

Ricerca di Sistema elettrico



Metodo per l'elaborazione di un catasto solare fotovoltaico urbano

Grazia Fattoruso, Giampiero Pasquale Sorrentino,
Massimiliano Fabbricino, Girolamo Di Francia

TITOLO (METODO PER L'ELABORAZIONE DI UN CATASTO SOLARE FOTOVOLTAICO URBANO)

Autori

Grazia Fattoruso - ENEA CR Portici

Girolamo Di Francia - ENEA CR Portici

Giampiero P. Sorrentino - Università degli Studi di Napoli Federico II

Massimiliano Fabbicino - Università degli Studi di Napoli Federico II

Mese Anno

Giugno/2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: LA3.5

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 01

Mese inizio effettivo: 01

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

Indice

RINGRAZIAMENTI	4
1 INTRODUZIONE	5
2 OBIETTIVO DELL'ATTIVITÀ.....	7
3 IL CATASTO SOLARE FOTOVOLTAICO URBANO	8
3.1 REVISIONE DELLA LETTERATURA.....	8
3.2 UN METODO GIS-BASED PER LA STIMA DEL POTENZIALE SOLARE URBANO	9
3.3 DETERMINAZIONE DELLE SUPERFICI URBANE DISPONIBILI	10
3.4 DETERMINAZIONE DEL POTENZIALE SOLARE FOTOVOLTAICO	13
4 IL CASO STUDIO.....	14
4.1 LA CITTÀ DI PORTICI	14
4.2 LA DOMANDA DI ELETTRICITÀ.....	14
5 IL MODELLO 3D DELLA CITTÀ DI PORTICI	16
5.1 CLASSIFICAZIONE DEL DATO LIDAR	16
5.2 DERIVAZIONE DEL FOOTPRINT DEGLI EDIFICI	17
5.3 MODELLAZIONE 3D DELL'EDIFICATO E DELLA VEGETAZIONE	19
5.4 VALIDAZIONE DEL MODELLO URBANO	22
6 MODELLO DISTRIBUITO DI RADIAZIONE SOLARE.....	24
6.1 SIMULAZIONE DELL'OMBREGGIAMENTO.....	24
6.2 SIMULAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE.....	25
7 LA MAPPA 3D DEL POTENZIALE SOLARE FOTOVOLTAICO DELLA CITTÀ DI PORTICI	27
7.1 CALCOLO DEI FATTORI DI RIDUZIONE.....	27
7.2 FATTORE DI RIDUZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE DA PM2.5.....	27
7.3 FATTORI DI RIDUZIONE DELLA SUPERFICIE DEI TETTI E DEL POTENZIALE SOLARE	30
8 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	33
9 CONCLUSIONI.....	35
BIBLIOGRAFIA	37

Figure

Figura 1: Diagramma di flusso della procedura di determinazione delle superfici dei tetti disponibili idonee ad installazioni fotovoltaiche.....	10
Figura 2: Schematizzazione dei pannelli in parallelo (fonte [13])	11
Figura 3: Mappa 3D della Citta di Portici (Napoli)	14
Figura 4: Dati LiDAR@GeoPortale Nazionale a copertura della città di Portici.....	16
Figura 5: Vista della nuvola di punti LiDAR. a) dato grezzo; b) dato post-classificazione	17
Figura 6: Dato LiDAR@GeoPortale Nazionale classificato a copertura della città di Portici.....	17
Figura 7: a) Modello digitale del terreno (DTM); b) Modello digitale di superficie (DSM) della città di Portici	18
Figura 8. Modello digitale di superficie normalizzato (nDSM) della città di Portici	18
Figura 9. Mappa del <i>footprint degli edifici</i> della città di Portici	18
Figura 10. Schemi di tipologia di tetto FLAT, GABLE e HIP comunemente presenti in città	19
Figura 11. Vista del modello 3D – LOD1 della città di Portici	20
Figura 12. Vista del modello 3D – LOD2 della città di Portici	20
Figura 13. Vista del modello 3D della Centro Ricerche ENEA di Portici con LOD1 (sinistra) e LOD2 (destra). 20	20
Figura 14. Vista del modello 3D della Museo di Pietrarsa con LOD1 (sinistra) e LOD2 (destra)	21
Figura 15. Modello 3D (LOD2) dell’edificato e dalla vegetazione della città di Portici	21
Figura 16. Vista del modello 3D (LOD2) della Reggia di Portici e della vegetazione circostante	22
Figura 17: Modello 3D della Chiesa di San Ciro prima e dopo la procedura di validazione	22
Figura 18: Particolare del modello 3D del Museo di Pietrarsa prima e dopo la validazione	23
Figura 19: Modello 3D del Centro ENEA di Portici prima e dopo la validazione	23
Figura 20. Effetto ombra nell'ambiente urbano: Bosco Superiore di Portici	24
Figura 21. Effetto ombra nel Centro Ricerche ENEA di Portici Portici.....	24
Figura 22. Effetto ombra nell'ambiente urbano: Piazza San Ciro.....	25
Figura 23. Mappa della radiazione solare media annua distribuita sulla città di Portici	25
Figura 24. Mappa della radiazione solare degli edifici della città di Portici	26
Figura 25. Mappa 3D della radiazione solare degli edifici della città di Portici.....	26
Figura 26. Mappa della distribuzione delle concentrazioni di PM2.5 per la regione Campania.....	27
Figura 27. Mappa della distribuzione di concentrazione media annua di PM2.5 nella Città di Portici.....	28
Figura 28. Mappa della radiazione solare affetta da PM2.5 nella Città di Portici.....	28
Figura 29. Mappa della distribuzione della riduzione percentuale media annua di radiazione solare nella città di Portici.....	29
Figura 30. Mappa della riduzione percentuale media annua di radiazione solare per gli edifici della città di Portici.....	29
Figura 31. Mappa della radiazione solare affetta da PM2.5 per gli edifici della città di Portici.....	30
Figura 32. Mappa 2D del potenziale di energia solare fotovoltaica [kWh/mq*day] degli edifici idonei della città di Portici.....	32
Figura 33. Mappa 3D del potenziale di energia solare fotovoltaica [kWh/mq*day] degli edifici idonei della città di Portici.....	32
Figura 34. Catasto solare fotovoltaico urbano per la città di Portici.....	33

Ringraziamenti

Il presente studio è stato condotto nel Laboratorio di Geomatica del Centro Ricerche ENEA di Portici, ed è il risultato della collaborazione scientifica, ormai decennale, tra il Laboratorio TERIN/SSI/EDS (già TERIN/FSD/SAFS) di ENEA e il Dipartimento DICEA dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, i cui referenti scientifici sono la Dott. Grazia Fattoruso@ENEA e il Prof. Massimiliano Fabbricino@UNINA.

Si ringrazia il prof. Fabbricino, mentore dei tesisti/assegnisti che hanno collaborato allo sviluppo del *Catasto Solare Fotovoltaico Urbano*, risultato dell'attività di ricerca svolta anche nella LA3.5 del progetto. Un ringraziamento speciale è rivolto all'ing. Giampiero Sorrentino che ha fornito un contributo encomiabile all'intero lavoro di ricerca, all'ing. Martina Nocerino e all'ing. Valentina Manna che hanno contribuito allo studio ancillare dell'impatto dell'inquinamento urbano da particolato fine sulla radiazione solare incidente sulle città, all'ing. Domenico Toscano che ha contribuito alla modellazione spaziale e numerica della distribuzione dell'inquinamento da polveri sottili in città.

Il Catasto Solare Fotovoltaico urbano, con prima applicazione alla città di Portici, ha avuto un'ampia diffusione attraverso la pubblicazione su ENEA News (<https://www.media.enea.it/comunicati-e-news/archivio-anni/anno-2023/energia-un-catasto-urbano-per-calcolare-il-potenziale-del-fotovoltaico-in-citta.html>), registrando un ottimo riscontro dalla rassegna stampa, dai social media e dalla TV. E' stato redatto un servizio giornalistico sul *Catasto* con intervista alla dott. Grazia Fattoruso, mandato in onda su RAI3 – TG LEONARDO e RAI3 TGR Campania (giugno 2023).

Il Catasto è stato inoltre selezionato come prodotto di ricerca da portare a TRL elevato, partecipando al Programma PoC ENEA 2023 e riscontrando grande interesse da parte di ben 7 aziende di settore. Attualmente è oggetto di una proposta di progetto di PoC – UrbanPhotoTwin, in fase di valutazione, con la collaborazione della Società URBISMAP. Obiettivo del Progetto UrbanPhotoTwin è sviluppare il catasto come servizio online a copertura di tutte le principali città italiane.

1 Introduzione

Le energie rinnovabili tra cui quelle solari sono per loro natura decentralizzate, locali e polverizzate in milioni di piccoli produttori. Questo concetto fu espresso già negli anni 90 dall'ingegnere Hermann Scheer, uno degli artefici della crescita delle rinnovabili in Europa. La sua visione di società nuova, più pacifica, democratica e pulita si basava su una strategia di diffusione dell'energia solare nonché di autonomia energetica dei cittadini. Gli obiettivi ambiziosi e a breve termine della transizione energetica indirizzano la società moderna verso questa visione.

Gli obiettivi attualmente fissati dal PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030) [1] nonché quelli derivanti dall'attuazione del pacchetto "Fit for 55" [2], anche alla luce del pacchetto "Repower UE" [3], richiedono di fatto entro il 2030 la realizzazione sul territorio nazionale di una potenza aggiuntiva di 80 GW da fonti di energia rinnovabile (FER), ripartita tra le Regioni e le Province autonome.

Significativa è la capacità incrementale della tecnologia fotovoltaica (FV). L'approccio alla diffusione di tale capacità è ispirato alla riduzione del consumo di territorio, promuovendo l'installazione innanzitutto su edificato, tettoie, parcheggi, aree di servizio, etc., nonché le installazioni agrivoltaiche, volte a massimizzare la sinergia tra la produzione di elettricità e l'attività agricola, nel rispetto di determinati requisiti tecnici e ambientali [4, 5]. Rimane tuttavia importante la diffusione di grandi impianti fotovoltaici a terra, favorendo le realizzazioni in aree marginali, siti contaminati, discariche e aree lungo il sistema infrastrutturale, anche attraverso il processo di identificazione delle aree idonee.

Gli obiettivi prefissati sono raggiungibili applicando diverse misure e strumenti quali: 1) l'erogazione di incentivi per favorire determinati meccanismi e promuovere specifiche tecnologie ad oggi non disponibili o tali da necessitare di ricerca e sviluppo; 2) la semplificazione degli iter autorizzativi nonché l'adeguamento alle nuove applicazioni di energie rinnovabili come possono essere l'agrivoltaico o le comunità energetiche rinnovabili (CER); 3) l'introduzione di nuovi modelli di produzione e consumo di energia elettrica quale quello dell'autoconsumo tramite CER; 4) le *policy*, fondamentali per lo sviluppo delle energie rinnovabili sul territorio.

Riguardo alle *policy*, le amministrazioni locali (le regioni e le province autonome, i comuni) sono chiamate a pianificare lo sviluppo del fotovoltaico sul territorio locale sulla base del potenziale solare disponibile e quindi adeguare i propri strumenti di governo del territorio e di pianificazione energetica all'esigenza di raggiungimento degli obiettivi di produzione di energia rinnovabile.

In questo quadro, la disponibilità di strumenti digitali abilitanti lo sviluppo del fotovoltaico in particolare quello integrato negli edifici e quello urbano, in grado di individuare e localizzare i siti idonei alle installazioni fotovoltaiche e valutare in maniera accurata il potenziale fotovoltaico, diventa fondamentale, sia per le amministrazioni locali che per gli *stakeholder*, che devono pianificare gli investimenti e disegnare le misure attuative.

Uno studio recente [6] ha dimostrato che è sufficiente utilizzare solo il 30% della superficie complessiva dei tetti degli edifici esistenti ad uso abitativo del nostro Paese, che equivarrebbe alla quasi totalità dell'area idonea all'installazione di sistemi fotovoltaici, per soddisfare l'intero fabbisogno elettrico del settore residenziale nazionale, pari a un consumo medio annuo di circa 65,5 mila GWh. Lo studio evidenzia come, ipotizzando di occupare interamente questa superficie ottimale (circa 450 km²), si potrebbero generare oltre 79 mila GWh di energia elettrica per una potenza complessiva installata di 72 GW.

Tuttavia, uno studio di questo tipo non risponde ai quesiti leciti di quali siano le superfici di copertura degli edifici residenziali utilizzabili, dove siano localizzati nelle diverse città del territorio nazionale, quale sia il potenziale fotovoltaico dei singoli edifici.

C'è da osservare però che dalla letteratura sono noti i vantaggi per i singoli edifici; sono disponibili metodi e strumenti per valutare il potenziale fotovoltaico e la resa energetica dei singoli edifici, mentre c'è ancora poca conoscenza sui potenziali benefici delle implementazioni fotovoltaiche a livello urbano su scala di singolo edificio.

Nell'ambito delle attività della LA 3.5, nel laboratorio di Geomatica di ENEA Centro Ricerche Portici, si è voluto investigare un metodo originale per la valutazione accurata del potenziale solare fotovoltaico a livello urbano ma a scala di singolo edificio e sviluppare uno strumento digitale originale riferito come *catasto solare*

fotovoltaico urbano. Questo strumento è in grado di valutare il potenziale solare fotovoltaico urbano considerando la città nel suo complesso includendo la geometria degli edifici (forma e altezza, le diverse parti che li compongono con le diverse altezze e diverse forme dei tetti); la vegetazione, il verde urbano ma anche l'inquinamento dell'aria da polveri sottili e le attività antropiche in generale. Genera una mappa 3D ad alta risoluzione spaziale del potenziale solare fotovoltaico a livello urbano, fino alla scala del singolo edificio, identificando e quantificando le superfici dei tetti degli edifici residenziali e non, realmente sfruttabili per la produzione di energia elettrica tramite impianti fotovoltaici integrati.

2 Obiettivo dell'attività

La transizione energetica con le sue esigenze cambia il ruolo della città che non è più solo attraversata dall'infrastruttura energetica ma diventa essa stessa infrastruttura, attraverso la diffusione del fotovoltaico (FV). La capacità del FV integrato in città resta significativa per raggiungere i target nazionali di sfruttamento delle rinnovabili.

Un passaggio pratico fondamentale è conoscere con precisione il reale potenziale solare FV utilizzabile in città nonché le superfici idonee alle installazioni di sistemi FV.

Questa è un'esigenza dei comuni che devono pianificare e incentivare localmente lo sviluppo delle rinnovabili per incontrare gli obiettivi di decarbonizzazione, piuttosto che delle società di settore che devono garantire l'efficienza delle installazioni FV, ma anche del singolo cittadino che intende investire nell'autoconsumo.

Per soddisfare questa esigenza, occorre che siano disponibili strumenti digitali affidabili, facilmente accessibili e utilizzabili, che consentano di esplorare in maniera puntuale la reale energia solare fotovoltaica sfruttabile sull'intera città, come sul singolo edificio, in particolare sul singolo tetto, e su altre aree urbane - mercatali, di parcheggio e ricreative.

Obiettivo dell'attività della LA3.5 è stato sviluppare un metodo e uno strumento digitale di mappatura e valutazione del potenziale solare fotovoltaico urbano mediante un gemello digitale (modello 3D) della città e una modellistica fotovoltaica, in grado di supportare le amministrazioni locali nonché le società di settore, i singoli professionisti e il cittadino comune.

Le amministrazioni locali possono utilizzare tale strumento per la pianificazione dello sviluppo del fotovoltaico nelle città, integrando l'informazione del potenziale fotovoltaico disponibile in città con la vincolistica, leggi e regolamenti locali/nazionali, strumenti di incentivazione, etc., identificando i siti realmente idonei per le installazioni fotovoltaiche.

Le società, i liberi professionisti possono utilizzarlo per l'ottimizzazione delle installazioni fotovoltaiche in siti urbani, accedendo alle informazioni necessarie per caratterizzare i siti di installazione e ottimizzare la resa energetica degli impianti fotovoltaici.

I soggetti pubblici/privati operanti nel settore delle CER possono utilizzare il *catasto* localizzando la capacità produttiva fotovoltaica delle superfici urbane idonee e incrociandola con le necessità di consumo di cittadini e/o imprese.

Il cittadino comune potrà interrogare il tetto della propria abitazione e conoscere la superficie e il potenziale fotovoltaico sfruttabile.

Il metodo e lo strumento digitale sviluppati sono stati applicati alla città di Portici (Napoli), nota per essere la città a più alta densità abitativa dell'Europa e per la complessa struttura urbana, costituendo un test rappresentativo delle medie/grandi città italiane per la validazione dello strumento. Questa applicazione ha consentito di generare una mappa 3D ad alta risoluzione spaziale del potenziale solare fotovoltaico della città, facilmente accessibile e interrogabile in maniera puntuale e globale.

3 Il catasto solare fotovoltaico urbano

Nel presente studio proponiamo un metodo *GIS-based* (Geographical Information System) originale in grado di valutare in maniera accurata il potenziale solare fotovoltaico a livello urbano, fino alla scala del singolo edificio (o altra area urbana) idoneo, considerando la città nel suo complesso ovvero la geometria degli edifici, la morfologia urbana, l'area verde, l'inquinamento atmosferico, le attività antropiche, etc.

3.1 Revisione della letteratura

Dalla revisione della letteratura effettuata emerge che sebbene siano noti i vantaggi delle installazioni fotovoltaiche sui singoli edifici, valutabili attraverso appositi modelli e strumenti digitali disponibili (e.g. PVSyst, PVGIS, Atlante Italiano della Radiazione Solare@ENEA, SunRISE@RSE, etc.), i potenziali benefici di implementazioni su scala urbana sono ancora poco conosciuti. Peraltro, pochi metodi sono disponibili in letteratura per valutare gli impatti su scala urbana delle applicazioni dei sistemi fotovoltaici.

Gli aspetti più importanti da tenere presente nella valutazione del potenziale fotovoltaico urbano sono essenzialmente due: 1) la scala, poiché le tecniche e i modelli applicati a scala di singolo edificio nonché a scala regionale o nazionale non possono essere applicati a livello urbano; 2) la disponibilità dei dati.

Non esiste ad oggi un modello standard applicabile per la modellazione energetica fotovoltaica urbana. Questo è il motivo per cui ogni studio eseguito inizia col definire un proprio modello di dati.

Gli approcci utilizzati in letteratura si basano fondamentalmente su due step: 1) la determinazione delle aree urbane disponibili idonee (tetti e facciate degli edifici ma anche aree mercatali, aree parcheggio, aree ricreative, etc.); 2) il calcolo del potenziale di energia solare fotovoltaica.

La differenza principale di questi approcci è il metodo utilizzato per determinare la superficie tetto disponibile in città nonché l'accuratezza della stima della radiazione solare che raggiunge tali superfici. I metodi per determinare la superficie urbana disponibile sono generalmente classificati in: *metodi a valore costante*, *metodi di selezione manuale* e *metodi basati sul GIS*.

I metodi a valore costante sono un utile punto di partenza per la velocità con cui consentono di ricavare la stima della superficie tetto disponibile, ma si basano su ipotesi molto semplificate, assumendo regole empiriche sul rapporto tra tetti inclinati e piani, il numero di edifici con orientamenti del tetto favorevoli o la quantità di spazio ostruita da componenti costruttivi. Le costanti vengono poi applicate all'intero patrimonio edilizio, determinato ad esempio dai dati censuari. In genere questi metodi producano stime poco accurate.

I metodi di selezione manuale si basano sulla selezione manuale dei tetti con caratteristiche adatte al fotovoltaico da fotografie aeree o tramite ispezioni visive per individuare eventuali ombreggiature e ostacoli edilizi. Questi metodi sono più accurati, ma richiedono un dispendio significativo di tempo e non sono facilmente replicabili.

I metodi basati sui GIS (i.e. GIS-based) utilizzano principalmente modelli 3D degli edifici per determinare la superficie tetto disponibile in un'area urbana, identificare ostacoli o valutare gli effetti dell'ombreggiamento. Questi ultimi sono molto più accurati e replicabili sebbene computazionalmente onerosi.

Nel nostro studio, il focus è stato sui metodi GIS-based, considerando che possono svolgere un ruolo importante nel supportare il processo decisionale per la realizzazione della transizione energetica, in particolare, quelli basati sul modello 3D (o digital twin) della città.

I modelli 3D urbani presentano grandi potenzialità nel campo della pianificazione urbanistica e attualmente possono avere un ruolo fondamentale anche nello sviluppo delle rinnovabili a livello urbano. Il numero di città per le quali è disponibile un modello 3D è in aumento grazie alle nuove tecnologie sia di raccolta dati come il dato LiDAR (Light Detection And Ranging) sia di elaborazione dello stesso. I droni, per esempio, sono diventati una soluzione molto efficiente ed economica per la raccolta dei dati a livello urbano. Allo stesso tempo, la potenza di calcolo necessaria per elaborare i dati raccolti è facilmente acquisibile.

Tuttavia, per un'analisi accurata del potenziale di energia solare in un contesto urbano, un fenomeno da valutare accuratamente è l'influenza della morfologia urbana (cioè la geometria, la disposizione, la densità e le tipologie costruttive) sull'accesso, l'ombreggiamento e le riflessioni solari. A causa della complessità dell'ambiente urbano, non tutta la radiazione solare che colpisce i tetti e le facciate degli edifici può essere

utilizzata come fonte di energia per la produzione di elettricità da parte degli impianti fotovoltaici. Diversi elementi dell'ambiente urbano possono ostacolare la quantità di insolazione incidente che raggiunge le superfici degli edifici. L'ombra proiettata dagli edifici e dalla vegetazione circostanti è uno dei fattori di riduzione della radiazione solare incidente più studiati. Ad esempio, Machete et al. (2018) [7] hanno dimostrato che il rilievo topografico e gli edifici circostanti possono ridurre in media del 30% il potenziale solare degli edifici in un contesto urbano. Rodriguez et al. (2017) [8, 9] hanno quantificato l'impatto dell'ombreggiamento e delle riflessioni multiple sulla radiazione solare incidente sulle superfici degli edifici della città di Manhattan (ad alta densità urbana), stimando una riduzione annuale fino al 60% per le facciate e al 25% per i tetti.

Esistono altri fenomeni legati all'urbanizzazione che possono influenzare la radiazione solare che raggiunge le superfici urbane come l'inquinamento atmosferico urbano da polveri sottili. Recentemente, infatti, sono stati studiati gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla generazione di energia fotovoltaica e, in particolare, la relazione tra la riduzione dell'insolazione solare che raggiunge i sistemi fotovoltaici e la concentrazione di PM2.5 nell'aria. L'inquinamento atmosferico comprende tipicamente sostanze fini (PM2.5) che sospese nell'atmosfera possono ridurre l'intensità della radiazione solare che raggiunge il suolo. A questo proposito, Peters et al (2018) [10], correlando le concentrazioni di particolato misurate e l'insolazione solare a Delhi hanno stimato che la radiazione solare totale che raggiunge il suolo durante un anno è ridotta di oltre un nono a causa dell'inquinamento atmosferico. Wang et al. (2019) [12], testando un sistema fotovoltaico distribuito sul tetto di un edificio a Shanghai, ha dimostrato che maggiore è la concentrazione di PM2.5, minore era la capacità di generazione di energia del modulo fotovoltaico. La radiazione solare ricevuta sulla superficie del modulo fotovoltaico era esponenzialmente correlata alla concentrazione atmosferica di PM2.5. A parte i grandi eventi di foschia che colpiscono diverse città del Mediterraneo orientale e del sud-est asiatico raggiungendo concentrazioni di PM2.5 fino a $375 \mu\text{m}^{-3}$ [10-11], l'inquinamento atmosferico è un problema che colpisce la maggior parte delle città di tutto il mondo, sebbene a diversi livelli di gravità.

In considerazione del ruolo che può avere lo sfruttamento del potenziale fotovoltaico urbano per la realizzazione della transizione energetica, considerare la riduzione della radiazione solare dovuta alle particelle PM2.5 nell'aria potrebbe fare la differenza tra un impianto solare fotovoltaico che raggiunge la produzione prevista e uno che fallisce.

Al fine di stimare quantitativamente gli effetti dell'inquinamento da PM2.5 sulla radiazione solare che raggiunge il suolo, gli autori hanno condotto uno studio [13], [14] nel quale hanno derivato una relazione empirica tra la concentrazione di PM2.5 e la riduzione dell'insolazione nella città di Napoli (Campania, Sud Italia) applicabile ad altre città in condizioni di inquinamento atmosferico simili, come il caso studio della città di Portici.

3.2 Un metodo GIS-based per la stima del potenziale solare urbano

Sulla base di quanto sopra osservato, il metodo GIS-based messo a punto in questo studio prende in considerazione nella stima del potenziale solare fotovoltaico urbano la città nel suo complesso a partire dal dettaglio della sua morfologia, generando un *digital twin* (i.e. gemello digitale o modello 3D) della città, che include edifici, vegetazione, infrastrutture e altre superfici urbane, a partire da dati LiDAR ad alta risoluzione. Il modello 3D permette di ricavare l'area realmente disponibile sui tetti degli edifici urbani, residenziali e non, per installazioni fotovoltaiche, identificando le ostruzioni sui tetti, consentendo di stimare la radiazione solare che raggiunge i singoli tetti in base alla forma, l'orientamento, e valutando l'effetto ombra dovuto al rilievo topografico e agli edifici e vegetazione circostanti nonché l'effetto dell'inquinamento atmosferico urbano da particolato fine.

Il metodo proposto si basa su un'analisi spaziale multicriteriale che restituisce una mappa 3D ad alta risoluzione spaziale dei tetti urbani ottimali all'installazione di pannelli fotovoltaici e del potenziale solare fotovoltaico della città.

Tale metodo è caratterizzato da tre passi fondamentali: 1) generazione di un modello 3D dettagliato della città; 2) selezione di un insieme di fattori limitanti (o coefficienti di riduzione) la radiazione solare che raggiunge le superfici urbane; 3) calcolo della radiazione solare che tiene in conto il ruolo dell'inclinazione e

dell'esposizione dei tetti urbani, dell'ombreggiamento, nonché l'influenza della morfologia urbana e dell'inquinamento atmosferico urbano.

3.3 Determinazione delle superfici urbane disponibili

3.3.1 Generazione del modello 3D della città

Il primo passo del metodo sviluppato consiste nella generazione del modello 3D della città (o digital twin) che include gli edifici, la vegetazione, le infrastrutture e altre superfici urbane (aree mercatali, parcheggi, aree ricreative, etc.), generato a partire dal dato LiDAR ad alta risoluzione spaziale. Questo modello cattura la geometria degli edifici e quindi la forma e l'estensione dei tetti consentendo di determinare la superficie tetto disponibile in città.

Per la generazione del modello 3D della città è stata elaborata una procedura step-by-step utilizzando metodi e modelli di analisi spaziale avanzati. Come primo passo, la nuvola di punti LiDAR è classificata in: terreno, edifici e alberi. Dal dato LiDAR classificato è generato un DSM (Digital Surface Model) ad alta risoluzione. Elaborando il DSM e il footprint della città, è derivato l'intero edificato urbano con il dettaglio della geometria di ogni singolo edificio unitamente alla vegetazione urbana. Per la modellazione degli edifici, è stata scelta la rappresentazione OGC CityGML - LOD2 (Level of Detail) [21] che include la geometria dell'edificio, con le diverse altezze delle diverse parti dell'edificio e la forma del tetto.

3.3.2 Identificazione dei fattori limitanti

Una volta generato il modello 3D della città, è possibile conoscere l'area edificata totale e la geometria dei singoli edifici che la compongono. Tuttavia, molti fattori cosiddetti limitanti possono portare alla riduzione della superficie tetto disponibile.

Per calcolare la superficie dei tetti disponibile per le installazioni fotovoltaiche in città, in letteratura, sono stati utilizzati diversi fattori limitanti (o coefficienti di riduzione) [8]. Questi coefficienti sono generalmente distinti in architettonici e solari.

Per questo studio sono stati scelti alcuni di questi coefficienti e definiti altri, tutti considerati essenziali per i nostri scopi. Essi sono indicati nel diagramma di flusso di Figura 1, che schematizza l'approccio sviluppato per la determinazione delle superfici dei tetti disponibili idonee.

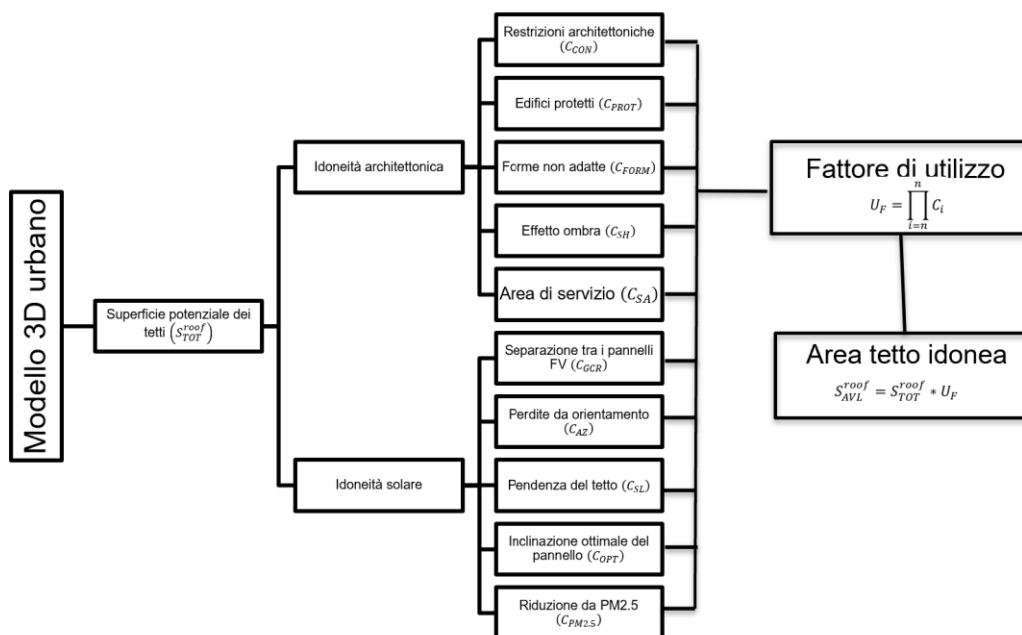


Figura 1: Diagramma di flusso della procedura di determinazione delle superfici dei tetti disponibili idonee ad installazioni fotovoltaiche.

A differenza di studi precedenti (e.g. [15], [16]) che applicano i coefficienti di riduzione ai risultati aggregati di un'intera area edificata, l'approccio qui proposto calcola i coefficienti in maniera spazialmente distribuita (i.e. variabili geografiche), per ogni singolo tetto di edificio e per ogni punto (cella) dello stesso, consentendo di stimare con maggiore accuratezza l'area tetto idonea e il relativo potenziale fotovoltaico. Questo è reso possibile dal modello 3D della città che permette di applicare i diversi fattori ai diversi edifici in base alla loro geometria, in particolare alla forma dei tetti, e al contesto urbano nel quale sono inseriti.

Al fine di comprendere la portata di ciascun coefficiente di riduzione, sono brevemente descritti di seguito:

- *Restrizioni architettoniche* (C_{CON}): esso si riferisce allo spazio già occupato da altri elementi architettonici o impiantistici sul tetto, come camini, impianti di climatizzazione, androni delle scale, ascensori e altro.
- *Edifici protetti* (C_{PROT}): tale coefficiente è applicato a quegli edifici soggetti a vincoli architettonico-storico-paesaggistici, sui quale non è possibile posizionare un impianto solare. Questo fattore è di tipo discreto, potendo assumere i valori 0 se si tratta di un edificio sottoposto a vincolo e pertanto da escludere dal calcolo del potenziale solare fotovoltaico, 1 altrimenti.
- *Forme non adatte* (C_{FORM}): tale coefficiente tiene conto delle geometrie non adatte all'utilizzo degli impianti fotovoltaici, come ad esempio i tetti di forma curva (volte, duomi e altro) che renderebbero il costo dell'impianto eccessivo; esso assume valore 0 in corrispondenza dei tetti di forma curva altrimenti 1.
- *Effetto ombra* (C_{SH}): questo coefficiente considera l'effetto ombreggiamento prodotto dagli elementi presenti nell'ambiente circostante, come gli edifici e la vegetazione o anche elementi architettonici dell'edificio stesso. Questo coefficiente è qui calcolato in maniera spazialmente distribuita attraverso specifici algoritmi geospaziali.
- *Area di separazione tra i pannelli FV* (C_{GCR}): questo coefficiente tiene conto della distanza minima tra i pannelli, necessaria per evitare il mutuo ombreggiamento (Figura 2).

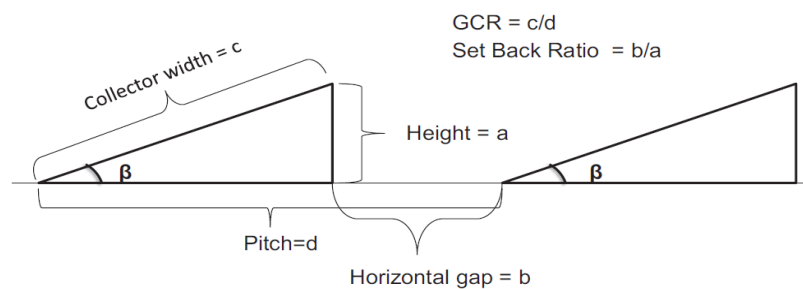


Figura 2: Schematizzazione dei pannelli in parallelo (fonte [13])

A partire dalla geometria dei pannelli, il valore del coefficiente C_{GCR} è ottenibile dall'equazione (1). Esso è inversamente proporzionale all'inclinazione del pannello e al parametro *Set Back Ratio* (SBR):

$$C_{GCR} = \frac{1}{\cos \beta + SBR * \sin \beta} \quad (1)$$

dove:

- β = inclinazione del pannello rispetto alla superficie di appoggio;

- *Set Back Ratio* (SBR) = $\frac{\text{Distanza minima orizzontale tra i pannelli}}{\text{Altezza dei pannelli}}$

In particolare, la dipendenza dall'angolo β mostra che all'aumentare di esso, aumenta l'ombra prodotta dal pannello, incidente sulle file di pannelli retrostanti. L'unico modo per non avere il

reciproco ombreggiamento è posizionare i pannelli con un'inclinazione nulla, ossia parallelo alla superficie di appoggio, come avviene in genere per i pannelli posizionati sui tetti inclinati.

Il Set Back Ratio è un parametro dipendente dalle caratteristiche geometriche e dalla posizione del sole secondo l'equazione:

$$SBR = \frac{b}{a} = \frac{c * \sin \beta * \cos \gamma}{\tan(\rho + \sigma) * a}$$

dove:

- γ = orientamento del pannello rispetto a SUD (azimut);
- ρ = angolo di inclinazione della falda;
- σ = altezza del sole prefissata, in genere si sceglie quella alle ore 12:00 del solstizio d'inverno.

Di solito, per i tetti orizzontali si preferisce utilizzare la formula empirica

$$SBR = 3 * c * \sin \beta.$$

- *Area di servizio (C_{SA})*: è un fattore che tiene conto dello spazio necessario per la regolare manutenzione degli impianti. Questo coefficiente diminuisce all'aumentare dell'inclinazione del pannello, in quanto viene tenuto in conto dal C_{GCR} . Nella Tabella 1 sono elencati i valori di C_{GCR} e C_{SA} analizzati da Byrne, et al. (2025) [17].

Tabella 1: Panoramica degli effetti GCR e SA sulle stime disponibili sul tetto (Fonte [17])

Tilt	GCR (%)	SA (%)	Available rooftop space (%)
0	100	20	80
5	80	17	63
10	66	13	53
15	57	10	47
20	51	7	44
25	46	3	43
30	42	0	42

In [17] è dimostrato che l'inclinazione del pannello fotovoltaico rispetto all'orizzontale è direttamente proporzionale alla distanza minima per evitare l'ombreggiamento ed inversamente proporzionale all'area necessaria per la manutenzione. In definitiva, all'aumentare dell'inclinazione, vi è una diminuzione dell'area disponibile del tetto;

- *Perdite da orientamento (C_{AZ})*: questo coefficiente tiene in considerazione la diversa angolazione azimutale che i tetti possono avere rispetto a SUD (azimut pari a 0°), la quale influenza l'ammontare della radiazione solare incidente sulla superficie;
- *Pendenza del tetto (C_{SL})*: questo coefficiente tiene conto della pendenza del tetto rispetto allo zenith, altra caratteristica geometrica che influenza l'ammontare della radiazione incidente sulla superficie;
- *Superficie utilizzata per i pannelli FV (C_{PV})*: è la percentuale di superficie dei tetti utilizzata per ospitare i pannelli fotovoltaici;
- *Inclinazione ottimale dei pannelli (C_{OPT})*: è un coefficiente amplificativo che tiene conto che il metodo di simulazione della radiazione solare sui tetti calcola il valore di quest'ultima rispetto al tetto dell'edificio e non rispetto al pannello fotovoltaico. In genere, i pannelli su un tetto orizzontale si posizionano con un'inclinazione ottimale finalizzata a massimizzare la radiazione solare incidente sulla superficie stessa durante l'arco annuale. Per l'Italia, l'inclinazione ottimale è pari a 30° rispetto all'orizzontale, ben diversa dall'inclinazione di un tetto orizzontale. È stato studiato che la radiazione solare incidente su di una superficie orizzontale è del 10-12% minore rispetto a quella incidente su di una superficie con inclinazione ottimale.
- *Riduzione della radiazione solare dovuta al PM2.5 ($C_{PM2.5}$)*: il presente coefficiente stima la riduzione della radiazione solare per effetto delle polveri sottili (PM2.5). Gli autori [13-14] hanno condotto studi precedenti sull'effetto delle concentrazioni di PM2.5 nell'aria sulla radiazione solare, nella città di

Napoli, mettendo a punto una relazione empirica per il calcolo del fattore di riduzione, utilizzando dati locali di insolazione e di PM2.5 della Rete di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPAC (Agenzia Regionale Protezione dell'Ambiente Campania). La relazione funzionale è data da:

$$\frac{I_{PM2.5}}{I_0} = \exp\left(\frac{-[PM2.5]}{250}\right) \quad (2)$$

dove:

I_0 = radiazione solare incidente su una superficie

$I_{PM2.5}$ radiazione solare affetta dalla presenza di PM2.5

$[PM2.5]$ = concentrazione di PM2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Per la città di Napoli, utilizzando questa relazione, è stato stimato che la radiazione solare che raggiunge un potenziale sito di installazione fotovoltaica subisce una riduzione annua del 5% a fronte di una concentrazione media annua di PM2.5 di circa $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Sulla base dei risultati di questa ricerca, è evidente che la riduzione della radiazione solare legata all'inquinamento atmosferico è un fattore da considerare potendo in specifici casi comportare una differenza sostanziale nella valutazione del potenziale fotovoltaico.

I coefficienti di riduzione sopra descritti, combinati secondo l'equazione (3), definiscono il Fattore di Utilizzazione $U_F: U_F = \prod_{i=1}^n C_i = C_{CON} * C_{PROT} * C_{FORM} * C_{SH} * C_{SA} * C_{GCR} * C_{AZ} * C_{SL} * C_{OPT} * C_{PM2.5}$ (3)

Combinando tale coefficiente globale con la superficie tetto disponibile, ottenuta attraverso il modello 3D della città, si ottiene la superficie tetto realmente utilizzabile per le installazioni fotovoltaiche. L'equazione corrispondente è la seguente:

$$S_{AVL}^{roof} = S_{TOT}^{roof} * U_F \quad (4)$$

3.4 Determinazione del potenziale solare fotovoltaico

Il passo successivo alla determinazione delle superfici urbane disponibili e all'elaborazione dei fattori limitanti selezionati è il calcolo della radiazione solare sulle superfici urbane modellate. Il metodo spaziale applicato tiene in conto l'ombreggiamento di alberi, edifici e altre ostruzioni nel raggio di 20 metri, nonché di grandi ostruzioni sul tetto stesso. Le aree in ombra non ricevono alcuna radiazione solare. Questo metodo si basa sull'algoritmo *Area Solar Radiation@ ESRI ArcGIS Pro* che identifica le aree illuminate dal sole attraverso l'analisi *viewshed* e calcola la radiazione solare diretta sulle superfici in base alla costante solare e al calcolo dell'angolo zenitale, mentre la radiazione diffusa viene calcolata in base a modelli di cielo uniforme o di cielo coperto standard. Combinando il *layer* spaziale (i.e. mappa tematica) della radiazione solare, così derivato, con il *layer* spaziale della riduzione della radiazione solare per effetto delle polveri sottili (PM2.5), generato, secondo la formula empirica (2), viene generato il modello di distribuzione della radiazione solare affetta dalle polveri sottili.

Combinando, attraverso un *overlay spaziale*, il *layer* della radiazione solare così calcolato e il *layer (raster)* della superficie dei tetti idonea, calcolata a partire dal modello 3D della città e applicando l'equazione (4) di map algebra, viene generato il modello di distribuzione del potenziale di energia solare (mappa 3D) ad alta risoluzione per ogni tetto di edificio e per ogni suo punto. Il calcolo del potenziale solare fotovoltaico urbano è dato dunque dalla seguente equazione geospaziale:

$$I_{PV} = S_{AVL}^{roof} * R_{Sol} \quad (5)$$

dove R_{Sol} è il *layer* spaziale di energia solare, S_{AVL}^{roof} è il *layer* spaziale della superficie dei tetti disponibili idonei (vedi eq. 4)

4 Il caso studio

4.1 La città di Portici

La Città di Portici ha rappresentato il caso studio di questo lavoro di ricerca. Portici è localizzata alle pendici del monte Vesuvio lato costiero, nel Golfo di Napoli, a sud-est di Napoli, capoluogo di provincia.

La superficie coperta dall'area urbana è di circa 4,54 kmq, con una popolazione di 53.801 abitanti. La città presenta numerosi edifici storici, costituenti un ricco patrimonio architettonico. Oltre alle numerose ville del XVIII e del XIX secolo, Portici ospita il Museo Nazionale Ferroviario di Pietrarsa e la Reggia di Portici, un grande palazzo reale nato per ospitare i reperti romani rinvenuti ad Ercolano, data la sua vicinanza agli scavi archeologici.

Nella zona portuale della municipalità, vi è ubicato il Centro Ricerche ENEA di Portici, specializzato in tecnologie e applicazioni fotovoltaiche, in cui è stato condotto il presente studio.

La vegetazione urbana è per la maggior parte nei polmoni verdi della città. Il più grande è il Bosco di Portici che si estende per circa 0,52 kmq.

La città risulta essere collegata sia dall'infrastruttura autostradale, sia dalla Strada Statale 18 Tirrenia Inferiore. Inoltre, è collegata all'intero Golfo di Napoli e a Salerno tramite due strade ferrate, con tre stazioni ferroviarie, due appartenenti alla Circumvesuviana ed una alla Ferrovia dello Stato (Figura 3).



Figura 3: Mappa 3D della Città di Portici (Napoli)

La città vesuviana ha una vocazione residenziale e commerciale, con una struttura basata su una alta presenza di edifici, di altezza fino a quasi 40 m, indice dello sviluppo verticale del contesto urbano. La matrice urbana è preponderante tale da risultare tra le città con la densità abitativa più alte d'Europa.

Inoltre, nel confine comunale si registra la presenza di due impianti fotovoltaici realizzati dal Comune di Portici e cofinanziati dalla Provincia di Napoli nell'ambito del Programma di attuazione della Legge 10/1991 sui risparmi energetici. Entrambi gli impianti sono stati installati su edifici comunali; in via Poli 68, sede della Scuola Media Santagata, ed in via Salute 45, sede della Scuola Materna IV Circolo Didattico (ex biblioteca). In particolare, l'impianto di via Poli produce 11.520 kWh/anno mentre quello di via Salute produce 15.300 kWh/anno (fonte: Piano Urbanistico Comunale - PUC).

4.2 La domanda di elettricità

La domanda di elettricità della città è stata determinata attraverso una stima indiretta a partire dai dati della provincia di Napoli rinvenuti nel PUC. La città di Portici ha una vocazione prettamente residenziale al quale si

collega un indirizzo terziario per cui il dato riguardante il consumo provinciale considerato fa riferimento a queste sole due aliquote, in modo da non sovrastimare la domanda comunale.

Dunque, il consumo elettrico annuale sul territorio provinciale è pari a 2.993,2 *GWh* (37,5%) per il settore residenziale e 3.156,4 *GWh* (39,6%) per il settore terziario, per un totale di 6149,6 *GWh* (77,1%). Si precisa che nel consumo del settore terziario non sono stati considerati i consumi relativi al trasporto FS che sono disponibili solo a livello regionale.

Si deriva pertanto che il consumo pro-capite, a partire dai dati sopra riportati, è pari a 1965,13 kWh/ab , dal quale è stato ottenuto un valore stimato di 105,73 *GWh* corrispondente alla domanda di energia elettrica richiesta dal Comune di Portici. In seconda battuta, è stato possibile consultare i dati reali del consumo di elettricità per l'anno 2019, relativo all'uso pubblico sia per i luoghi pubblici (municipio, scuole, fontane ecc.) sia per l'illuminazione pubblica. Il totale corrisponde a 2,92 *GWh*, dal quale si ricava per differenza un consumo privato di 102,81 *GWh*, ossia poco più del 97%.

5 Il modello 3D della Città di Portici

La metodologia proposta è stata applicata alla città di Portici, generando una mappa 3D del potenziale solare fotovoltaico della città, riferito come *catasto solare fotovoltaico urbano*, accessibile in maniera puntuale tramite *map viewer*.

L'applicazione della metodologia al caso studio si è articolata nei seguenti passi principali:

- acquisizione e classificazione del dato LiDAR ad alta risoluzione
- acquisizione/elaborazione del *footprint* degli edifici urbani
- generazione del modello 3D della città (edifici e vegetazione)
- modellazione della radiazione solare spazialmente distribuita sulla città
- elaborazione dei coefficienti di riduzione
- generazione della mappa 3D ad alta risoluzione del potenziale solare fotovoltaico degli edifici urbani

5.1 Classificazione del dato LiDAR

L'input di partenza è il dato LiDAR ad alta risoluzione (2x2 metri), acquisito nel formato ASCII dal GeoPortale Nazionale (<https://gn.mase.gov.it/portale/home>) del MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica). Per coprire tutta l'area studio della città di Portici è stato necessario l'utilizzo di dieci tavole (Figura 4) che sono state successivamente fuse in un unico Las Dataset, che permette di esaminare più file contemporaneamente in modo più facile e veloce per la piattaforma ESRI- ArcGIS Pro. Il risultato è una nuvola di punti, che si estende su 10,6 kmq di superficie, con una densità di 1,7 punti/mq, per un totale di 18.243.659 punti. Vista la necessità di avere i dati in un sistema di riferimento proiettato per la successiva modellazione 3D dell'area urbana, la nuvola di punti è stata proiettata dal sistema di riferimento geografico WGS84 al WGS84-UTM33N.

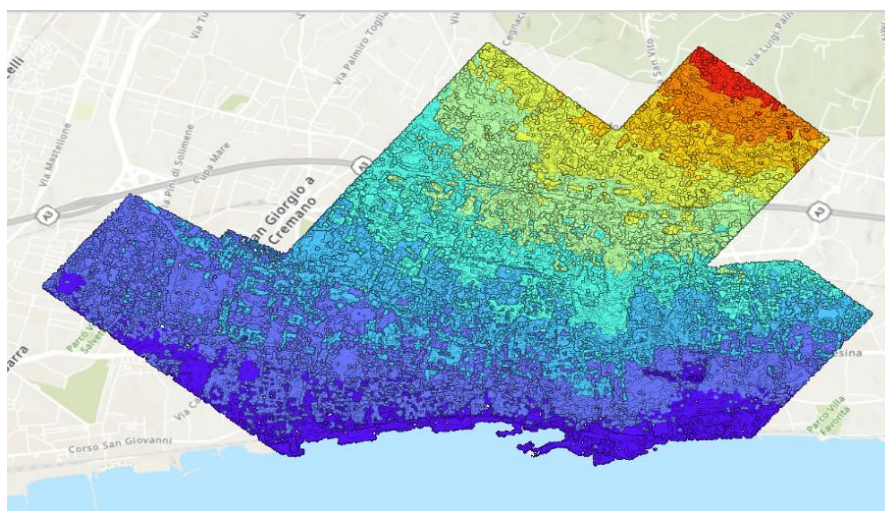


Figura 4: Dati LiDAR@GeoPortale Nazionale a copertura della città di Portici

Ad ogni punto del Las Dataset è assegnata una coordinata (x; y; z), un valore di intensità luminosa e valore di classificazione. Il dataset di punti LiDAR acquisito risultava essere grezzo, ossia con una classificazione primaria: 0 = Never Classified; 1 = Unassigned; 2 = Ground.

Una corretta e dettagliata classificazione è fondamentale per far sì che gli input alla modellazione 3D risultino affidabili e in particolare per ottenere la quota corretta degli elementi che caratterizzano l'ambiente urbano. Per tal motivo si è provveduto, attraverso specifici *tool* di analisi spaziale, integrati nella piattaforma ESRI- ArcGIS Pro, ad arricchire la classificazione assegnata alla nuvola di punti, ottenendo la seguente classificazione di maggiore dettaglio: 0 = Never Classified; 1 = Unassigned; 2 = Ground; 3 = Low vegetation; 4 = Medium vegetation; 5 = High vegetation; 6 = Buildings.

In particolare, i *tool* di ESRI-ArcGIS Pro utilizzati sono:

- *Classify Ground*: assegna il valore 2 in base alla quota altimetrica dei punti più bassi;
- *Classify Buildings*: assegna il valore 2 sia in base alla quota altimetrica dei punti più alti sia rispetto alla superficie che i punti formano;
- *Classify by Height*: assegna il valore 3, 4, 5 in base alla quota altimetrica dei punti.

I risultati della classificazione sono mostrati nelle Figure 5, 6.

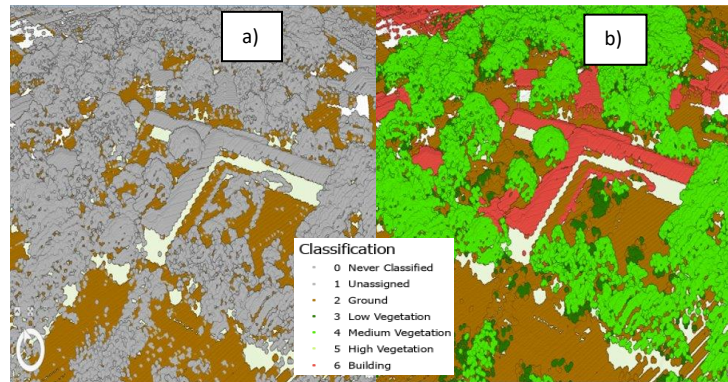


Figura 5: Vista della nuvola di punti LiDAR. a) dato grezzo; b) dato post-classificazione

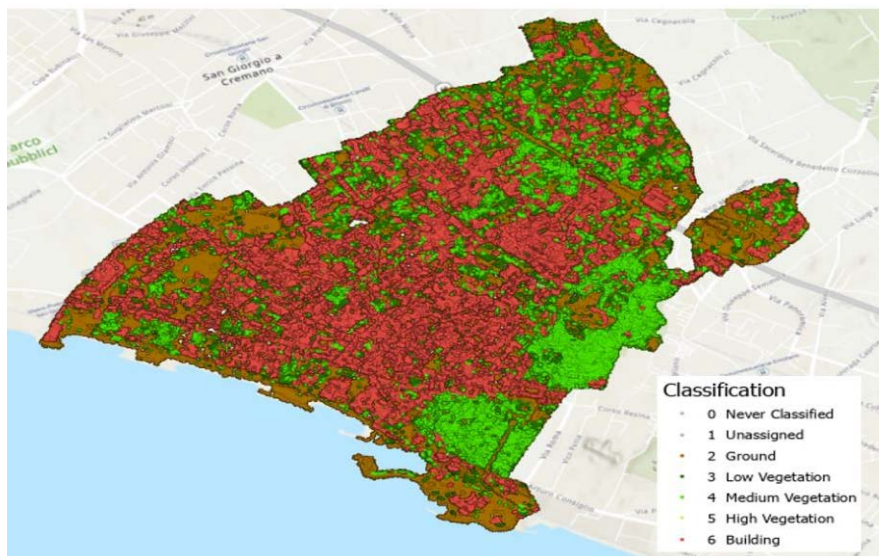


Figura 6: Dato LiDAR@GeoPortale Nazionale classificato a copertura della città di Portici

5.2 Derivazione del footprint degli edifici

Dal dato LiDAR classificato sono stati estratti i modelli spaziali di superficie (o DEM-Digital Elevation Model): il Digital Terrain Model (DTM), il Digital Surface Model (DSM) e il Normalized Digital Surface Model (nDSM), ad una risoluzione spaziale di 2x2 metri (Figure 7-8), attraverso *tool spaziali* di modellazione plano-altimetrici. Il DSM consente di catturare l'altezza degli oggetti presenti su un dato terreno come le cime degli alberi e degli edifici, mentre il DTM cattura la quota del terreno. nDSM è dato dalla differenza tra il DSM e DTM. I valori di altezza in nDSM vanno da zero a livello del suolo all'altezza verticale dell'elemento più alto catturato nel DSM mentre il DSM e il DTM rappresentano l'altezza assoluta riferita a un datum, tipicamente il livello medio del mare, un geode di riferimento o un ellissoide.

Rispetto all'estensione dell'area studio (4,7 kmq), sono stati ottenuti *layer raster* ad alta risoluzione spaziale costituito da 1.175.000 celle.

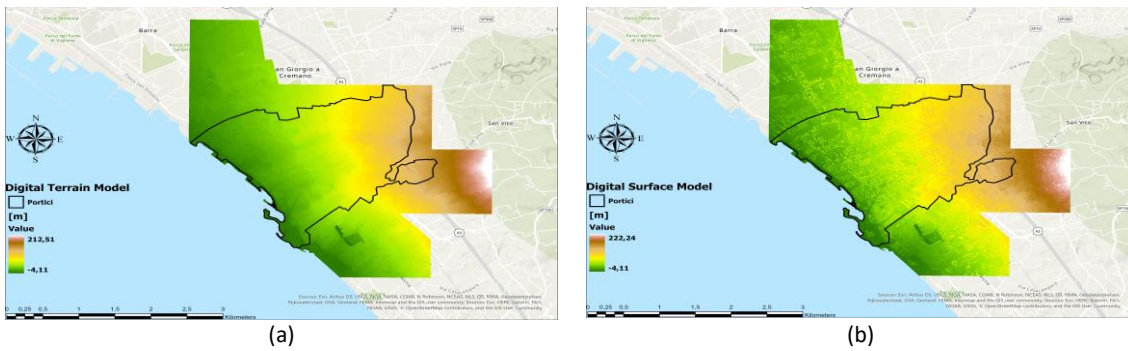


Figura 7: a) Modello digitale del terreno (DTM); b) Modello digitale di superficie (DSM) della città di Portici

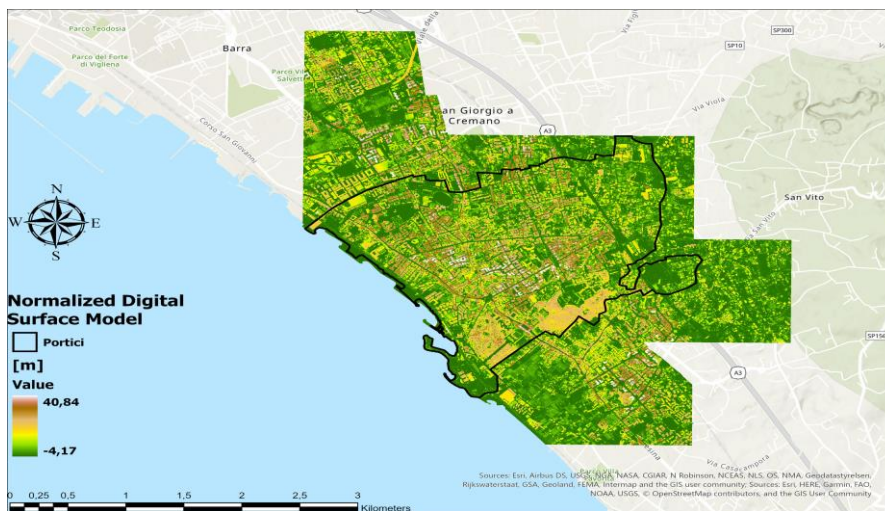


Figura 8. Modello digitale di superficie normalizzato (nDSM) della città di Portici

Attraverso l'analisi incrociata dei modelli spaziali di superficie e del dato LiDAR precedentemente classificato, è stato possibile estrapolare il *footprint* dell'edificato (Figura 9). Quest'ultimo è la proiezione su un piano 2D dei tetti degli edifici, ossia l'impronta degli edifici schematizzata attraverso un dato vettoriale poligonale. Ad esso sono associate informazioni geometriche quali l'altezza, il perimetro e l'area degli edifici, fondamentali nei passi successivi della procedura di calcolo del potenziale solare.

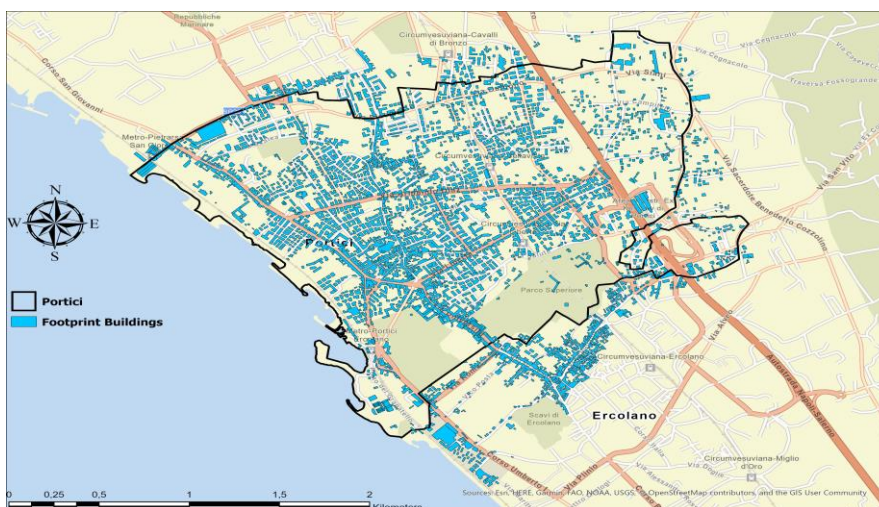


Figura 9. Mappa del *footprint* degli edifici della città di Portici

5.3 Modellazione 3D dell'edificato e della vegetazione

Il livello informativo del *footprint* elaborato corrisponde secondo lo standard OGC CityGML [21] al livello di dettaglio LOD0, secondo il quale ad ogni poligono è associato un'altezza.

Il *footprint* insieme ai DEM, sono gli input necessari per la modellazione 3D del contesto urbano. Si osservi che maggiore è il livello di dettaglio di questi livelli informativi, maggiore è l'accuratezza del modello 3D dell'edificato elaborato. In particolare, il *footprint* deve essere opportunamente segmentato rappresentare ogni parte dell'edificio con uno specifico poligono.

La modellazione 3D urbana attraverso la piattaforma ESRI-ArcGIS Pro consente di ottenere un output che va dal LOD1 al LOD3, a seconda del livello di dettaglio che si vuole ottenere. Per i nostri scopi, il LOD3, ossia la modellazione dell'edificato con i dettagli architettonici anche delle facciate, presenta un dettaglio non necessario per il calcolo della radiazione solare sulle superfici dei tetti, con un dispendio non trascurabile di tempo computazionale.

La differenza tra la modellazione LOD1 e LOD2 è la possibilità di modellare la forma dei tetti dell'edificato. Nel primo caso, ogni edificio è schematizzato come un blocco, una elevazione del *footprint* in input rispetto all'attributo dell'altezza, la cui forma dei tetti è solo *flat*, ossia orizzontali. Il LOD2 aggiunge la modellazione del tetto nelle sue forme reali, includendo otto tipi di forme diverse: FLAT; GABLE; HIP; SHED; MANSARD; DOME; VAULT; SPHERICAL.

Il dettaglio della forma del tetto è per i nostri scopi fondamentale ovvero per il calcolo della radiazione solare incidente su di una superficie, in quanto questa risulta essere dipendente dall'orientazione azimutale e zenitale, oltre al fatto che la forma stessa del tetto condiziona gli spazi sfruttabili, ma anche le tipologie di pannelli che possono essere utilizzati.

La Figura 10 mostra esempi di forme di tetto di edifici più comunemente presenti in un contesto urbano.

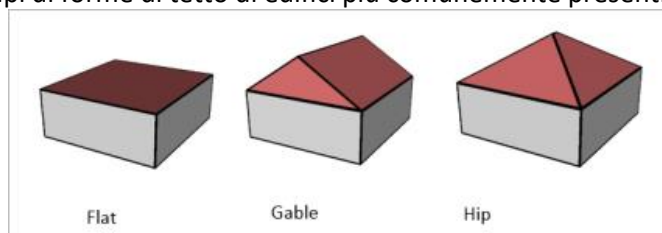


Figura 10. Schemi di tipologia di tetto FLAT, GABLE e HIP comunemente presenti in città

La scelta tra i diversi LOD_x dipende sostanzialmente dal contesto che si sta analizzando. Se l'area urbana che si vuole modellare è composta da edifici assimilabili a blocchi, senza che questi si discostino troppo dalla realtà, allora è opportuno elaborare il LOD1, ottimizzando anche i tempi computazionali. Diversamente in un contesto urbano con un'ampia varietà di forme dei tetti, occorre elaborare il LOD2 per una modellazione urbana maggiormente corrispondente a quella reale.

Per la città di Portici è stato elaborato il modello 3D sia con un livello di dettaglio LOD1 e con un livello di dettaglio LOD2. Di seguito sono riportati alcuni particolari della città che maggiormente evidenziano la maggiore precisione ottenuta dal modello LOD2 della città (Figure 11-14).

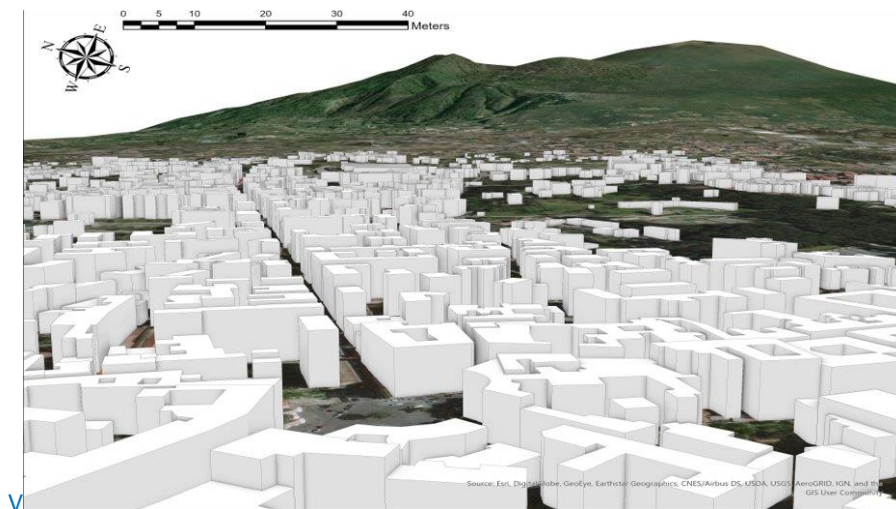


Figura 11. Vista del modello 3D – LOD1 della città di Portici

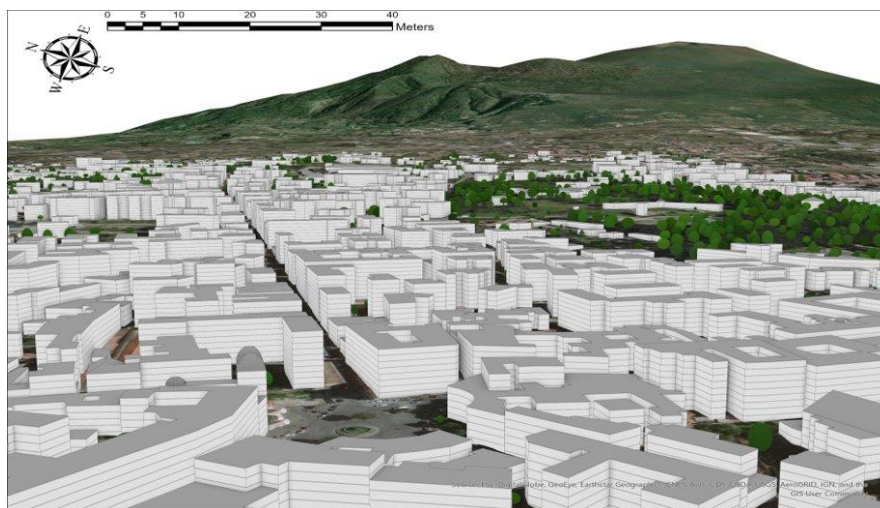


Figura 12. Vista del modello 3D – LOD2 della città di Portici

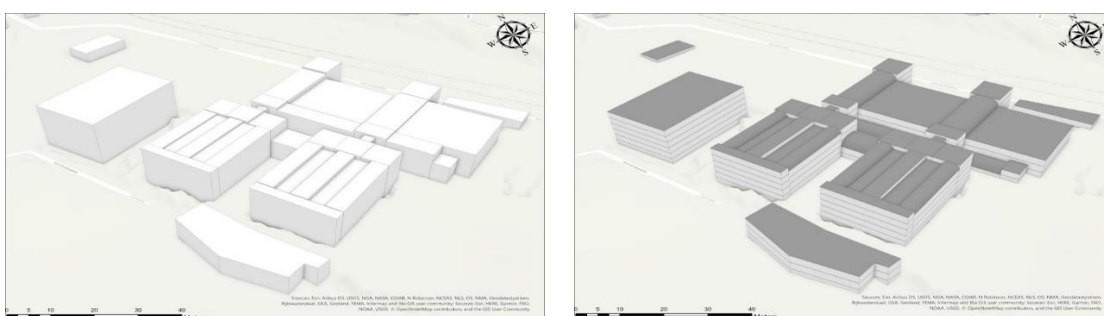


Figura 13. Vista del modello 3D della Centro Ricerche ENEC di Portici con LOD1 (sinistra) e LOD2 (destra)

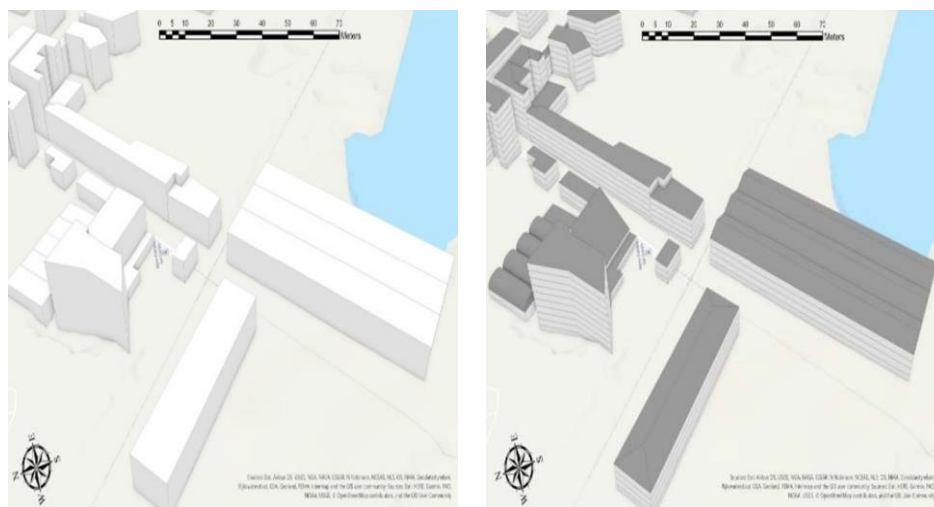


Figura 14. Vista del modello 3D della Museo di Pietrarsa con LOD1 (sinistra) e LOD2 (destra)

L'ambiente urbano non è composto solo dagli edifici, ma anche dalla vegetazione, che gioca un importante ruolo nel calcolo della radiazione solare, in quanto è fonte di ombreggiamento sugli edifici, in particolar modo per la vegetazione ad alto fusto. Combinando i *layer* DSM e *footprint*, è stato elaborato il modello 3D della vegetazione della città di Portici.

Nella Figura 15 è riportato la mappa del modello 3D della città di Portici, edificato e vegetazione, con un livello di dettaglio LOD2. Nella Figura 16, è possibile visualizzare il modello 3D della Reggia di Portici e della vegetazione circostante.



Figura 15. Modello 3D (LOD2) dell'edificato e dalla vegetazione della città di Portici

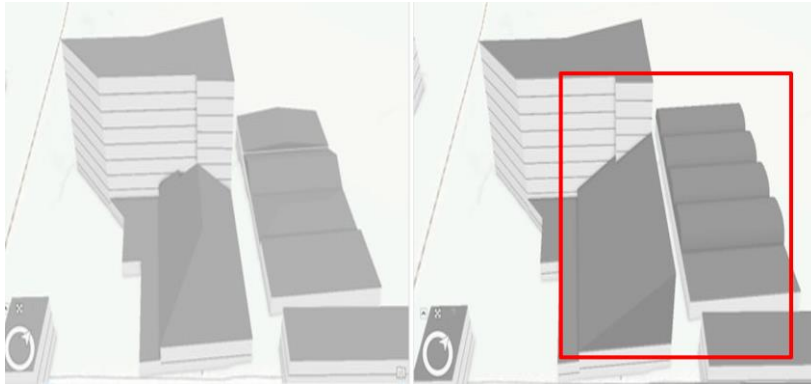


Figura 18: Particolare del modello 3D del Museo di Pietrarsa prima e dopo la validazione



Figura 19: Modello 3D del Centro ENEA di Portici prima e dopo la validazione

Il dato LiDAR ad alta risoluzione è in grado di catturare fino al dettaglio dell'ambiente urbano come le ostruzioni sui tetti ovvero i camini, gli impianti di climatizzazione, etc. Ciò di contro, utilizzando un LOD2, può determinare degli errori di modellazione in particolare della forma dei tetti. Pertanto, si è proceduti alla validazione anche manuale della forma dei tetti, attraverso confronto con le mappe di Google Earth Pro, che utilizza un LOD3.

Nella Tabella 2 sono riportati i risultati della validazione manuale degli edifici.

Tabella 2: Risultati della validazione della modellazione dei tetti

Tipologia tetto	Pre-Validazione	Post-Validazione
Edifici totali	2467	2467
Tetti FLAT	2388	2388
Tetti GABLE	576	57
Tetti HIP	516	34

6 Modello distribuito di radiazione solare

6.1 Simulazione dell'ombreggiamento

La modellazione del contesto urbano nel dettaglio degli elementi che lo costituiscono, sia dell'edificato con i suoi tetti sia della vegetazione, ha un ruolo importante nella valutazione dell'ombreggiamento.

Le moderne città si sviluppano sempre più in verticale per sopperire alla mancanza di spazio orizzontale necessario per ospitare la popolazione urbana in crescita. Essendo la municipalità di Portici uno dei comuni con più alta densità di abitanti in Europa, gli edifici sono piuttosto alti e a ridosso l'uno dell'altro tendendo a farsi ombra reciprocamente in funzione della posizione del sole. Peraltro, laddove c'è vegetazione urbana ad alto fusto, occorre considerare anche l'ombreggiamento degli alberi sugli edifici.

In questo studio, una volta generato il modello 3D degli edifici e della vegetazione, si è dunque proceduti anche alla valutazione dell'ombreggiamento reciproco tra edifici, edifici e vegetazione nonché del rilievo topografico. Allo scopo è stato utilizzato un modello di simulazione spaziale dell'ombreggiamento disponibile in ESRI- ArcGIS Pro, come mostrato nelle Figure 20-22. Questa informazione è presa in input dalla procedura di calcolo della radiazione solare.



Figura 20. Effetto ombra nell'ambiente urbano: Bosco Superiore di Portici



Figura 21. Effetto ombra nel Centro Ricerche ENEA di Portici



Figura 22. Effetto ombra nell'ambiente urbano: Piazza San Circo

6.2 Simulazione della radiazione solare

La valutazione della radiazione solare incidente su di una superficie durante un intervallo di tempo è un requisito fondamentale per la stima del potenziale solare fotovoltaico.

Per il calcolo della radiazione solare è stato utilizzato il *tool di modellazione* di ESRI-ArcGIS Pro - *Calculate Solar Radiation*, basato sull'algoritmo geospaziale R-SUN [19]. Quest'algoritmo calcola la radiazione solare incidente sulle superfici dei tetti urbani valutando l'ombreggiamento dell'ambiente circostante gli edifici, includendo gli alberi, gli altri edifici e il rilievo topografico nonché altri *feature* urbane laddove presenti, e l'inclinazione e l'orientamento della superficie dei tetti.

Questo *tool* prende in input il modello 3D della città (edificato e vegetazione) e il DSM. La scelta di utilizzare un DSM piuttosto che un DTM consente di tenere in considerazione tutti quegli elementi urbani che non sono oggetto della modellazione 3D. L'output è il modello spaziale della radiazione solare con risoluzione spaziale di 2x2 metri.

Il *tool* associa ad ogni cella del *raster* di output un valore di radiazione in [$kWh/(mq * day)$] calcolato sia per ogni mese, sia per l'intero anno, generando tredici output finali. In Figura 23 è riportata la mappa 2D della radiazione solare annua distribuita sulla intera città di Portici.

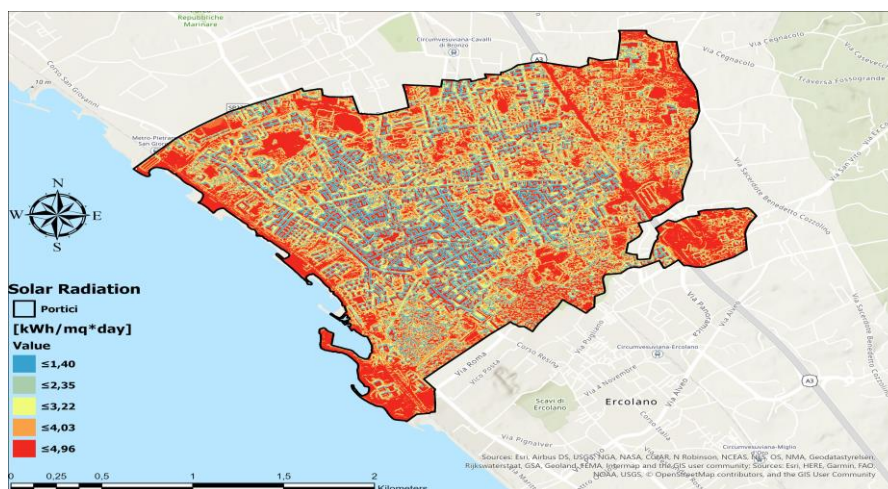


Figura 23. Mappa della radiazione solare media annua distribuita sulla città di Portici

Attraverso il tool *Calculate Solar Radiation*, il modello distribuito della radiazione solare è visualizzato sui tetti di ogni singolo edificio modellato, ri-assemblando e posizionando le celle del *raster* di output secondo l'orientamento dei tetti.

Nelle Figure 24, 25 sono riportate rispettivamente la mappa 2D e la mappa 3D della radiazione solare degli edifici della città.

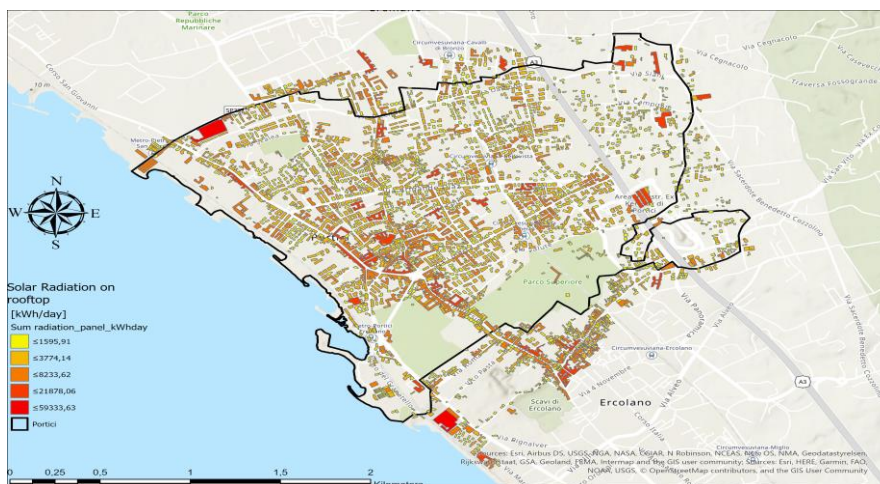


Figura 24. Mappa della radiazione solare degli edifici della città di Portici

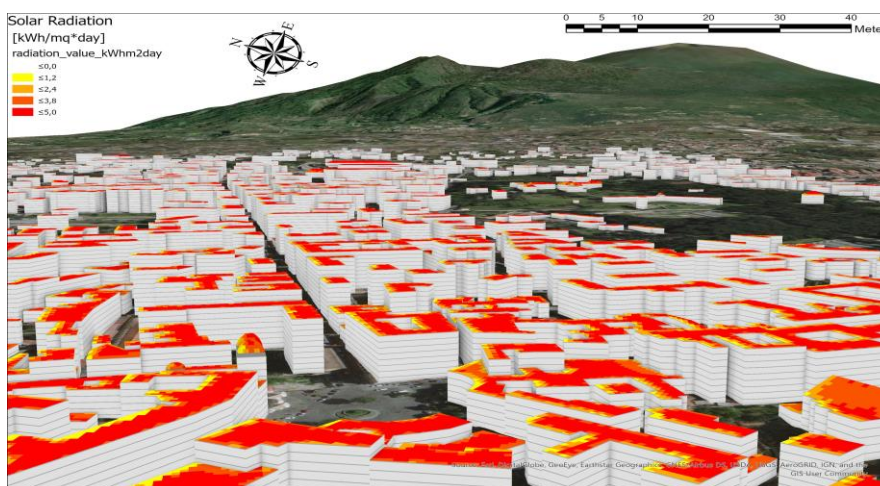


Figura 25. Mappa 3D della radiazione solare degli edifici della città di Portici

Dalla mappa 3D della radiazione solare, si può osservare che la radiazione non è omogenea sui tetti e questo è un particolare che non si è in grado di ottenere da una mappatura 2D della radiazione solare (vedi Figura 24).

Si osserva anche che i tetti esposti a sud e ad ovest presentano una maggiore radiazione solare incidente (visualizzato tramite il colore rosso scuro). Diversamente, i tetti esposti a nord e ad est presentano una minore radiazione solare incidente. In particolare, per quest'ultimo caso, il motivo è associato alla presenza del monte Vesuvio proprio ad est rispetto alla municipalità di Portici, privando la città delle prime ore di luce diretta.

Il potenziale di radiazione solare che ricade sui tetti dell'edificato dell'area studio, risulta essere pari a $1.620,18 \text{ GWh/anno}$. Questo valore è il massimo ottenibile, ma non è il massimo utilizzabile, dovendo considerare i fattori di riduzione.

7 La mappa 3D del potenziale solare fotovoltaico della città di Portici

7.1 Calcolo dei fattori di riduzione

I coefficienti di riduzione definiti nel paragrafo 3.3.2 possono variare da uno studio all'altro. I valori per il presente studio sono stati scelti dopo aver esaminato le ipotesi di altri studi presenti in letteratura, adattandoli all'ambito e alle caratteristiche di questo studio.

I coefficienti di riduzione $C_{PM2.5}$ e C_{OPT} e i valori loro assegnati sono invece il risultato di studi precedenti degli autori [13, 14, 20]. Essi rappresentano nella metodologia proposta fattori originali che possono influenzare l'accuratezza del calcolo del potenziale solare fotovoltaico urbano.

I coefficienti di riduzione scelti per il metodo proposto sono calcolati come *layer* spazialmente distribuiti e applicati ad ogni singolo edificio, a differenza di altri studi presenti in letteratura che applicano i coefficienti come dato aggregato.

Dunque, non tutta la superficie tetto disponibile può essere sfruttata per le installazioni fotovoltaiche. Elaborando i coefficienti di riduzione selezionati come variabili geografiche e combinando queste in un *overaly spaziale* secondo le equazioni (3) e (4), (5), si individua la superficie tetto disponibile realmente sfruttabile in città per le installazioni fotovoltaiche e il potenziale solare fotovoltaico a livello urbano fino alla scala del singolo edificio.

7.2 Fattore di riduzione della radiazione solare da PM2.5

Il fattore di riduzione $C_{PM2.5}$ è calcolato utilizzando la relazione funzionale (2) descritta precedentemente come *layer* spazialmente distribuito e riferito alla città di Portici.

Allo scopo, è stata generata una mappa della distribuzione del PM2.5 sulla città di Portici, basata sulle concentrazioni medie annue misurate dalla rete di stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria dell'ARPAC (Agenzia Regionale Protezione ambientale Campania), distribuita sull'intero territorio regionale. Le stazioni considerate sono 24 per la maggior parte localizzate nei territori della provincia di Napoli e Caserta.

Il dataset delle concentrazioni di PM2.5 elaborato si riferisce al periodo 2017 e contiene misure orarie o giornaliere dalle quali sono state derivate le concentrazioni medie mensili e annuali in [$\mu\text{g}/\text{mc}$]. Tra le stazioni considerate, vi sono stazioni di fondo, di traffico e industriali. Sul territorio della città di Portici è presente una sola stazione ARPAC di fondo ed è localizzata all'interno di una delle aree verdi comunali, il bosco della Reggia.

La mappa di distribuzione di PM2.5 a livello regionale con una risoluzione spaziale di 2x2 metri è stata elaborata partendo dai dati di concentrazione media annua di PM2.5, utilizzando il metodo geostatistico *Ordinary Kriging* (Figura 26).

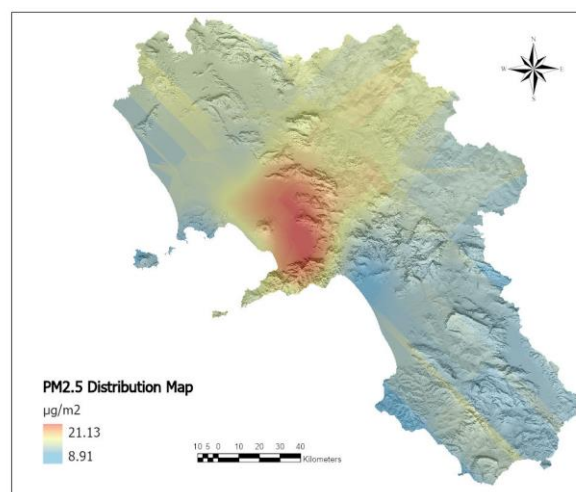


Figura 26. Mappa della distribuzione delle concentrazioni di PM2.5 per la regione Campania

Dalla mappa regionale è estratta la mappa di distribuzione del PM2.5 della città di Portici (Figura 27), passando quindi da un dato puntuale ad un dato distribuito sull'intera città. Dalla questa mappa, si stima che nella Città di Portici la concentrazione annua di PM2.5 è mediamente di 15,54 $\mu\text{g}/\text{mc}$.

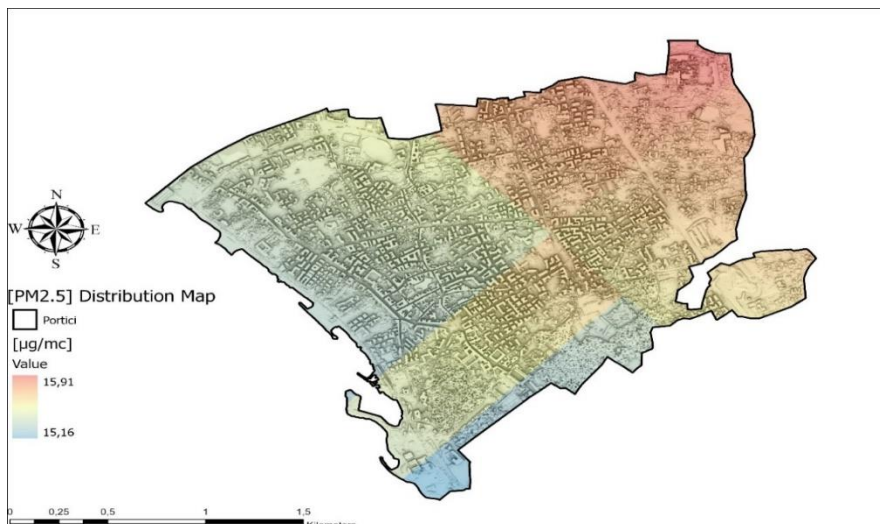


Figura 27. Mappa della distribuzione di concentrazione media annua di PM2.5 nella Città di Portici

Combinando le mappe della distribuzione di PM2.5 e della radiazione solare (Figura 23) secondo la relazione empirica (2), è ricavato un modello spazialmente distribuito ad alta risoluzione spaziale (2 metri) della radiazione solare affetta da PM2.5 per la città di Portici (Figura 28).

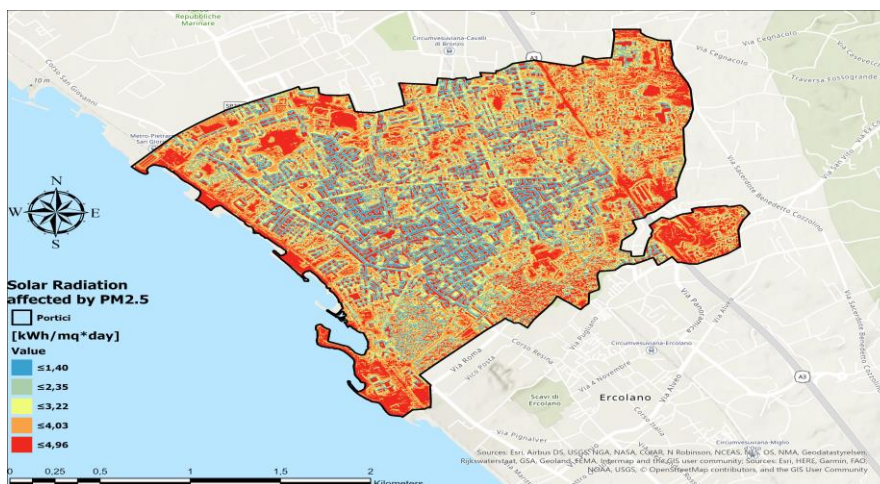


Figura 28. Mappa della radiazione solare affetta da PM2.5 nella Città di Portici

La mappa di riduzione della radiazione solare derivata (valore %) nella Figura 29 mostra che l'insolazione solare che raggiunge la città di Portici è ridotta mediamente del 6,02%, per effetto di concentrazioni medie annue di PM2.5 di circa 15,54 $\mu\text{g}/\text{mc}$ presenti sulla città.

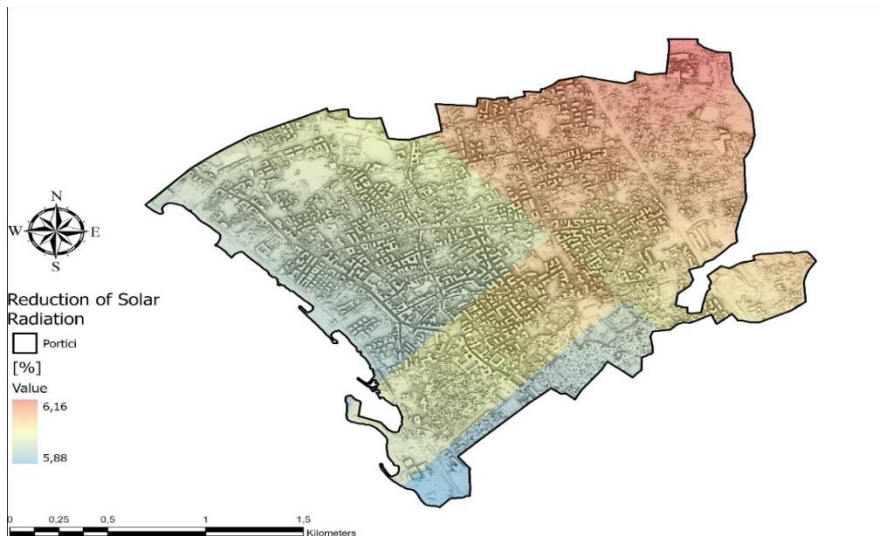


Figura 29. Mappa della distribuzione della riduzione percentuale media annua di radiazione solare nella città di Portici

Si è calcolato anche che il totale annuo di energia solare ridotta per effetto del particolato fine sulla città di Portici è pari a 1.522,67 GWh. Nella Tabella 3 sono riassunti i risultati dell'applicazione del coefficiente $C_{PM2.5}$.

Tabella 3: Impatto del PM2.5 sulla radiazione solare totale annua per la Città di Portici

Variabili	Risultati
Radiazione solare con 0 $\mu\text{g}/\text{mc}$ [GWh/anno]	1.620,18
Radiazione solare ridotta dal PM2.5 [GWh/anno]	1.522,67
Radiazione persa [GWh/anno]	97,51
Riduzione [%]	6,02

Successivamente è stato effettuato il calcolo della radiazione solare affetta da PM2.5 per ogni edificio, evidenziando il peso del coefficiente $C_{PM2.5}$ su ogni singolo tetto (Figure 30, 31).

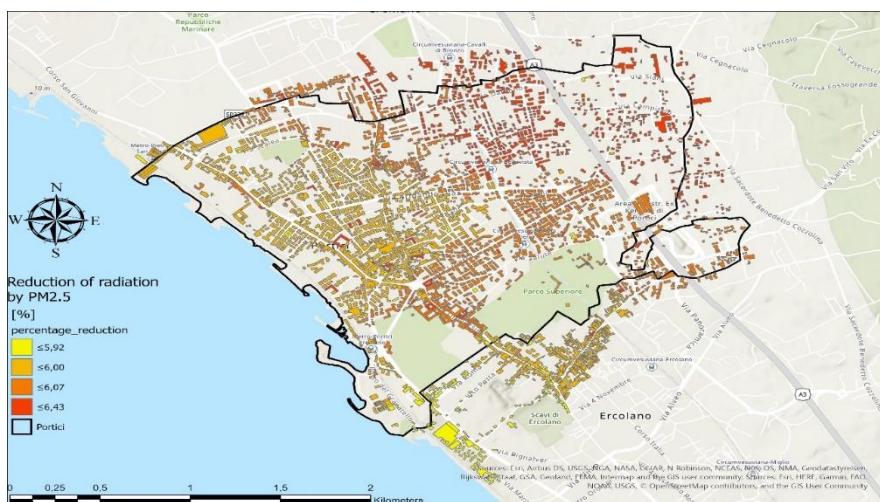


Figura 30. Mappa della riduzione percentuale media annua di radiazione solare per gli edifici della città di Portici

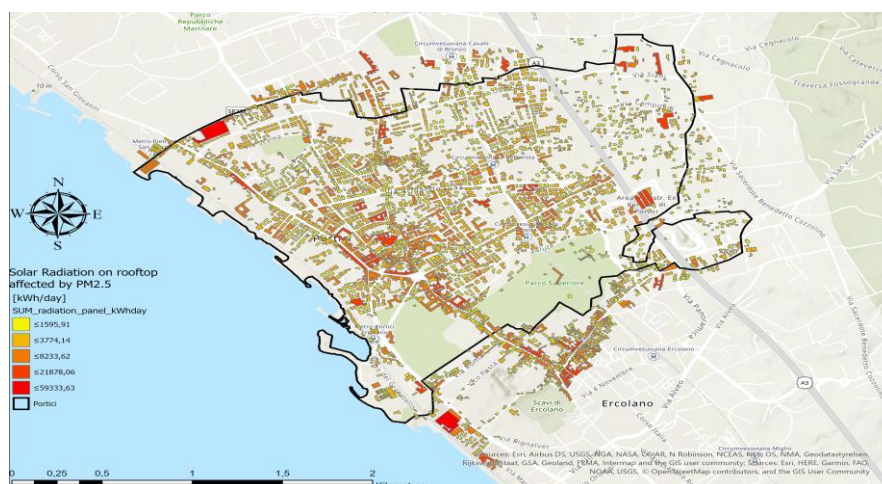


Figura 31. Mappa della radiazione solare affetta da PM2.5 per gli edifici della città di Portici

7.3 Fattori di riduzione della superficie dei tetti e del potenziale solare

Come descritto in precedenza, in questo studio, il calcolo della radiazione solare che raggiunge i tetti degli edifici urbani tiene conto della geometria degli edifici nonché dell'ombreggiamento reciproco degli edifici, della vegetazione e del rilievo topografico sugli edifici. Altro fattore considerato è un valore minimo della radiazione solare che raggiunge i tetti pari a 800 kWh/mq all'anno. L'approccio spazialmente basato ci consente di applicare la soglia minima della radiazione solare a livello di cella del *raster*: tutte le celle con un valore minore del valore soglia specificato sono escluse contribuendo a determinare con accuratezza la superficie sfruttabile di ogni singolo tetto che si assume debba avere una superficie minima di 30 mq.

Di seguito sono specificati i valori assegnati ai fattori di riduzione della superficie tetto scelti nella metodologia proposta:

- *Restrizioni architettoniche* (C_{CON}): tenendo conto degli studi eseguiti in letteratura [8], [9] è stato scelto di utilizzare un valore $C_{CON} = 0,80$ per tutti i tetti orizzontali, mentre per i tetti inclinati è stato scelto il valore di $C_{CON} = 0,90$, considerando che in genere i tetti orizzontali sono più praticabili di quelli inclinati;
- *Edifici protetti* (C_{PROT}): questo coefficiente nel calcolo del potenziale solare assume valore $C_{PROT} = 0$ per tutti gli edifici che sono soggetti a vincoli urbanistici e/o paesaggistici. Nel caso studio della città di Portici, tale valore è stato applicato solo alle chiese poiché gli edifici appartenenti alla categoria di beni culturali e del paesaggio possono potenzialmente essere utilizzati per installazioni fotovoltaiche previa autorizzazione della Sovrintendenza (D.Lgs. 42/2004);
- *Forme non adatte* (C_{FORM}): per tale fattore è stato assegnato il valore di $C_{FORM} = 0$ per tutti quei tetti che hanno forme curvilinee, in quanto, anche se esistono tecnologie dette "modellabili", si ritiene che esse siano troppo costose e poco diffuse;
- *Effetto ombra* (C_{SH}): il valore assegnato a questo coefficiente è $C_{SH} = 1$, poiché l'ombreggiamento generato dall'ambiente circostante è valutato dall' algoritmo di stima della radiazione solare;
- *Area di separazione tra i pannelli FV* (C_{GCR}): in questo studio è stato considerato un'inclinazione dei tetti pari a quella ottimale, che nella penisola italiana corrisponde a 30° rispetto all'orizzontale, che secondo la Tabella 1, porta ad un valore di $C_{GCR} = 0,42$ per i tetti orizzontali, mentre per quelli inclinati questo spazio non è necessario. L'inclinazione ottimale non solo permette di ottimizzare la radiazione, riducendone la componente di riflessione, ma evita anche l'accumulo eccessivo di polvere, diminuendo l'ordinaria attività di pulizia del pannello.
- *Area di servizio* (C_{SA}): ponendo l'inclinazione ottimale pari a 30°, lo spazio necessario per l'attività manutentiva è già incluso nello spazio lasciato tra una fila e l'altra dei pannelli per evitare il mutuo ombreggiamento, di conseguenza il valore è $C_{SA} = 1$;

- *Perdite da orientamento (C_{AZ}):* il valore assegnato ad esso è $C_{AZ} = 1$, poiché l'orientamento del tetto è già tenuto in conto nell'algoritmo di calcolo della radiazione solare utilizzato;
- *Pendenza del tetto (C_{SL}):* il valore assegnato ad esso è $C_{SL} = 1$, poiché la pendenza del tetto è già tenuta in conto nell'algoritmo di calcolo della radiazione solare utilizzato;
- *Superficie utilizzata per i pannelli FV (C_{PV}):* è stato considerato solo l'uso della tecnologia fotovoltaica $C_{PV} = 1$;
- *Inclinazione ottimale dei pannelli (C_{OPT}):* il calcolo della radiazione solare è eseguito considerando la superficie del tetto e non del pannello fotovoltaico, che è generalmente posto ad un'inclinazione di 30° quando il tetto è orizzontale. Tuttavia, l'irraggiamento entrante su una superficie inclinata è maggiore rispetto a quello su una superficie orizzontale. Questo aspetto è tenuto qui in considerazione assegnando valore $C_{OPT} = 1,11$. Per i tetti inclinati tale coefficiente non si considera perché il pannello FV si posiziona generalmente parallelamente al tetto.
- *Riduzione della radiazione solare dovuta al PM2.5 ($C_{PM2.5}$):* il valore assegnato ad esso è $C_{PM2.5} = 1$, poiché la riduzione della radiazione solare per effetto del PM2.5 è già tenuta in conto nel calcolo della radiazione solare;

Nella Tabella 4 sono riportati i valori dei coefficienti di riduzione della metodologia proposta.

Tabella 4: Elenco dei coefficienti di riduzione scelti e valori assegnati

Fattori di riduzione	Valore
C_{CON}	Tetti orizzontali: 0,80 Tetti inclinati: 0,90
C_{PROT}	0 (considerato nel modello 3D urbano)
C_{FORM}	Tetti curvi: 0
C_{SH}	1 (considerato nel calcolo della radiazione solare)
C_{GCR}	Tetti orizzontali: 0,42 Tetti inclinati: 1
C_{SA}	Tetti orizzontali: 1 (Considerato in C_{GCR}) Tetti inclinati: 1
C_{AZ}	1 (considerato nel calcolo della radiazione solare)
C_{SL}	1 (considerato nel calcolo della radiazione solare)
C_{PV}	1
C_{ST}	0
C_{OPT}	Tetti orizzontali: 1,11 Tetti inclinati: 1
$C_{PM2.5}$	1 (Considerato nel calcolo della radiazione solare affetta da PM2.5)
Minima superficie dei tetti	30 mq
Minimo Irraggiamento	800 kWh/mq/anno

Questi coefficienti sono elaborati come *layer* spazialmente distribuiti ovvero mappe tematiche e sono combinati con un *overlay spaziale* secondo l'equazione (5), generando le mappe 2D e 3D del potenziale solare fotovoltaico urbano, edificio per edificio idoneo, alla risoluzione spaziale di 2 metri (Figure 32-34).

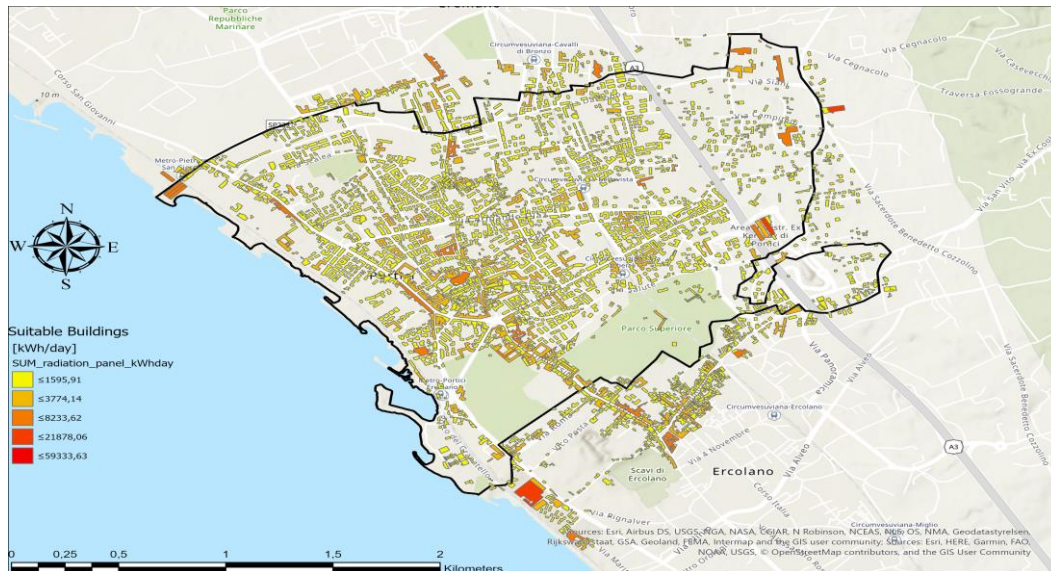


Figura 32. Mappa 2D del potenziale di energia solare fotovoltaica [kWh/mq*day] degli edifici idonei della città di Portici



Figura 33. Mappa 3D del potenziale di energia solare fotovoltaica [kWh/mq*day] degli edifici idonei della città di Portici

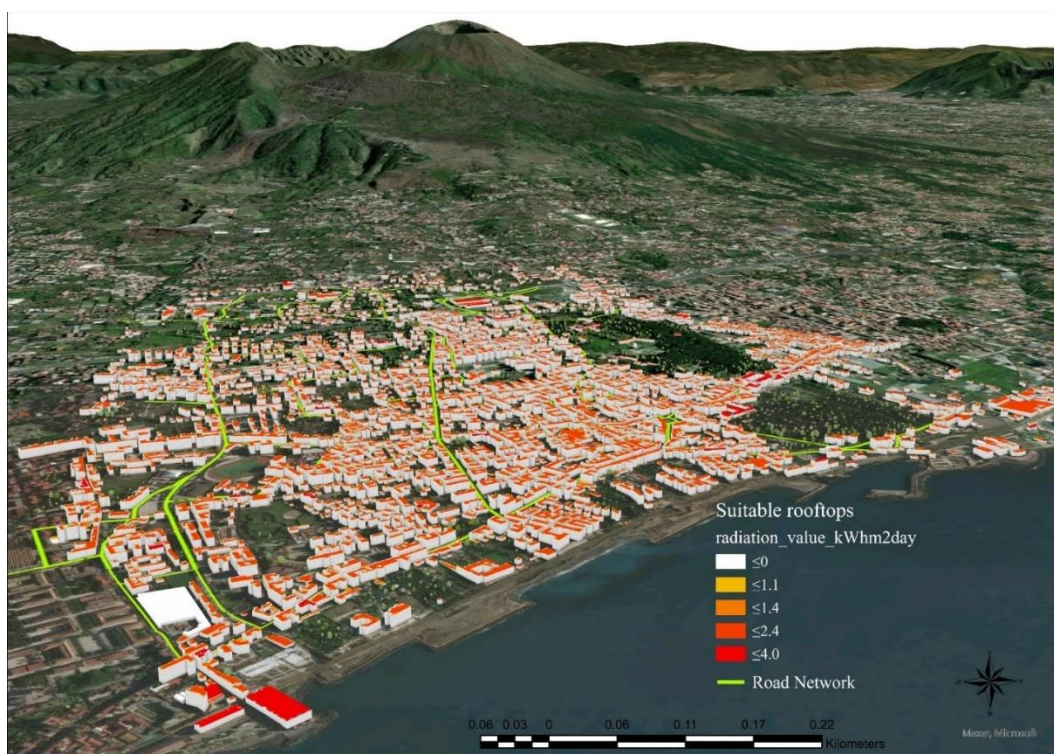


Figura 34. Catasto solare fotovoltaico urbano per la città di Portici

8 Risultati e discussione

Applicando la metodologia proposta alla città di Portici e generando il modello 3D dettagliato degli edifici e della vegetazione è stato possibile identificare e quantificare le superfici dei tetti disponibili in città per l'installazione di pannelli fotovoltaici. In particolare, si è calcolato che l'area urbana edificata conta 2479 edifici con un'altezza media di circa 13 m e un rapporto medio tra la superficie degli stessi e il rispettivo volume è risultato pari a $0,077\text{m}^{-1}$, il quale rispecchia l'alta densità abitativa caratteristica della Città di Portici, che la rende tra le città più densamente abitate d'Italia.

Applicando i coefficienti di riduzione sia solari che architettonici all'intera città e edificio per edificio, escludendo ogni edificio con una superficie del tetto inferiore a 30mq o un irraggiamento inferiore a 800 kWh/mq anno, si è calcolato che, sebbene la superficie tetto totale disponibile in città sia 1.18 kmq , corrispondente a circa il 26% dell'area comunale, solo 0.36 kmq costituiscono la superficie realmente sfruttabile per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico. Di questa superficie tetto idonea, l'89,41% è costituita da tetti piani e il restante 10,59% include tetti spioventi.

Dal modello di simulazione della radiazione solare, valutando anche l'impatto dell'inquinamento da polveri sottili presente in città, considerando concentrazioni medie annue di $\text{PM}_{2.5}$ pari a $15,54\text{ }\mu\text{g}/\text{mc}$, si stima un valore complessivo di potenziale di energia solare fotovoltaica pari a $556,59\text{ GWh}/\text{anno}$ per l'intera città.

Si tratta di una stima al limite di saturazione dei tetti valutati idonei rispetto ad un insieme specifico di criteri di idoneità, essenzialmente solari ed architettonici.

In Tabella 5 sono riportati i valori aggregati calcolati per l'intera città di Portici.

Tabella 5: valori aggregati calcolati per l'intera Città di Portici

Variabile	Risultato
Domanda totale di energia elettrica della città	105,73 GWh
Popolazione della città	53.801 <i>abitanti</i>
Numero di edifici modellati	2.467
Superficie totale della città	4,54 kmq
Superficie totale dei tetti	1,18 kmq
Percentuale di tetti orizzontali	95%
Percentuale di tetti inclinati	4,2%
Altezza media degli edifici	13 m
Rapporto superficie/volume degli edifici	0,077 m-1
Superficie idonea dei tetti	0,36 kmq
Percentuale di tetti orizzontali idonei	89,41%
Percentuale di tetti inclinati idonei	10,59%
Potenziale solare fotovoltaico urbano	556,59 GWh/anno

Si osservi che, se consideriamo il 30% del potenziale solare fotovoltaico disponibile per l'intera città, percentuale confermata da altri studi [9], considerando che una famiglia media composta da 3-4 persone consuma circa 2.700 kWh all'anno, il potenziale disponibile riuscirebbe a coprire il fabbisogno di circa 60.000 famiglie ovvero il fabbisogno delle famiglie della città di Portici e di altre 2 città con la stessa popolazione. Considerando invece che un'auto moderna non elettrica emette circa 3 tonnellate di CO₂ all'anno, sfruttando il 30% del potenziale solare disponibile sulla città di Portici, si eviterebbero circa 6500tCO₂/anno pari alle emissioni di circa 2100 automobili.

L'approccio proposto per il calcolo del potenziale solare fotovoltaico urbano si colloca tra gli approcci *bottom-up*, così definiti in letteratura, differenziandosi dagli approcci *top-down*. Questi ultimi sono metodi statistici che facendo uso di database e dati disponibili da varie fonti, consentono di dare delle stime sia del potenziale fotovoltaico che della resa energetica al livello macroscopico.

Utilizzando un approccio *top-down* in [22], gli autori osservavano che in Italia ci sono 12 milioni di edifici classificati come edilizia residenziale (fonte ISTAT). Attualmente, da dati GSE solo poco più del 7% di questi è dotato di impianti con una potenza che non supera i 20 kW e per un installato complessivo di circa 4750 MW. Proiettando l'installato attuale al limite di saturazione dell'edificato censito da ISTAT, si ottiene un potenziale per questa applicazione di 65 GW. Assumendo un fattore di ricoprimento dei tetti pari a 150 W/mq (una assunzione che si può ritenere oggi conservativa) si ottiene una superficie tecnica di circa 437 k mq, molto vicina a quella stimata da altri studi con metodologie *top-down* diverse. Se confrontiamo questa metodologia con quella *bottom-up* qui proposta e applicata all'intera città di Portici, si ottiene una superficie massima ricopribile pari a 0.11kmq contro la stima qui calcolata di 0.36 kmq. Questa differenza può essere ascrivibile al fatto che nella valutazione attraverso l'approccio *bottom-up* proposto non si è tenuto conto di fattori sociopolitici, regolamentari (per il residenziale soprattutto il meccanismo SPP) e altro (e.g. scelte individuali non dettate dai criteri definiti) che determinano effettivamente la taglia dell'impianto che viene installato nonché un'ulteriore riduzione della superficie utilizzabile.

L'approccio qui proposto quale approccio *bottom-up* diventa particolarmente interessante perché consente analisi di dettaglio di aree urbane anche ampie consentendo l'individuazione dei siti più idonei alle installazioni fotovoltaiche e quindi più produttivi. In sostanza, ad oggi, la superficie su tetto utilizzata è normalmente inferiore a quella effettivamente disponibile e ciò si riflette nella differenza tra le due stime. E' importante sottolineare che lo strumento del catasto solare fotovoltaico urbano sviluppato, fornisce anche la capacità di interrogare in maniera puntuale ogni singolo edificio della città o insieme di edifici raggruppati

rispetto a specifici parametri amministrativi (e.g. destinazione d'uso), energetici (e.g. consumo elettrico, cabina primaria di riferimento), topologici (e.g. vicinanza reciproca o a infrastrutture), vincolistici, etc., e visualizzare il valore di potenziale solare fotovoltaico nonché il valore di superficie realmente sfruttabile per installazioni fotovoltaiche sui tetti degli edifici urbani.

9 Conclusioni

Lo sviluppo delle tecnologie fotovoltaiche in città necessita di strumenti digitali abilitanti per la valutazione della quantità reale di energia fotovoltaica utilizzabile sui tetti degli edifici e su ogni altra superficie urbana idonea.

Il *Catasto solare fotovoltaico urbano* proposto è uno strumento digitale basato su dati validati, tecnologia GIS e modellazione fotovoltaica che consente di identificare e quantificare le superfici ottimali per l'installazione di piccoli e medi impianti fotovoltaici in aree complesse ed eterogenee come quelle urbane con vincoli architettonici, socioeconomici, politici ed ambientali.

Il Catasto consente di valutare in maniera accurata il potenziale solare fotovoltaico delle superfici urbane idonee considerando la città nel suo complesso, ovvero la morfologia urbana, la struttura degli edifici, il verde, l'inquinamento atmosferico, le attività antropiche. Questa valutazione può essere integrata con l'informativa vincolistica, urbanistica e normativa vigente.

L'accuratezza del potenziale solare calcolato dipende dall'approccio GIS-based sviluppato, basato su un modello 3D dettagliato della città (o gemello digitale) che include gli edifici, la vegetazione, generato a partire dal dato LiDAR ad alta risoluzione spaziale. Il modello 3D permette di ricavare le superfici urbane (e.g. tetti degli edifici, aree mercatali, di parcheggio, ricreative) realmente utilizzabili per le installazioni fotovoltaiche, identificando le ostruzioni sui tetti, la forma, l'orientamento e l'inclinazione, nonché di stimare la radiazione solare che raggiunge il tetto di ogni singolo edificio in funzione delle sue caratteristiche geometriche ed espositive, valutando l'effetto ombra dovuto al rilievo topografico e agli edifici, alberi e altre strutture urbane circostanti piuttosto che l'impatto dell'inquinamento urbano da polveri sottili.

Rispetto ad altri strumenti o approcci sviluppati, lo strumento del Catasto, che abbiamo realizzato, offre il vantaggio di identificare quegli edifici o altre aree urbane che presentano i requisiti architettonici e solari per cui sono idonei alle installazioni di pannelli fotovoltaici e quindi di valutare l'effettiva radiazione solare che raggiunge ogni singolo tetto di edificio o altra area o insieme di questi. Con questo strumento è possibile valutare il potenziale solare fotovoltaico di un dato edificio o un dato quartiere della città o di specifici edifici quali quelli pubblici, per esempio, al fine di mettere in atto azioni mirate ed informate di pianificazione energetica urbana da fonte rinnovabili

È uno strumento pensato per supportare i processi di pianificazione e di incentivazione energetica rinnovabile delle amministrazioni locali allo scopo di renderli mirati ed efficaci. Un Comune (o una regione) può anche utilizzarlo per incrociare l'informazione del potenziale di energia solare degli edifici urbani con altre informazioni quali ad esempio la distribuzione della povertà energetica urbana esistente, al fine di mettere in atto azioni mirate ed informate per combattere il fenomeno della povertà energetica delle famiglie.

Questo strumento può essere utilizzato per pianificare le CER in città, per individuare e dimensionare insieme di edifici urbani tali per cui il bilancio di energia netto (differenza tra produzione di energia fotovoltaica e consumo elettrico) sia positivo per cui si immette energia prodotta in rete, o nullo tale per cui la CER è autosufficiente.

Il Catasto consente ad una amministrazione comunale di comprendere quali edifici della città hanno maggiore potenziale fotovoltaico per produrre energia, accumularla e distribuirla a edifici/famiglie che versano in condizioni di povertà energetica; un operatore della comunicazione attraverso il Catasto ha modo di esplorare il potenziale fotovoltaico degli edifici urbani per supportare il deployment di antenne 5G in città, note essere molto energivore.

Uno sviluppo futuro dello strumento del Catasto è renderlo fruibile come servizio integrato in piattaforme dedicate Web-GIS (e.g. UrbisMap - <https://www.urbismap.com/>) che consentono l'accesso e l'integrazione con banche dati validate territoriali, ambientali, strumenti urbanistici digitali (e.g. catasto urbano, Piano Urbanistico Comunale - PUC, etc.), la normativa locale/nazionale e la vincolistica locale nella forma di *layer*

geografici, generando un servizio avanzato per l'identificazione delle superfici urbane realmente idonee alle installazioni fotovoltaiche e la valutazione accurata del potenziale solare fotovoltaico di ogni singolo tetto di edificio urbano o altra superficie urbana idonei nonché per raggruppamenti di edifici/superfici rispetto a parametri amministrativi (e.g. destinazione d'uso), energetici (e.g. consumo elettrico, cabina primaria di riferimento), socio-economici, topologici (e.g. vicinanza reciproca o a infrastrutture), vincolistici, etc., e per l'intera città.

Il Catasto realizzato come servizio a livello nazionale potrà consentire in maniera puntuale, facile e veloce ai modelli in 3D delle città italiane, di esplorare dove e quanto potenziale fotovoltaico è realmente utilizzabile nelle città e supportare ogni processo che trasformi la città in infrastruttura energetica rinnovabile.

Bibliografia

1. PNIEC (Piano Energia e Clima) - <https://www.mimit.gov.it/it/notizie-stampa/pniec2030> (ultimo accesso 24 gennaio 2024)
2. Fit for 55 - <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (ultimo accesso 24 gennaio 2024)
3. RepowerEU - https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_it (ultimo accesso 24 gennaio 2024)
4. Fattoruso, G.; Toscano, D.; Venturo, A.; Scognamiglio, A.; Fabbricino, M.; Di Francia, G., Sustainability 2024, 16, 911. <https://doi.org/10.3390/su16020911>
5. Fattoruso, G.; Scognamiglio, A.; Venturo, A.; Toscano, D.; Nardella, G.; Fabbricino, M. In Computational Science and Its Applications—ICCSA 2023 Workshops; Gervasi, O., Murgante, B., Rocha, A.M.A.C., Garau, C., Scorza, F., Karaca, Y., Torre, C.M., Eds.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2023; pp. 70–80.
6. Palladino, D.; Calabrese, N., Energies 2023, 16, 3042. <https://doi.org/10.3390/en16073042>
7. Machete R., Falcão A.P., Gomes M.G., Rodrigues A.M., Energy & Buildings 177 290-302 (2018).
8. Rodríguez, L.R., Duminil, E., Ramos, J.S., Eicker, U, Solar Energy 146, 264-275 (2017)
9. Rodríguez, L. R., Nouvel, R., Duminil, E., Eicker, U., Solar Energy, 157, 880-894, (2017), <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.017>.
10. Peters I. M, Karthik S., Liu H., Buonassisi T. and Nobre A., Energy Environ. Sci., 11, 3043-3054. (2018)
11. Nobre, A. M., Karthik, S., Liu, H., Yang, D., Martins, F. R., Pereira, E. B., ... & Peters, I. M., Renewable Energy, 89, 389-400. (2016)
12. Wang H., Meng X. and Chen J., Building Serv. Eng. Res. Tech-nol., Vol. 41 Issue 1, 73-85 (2019)
13. Nocerino, M.; Fattoruso, G.; Sorrentino, G.; Manna, V.; De Vito, S.; Fabbricino, M.; Di Francia, G., In Proceedings of the Sensors and Microsystems; Di Francia, G., Di Natale, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; pp. 125–130.
14. Di Francia, G.; Fattoruso, G.; Nocerino, M.; Puocci, M.G.; Esposito, E.; De Vito, S.; Fabbricino, M., In Proceedings of the Sensors and Microsystems; Di Francia, G., Di Natale, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2023; pp. 73–79.
15. Bódis, K., Kougiyas, I., Jäger-Waldau, A., Taylor, N., Szabó, S., Renew. Sustain. Energy Rev. 114, 109309 (2019).
16. Lee S., Iyengar S., Feng M., Shenoy P., Maji S., KDD 2109, ACM SIGKDD 2105-2113 (2019).
17. Byrne, J., Taminiau, J., Kurdgelashvili, L., Kim, K.N., Renew. Sustain. Energy Rev. 41, 830-844 (2015).
18. ESRI ArcGIS Pro - <https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
19. Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D. & Ossenbrink, H. A., Solar Energy, Issue 81(10), pp. 1295-1305 (2007).
20. Fattoruso, G.; Nocerino, M.; Sorrentino, G.; Manna, V.; Fabbricino, M.; Di Francia, G.. In Computational Science and Its Applications—ICCSA 2020; Gervasi, O., Murgante, B., Misra, S., Garau, C., Blečić, I., Taniar, D., Apduhan, B.O., Rocha, A.M.A.C., Tarantino, E., Torre, C.M., Karaca, Y., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; pp. 665–677
21. OGC CityGML – <https://www.ogc.org/standard/citygml/> (ultimo accesso 24 gennaio 2024)
22. Di Francia G., Fattoruso G., Ingenio – Informazione tecnica e progettuale – <https://www.ingenio-web.it/articoli/il-fotovoltaico-si-ma-dove-c-e-abbastanza-spazio-per-il-fotovoltaico-in-italia/> (ultimo accesso 24 gennaio 2024)