

## 3D SolarWeb: approccio integrato per la stima del potenziale fotovoltaico sui centri abitati

Riccardo De Filippi, Matteo Poletti, Cesare Furlanello (\*),  
Francesco Nex, Fabio Remondino, Giorgio Agugiaro (\*\*),  
Stefano Menegon, Gabriele Dallago, Steno Fontanari (\*\*\*)

(\*) Predictive Models for Biomedicine & Environment (MBPA) unit, Fondazione Bruno Kessler (FBK), Trento, Italy  
Email: (defilippi, poletti, furlan)@fbk.eu, Web: <http://mpba.fbk.eu>  
(\*\*) 3D Optical Metrology (3DOM) unit, Fondazione Bruno Kessler (FBK), Trento, Italy  
Email: (franex, remondino, agugiaro)@fbk.eu, Web: <http://3dom.fbk.eu>  
(\*\*\*) MPASolutions, Trento, Italy - (menegon, dallago, fontanari)@mpasol.it, Web: <http://www.mpasol.it>

### Riassunto

In questo articolo è descritta la metodologia sviluppata nell'ambito del Progetto 3DSolarWeb per la realizzazione di un catasto solare degli edifici in aree montane. Tale progetto, nato dalla collaborazione fra la Fondazione Bruno Kessler (FBK) di Trento e MPA Solutions s.r.l., ha avuto come obiettivo quello di sviluppare e rendere accessibile via internet uno strumento innovativo per la stima precisa del potenziale fotovoltaico dei tetti e la conseguente localizzazione ottimale degli impianti solari fotovoltaici. 3DSolarWeb ha coinvolto esperti interdisciplinari di diversi settori e ha privilegiato l'uso di dati open e a bassa risoluzione già esistenti (LiDAR a 1-2 m di risoluzione) e/o dati fotogrammetrici ad altissima risoluzione (pixel a terra <10-20 cm). Il progetto ha visto il processamento fotogrammetrico di immagini aeree per la generazione di modelli digitali di superfici (DSM) e true-orthophoto ad alta risoluzione, la stima dell'energia incidente per la stima del potenziale fotovoltaico sugli edifici ed infine un'interfaccia web per le interrogazioni degli utenti su un geodatabase centralizzato. Nell'articolo è descritta nel dettaglio l'esperienza maturata sul Comune di Transacqua (TN) mostrando le funzionalità dell'applicativo realizzato e gli sviluppi futuri del progetto.

### Abstract

*The paper presents the research carried out in the on-going 3DSolarWeb project to test and implement a complete pipeline for the generation of a solar cadastre of building roofs located in alpine areas. The project aims at providing reliable results in a cost-effective way, using (low resolution) available data and new aerial imagery acquisitions as input. The environmental context is digitally represented using already existing low resolution LiDAR data (1-2 m resolution), while the urban area is modelled using high resolution aerial images (10-20 cm GSD) and photogrammetric DSM. Reliable models and algorithms for the estimation of the incoming sun radiance are then adopted and a WebGIS is set up for the interactive calculation of the photovoltaic (PV) potential in a raster-based form. The paper summarizes the entire pipeline and the results (Figure 1) achieved on the test areas to show the potentialities of the method and the web-based service.*

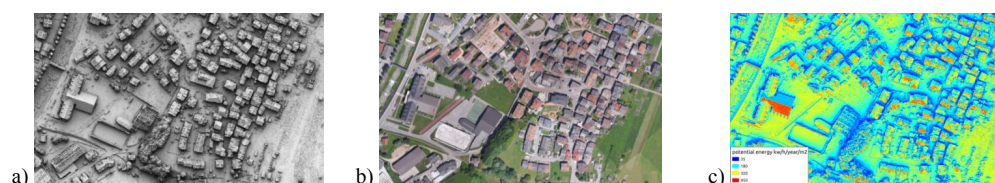


Figura 1. DSM fotogrammetrico (a), true orthophoto (b) e visualizzazione nel WebGIS del potenziale fotovoltaico (c).

## Introduzione

La necessità di conoscere con precisione il potenziale fotovoltaico di parti del territorio o dei tetti dell'edificato sta diventando sempre più importante sia nel settore pubblico che privato, per via dell'importanza che tale aspetto ricopre da un punto di vista economico. Come è noto, l'energia solare rappresenta un'alternativa pulita per la produzione di energia e la riduzione delle emissioni di anidride carbonica. La collocazione di pannelli solari sui tetti degli edifici risponde inoltre all'esigenza di non ridurre l'uso del suolo (spesso agricolo) con "campi solari".

Da un lato, le amministrazioni pubbliche, a partire dal livello nazionale fino a quello locale, necessitano di strumenti per valutare accuratamente questioni quali la fattibilità, la convenienza e la lungimiranza delle loro politiche, potendo influenzare (indirettamente con la promulgazione di leggi e direttamente con incentivi) l'installazione di impianti fotovoltaici. Dall'altro lato, il settore privato, dalle aziende di produzione di energia fino agli utenti stessi, necessitano di una stima accurata del potenziale estraibile su una determinata area onde evitare incertezze nell'affrontare un investimento in tal senso.

Un pannello solare necessita di essere collocato ed orientato correttamente e per questo è cruciale un sistema in grado di determinare mediante modelli predittivi la giusta superficie sulla quale eseguire l'installazione. L'interesse per la determinazione efficiente del potenziale fotovoltaico è andato via via crescendo negli ultimi anni, come dimostrato dal numero sempre maggiore di applicativi per la pianificazione e la stima del potenziale fotovoltaico. Esempi di servizi GIS dedicati al solare sono dati da SOLEMI, SoDA i quali possono fornire modelli di irraggiamento a livello globale, anche se con risoluzioni molto ridotte. Esempi di catasto solare sono comunque già presenti in molte città del mondo fra cui Berlino, Vienna, New York, San Francisco e Locarno, solo per citarne alcune. In molti casi tali servizi sono pubblicati gratuitamente on-line, permettendo ai residenti di determinare il potenziale solare delle loro abitazioni.

La principale limitazione di queste applicazioni è data dall'enorme mole di dati eterogenei che deve essere raccolta e processata nonché dalla stretta collaborazione necessaria fra specialisti di differenti discipline.

I dati, ad esempio, comprendono modelli meteorologici, modelli tridimensionali delle superfici dei tetti nonché algoritmi di stima del potenziale fotovoltaico e misure eseguite *in loco*. Da un lato è poi necessario disporre di modelli tridimensionali molto dettagliati al fine di determinare le ombre e le occlusioni che si possono creare sulla superficie dei tetti, dall'altro occorrono modelli a vasta scala per determinare le ombre dovute a montagne in prossimità del centro abitato. Se il dato su larga scala (e bassa risoluzione) è ormai abbastanza facilmente reperibile (da modelli globali o acquisizioni sul territorio nazionale), le cose sono ben diverse per il dato ad alta risoluzione: modelli digitali degli edifici di tipo LoD2 (Kolbe, 2008) o maggiormente dettagliati sono piuttosto rari e la loro realizzazione richiede sempre acquisizioni *ad hoc* e spesso congiunte (LiDAR e fotogrammetria). Una volta ottenuto un modello tridimensionale, su di esso sono applicati i modelli di irraggiamento, per determinare il potenziale estraibile: anche in questo caso, i valori ottenuti necessitano di essere validati attraverso solarimetri posti sull'area in esame. Infine, dopo tutte queste fasi, i risultati ottenuti devono essere presentati in un'interfaccia semplice da interrogare, dando la possibilità a qualsiasi potenziale utente di valutare l'idoneità di un'area per la produzione di energia solare.

In questo articolo, è presentato il lavoro svolto nell'ambito del progetto di ricerca 3DSolarWeb: in questo progetto è stata implementato tutto il processo produttivo che porta alla realizzazione di un catasto solare in aree alpine, partendo quindi dall'acquisizione dei dati geomatici fino alla realizzazione di un'interfaccia web per la consultazione dei dati.

Durante il progetto si è cercato sempre di optare per soluzioni tecnicamente efficienti, ma economicamente sostenibili, usando dati già disponibili (a bassa risoluzione) dove possibile e eseguendo acquisizioni (a basso costo) laddove invece fosse necessario. Inoltre sono stati privilegiati l'uso di software open-source e di procedure automatiche e semi-automatiche per ridurre l'investimento iniziale e l'intervento umano.

Il progetto 3DSolarWeb si è focalizzato principalmente sulle aree alpine, dove le zone urbanizzate sono normalmente circondate da rilievi montuosi. In queste aree, a differenza delle zone pianeggianti, non basta tener presente le occlusioni all'irraggiamento dovute ad ostacoli vicini (camini, edifici adiacenti, ecc.), ma occorre tenere in considerazione la presenza di ostacoli orografici nelle zone limitrofe. Da questo si capisce come, la richiesta di accuratezza geometrica da un lato e la variabilità delle scale da prendere in considerazione (dall'architettico al regionale) abbia obbligato ad adottare un approccio multi-risoluzione. Nel caso specifico, l'inquadratura ambientale generale, è stato fornito da dati LiDAR (o fotogrammetrici) a bassa risoluzione, mentre le aree urbane sono state modellate utilizzando dati ad alta risoluzione forniti da modelli digitali del terreno fotogrammetrici.

In alcuni esempi già esistenti, gli edifici sono rappresentati come modelli prismatici (modelli LoD2) che approssimano la geometria reale dell'edificio: tuttavia, in questi modelli non sono rappresentati oggetti quali camini o piccoli dettagli del tetto: del resto modelli più dettagliati (LoD3) sarebbero estremamente più complessi da ottenere e la loro realizzazione richiederebbe un grosso lavoro di *editing* manuale. Per queste ragioni, nel progetto 3DSolarWeb si è optato per l'uso di modelli a *mesh* ad altissima risoluzione, analizzati come immagini *raster*.

È stata infine realizzata un'interfaccia web per la visualizzazione del potenziale fotovoltaico. Grazie ad una true-orthophoto è possibile la ricerca di una abitazione, e con pochi comandi la determinazione in tempo reale della disposizione ottimale dei pannelli solari.



Figura 2. Esempi di catasti solari disponibili su web e caratterizzati da diversi approcci di rappresentazione dei dati: rasters riclassificato dell'irradianza solare mappata sul catasto cittadino (Vienna – a), falde vettoriali colorate con i valori medi di irradianza solare (St. Gallen – b), raster riclassificato del potenziale fotovoltaico sovrapposto all'ortofoto cittadina (Bressanone – c).

## Stato dell'arte

Esistono vari esempi di applicazioni relative al potenziale fotovoltaico a seconda della scala presa in considerazione (globale, nazionale, regionale o locale) e dell'applicazione per la quale sono state realizzate (Izquierdo et al. 2008; Ludwig et al. 2009; Bergamasco and Asinari, 2011). Facendo riferimento al catasto solare in zone urbane, esistono vari esempi realizzati sia per finalità accademiche che commerciali. In tutti questi esempi, tuttavia, uno degli aspetti principali è rappresentato dalla qualità del dato geometrico, più specificatamente dalla disponibilità o meno di modelli tridimensionali accurati di edifici o di altre costruzioni antropiche potenzialmente disponibili per la produzione di energia fotovoltaica.

Attualmente la maggior parte dei modelli tridimensionali di aree urbane (Haala e Kada, 2010) sono realizzati partendo nuvole di punti dense generate da acquisizioni LiDAR (Oude Elberink e Vosselman, 2011; Jochem et al., 2011; Jochem et al. 2009; Kassner et al., 2008; Zhou and Neumann, 2008; Rottensteiner et al., 2005), anche se va notato come il numero di esempi di tali modelli ottenuti da DSM fotogrammetrici (Nex e Remondino, 2012; Zebedin et al., 2006) o dall'integrazione di diverse tipologie di dati (Vallet et al., 2011; Demir et al., 2009) sia in costante aumento. Generalmente ogni edificio è rappresentato come un insieme di superfici vettoriali chiuse; a seconda del grado di dettaglio (*Level of Detail*, *LoD*), i tetti degli edifici possono essere modellate

come semplici superfici piate (LoD1) o più nel dettaglio come insieme di superfici inclinate (LoD2), rappresentanti le singole falde.

Ad oggi esistono anche vari software per la stima del potenziale fotovoltaico, sia nell'ambito commerciale che open-source come, ad esempio, Esri ArcGIS, Saga GIS e GRASS GIS. In tal senso vale la pena ricordare come i differenti moduli esistenti in GRASS GIS siano stati utilizzati e testati in una grande varietà di studi, fornendo risultati affidabili (Kryza et al. 2010; Nguyen and Pearce, 2010; Hofierka and Kanuk 2009). La maggior parte di questi approcci è basata sull'uso di modelli geometrici 2.5D mentre solo in (Hofierka and Zlocha, 2012) è stata presentata una stima sul modello tridimensionale completo, riuscendo così a fornire il potenziale delle superfici verticali (come le facciate degli edifici).

A livello di presentazione e visualizzazione dei dati esistono, infine, differenti esempi rintracciabili sul web (Figura 2). In questi esempi, le mappe di classificazione dei tetti possono essere solitamente visualizzate in un WebGIS in base alla loro grado di "idoneità" ad ospitare. In alcuni casi sono forniti dati più dettagliati per ogni falda del tetto, rappresentando ciascuna di esse come entità vettoriale e codificando con opportuni colori l'idoneità delle diverse superfici ad ospitare pannelli solari.

## **Descrizione della metodologia di calcolo e pubblicazione dei risultati su web**

### **Rilievo e modellazione del territorio**

Contrariamente alla maggior parte delle applicazioni presentate e disponibili su web, la applicazione di 3DSolarWeb utilizza dati LiDAR solo per ricostruzione a bassa risoluzione dell'ambiente circostante, mentre la ricostruzione tridimensionale dell'ambiente urbano per la stima precisa del potenziale fotovoltaico è interamente ricavata dal processamento di immagini aeree con tecniche fotogrammetriche. Come è ben noto, le moderne tecniche di matching fotogrammetrico permettono di fornire nuvole di punti comparabili a quelle LiDAR in termini di completezza e accuratezza. Un volo fotogrammetrico eseguito con 10 cm di pixel a terra (GSD) può teoricamente permettere la generazione di nuvole di punti con una densità nell'ordine dei 100 punti/m<sup>2</sup> (in media un punto nello spazio per ogni pixel dell'immagine). Al contrario, un tipico volo LiDAR per la generazione di modelli urbani, permette di acquisire 20-25 punti/m<sup>2</sup>, con maggiori costi durante le fasi di acquisizione e processamento del dato. L'estrazione di dati più densi, inoltre, rende maggiormente facile la determinazione di discontinuità, aspetto direttamente connesso al livello di dettaglio che può essere raggiunto nella modellazione geometrica dell'edificio.

Va tuttavia ricordato che i DSM fotogrammetrici sono a volte più rumorosi dei dati LiDAR e sono generalmente condizionati dalla qualità radiometrica delle immagini, dalla loro sovrapposizione, dalla presenza di ombre e dalla tessitura degli oggetti analizzati. Le elevate sovrapposizioni fra le immagini possono solo parzialmente sopperire a questi problemi e alcuni dati rumorosi possono essere visibili principalmente nelle zone in ombra ed occluse. Inoltre, maggiore è il numero degli oggetti acquisiti, maggiore è il grado di dettaglio con cui possono essere ricostruiti, ma di conseguenza maggiore è anche il rumore che apparentemente viene percepito: i tetti sul dato LiDAR appaiono normalmente piani perché non sono sufficientemente risolti, mentre sul dato fotogrammetrico possono apparire ondulati poiché il DSM è già in grado di seguire l'andamento delle tegole.

Nel progetto 3DSolarWeb, le immagini aeree sono state acquisite mediante un braccio meccanico montato su elicottero (proprietà Smart3K s.r.l.) con una camera Nikon D3X. Il volo è stato eseguito in modo da avere alte sovrapposizioni fra le immagini e alta risoluzione geometrica (pixel a terra pari a 9 cm). La triangolazione fotogrammetrica e la successiva generazione della nuvola di punti, sono stati eseguiti con il tool Aperio/MicMac (IGN, Paris). Il matching fotogrammetrico utilizza un approccio piramidale e multi risoluzione (con l'algoritmo Optimal Flow di Pierrot-Deseilligny e Paparoditis, 2006), in grado di determinare le coordinate spaziali di ciascuna immagine presa come



riferimento. Un processo di minimizzazione energetica permette di incrementare l'affidabilità dei risultati forniti dalla sola correlazione fra immagini, permettendo da un lato di regolarizzare e lisciare le superfici generate senza per questo compromettere le discontinuità degli oggetti analizzati. Dall'approccio multi-immagine, diverse nuvole di punti vengono generate con un valore radiometrico per ciascun punto.

Dall'esperienza maturata all'interno del progetto, una risoluzione geometrica a terra delle immagini di 20 cm è sufficiente per rappresentare in maniera adeguata ciascun elemento dei tetti (quali abbaini, camini e spioventi) in modo da poter rappresentare e modellare correttamente ombre ed occlusioni. Una risoluzione maggiore ( $< 20$  cm) potrebbe fornire risultati geometrici migliori ma si tradurrebbe in maggiori tempi computazionali e difficoltà nella gestione dei dati. Per questo motivo, il valore di 20 cm rappresenta allo stato attuale un buon compromesso fra qualità del dato e tempi di elaborazione.

Una volta estratta la nuvola di punti, questa è trasformata in *raster* (Figura 3) per poter essere successivamente utilizzata nella stima del potenziale fotovoltaico. Solitamente si ricorre a mappe bidimensionali per determinare la posizione degli edifici. In questo caso, tuttavia, onde evitare problemi di disallineamento (Agugiario ed al., 2012), è stato sviluppato un algoritmo automatico per l'estrazione e la suddivisione in sotto elementi delle piante degli edifici (Nex e Remondino, 2012). Il metodo processa le nuvole fotogrammetriche al fine di ottenere una rappresentazione maggiormente dettagliata della pianta dell'edificio e una ricostruzione dell'edificato in LoD2 (Figura 3g).

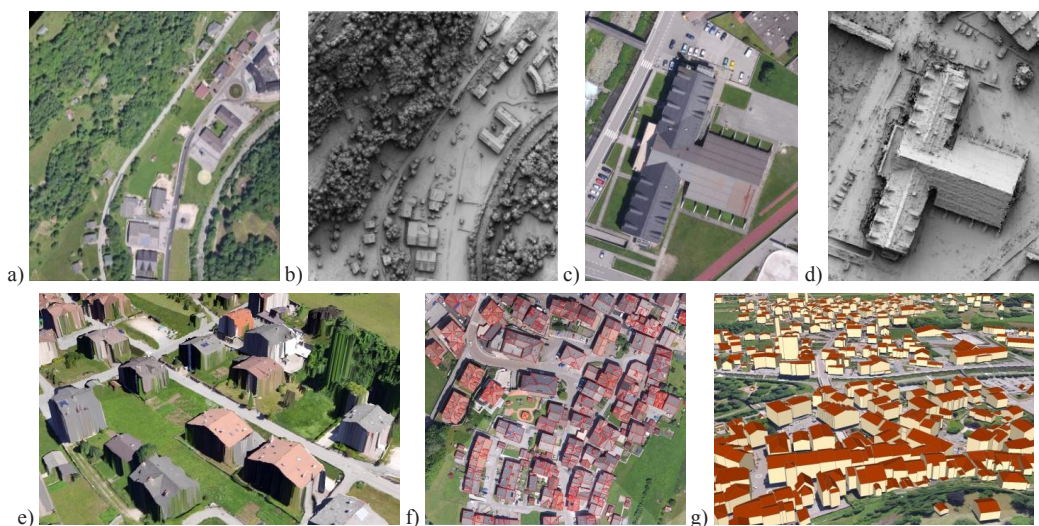


Figura 3. Esempio di modello digitale (DSM) di un'area alpina (a, b) e dettaglio su un edificio (c, d).  
Modello poligonale con tessitura (e), piante degli edifici (f) e LOD2 dell'edificato (g).

### Realizzazione dell'algoritmo di stima

Per il calcolo potenziale energetico si è scelto di utilizzare l'algoritmo *r.sun* del software open source GRASS GIS il quale è implementato in un servizio di Web Processing Service (WPS); in questo modo, l'utente può calcolare il potenziale fotovoltaico di una superficie considerando l'angolo di incidenza del sole rispetto alla posizione geografica dell'oggetto, il disturbo derivante dalle occlusioni nelle diverse ore della giornata e la torbidità dell'aria.

L'algoritmo è stato realizzato in diverse fasi. La prima fase permette di ottenere le mappe di ombreggiamento derivante dalle occlusioni durante tutto l'arco dell'anno e nelle diverse ore della giornata. Nella seconda fase è invece stata calcolata l'irradiazione solare oraria per tutta la durata

dell'anno. Nella terza fase, infine, l'irradiazione solare è combinata con la temperatura dell'aria e la tipologia di impianto fotovoltaico per stimare la produzione energetica. Di seguito è riportata una descrizione maggiormente dettagliata di ciascuna di queste fasi.

### 1) Calcolo dell'orizzonte

Per il calcolo orario dell'ombreggiamento derivante dalle occlusioni è stato utilizzato il modulo *raster r.horizon* di GRASS GIS. Il modulo richiede come input un modello digitale del terreno in formato *raster*. Il dataset di input è stato nel nostro caso un modello omogeneizzato tra il Modello Digitale di Superficie (DSM) ad alta risoluzione (18 cm) ottenuto da OR2 e relativo all'area di interesse del caso di studio (Fiera di Primiero) e il Modello Digitale del Terreno della Provincia Autonoma di Trento a risoluzione di 1 metro. Per ogni pixel della zona di interesse è stato calcolata l'altezza dell'orizzonte per un intervallo pari a 10 gradi realizzando 36 mappe di orizzonte.

### 2) Calcolo dell'irraggiamento

Il calcolo dell'irraggiamento è stato realizzato sfruttando il modulo *r.sun* di GRASS GIS. Nello specifico tale modulo calcola mappe di radiazione diretta, diffusa e riflessa in condizioni di *clear-sky*, senza considerare l'eventuale presenza di nuvole. La radiazione globale è stata calcolata per ogni pixel della zona di interesse, nelle diverse ore della giornata per ciascun giorno dell'anno. Il calcolo tiene conto dell'angolo di incidenza, della traiettoria solare, dell'altezza dell'orizzonte e della torbidità dell'aria ottenuta dal dataset LINKE. Il numero di mappe di irraggiamento orario della zona di interesse è pari a 5475, di dimensione pari a 140 Mb a mappa.

### 3) Stima della produzione energia fotovoltaica (PV)

A partire dalle mappe di irraggiamento è stata stimata la produzione elettrica fotovoltaica mensile e annuale. Il calcolo è stato effettuato introducendo un fattore di correzione orario sul rendimento del pannello legato alla temperatura delle celle. Utilizzando la "Guida pratica al dimensionamento preliminare di un impianto fotovoltaico" fornito da Boso & Partners s.r.l. è stata stimata la temperatura oraria della cella a partire dalla temperatura dell'aria e dall'irraggiamento secondo la formula:

$$T_c = T_e + ((NOCT - 20) / 800 + 0.015) \cdot G \quad [1]$$

dove:

$T_c$  = temperatura della cella (°C);

$T_e$  = temperatura oraria dell'aria (°C);

NOCT = temperatura operativa nominale di cella (°C);

G = irraggiamento orario.

A partire dalla temperatura della cella possiamo definire il fattore di correzione  $\eta_{temp}$  sul rendimento standard come:

$$\eta_{temp} = (1 - \gamma \cdot (T_c - T_{c, std})) \quad [2]$$

dove:

$\gamma$  = coefficiente di temperatura, legato alla tipologia del pannello

$T_{c, std}$  = temperatura della cella in condizioni standard.

Definiamo il rendimento reale come:

$$\eta_{real} = \eta_{std} \cdot \eta_{temp} \cdot \eta_{impianto} \quad [3]$$

$\eta_{std}$  = rendimento in condizioni standard;

$\eta_{impianto}$  = rendimento dell'impianto.

Sulla base del rendimento reale e dell'irraggiamento orario sono state calcolate le mappe orarie di EPU (Energia elettrica unitaria prodotta):

$$EPU = G \cdot \eta_{\text{real}} \quad [4]$$

Le 5475 mappe orarie di energia elettrica unitaria prodotta sono state infine aggregate su scala mensile e annuale. Il pannello standard è rappresentato da un pannello in silicio monocristallino con rendimento in condizioni standard del 16%, NOCT 48 gradi,  $\gamma = 0.40 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ .

Altre tipologie di pannelli caratterizzati dalla tipologia della cella sono implementabili variando i parametri legati alle caratteristiche del pannello.

### Estrazione del dato per pubblicazione su web

I risultati ottenuti sono stati resi accessibili esponendoli con processi WPS. La tecnologia utilizzata è il *framework* PyWps. Nello specifico il processo permette di ottenere valori di irraggiamento solare e di produzione elettrica fotovoltaica mensili e annuali per superfici disegnate sull'interfaccia web dall'utente estraendo i valori di produzione energetica su poligoni forniti in input.

### Validazione del modello

La validazione è fondamentale per definire la bontà del modello implementato e utile per valutare l'uso di altre variabili per migliorare la stima della produzione. Per validare il modello sull'area di studio sono stati utilizzati due dataset diversi.

Nel primo caso sono stati confrontati i valori di irraggiamento globale con cielo sereno dati da PVGIS con quelli del modello 3DSWG estratti sul medesimo punto della test area. Il dataset PVGIS è stato ottenuto grazie all'applicazione <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> estraendo i valori di irraggiamento media giornaliera su un piano fisso con inclinazione di 35 gradi, orientato verso sud (orientamento pari a 0 gradi), in condizioni di cielo sereno (*clear sky*). Questo è lo strumento fino ad oggi utilizzato dai tecnici del settore per stimare la produzione fotovoltaica su un punto. La una risoluzione a terra di questa applicazione è di 1 km x 1 km. Come evidenziato in Figura 4 e Tabella 1, su scala mensile il modello usato in 3DSWG sottostima mediamente del 30% rispetto a PVGIS con differenze più accentuate nel mese di Gennaio e più ridotte nel mese di Maggio.

Per valutare se questa sottostima (dovuta all'impiego un modello digitale del terreno e dell'urbanizzato geometricamente più dettagliato e risoluto) sia corretta, si è proceduto a validare il modello con dei dati di produzione reali. I dati di produzione reale sono stati raccolti dal partner di progetto Boso & Partners e si riferiscono alla produzione di energia dell'impianto a pannelli fotovoltaici collocato sul tetto del Caseificio del Primiero. L'impianto è composto da 252 pannelli SHARP 245 e copre una superficie di 416 mq, ogni pannello è in silicio policristallino con una dimensione di 156.5 mm × 156.5 mm, 60 celle in serie. L'inclinazione del tetto è di 18 gradi e l'orientamento è di circa 5 gradi ovest.

È utile specificare che i dati di produzione del caseificio si riferiscono ad un anno di produzione e forniscono una validazione parziale del modello. Essendo la stima del modello *r.sun* fatta in condizioni di *clear sky* non sono considerati nella validazione dati di produzione relativi a giornate con bassa pressione (valori inferiori 940 mbar) o dove sono state registrate precipitazioni. Sono stati utilizzati a questo scopo i dati della stazione meteo di Mezzano che dista circa 1,5 km dall'impianto considerato. Inoltre sono stati filtrati dati che indicavano una produzione molto inferiore rispetto al dato registrato in una finestra temporale di 5 giorni. La validazione è fatta utilizzando 88 punti, e differenza fra i valori medi mensili del dato reale e la stima di produzione ottenuta dal modello, e fra i valori medi mensili del dato reale e la stima di produzione indicata da PVGIS. Il valore medio annuale della differenza è pari a 40 KWh. In Tabella 2 viene evidenziata la distribuzione mensile dell'errore. Nel mese di Aprile la produzione bassa dell'impianto comporta un errore medio molto rilevante che influisce sull'errore medio annuale. In Figura 5b i valori di produzione media

giornaliera stimati dal modello (linea verde), misurati con la calcolatrice del fotovoltaico in rete di PVGIS (linea gialla) vengono confrontati con i valori di produzione reale dell'impianto poco sopra descritto (punti rossi) con relativo intervallo di confidenza.

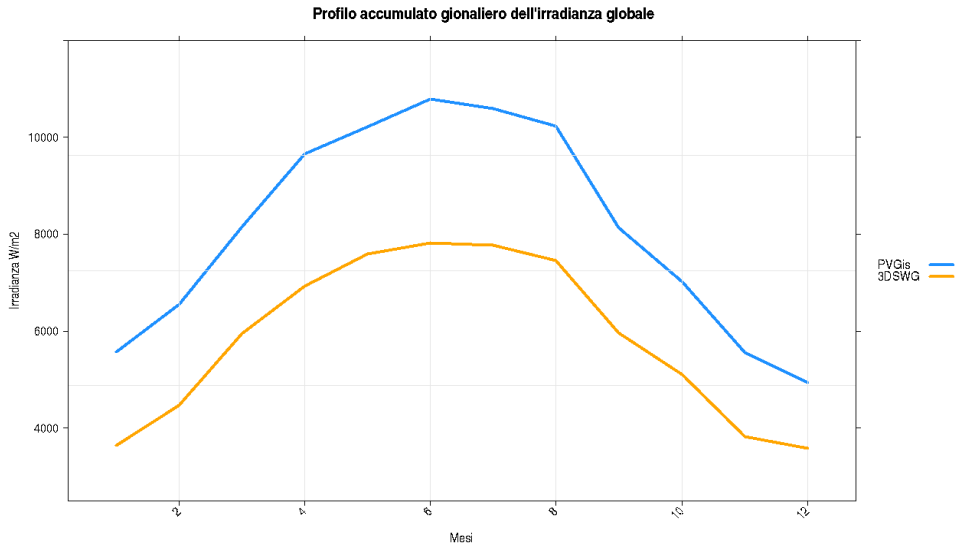


Figura 4. Confronto tra i profili accumulati su base giornaliera dell'irradianza globale [W/m<sup>2</sup>] stimata dall'applicativo web PVGIS - curva blue - e dalla metodologia sviluppata all'interno del progetto 3DSolarWeb GIS (3DSWG) - curva rossa. La corretta sotto-stima di 3DSWG è dovuta all'impiego di una migliore risoluzione geometrica del territorio e dell'urbanizzato.

Mese	PVGis [W/m <sup>2</sup> ]	3DSWG [W/m <sup>2</sup> ]	Differenza (PVGIS-3DSW)	Differenza %
Gennaio	5580.5	3652.327	-1928.173	34.55
Febbraio	6546.5	4468.358	-2078.142	31.74
Marzo	8146.75	5957.294	-2189.456	26.88
Aprile	9656.5	6931.106	-2725.394	28.22
Maggio	10208.83	7595.776	-2613.057	25.60
Giugno	10779.67	7823.711	-2955.956	27.42
Luglio	10585.25	7778.617	-2806.633	26.51
Agosto	10234.83	7463.653	-2771.18	27.08
Settembre	8129.5	5963.245	-2166.255	26.65
Ottobre	7016.25	5100.328	-1915.922	27.31
Novembre	5551.75	3818.446	-1733.304	31.22
Dicembre	4940.75	3589.034	-1351.716	27.36

Tabella 1. Valori di irradianza mensile stimati con PVGIS e 3DSWG. 3DSWG sottostima mediamente del 30% rispetto a PVGIS con differenze più accentuate nel mese di Gennaio e più ridotte nel mese di Maggio.



me	reale	reale n punti	3DSWG	PVGis	3DSWG -reale	PVGis-reale
Gennaio	94.575	8	136.4265	169.2	41.851516	74.625
Febbraio	NA	0	191.7766	253.2	NA	NA
Marzo	247.21	2	272.2725	353.6	25.062453	106.39
Aprile	111.4371	8	348.5915	371.6	237.154341	260.16288
Maggio	388.9755	2	387.7875	440	-1.187969	51.0245
Giugno	404.5224	5	400.4382	436	-4.084238	31.4776
Luglio	378.9286	7	391.9767	496	13.048099	117.07143
Agosto	357.1342	12	359.8023	412	2.668104	54.86583
Settembre	291.5373	11	280.7378	354	-10.799464	62.46273
Ottobre	224.3133	12	215.8322	273.6	-8.481173	49.28667
Novembre	144.9055	11	146.2781	172.8	1.372628	27.89455
Dicembre	86.003	10	120.3984	159.6	34.395403	73.597

Tabella 2. Errore medio e numero di punti considerati aggregato su scala mensile per tutta la superficie dell'impianto considerato in KWh.

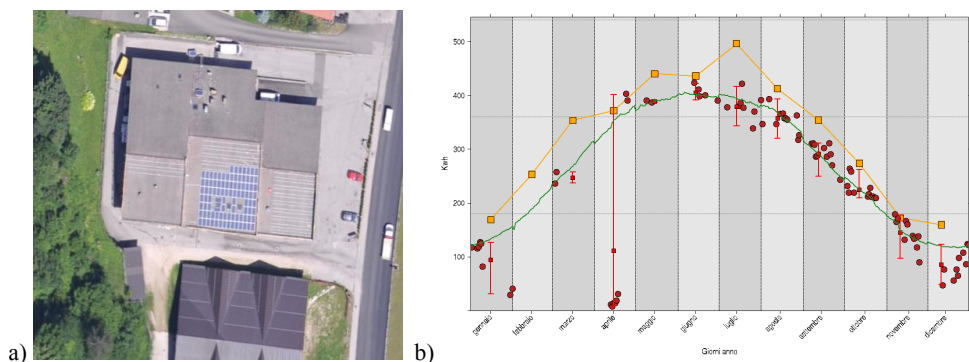


Figura 5. Dettaglio dell'impianto fotovoltaico del caseificio del Primiero (a) e grafico produzione reale e stimata (b).

### Piattaforma WebGIS

L'attuale interfaccia pilota della piattaforma WebGIS mette a disposizione le funzionalità di base della prevista versione finale (Figura 6). Scopo della piattaforma geo-web nella sua implementazione definitiva è di consentire al cittadino e/o al tecnico di valutare l'opportunità di installare pannelli fotovoltaici sul proprio tetto, tenendo conto dei costi e mettendoli in relazione con la produttività energetica stimata di ogni singola sezione del tetto. Finora le funzioni di base già realizzate consentono, oltre alla navigazione fra le diverse basi cartografiche realizzate (true orthophoto, perimetrazioni e falde dei tetti, EPU), di visualizzare il trend della produzione stimata

di energia in ogni punto dei tetti della zona pilota (Figura 6). La piattaforma webGIS è composta da un server WPS Open Source (su *framework* PyWPS) per il calcolo in tempo reale della radiazione solare o del potenziale fotovoltaico, e di un server cartografico Open Source (basato su MapServer e sul *framework* Django) per la pubblicazione delle mappe e l'autenticazione degli utenti. Nel dettaglio, il processo consente di estrarre i valori di irraggiamento solare e di produzione di energia elettrica mensile e annuale per una superficie identificata dall'utente tramite l'interfaccia web. Dopo la digitalizzazione della superficie di interesse (per esempio una falda o posizionando la forma di uno o più pannelli su porzioni di essa) l'interfaccia restituirà il valore dell'energia prodotta per l'area identificata.

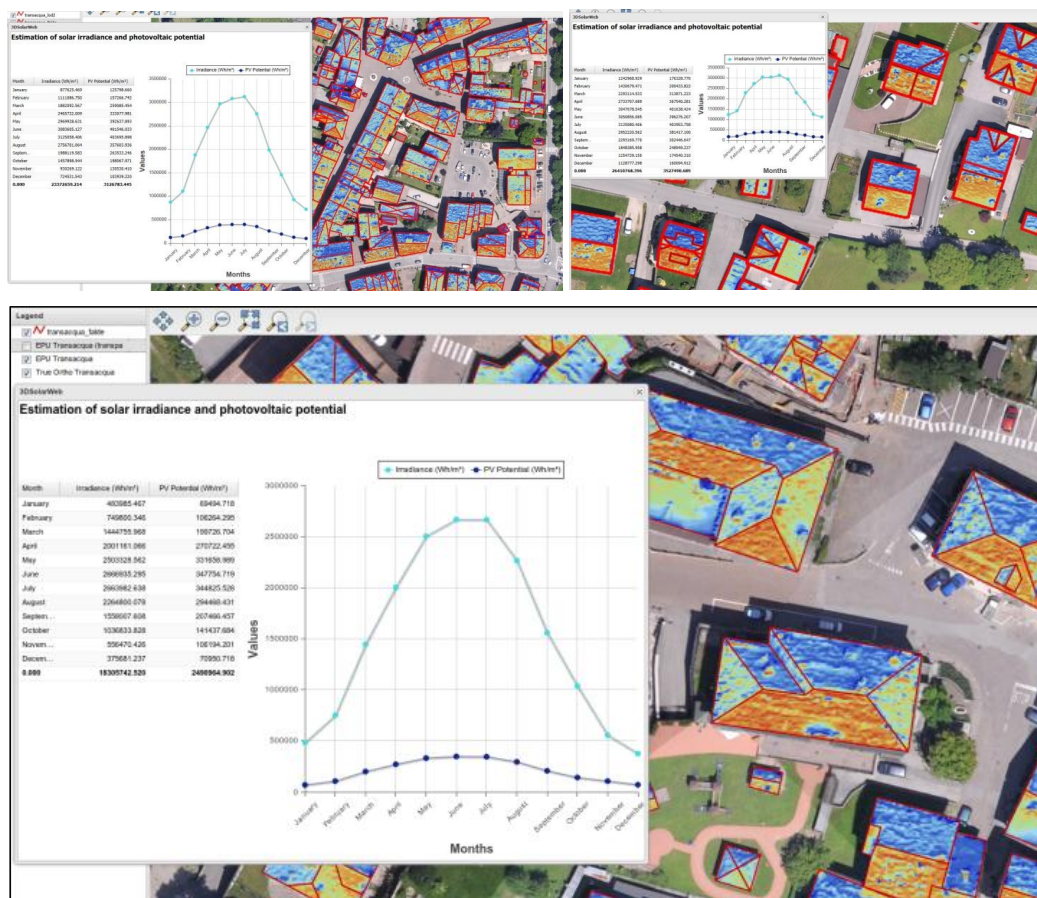


Figura 6. Esempi della visualizzazione "color-coding" all'interno del webGIS del progetto. Il potenziale fotovoltaico stimato è visualizzato, per ciascun pixel, sulla true-orthofoto dell'area in esame. Ciascuna falda può essere interrogata e le curve di EPU sono visualizzate.

## Conclusioni e sviluppi futuri

L'articolo ha presentato le attività di ricerca e sviluppo all'interno del progetto 3DSolarWeb per la stima precisa del potenziale fotovoltaico (PV) dei tetti. Partendo da dati fotogrammetrici ad alta risoluzione, il PV viene stimato a risoluzione centimetrica considerando tutte le occlusioni del

territorio. Il risultato (mappe raster), pubblicato attraverso un webGIS visualizzando le stime su true-orthofoto, permette interrogazioni agli utenti su un geodatabase centralizzato.

Le prossime versioni dell'interfaccia web permetteranno di scegliere i pannelli fotovoltaico fra le diverse tipologie presenti sul mercato e di posizionarli sulla porzione di tetto scelta, tenendo conto automaticamente della pendenza della falda (deformando la proiezione del pannello automaticamente in base all'inclinazione) e impedendone la collocazione fuori dalla falda o sopra strutture secondarie (come camini o abbaini). La versione definitiva consentirà ai cittadini di valutare l'idoneità dei tetti o di loro porzioni per l'installazione dei pannelli, e ai tecnici (geometri, architetti, ingegneri) di confrontare i costi e l'energia prodotta da ogni singola installazione, determinando con estrema precisione, fra le altre grandezze, il tempo necessario per il rientro dell'investimento fatto (calcolato sulla base dell'energia ricavata per denaro investito - Energy Returned on Money Invested).

### **Riferimenti bibliografici**

Agugiaro, G., Nex, F., Remondino, F., De Filippi, R., Droghetti, S., Furlanello, C., 2012: Solar radiation estimation on building roofs and web-based solar cadastre. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. I(2), pp. 177-182.

Bergamasco, L., Asinari, P., 2011: Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). *Solar Energy*, Vol. 85(5), pp. 1041-1055.

Blanc, P., Gschwind, B., Lefèvre, M., Wald, L., 2011: The HelioClim project: surface solar irradiance data for climate applications. *Remote Sensing*, Vol. 3, pp. 343-361.

Demir, N., Poli, D., Baltsavias, E., 2009: Detection of buildings at airport sites using images & LiDAR data and a combination of various methods. *ISPRS Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38(3/W4), pp. 71-77.

Haala, N., Kada, M., 2010: An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, pp. 570-580.

Hofierka, J., Kaňuk, J., 2009: Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy*, Vol. 34(10), pp. 2206-2214.

Hofierka, J., Zlocha, M., 2012: A new 3-D solar radiation model for 3-D city models. *Transactions in GIS*, Vol. 16, pp. 681-690.

Ike, S., Kurokawa, K., 2005: Photogrammetric estimation of shading impacts on photovoltaic systems. *Proc. 31st Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, pp. 1796-1799.

Izquierdo, S., Rodrigues, M., Fueyo, N., 2008: A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, Vol. 82(10), pp. 929-939.

Jacobson, M.Z., 2009: Review of solutions to global warming, air pollution and energy security. *Energy & Environmental Science*, Vol. 2, pp. 148-173.

Jochem, A., Hofle, B., Rutzinger, M., Pfeifer, N., 2009: Automatic roof plane detection and analysis in airborne Lidar point clouds for solar potential assessment. *Sensors*, Vol. 9, pp. 5241-5262, doi:10.3390/s90705241.

Jochem, A., Höfle, B., Hollaus, M., Rutzinger, M., 2009: Object detection in airborne LIDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas. *ISPRS Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38(3/W8), pp. 1-6.

Kassner, R., Koppe, W., Schüttenberg, T., Bareth, G., 2008: Analysis of the solar potential of roofs by using official LiDAR data. *ISPRS Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.37(4).

Kolbe, T., Groeger, G., Pluemer, L., 2008: CityGML - 3D City models for emergency response. In: Zlatanova/ Li (Eds): *Geo-Information technology for emergency response*, pp. 257-274.

Kryza, M., Szymanowski, M., Migala, K., Pietras, M., 2010: Spatial information on total solar radiation: Application and evaluation of the r.sun model for the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard. – *Polish Polar Research*, Vol. 31(1), pp. 17-32.

Ludwig, D., Lanig, S., Kärle, M., 2009: Location analysis for solar panels by LiDAR-data with geoprocessing – SUN-AREA. *Envi-roinfo 2009, Proc. 23rd Int. Conference on Informatics for Environmental Protection*, Berlin, Germany.

Mueller, R., Behrendt, T., Hammer, A., Kemper, A., 2012: A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands. *Remote Sensing*, Vol. (4), pp. 622-647.

Nex, F., Remondino, F., 2012: Automatic roof reconstruction from photogrammetric DSM. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.(I-3), pp. 257-262.

Nguyen, H.T., Pearce, J.M., 2010: Estimating potential photovoltaic yield with r.sun and the open source Geographical Resources Analysis Support System. *Solar Energy*, Vol. 84(5).

Oude Elberink, S., Vosselmann, G., 2011: Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66(2), pp. 157-165.

Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006: A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from Spot5-HRS stereo imagery. *ISPRS Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36(1/W41).

Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2005: Automated delineation of roof planes from LiDAR data. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36(3/W19), pp. 221-226.

Šuri, M., Hofierka, J., 2004: A New GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*, Vol. 8, pp. 175-190.

Ubertini, S., Desideri, U., 2003: Performance estimation and experimental measurements of a photovoltaic roof. *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 1833-1850.

Vallet, B., Pierrot-Deseilligny, M., Boldo, D., Brédif, M., 2011: Building footprint database improvement for 3D reconstruction: A split and merge approach and its evaluation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66(5), pp. 732-742.

Zebedin, L., Klaus, A., Gruber-Geymayer, B., Karner, K., 2006: Towards 3D map generation from digital aerial images. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 60(6), pp. 413-427.

Zhou Q.-Y., Neumann, U., 2008: Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data. *ACM GIS*.

### **Ringraziamenti**

Il progetto 3D Solar Web è stato finanziato dall'European Regional Development Fund e come Legge6/1999 della Provincia Autonoma di Trento. Il lavoro è anche stato supportato dai progetti CIEM e 3M (co-founded Marie-Curie Actions FP7 – PCOFOUND – GA-2008-226070, acronym “Trentino Project” and “Incoming Team 2009”). Gli autori ringraziano il partner di progetto Boso & Partner s.r.l. (<http://www.bosoandpartners.it>) per la raccolta dei dati di produzione, l'azienda Smart3K (<http://www.smart3k.it/>) per il braccio impiegato per l'acquisizione delle immagini da elicottero, la Provincia Autonoma di Trento e il Comune di Trento per la loro disponibilità e per la fornitura di gran parte dei dati geo-spaziali usati nel progetto.