

Analisi di stima sulla producibilità energetica fotovoltaica di edifici civili situati in un contesto urbano in QGIS

Pietro Tagliariol

Laureato in Tecniche dell'Edilizia e del Territorio presso l'Università degli Studi di Udine, tagliariolpietro@hotmail.it

Parole chiave: QGIS, Analisi del Territorio, Fotovoltaico, Stima Producibilità Energetica

Key words: QGIS, Territory Analysis, Photovoltaics, Energy Productivity Estimation

Abstract

QGIS è un software geospaziale open source che offre innumerevoli funzioni per eseguire analisi sul territorio, ed è per questa ragione che attraverso di esso si è scelto di svolgere un'indagine nel campo delle fonti rinnovabili per la produzione di energia pulita, utilizzando gli open data del database cartografico della Regione Friuli Venezia Giulia. Il presente lavoro ha lo scopo di illustrare come avviene l'elaborazione dell'analisi mirata a determinare la stima della produzione di energia elettrica annua che potrebbe offrire un determinato impianto fotovoltaico se installato sulle coperture di edifici civili situati in un contesto urbano. Per ottenere questa stima ci si è focalizzati sulle proprietà geometriche che caratterizzano gli elementi edilizio-architettonici degli immobili, quali la pendenza e l'orientamento delle superfici che compongono la copertura e dalla quale dipende la loro esposizione solare nell'arco temporale di un intero anno. In seguito, sono stati applicati i dati ricavati dal simulatore *Photovoltaic Geographical Information System* impostando i parametri di uno specifico impianto solare a pannelli fotovoltaici. Si è così riuscito a determinare, per ogni superficie di copertura degli edifici del territorio in esame, una stima della quantità di energia annua che l'impianto selezionato avrebbe potuto generare.

QGIS is an open source geospatial software that offers countless functions to perform analysis on the territory, and it is for this reason that through it we have chosen to carry out an investigation in the field of renewable sources for clean energy production, using the open data of the cartographic database of the Friuli Venezia Giulia Region. The purpose of this paper is to illustrate how the elaboration of the analysis aimed at determining the estimated annual electricity production that a given photovoltaic system could offer if installed on the roofs of civil buildings located in an urban context takes place. To obtain this estimate, we focused on the geometric properties that characterize the architectural elements of the buildings, such as the slope and orientation of the surfaces that make up the roof and on which their solar exposure over the time span of an entire year depends. Then, data obtained from the Photovoltaic Geographical Information System simulator were applied by setting the parameters of a specific solar panel system. Thus, it was possible to determine, for each area of building coverage in the area under consideration, an estimate of the amount of annual energy that the selected system would be able to generate.

1. Introduzione

Di fronte all'obiettivo di conseguire una transizione energetica il più rapida possibile, le istituzioni stanno proponendo incentivi finalizzati a coinvolgere la collettività nella produzione di energia pulita derivante da fonti rinnovabili sostenibili, come l'energia solare. Ciò, unito al desiderio morale di impegnarsi nel contribuire al raggiungimento di un sufficiente grado di sostenibilità energetica in futuro, porta sempre più persone a valutare concretamente l'opportunità economica che può offrire l'installazione di impianti alimentati ad energia solare. La realizzazione di tali impianti, però, prevede che siano soddisfatte in fase di progettazione alcune condizioni di carattere tecnico per determinare il raggiungimento di un livello di produttività adeguato. Si propone, quindi, un'analisi svolta sul territorio che possa fornire, per ogni edificio civile presente nell'area esaminata, una stima della producibilità energetica annua che uno specifico impianto può offrire. La presente indagine si svolge all'interno del software geospaziale open source QGIS e le informazioni spaziali impiegate sono liberamente consultabili e usufruibili dalla banca dati cartografica della Regione Friuli Venezia Giulia. La seguente elaborazione è stata eseguita considerando l'installazione di uno specifico impianto fotovoltaico, i cui dati relativi alla producibilità sono stati attinti dal simulatore *Photovoltaic Geographical information System* (PVGIS). Premesso, quindi, che il processo che verrà illustrato di

seguito può essere emulato da chiunque, a patto che si disponga delle conoscenze tecniche ed informatiche necessarie; si desidera spostare l'attenzione sui criteri di natura immutabile su cui si basa l'analisi: la pendenza e l'orientamento delle superfici che compongono le coperture. Essa, infatti, prevede che la stima sia determinabile solamente dopo aver definito le proprietà geometriche che caratterizzano gli elementi edilizi e architettonici degli immobili, individuando i relativi angoli zenitali e azimutali, l'ampiezza delle superfici e la presenza di elementi che possono rappresentare un ostacolo all'installazione di un impianto.

Per svolgere l'indagine, si sono resi necessari i dati vettoriali della Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) e i dati raster dei modelli digitali di elevazione delle superfici, o *digital surface model* (DSM), e delle ortofoto. La CTRN ha lo scopo di definire i contorni delle aree entro le quali considerare i dati altimetrici del modello digitale di elevazione, i quali rappresentano la risorsa necessaria e indispensabile per lo sviluppo dell'elaborazione di seguito descritta. L'uso delle ortofoto, invece, consente di osservare il reale contesto dei dati spaziali del territorio permettendo di decifrarne più agevolmente il loro significato.

Una volta spiegato il processo messo in atto, si descriveranno i risultati raggiunti più rilevanti e selezionati in base alla numerosità di casi simili riscontrati, alla loro peculiare rappresentazione o all'entità della produzione energetica stimata.

2. Elaborazione dei dati

2.1 Considerazioni iniziali

Viste le possibili applicazioni di uno strumento come QGIS, si è scelto di realizzare con esso un'analisi effettuabile con l'impiego dei dati contenuti nel database cartografico della Regione Friuli Venezia Giulia usufruibile al pubblico in modo totalmente gratuito. Il territorio su cui è stata eseguita l'indagine consiste in una zona del centro di Udine che si estende per circa 1,4 km², all'interno di un quadrante i cui lati misurano rispettivamente 840 m e 1620 m.

Si è scelto di svolgere la seguente indagine perché tratta un argomento di grande interesse pubblico, come la sostenibilità ambientale attraverso lo sfruttamento di energia pulita da fonti rinnovabili, e perché può rappresentare un mezzo utile ad effettuare analisi più approfondite da parte di aziende che si occupano della commercializzazione di impianti fotovoltaici o di pannelli solari, modificando i parametri impiegati o integrando nuovi dati più specifici.

L'analisi che si andrà ad illustrare di seguito ha come obiettivo l'individuazione della predisposizione delle coperture, situate in un contesto urbano, ad ospitare un impianto fotovoltaico e la stima della quantità di energia che esso può offrire attraverso l'analisi delle caratteristiche geometriche della superficie sulla quale potrà essere posato. Per fare ciò, si sono posti in relazione tra loro la pendenza e l'orientamento delle superfici di copertura in quanto costituiscono il fattore principale ed immutabile nei progetti di installazione di impianti alimentati ad energia solare. Dunque, la stima ricercata considererà solamente la variabilità dell'energia elettrica cumulabile in un anno da un determinato impianto in base alle caratteristiche architettoniche degli immobili e non ulteriori parametri di natura variabile come le condizioni meteorologiche, il reale bisogno dell'utenza o la capacità strutturale di un edificio civile.

Lo scopo ultimo di questo elaborato è quello di realizzare una mappa digitale in grado di evidenziare a colpo d'occhio le coperture più adatte ad assorbire le radiazioni solari e, quindi, a fornire la maggior produzione annua di elettricità di un impianto alimentato ad energia pulita. Per svolgere questa attività verranno impiegati algoritmi della libreria digitale GDAL e funzioni di GRASS GIS, presenti nel software QGIS in quanto appartenenti alla Open Source Geospatial Foundation e distribuiti con licenza libera.

I parametri che influenzano la soddisfazione, o meno, di questi bisogni si differenziano in base al contributo energetico che generano, sottoforma di acqua calda sanitaria o di elettricità. A fronte di ciò, si è optato per sviluppare l'elaborazione considerando una sola tipologia d'impianto, quello fotovoltaico, e da esso si sono definite le rispettive condizioni che influiscono sul suo livello di produttività. Dunque, si sono considerate ottimali quelle condizioni che con più frequenza si ricercano nel momento in cui si progetta la realizzazione di impianti fotovoltaici in copertura. Prime fra tutte l'orientamento a sud della falda, in quanto permette alla superficie di essere esposta ai raggi del sole per un maggior lasso di tempo durante la giornata. Per quanto riguarda la pendenza, invece, si sono distinti i tetti piani da quelli inclinati considerando i primi migliori in quanto più facilmente predisposti all'installazione dell'inseguitore solare automatico, un dispositivo meccanico in grado di ruotare il piano dei pannelli in base alla direzione dei raggi del sole variandone la pendenza al susseguirsi delle stagioni e l'orientamento durante il giorno. Ne consegue che la capacità di assorbimento delle radiazioni solari, lungo l'intero arco di tempo compreso in un anno, risulti maggiore rispetto a quella di un

impianto installato in modo complanare ad una falda inclinata e orientata in una determinata direzione.

Un dato geografico da tenere da conto in un'analisi di questo tipo è quello della latitudine del territorio di competenza, che influenza il grado ottimale di inclinazione di un impianto ad energia solare. Indicativamente, maggiore è la latitudine della zona indagata maggiore dovrà essere la pendenza del pannello. Per determinare il grado di inclinazione ottimale, per tutte quelle superfici non piane, si è fatto uso dell'applicazione web PVGIS, che ha individuato l'angolo di 38° come il migliore per la zona di Udine. PVGIS, è un simulatore interattivo in grado di restituire una stima della producibilità media di un impianto fotovoltaico in base alle sue specifiche tecniche, alla sua geometria e alla posizione geografica in cui questo è collocato.

Con l'ausilio di questi strumenti e tenendo conto delle considerazioni descritte, si illustra nel dettaglio la fase operativa che ha permesso di raggiungere lo scopo prefissato.

2.2 Raccolta dei dati

I dati di partenza per l'esecuzione dell'elaborato sono stati ricavati dalla piattaforma web EAGLE.FVG. In primis, si è ricercato il dato vettoriale della CTRN che contiene l'insieme delle aree che formano il contesto urbano della città di Udine, rappresentando sia gli elementi di carattere morfologico che antropico. Dunque, al suo interno non sono riportati unicamente le aree del conglomerato edilizio, ma vi sono anche quelle attinenti alla vegetazione, all'orografia e all'idrografia.

Di seguito, dal medesimo WebGIS, si sono ottenuti i dati raster provenienti dai rilievi LiDAR e di fotogrammetria aerea più recenti, quelli effettuati tra il 2017 e il 2020. Tra questi si sono selezionati le ortofoto con dimensione del pixel a terra di 10 cm e i modelli digitali di elevazione delle superfici di passo pari a 0,50 m, precisione ottenuta a seguito del rilievo effettuato eseguendo una scansione del territorio in grado di restituire una nuvola di punti con una densità di 16 punti per m². Per quanto riguarda i modelli altimetrici scaricati, si è scelto di svolgere l'intero processo sui modelli di elevazione delle superfici, e non sul *Digital Building Model*, per evidenziare quegli elementi che possono costituire un fattore di impedimento alla realizzazione dell'impianto, come per esempio lucernari e comignoli, o di ombreggiamento, ad esempio alberi aventi un'altezza maggiore di quella della copertura del fabbricato. Si è scelto di comprendere nell'elaborato anche le ortofoto per rendere più chiaro il reale contesto in cui si avrebbe operato e per poter disporre di uno strumento per una prima valutazione dell'attendibilità dei dati che si andranno a realizzare.

All'interno del software si è operato con il sistema di riferimento cartografico RDN2008/TM33, codificato come EPSG6708, e in esso è stata eseguita automaticamente la georeferenziazione dei dati importati.

2.3 Filtraggio dei dati e ritaglio dei raster

Come prima cosa, è necessario filtrare alcuni dati contenuti nel layer vettoriale dedicato alle aree del demanio che non sono adeguati al fine dell'elaborazione. Siccome l'analisi riguarda le coperture del costruito in contesto urbano, si deve andare ad eliminare tutti quegli elementi che non ricadono all'interno dell'estensione del raster e che, già in un primo momento, non sono idonei all'installazione degli impianti considerati. Nel presente caso sono state rimosse le aree pertinenti la vegetazione, l'orografia, l'idrografia, gli impianti, gradinate o altre opere di carattere meramente urbano, conservando in questo modo solamente le aree destinate agli edifici civili. La rimozione di tali elementi non è stata complessa in quanto il vettore conteneva già al suo interno una doppia classificazione delle aree rappresentate

che descriveva la funzione primaria e secondaria che ognuna di esse svolgeva.

Si sarebbe potuto sfolire ulteriormente il numero di campioni considerati andando ad escludere dall'analisi anche quelle strutture classificate come edifici civili, ma ricadenti nella sottocategoria degli edifici di culto che contribuiscono a valorizzare il patrimonio artistico, storico e culturale della città di Udine. Nonostante ciò, si è deciso di conservarli per avere modo di osservare come queste superfici avrebbero risposto ai programmi di QGIS, quindi per poter disporre del maggior quantitativo di informazioni possibili.

Successivamente, si effettua il ritaglio dei *Digital Elevation Model* (DEM) per ottenere dei nuovi raster che contengano solamente i pixel che rientrano all'interno delle aree del vettore. Per eseguire quest'azione si è fatto uso della funzione *ritaglia raster con maschera*, disponibile tra gli strumenti di processing di GDAL disponibili in QGIS, in cui viene richiesto di selezionare il raster da ritagliare e il vettore i cui elementi ne faranno da contorno. Si genera così un nuovo raster con solo i pixel le cui coordinate planimetriche del loro centro ricadono all'interno dei poligoni precedentemente identificati come edifici.

Durante questa fase si sono verificati degli errori nell'esecuzione dell'algoritmico che non hanno permesso di ritagliare alcune immagini in modo immediato, ma è stato necessario rieseguire l'operazione di ritaglio in tre step andando a selezionare come poligoni di maschera solo alcuni degli elementi contenuti nell'estensione del raster. Si ipotizza che l'errore sia dovuto ad un'incerta definizione geometrica dei perimetri di edifici adiacenti causandone la probabile intersecazione o sovrapposizione, le quali non permettevano all'algoritmo di ricollocare il pixel all'interno di un'area rispetto ad un'altra.

2.4 Determinazione pendenza e orientamento

Sui DEM appena ricavati, si è applicato l'algoritmo *r.slope.aspect* di GRASS GIS (Liscia et al. 2014), il quale esegue un'analisi matematica sulla superficie della nuvola di punti definita dalle coordinate planimetriche di ogni cella e dalle relative quote altimetriche restituendo dei nuovi raster in cui sono riportati per ciascuno i valori di pendenza e di orientamento.

La pendenza viene sempre restituita in riferimento al piano cartografico e c'è la possibilità di scegliere se esprimerla in gradi angolo o percentuale; nel presente caso si è optato per i gradi sessadecimali. I raster generati potranno essere tematizzati in funzione dei valori ottenuti, come per Figura 1.



Figura 1. Rappresentazione delle pendenze delle coperture.

L'orientamento, invece, è stato definito considerando la direzione cardinale nord come origine dell'angolo sul piano azimutale. In un secondo momento si è modificata la tematizzazione della banda per poter ottenere una visualizzazione che rendesse facilmente leggibili i dati generati. Si è realizzata una nuova scala dei colori che restituisse dei colori caldi per i

valori di pendenza considerati ottimali e dei colori freddi per quelli che rappresentano condizioni sfavorevoli o inopportune.

Si mette in luce il fatto che non sia matematicamente possibile determinare l'orientamento laddove la superficie del modello digitale di elevazione risulti piano. Il programma, però, prevede che nei casi in cui si riscontri pendenza nulla venga assegnato il valore angolare zero, riuscendo così ad attribuirgli un dato numerico che risulterà univoco in quanto differenziato dal valore dell'angolo giro. Interrogando i risultati ottenuti dal raster relativo all'orientamento e confrontandoli con quelli presenti nel raster delle pendenze si è constatato che, comunque, quando la pendenza della copertura era prossima allo zero, appariva un numero quantitativo di pixel con orientamenti molto diversi tra loro. Ciò avviene a causa dell'irregolarità della superficie della nuvola di punti che causa, quindi, una rappresentazione puntinata in modo disomogeneo per le superfici di copertura orizzontali, come in Figura 2.

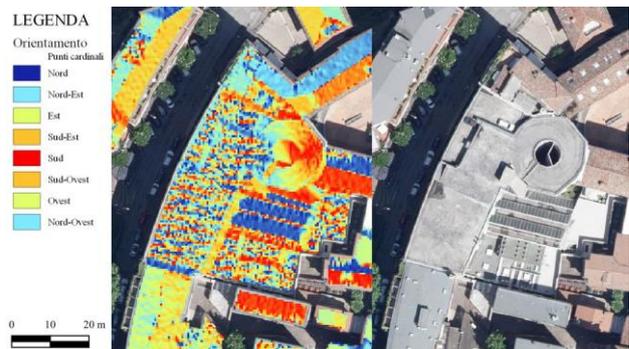


Figura 2. Restituzione grafica dell'orientamento delle superfici orizzontali comparata all'ortofoto.

Questo discorso invece, non vale per quelle aree a pendenza lievemente maggiore, che presentano una pendenza più o meno costante lungo tutta la copertura. Dunque, le superfici orizzontali saranno individuabili per via dell'elevata concentrazione di pixel colorati in modo differente.

2.5 Riclassificazione dei dati

Affinché sia possibile mettere in relazione tra loro i valori numerici delle pendenze e dell'orientamento delle falde, sarà necessario raggruppare valori simili in degli intervalli definiti arbitrariamente. Questa operazione, detta riclassificazione, permette di ottenere un raster i cui pixel restituiscono dei nuovi valori associati a dei range di angoli impostati. Graficamente, l'applicazione dell'algoritmo comporta un'omogeneizzazione dei dati con conseguente formazione di aree di ampiezza maggiore laddove risultino adiacenti le celle con entità iniziale appartenenti allo stesso intervallo. L'output manterrà le sue proprietà per quanto riguarda il sistema di riferimento e la posizione cartografica dei pixel, ma questi ultimi perderanno il loro significato geometrico.

Prima di descrivere il processo impiegato, è di fondamentale importanza parlare della metodologia adottata per riclassificare pendenza e orientamento. Ricordando quanto riportato nelle considerazioni iniziali, si sono andati a considerare le condizioni che solitamente sono valutate ottimali per il progetto di un impianto ad energia solare in copertura. Per questo motivo, si è deciso di classificare le pendenze delle coperture distinguendo i tetti piani, quelli con una pendenza capace di garantire un buon livello di esposizione durante l'intero anno, le coperture capaci di rendere maggiormente nella stagione estiva o invernale e le aree con una pendenza inadeguata.

Si è scelto di riclassificare gli angoli della pendenza in categorie numerate in maniera crescente in base alla loro capacità di soddisfare l'obiettivo prefissato; eccezion fatta per le superfici piane a cui è stato associato il valore zero, in considerazione del fatto che su di esse l'orientamento azimutale non è determinabile. Questo fatto risulterà fondamentale nel momento in cui si dovrà instaurare una relazione matematica tra i livelli di pendenza e quelli di orientamento, come si vedrà in seguito.

Identificati i criteri del nuovo classamento, la riclassificazione è stata eseguita con l'algoritmo *r.reclass* di GRASS GIS, il quale esegue sul raster in ingresso un set di istruzioni espresse sottoforma di codice. Infatti, selezionato il layer su cui si intende agire, viene richiesto di inserire il file contenente le regole di riclassificazione oppure di trascriverle direttamente nello spazio apposito. Siccome apportare una nuova classificazione dei valori angolari comporta la perdita del loro significato geometrico, essa è stata eseguita in modo da avere degli indici univoci per ogni nuovo range e crescenti man mano che il valore angolare si avvicinava a quello ottimale per l'installazione di impianti fotovoltaici, ossia l'angolo di 38° rispetto al piano orizzontale. Dunque, il codice trascritto per eseguire l'elaborazione è stato il seguente:

```
0 THRU 3 = 0
3 THRU 15 = 4
15 THRU 30 = 9
30 THRU 45 = 16
45 THRU 60 = 7
* = 1
END
```

La riclassificazione dell'orientamento è stata svolta in maniera analoga, con la sola differenza nei nuovi valori di riclassificazione. Si è associato il valore uno a tutte quelle superfici orientate prevalentemente in direzione nord, le quali non potranno godere in alcun modo di un'adeguata esposizione solare. Nello specifico, si è usata una classificazione suddividendo il piano azimutale in 6 settori e assegnando valori maggiori per quegli angoli che si avvicinano al valore di 180°, ossia al Sud. Il codice impiegato ha la stessa struttura del primo, ma la riclassificazione è avvenuta come da Figura 3.

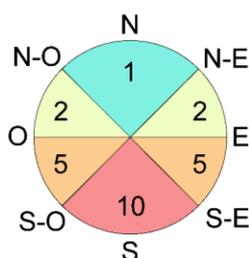


Figura 3. Riclassificazione dell'orientamento delle superfici.

I nuovi valori si differenziano man mano che dalla direzione Nord ci si sposta verso la direzione Sud, ma sono equivalenti per i lati Est o Ovest.

2.6 Calcolo raster

Ottenuti i layer con gli indici dei pixel riclassificati come imposto, si dovrà proseguire ragionando sul modo migliore per mettere in relazione fra loro entrambi i fattori in un'unica equazione a due variabili. Lo scopo è quello di ottenere un coefficiente che identifichi le coperture che potrebbero garantire il maggior assorbimento di radiazioni solari nel caso vi si installasse un impianto a pannelli fotovoltaici. Questo fondamentale passaggio consiste nel calcolo dei valori riportati nelle celle delle immagini relative a pendenza e orientamento, le

quali, se sovrapposte, combaciano alla perfezione perché originarie dello stesso ritaglio del modello digitale. La funzione da impiegare, ossia il *calcolatore raster* di QGIS, svolge un calcolo tra gli indici di banda presenti nei pixel che rappresentano la stessa superficie di territorio oppure nel caso in cui una sia contenuta nella superficie dell'altra. È in questo momento che si mostra cruciale l'aver predisposto anticipatamente e coscientemente i valori numerici da impiegare per descrivere le classi di pendenza e orientamento. Di fatto, sono state definite le condizioni degli angoli zenitali e azimutali delle superfici esprimendole con numeri fittizi e ordinati in modo progressivo per poter applicare una funzione che fosse la più semplice possibile e con risultati di facile previsione.

La formula (1) usata nella lavorazione prodotta è di semplice natura e riesce a mettere in relazione in modo coerente sia i valori associati alla pendenza che quelli legati all'orientamento.

Si è scelto di adottare un'equazione che comportasse dei valori nulli per le superfici piane, valori unitari laddove vi fossero situazioni inadeguate o non auspicabili, per poi vedere i valori incrementare in maniera esponenziale all'avvicinarsi delle condizioni di inclinazione considerate ideali. Dunque, si è impiegata la seguente formula:

$$C = P^2 \times O^2 \quad (1)$$

ove
P = valore riclassificato della pendenza
O = valore riclassificato dell'orientamento
C = coefficiente fittizio

La formula deve essere digitata all'interno del calcolatore raster con un linguaggio che consente al programma di riconoscere la banda che contiene il valore da elaborare, anche nel caso corrente in cui i raster riclassificati siano monobanda. Pertanto, il codice da digitare all'interno dello spazio dedicato all'espressione del calcolatore raster sarà in genere definito nel seguente modo:

("Pendenza@1^2)*("Orientamento@1^2)

L'output che otterremo sarà un raster composto da una matrice contenente in ogni sua cella il risultato dell'espressione indicata: il coefficiente fittizio di esposizione solare (Bonesso et al. 2013).

Con la relazione instaurata tra i dati, verrà restituita una varietà di valori sufficiente, se tematizzata come da Tabella 1, ad eseguire una prima indagine in grado di mettere in luce quelle aree di copertura capaci, o meno, di accogliere un impianto e di massimizzare la sua resa in termini di assorbimento di energia solare in funzione della pendenza e dell'orientamento. Si evidenzia come si sia riuscito a risolvere il problema dell'orientamento delle superfici piane, le quali inizialmente presentavano tutta una serie di valori non coerenti tra loro e che ora, grazie al prodotto del valore riclassificato della pendenza, restituiscono zero in ogni punto della superficie piana.

C = P ² · O ²		Orientamento							
		0°-45°	45°-90°	90°-135°	135°-225°	225°-270°	270°-315°	315°-360°	
		1	2	5	10	5	2	1	
Pendenza	0°-3°	0	0	0	0	0	0	0	
	3°-15°	4	16	64	400	1600	400	64	16
	15°-30°	9	81	324	2025	8100	2025	324	81
	30°-45°	16	256	1024	6400	25600	6400	1024	256
	45°-60°	7	49	196	1225	4900	1225	196	49
	60°-90°	1	1	4	25	100	25	4	1

Tabella 1. Coefficienti fittizi generati dal calcolatore raster tematizzati in funzione dell'esposizione solare annua.

2.7 Vettorializzazione e stima dell'energia producibile

Disporre di un vettore riportante i dati ricavati risulta essenziale qualora si voglia svolgere ulteriori operazioni e indagini sulle prestazioni raggiungibili da determinati impianti ad energia solare in relazione alle caratteristiche delle aree individuate (Moraca, 2018). La vettorializzazione di un layer raster avviene con l'impiego della funzione *poligonizzazione* di GDAL, il quale estrae dall'immagine i contorni dei pixel trasformandoli in poligoni. Questo algoritmo è in grado di riconoscere le celle adiacenti che presentano lo stesso valore della banda selezionata e di unire i loro contorni in un unico elemento. Il valore della banda individuato verrà riportato sottoforma di attributo all'interno di un nuovo campo nella *tabella degli attributi*, una tabella in grado di contenere tutta una serie di informazioni espresse in forma di numero o di stringa di testo. Il layer vettoriale che si andrà a creare disporrà di un campo dedicato ai coefficienti fittizi presenti nel raster per ogni singolo poligono che si sarà venuto a creare con la poligonizzazione. Sarà, poi, possibile determinare la superficie di ogni elemento del vettore grazie ad una specifica funzione del *calcolatore dei campi* ed inseguito si potranno applicare i parametri desiderati per effettuare la stima della quantità di energia elettrica ottenibile da ogni copertura con un determinato impianto fotovoltaico. Vi è un'apposita funzione disponibile per calcolare l'area di ogni singolo poligono. È resa immediatamente disponibile tra quelle presenti nella categoria riguardante le geometrie all'interno del calcolatore dei campi e riporta il seguente codice:

\$area

I parametri utilizzati nell'analisi per eseguire la stima sono quelli presenti nella piattaforma PVGIS, ossia la tecnologia dei pannelli fotovoltaici, la loro potenza, la percentuale di perdita di sistema, la pendenza, l'orientamento e la tipologia di montaggio dell'impianto. Da questi, uniti alla posizione geografica del territorio, la piattaforma è in grado di indicare la produzione annua di energia fotovoltaica, illustrando anche un istogramma delle quantità prodotte per ogni mese dell'anno. Nello specifico, l'indagine è stata svolta considerando un impianto a pannelli in silicio, collegato alla rete, con pannelli di potenza 350 W e una perdita di sistema del 14%, montato su appositi telai. All'interno della piattaforma, è stata riportata la potenza dell'impianto per m², in modo che ci venisse restituita la quantità di energia annua ottenibile in proporzione all'unità di superficie (Fig. 4). Dunque, il valore inerente alla potenza inserito all'interno del simulatore corrisponde al rendimento energetico specifico del pannello, pari al 20%, e quindi in grado fornire una potenza di 200 W per m².

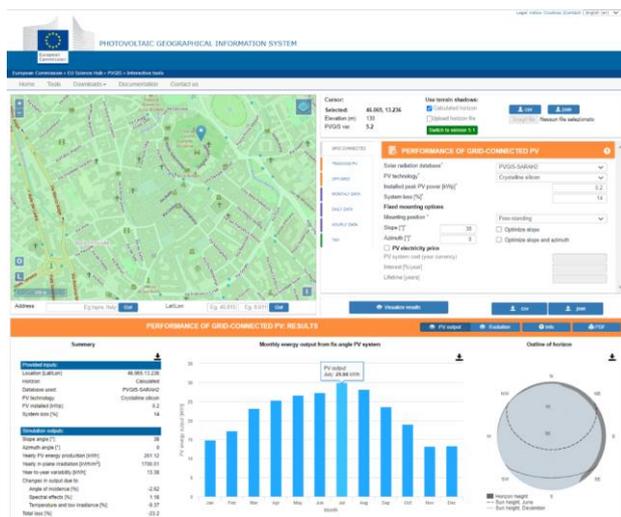


Figura 4. Schermata dimostrativa della stima prodotta dal simulatore PVGIS.

Effettuando le simulazioni su PVGIS per ogni valore medio degli intervalli impostati con la riclassificazione dei raster, si sono ottenuti i totali di energia annua producibile per le diverse pendenze e gli orientamenti. Siccome si è considerata la possibilità di installazione degli inseguitori solari sulle superfici piane di copertura, il valore ottenuto dalla simulazione in PVGIS è stato incrementato del 25% per la maggiore resa che questi dispositivi meccanici possono procurare.

Il passo successivo prevede che ai coefficienti fittizi di tutti gli elementi del vettore siano associati i rispettivi indici di produttività annua per realizzare un nuovo campo di attributi. Per farlo, si è ricorsi al calcolatore dei campi, in cui è stato trascritto un codice che ha permesso di individuare ciascuno delle centinaia di migliaia di elementi, l'attributo del coefficiente e, in base al suo valore, creare un nuovo attributo relativo all'energia annua ottenibile per m².

Il codice impiegato è stato riportato con la seguente sintassi:

```
CASE WHEN "Coefficiente" = 0 THEN 328
      WHEN "Coefficiente" = 1 THEN 51
      WHEN "Coefficiente" = 4 THEN 119
      ...
      WHEN "Coefficiente" = 25600 THEN 262
```

END

Infine, si sono moltiplicati i valori di prestazione degli impianti fotovoltaici per unità di superficie per le aree dei poligoni che compongono le innumerevoli superfici di copertura presenti nel centro urbano. Nel farlo, si è considerato che un impianto non occupa quasi mai l'intera superficie di una copertura, per via delle dimensioni dei moduli e di altri aspetti di natura architettonica o strutturale. Pertanto, è stata introdotta una riduzione alla superficie effettivamente utilizzabile, stimata intorno al 50%. Tenendo conto di ciò, sempre tramite il calcolatore dei campi è stato generato un nuovo campo i cui attributi sono il risultato del prodotto tra la superficie di copertura utilizzabile e la produzione annua al m² di energia dell'impianto fotovoltaico. Il prodotto è stato calcolato con la funzione seguente:

$$S = A \times 0,5 \times E \quad (2)$$

ove
 S = stima dell'energia annua ottenibile
 A = area della superficie di copertura
 E = energia annua producibile per m²

Si è quindi ottenuta, per ogni edificio civile situato nel contesto urbano, la stima di quanta energia elettrica annua che può essere mediamente ricavata da un impianto fotovoltaico in funzione delle caratteristiche geometriche delle singole coperture. Disporremo quindi di un vettore dalla quale è possibile consultare, per ogni suo elemento, i valori dei coefficienti, l'estensione della loro area, la produttività energetica al m² per il tipo di impianto e la stima finale. Tutte queste informazioni saranno visibili da un unico layer vettoriale e potrebbero essere modificate o integrate all'interno di altri ambienti GIS.

3. Analisi del processo e dei risultati

Il processo descritto fin qui permette di ottenere delle mappe digitali tematizzabili in funzione dell'irraggiamento solare riscontrabile dalle caratteristiche geometriche delle coperture degli edifici ed un vettore che illustra il potenziale energetico raggiungibile installando su di esse un determinato impianto fotovoltaico. Con questi dati a portata di mano, diventa necessario visionare quanto realizzato e confrontare l'influenza

delle considerazioni iniziali con l'attendibilità dei risultati conseguiti per avere una chiave di lettura critica sulla loro qualità e precisione.

Innanzitutto, è bene chiarire come ci si debba rapportare al problema più importante di tutti per un'analisi che studia lo sfruttamento di pannelli solari: l'ombreggiamento. Le superfici di copertura soggette ad ombreggiamento non sono evidenziate e, pertanto, a primo impatto potrebbero apparire idonee all'installazione di impianti fotovoltaici tanto quanto quelle che non presentano questa problematica. Esistono due cause principali di ombreggiamento, ossia la presenza di elementi architettonici, o vegetazione, posti al di sopra della superficie di copertura (Fig. 5) e quella causata dalla presenza di altre costruzioni vicine.

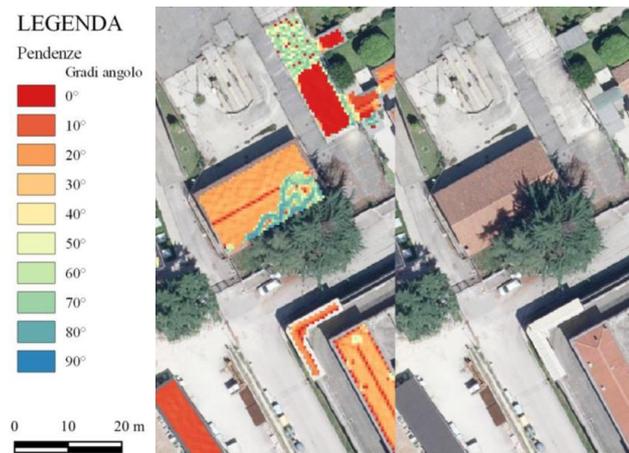


Figura 5. Esempio di un elemento di ombreggiamento sulla superficie di copertura.

Nei primi due casi, questi elementi possono essere individuati facilmente perché rappresentati da insiemi di pixel, o poligoni, aventi valori di coefficiente nettamente diversi. Questo avviene a causa del dislivello altimetrico individuato durante i rilievi LIDAR e al trattamento di queste superfici durante la riclassificazione dei valori. Inoltre, fin dal principio si sono importate in QGIS anche le ortofoto che hanno permesso di verificare con immediatezza la natura degli elementi di disturbo che emergono dal modello digitale delle superfici.

Invece, nel caso in cui l'ombreggiamento sia dovuto alla presenza di edifici nelle vicinanze, non risulta esservi modo di evidenziarlo dai layer ottenuti con la lavorazione descritta. Il metodo più pratico per riuscire a notare quest'eventualità è osservare nel dettaglio i modelli digitali di elevazione, nei quali è semplice accorgersi della presenza di differenze di quote importanti tra costruzioni vicine, come si può osservare nella Figura 6 sottostante.

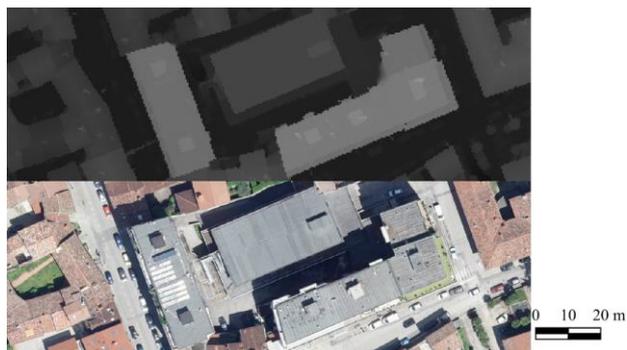


Figura 6. Ombreggiamento tra edifici individuabile dal confronto tra modello altimetrico digitale e ortofoto.

In figura è presente un confronto tra il modello digitale di elevazione e l'ortofoto dai quali si può notare, già da una prima occhiata, lo stacco di quota presente fra l'ala dell'edificio fronte strada rappresentato con tonalità chiare e quello posto a nord raffigurato con colori scuri perché di quota inferiore. Alla luce di ciò si sottolinea che per eseguire una corretta valutazione sulla predisposizione di una copertura ad ospitare pannelli solari può essere necessario confrontare il vettore finale della stima energetica ottenibile con i dati di partenza sui quali si è operato. Illustrato l'argomento principale che mina l'affidabilità delle informazioni prodotte alla fine dell'elaborazione, è importante osservare anche gli aspetti che riguardano gli elementi che compongono il vettore spaziale ottenuto. Inoltre, si richiama l'attenzione sul fatto che le aree in esso riportate sono calcolate sul piano cartografico, e quindi risultano inferiori per tutte quelle superfici di copertura che presentano un qualsiasi grado di pendenza.

Dal punto di vista estimativo, si è cercato di impostare dei parametri che non fossero esageratamente ottimistici, e per tali ragioni si è preferito considerare un basso grado di area di copertura effettivamente utilizzabile ed un rendimento dei pannelli fotovoltaici che fosse standard per il mercato attuale. Dato lo sviluppo del mercato dei pannelli ad energia solare, recentemente si sono viste incrementare le prestazioni dei pannelli fotovoltaici, che hanno raggiunto un grado di efficienza pari al 20% anche per quei pannelli che non rientrano tra i prodotti considerabili top di gamma.

Visionando le stime di energia elettrica annuale prodotta per ogni tipologia di copertura, ci si è resi conto che i valori risultano essere attendibili per la quasi totalità degli edifici. Si è appurato che le falde dei tetti delle abitazioni singole, categoria edilizia prevalente nel territorio esaminato, presentano una stima di producibilità elettrica che risulta leggermente inferiore ai valori calcolati misurando dal software una ad una le superfici di copertura potenzialmente usufruibili di un gruppo di edifici ed applicando su di essi i medesimi parametri dell'impianto fotovoltaico. Nell'esempio in Figura 7, è riportato un edificio per il quale si è stimato che, installando un impianto fotovoltaico nella falda maggiormente esposta a sud, si riesca ad ottenere annualmente una produzione di energia elettrica pari a circa 14.000 kWh. Attraverso gli strumenti di QGIS si è trovato plausibile che vi si possa impiegare una superficie di falda maggiore a quella stimata, e su di essa si sono applicati i parametri e i risultati di PVGIS inserendo i gradi di pendenza e orientamento ricavati dall'algoritmo di GRASS. Si è tenuto conto della presenza dell'oggetto posto in prossimità della linea di colmo del tetto, valutando un'abbondante area in sua prossimità come inadeguata all'installazione di un impianto ad energia solare. Il discostamento finale tra i due valori di produzione di energia era inferiore al 10%, come si è riscontrato per innumerevoli altre costruzioni, e si è osservato che la stima ottenuta dall'analisi svolta era quasi sempre inferiore a quella proposta dalla piattaforma PVGIS.



Figura 7. Superfici di copertura tematizzate in funzione della produttività energetica annua su m² di impianto fotovoltaico.

Oltre ai casi appena descritti, ve ne sono diversi la cui rappresentazione della copertura risulta essere disomogenea in quanto composta da numerose aree con indici di producibilità diversi seppur simili tra loro. Questo avviene quando la superficie del modello digitale presenta valori di pendenza o orientamento che fluttuano attorno ai valori di contorno dei range impostati durante la riclassificazione. In tali casi, la stima è ottenibile considerando la somma dei valori di ogni area, visionabili dalla tabella degli attributi del vettore selezionando i corrispettivi elementi. In Figura 8 si può osservare un chiaro esempio di una copertura il cui livello di producibilità annua può essere stimato considerando l'ammontare degli indici di ogni area contenuta in essa e di come in realtà la superficie risulti piuttosto omogenea. La falda posta in direzione sud sarà quella ottimale per l'installazione di impianti fotovoltaici, poiché, a conti fatti, si stima che i suoi 200 m² di superficie potrebbero generare circa 20.000 kWh all'anno.



Figura 8. Confronto fra il vettore di stima della produttività energetica e l'ortofoto di una copertura con rappresentazione disomogenea della sua superficie.

Invece, I casi in cui si riscontrano valori di producibilità energetica non realistici sono esigui e riguardano principalmente le coperture piane con ampie superfici, per le quali sono spesso presenti corpi ed elementi architettonici che possono causare ombreggiamenti per la posizione in cui si trovano. Ne è un esempio la copertura rappresentata nella Figura 9, nella quale sono presenti dei vani scala e impianti che rappresentano un ostacolo per il pieno sfruttamento dell'area non solo dal punto di vista della gestione degli spazi, ma anche per le zone d'ombra che ne derivano durante l'arco della giornata. L'installazione di un impianto dotato di inseguitore solare potrebbe essere una soluzione per cercare di far fronte al problema, ma difficilmente si potranno raggiungere gli oltre 115.000 kWh annui che

risultano dalla stima. Una soluzione procedurale per evitare di riscontrare stime così ottimistiche sarebbe quella di applicare una percentuale di superficie di copertura effettivamente utilizzabile variabile in base all'entità dell'area di ogni elemento del vettore. Si potrebbe generare un abbassamento dei valori dell'energia producibile dalle grandi coperture applicando percentuali inferiori.



Figura 9. Confronto fra il vettore della stima di produttività energetica e l'ortofoto di una copertura con stima inattendibile.

4. Conclusioni

Il presente lavoro ha lo scopo di dimostrare come può avvenire un'analisi sul territorio attraverso l'utilizzo di risorse totalmente accessibili. Si è voluta svolgere questa analisi perché si sono riscontrate numerose indagini sullo stesso argomento, eseguibili dall'inizio alla fine solo attraverso l'uso di software a pagamento o dati non disponibili al pubblico. Nel processo descritto, invece, si sono utilizzati strumenti e dati liberamente distribuiti dalla *Open Source Geospatial Foundation*, dalla Regione Friuli Venezia Giulia e dall'Unione Europea.

Il processo in esame vede interessata un'area di circa 1,4 km², che comprende il centro urbano della città di Udine e sulla quale hanno sedime circa 1200 fabbricati. È stata selezionata quest'area per la sua particolare orografia e per le differenti coperture presenti. In questo modo si è potuto verificare meglio il comportamento dei vari algoritmi di QGIS, osservando l'attendibilità dei dati da essi generati.

Si sottolinea che per eseguire un elaborato come quello illustrato è necessario disporre di modelli digitali altimetrici che abbiano una precisione minima di 1 m per passo, perché altrimenti andrebbero perse troppe informazioni che porterebbero ad un'approssimazione troppo elevata delle superfici di copertura. Dunque, si potrebbe svolgere l'elaborazione anche in contesti differenti da quelli urbani a patto che si possa disporre di modelli digitali altimetrici sufficientemente dettagliati.

Come descritto nelle considerazioni iniziali, questo processo può essere svolto in maniera analoga anche per gli impianti solari termici, siccome le loro prestazioni sono anch'esse soggette al livello di irraggiamento solare a cui sono sottoposti durante l'anno. Ovviamente, bisognerebbe applicare parametri differenti in considerazione della loro funzione all'interno di un edificio. Essendo impianti che producono calore, dovranno offrire le loro massime prestazioni nelle stagioni invernali in cui vi è più bisogno di scaldare gli ambienti interni alla struttura. Ciò significa che i pannelli dovranno godere di una maggiore inclinazione rispetto a quelli fotovoltaici la cui energia elettrica prodotta è richiesta durante tutto l'anno in modo più o meno costante, sempre in considerazione di aspetti come la funzione dell'edificio e la tipologia di impianti che ospita.

Disponendo dei dati adeguati, sarebbe stato interessante integrare al vettore anche la stima della producibilità degli impianti solari termici per poi paragonarli a quella ricavata dall'analisi. Seguendo questo approccio, si sarebbe dovuto dare priorità per l'intero processo all'individuazione dei livelli di irraggiamento solare delle superfici, per proseguire in un secondo momento alla stima della produttività di entrambi gli impianti. Si è preferito operare come dimostrato perché si è reputato di maggiore interesse sviluppare e approfondire l'indagine per un determinato tipo di impianto, con l'obiettivo di riuscire a rendere maggiormente distinguibili le coperture con un maggior potenziale rispetto alle altre.

Per quanto riguarda i fotovoltaici, sarebbe interessante confrontare la stima individuata con i dati misurati sugli impianti già esistenti nell'area di studio, in modo tale da verificare ulteriormente l'attendibilità sia del processo realizzato, che dei dati tecnici rilasciati dal simulatore PVGIS. In ogni caso, l'analisi ha ampi margini di miglioramento, che possono essere dettati dall'applicazione di criteri di giudizio maggiormente mirati ad una determinata situazione architettonica oppure dall'impiego di parametri derivanti da fonti che si occupano in prima persona della realizzazione e monitoraggio degli impianti fotovoltaici. Date le molte variabili in gioco ci si è accontentati di svolgere uno studio su di un caso generico, ma disponendo di specifiche direttive si può riuscire ad individuare con maggiore precisione quelle coperture in grado di soddisfarne i requisiti. D'altra parte, se si disponesse delle informazioni riguardanti i reali consumi energetici di un edificio si potrebbe arrivare addirittura ad evidenziare in quali casi un impianto sarebbe capace di provvedere pienamente ai bisogni dell'utenza.

Purtroppo, non si è riuscito a trovare il modo di mettere in risalto anche i problemi derivanti dai possibili ombreggiamenti tra edifici adiacenti, dovendo lasciare all'utente il compito di consultare in autonomia anche i dati dai quali è cominciata l'elaborazione.

In conclusione, si reputa soddisfacente il lavoro svolto perché coinvolge un gran numero di costruzioni per le quali si è riusciti ad associare una stima del potenziale fotovoltaico ed a restituire una raffigurazione immediata delle superfici più adatte ad ospitare un impianto solare in copertura.

Riconoscimenti

Contributi dei singoli autori

Idea, concezione, metodologia e supervisione: Tagliariol Pietro

Fonti di finanziamento

Nessuna.

Conflitti di interesse

L'autore dichiara di non aver alcun conflitto di interesse.

Bibliografia

Liscia N, Minchilli M., 2014. Analisi spaziale in ambiente GIS per la valutazione paesaggistica ed energetica dei pannelli solari in ambito urbano. *Conferenza ASITA, Firenze, 14-16 Ottobre 2014*

Bonesso S., Mutani G., Hubina T., Ramassotto A., 2013. L'applicazione delle tecnologie fotovoltaiche integrate sulle coperture degli edifici con software GIS", *GEOmedia*, 17(2), pp. 6-11

Moraca M., 2018. Fotovoltaico e GIS: come individuare l'utilizzabilità di un tetto. massimilianomoraca.it/blog/gis/fotovoltaico-e-gis-come-individuare-lutilizzabilita-di-un-tetto/, aggiornato il 22-05-2022

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, "WebGIS EAGLE.FVG." <https://eaglefvg.regione.fvg.it> (Accessed 31 August 2023).

European Commission, Joint Research Centre (JRC), "Photovoltaic Geographical Information System." <https://re.jrc.ec.europa.eu> (Accessed 31 August 2023).

QGIS Development Team, "QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System." <https://www.qgis.org> (Accessed 31 August 2023).

GRASS Development Team, "GRASS GIS - Free and Open Source Geographic Information System." <https://grass.osgeo.org> (Accessed 31 August 2023).