.D., Roy, G.G., Uloth C.J., 1990. An evaluation of formulae for solar declination and the equation of time. Research Report No 17, School of Architecture, University of Western Australia.

[12] Ecotect, <http://www.squ1.com>.

[13] Radiance, <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>.

[14] TRNSYS, <http://www.trnsys.com/>.

[15] Quaschnig, V., Hanitsch, R., 1998. Irradiance calculation on shaded surfaces. Solar Energy 62 (5), 369-375.

[16] Grochowski, J., Fuge, U., Niehage, M., 1997. STASOL Ein Programm zur Simulation der Solarstrahlung unter Berücksichtigung von Teilabshattungen der Diffusend Direktstrahlung. Proceedings of the 12th Symposium Photoltaische Solarenergie, Staffelstein, 106-110.

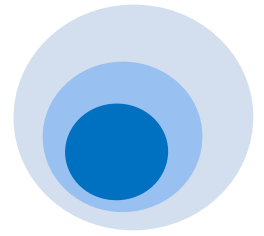
[17] Woyte, A., 1997. Charakterisierung von Abschattenden Objekten und ihr Einfluss auf den Energieertrag von Photovoltaik-Anlagen. Universität Hannover, Fachbereich Elektrotechnik and Institut für Solarenergieforschung, Hannover.

[18] Caamaño, E., Lorenzo, E., 1997. On-site characterisation of grid-connected PV systems. Proceedings of the 14th EC PV Solar Energy Conference, Barcelona, 1536-1539.

[19] Frei, R., Meier, C., Eichenberger, P., 2000. A fast, efficient and reliable way to determine the PV-shading horizon. Proceedings of the 16th EC PV Solar Energy Conference, Glasgow, 2678.

[20] Skiba, M., Faller, F.R., Eikmeier, B., Ziolek, A., Unger, H., 2000. Skiameter shading analysis. Prceedings of the 16th EC PV Solar Energy Conference, Glasgow, 2402-2105.

[21] Tomori, T. Otani, K., Sakuta, K., Kurokawa, K., 2000. On-site BIPV array shading evaluation tool using stereo-fisheye photographs. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, AK, 1599-1602.



[22] Blewett, T., Horne, M., Hill, R., 1997. Heliodon prediction of shading on the building integrated photovoltaic systems. Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA, 1393-1396.

[23] Chaabene, M., Ben Ammar, M., 2008. Neuro-fuzzy dynamic model with Kalman filter to forecast irradiance and temperature for solar energy systems. Renewable Energy 33 (7), 1435-1443.

[24] Chang, T.P., 2009. The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere. Solar Energy 83 (8), 1274-1284.

[25] Drif, M., Perez, P.J., Aguilera, J., Aguilar, J.D., 2008. A new estimation method of irradiance on partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems. Renewable Energy 33 (9), 2048-2056.

[26] Lopez, G., Batlles, F.J., Tovar-Pescador J., 2005. Selection of input parameters to model direct solar irradiance by using artificial neural networks. Energy 30 (9), 1675-1684.

[27] Mellit, A., Eleuch, H., Benghanem, M., Elaoun, C. Massi Pavan, A., 2010. An adaptive model for predicting of global, direct and diffuse hourly solar irradiance. Energy Conversion and Management 51 (4), 771-782.

[28] Muneer, T., 1997. Solar Radiation and Daylight Models for the Energy Efficient Design of Buildings. Architectural Press, Oxford.

[29] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy 44 (5), 271-289.

[30] Woyte, A., Nijs, J., Belmans, R., 2003. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field tests results. Solar Energy 74 (3), 217-233.