

# **STUDIO TERRITORIALE DELLA RISORSA EOLICA NEL COMUNE DI PERUGIA: ASPETTI METODOLOGICI, ENERGETICI ED AMBIENTALI**

*Francesco Asdrubali, Giorgio Baldinelli*

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Perugia, Via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia

## **SOMMARIO**

Nell'ambito del Piano Energetico e Ambientale del Comune di Perugia si è effettuato uno studio sulla disponibilità della risorsa eolica all'interno del territorio comunale. L'indagine si è sviluppata a partire dai dati anemometrici relativi a due stazioni di presenti nella zona, integrate con un codice di calcolo che, attraverso una serie di modelli numerici, ha reso possibile l'elaborazione della mappa del vento. Sono stati così individuati due siti potenzialmente idonei, per i quali si è condotta un'analisi di fattibilità tecnico-economica. Soltanto una delle due località è risultata valida per l'installazione di un campo eolico e per essa si è quindi proceduto alla valutazione delle prestazioni in termini di riduzione delle emissioni di gas serra; si è infine messa a punto una metodologia per la definizione dettagliata dell'impatto visivo della centrale eolica.

## **ABSTRACT**

Within the Energy Plan of the town of Perugia, the potential of wind energy resource was evaluated. Starting from anemometric data of two stations situated in the territory, wind maps were obtained thanks to a simulation code, using a series of numerical models such as orography, stability and roughness. Two possible sites came out from the model and for these places a technical-economical feasibility analysis was conducted, finding out that only one site is suitable for the installation of a wind farm. A group of 15 aerogenerators, producing globally 30 GWh per year, was proposed. From the environmental point of view, the wind farm should permit the saving of 32.000 ton CO<sub>2-eq</sub> per year, giving a strong contribution to reduce greenhouse gases emissions in the territory. Finally, a visual impact analysis of the aerogenerators insertion was conducted through renderings and photomontages, which constitute an important tool to assess the real visual impact of a wind farm. In Italy, in fact, the visual aspects of wind farms result strategic because of the high value of the national landscape.

## **1. INTRODUZIONE**

Le tecnologie relative allo sfruttamento dell'energia eolica sono sufficientemente mature per garantire costi di produzione contenuti e impatto ambientale ridotto rispetto ad altre

tecnologie per la produzione di energia elettrica. In relazione ad altre fonti rinnovabili di energia, quella eolica si distingue per essere estremamente dispersa, ossia possedere bassa densità energetica per unità di area della superficie del territorio. Ciò comporta da un lato la difficoltà di sfruttamento della risorsa a costi competitivi, dall'altro la necessità di procedere spesso all'installazione, in uno stesso sito, di più aerogeneratori; l'esempio più tipico, infatti, per un impianto eolico è costituito dalla "Wind farm" cioè un insieme di più aerogeneratori disposti variamente sul territorio, ma collegati ad un'unica linea elettrica che li raccorda alla rete locale o nazionale. L'energia eolica, pur presentando caratteristiche sfavorevoli quali l'irregolarità, l'aleatorietà legata alla velocità e direzione del vento e l'impossibilità di accumulazione, risulta convertibile direttamente in energia meccanica e quindi elettrica, ed è disponibile sia di giorno che di notte. Restano tuttavia numerosi problemi da risolvere per una sua maggiore diffusione, legati soprattutto alle procedure di valutazione dell'impatto ambientale ed in particolar modo quello paesaggistico. Nell'ambito del Piano Energetico ed Ambientale del territorio del Comune di Perugia [1] si è elaborato uno studio a carattere territoriale sulla valutazione della risorsa eolica e l'attuabilità di interventi pilota e dimostrativi; a tal fine, si è considerata tutta la parte settentrionale del territorio comunale, ricca di rilievi, e si sono individuati due possibili siti per la realizzazione del parco eolico, valutandone la potenzialità energetica e fornendo strumenti per la definizione degli effetti sull'ambiente.

## **2. METODOLOGIA PER LA REDAZIONE DI STUDI TERRITORIALI SULLA RISORSA EOLICA**

Le caratteristiche del territorio italiano sono molto diverse da quelle di altri paesi e molte aree di interesse anemologico presentano condizioni estremamente vincolanti per la progettazione di parchi eolici, quali:

- alta densità abitativa;
- alto valore paesaggistico;
- diffusa presenza di beni storico–artistici e ambientali da tutelare.

A questi fattori si aggiungono anche problematiche di tipo geo-morfologico (siti localizzati su stretti crinali, spesso inaccessibili, con poca possibilità di scelta per il posizionamento delle macchine) e un'anemologia generalmente estremamente complessa.

I dati di ventosità di un determinato sito (ovvero il suo potenziale eolico) rivestono notevole importanza poiché la produzione elettrica di un impianto dipende in primo luogo da tali caratteristiche; queste sono a loro volta influenzate in modo sensibile dall'orografia locale.

Gli elementi chiave per l'individuazione del sito e la valutazione della fattibilità energetica per l'installazione di un parco eolico sono:

- 1) individuazione dell'area:
  - verifica della risorsa eolica;
  - verifica dell'assenza di vincoli ambientali, idrogeologici e geotecnici;
  - possibilità di collegamento alla rete;
  - verifica della disponibilità dei terreni;
  - accessibilità dell'area con trasporti eccezionali;
- 2) posizionamento degli aerogeneratori:
  - rispetto delle distanze;
  - adattamento all'orografia e morfologia del territorio;
  - massimo sfruttamento della risorsa eolica nel rispetto dell'ambiente.
- 3) verifica dell'impatto visivo e paesaggistico della centrale eolica.

Come si vede, si tratta di numerosi requisiti e vincoli, per cui la soluzione più idonea va studiata caso per caso.

### **3. IL CONTESTO TERRITORIALE**

La fase preliminare dello studio consiste nel reperimento dei dati anemologici; la finalità è la costruzione di mappe del vento per il territorio per il quale si vuole valutare la possibilità di sfruttamento dell'energia eolica.

Nel Comune di Perugia si sono resi disponibili i dati di una stazione di rilevamento in ambito urbano in un arco temporale a partire dal 1961 e quelli della stazione ubicata nel vicino aeroporto di Sant'Egidio (reperiti su annuari e bollettini meteorologici pubblicati a cura dell'ISTAT) a partire dal 1979 [2]. I dati relativi alla stazione interna alla città non possono essere utilizzati in quanto le misurazioni in essa eseguite risultano pesantemente influenzate da ostacoli di varia natura (campanili, tetti, ecc.) presenti in prossimità dell'ubicazione delle strumentazioni. Al fine di una corretta interpretazione di essi risulterebbe quindi necessario modellare il territorio circostante l'Osservatorio con un grado di accuratezza non giustificato dagli scopi prefissati. I dati della stazione aeroportuale, invece, sono continui e completi seppur disomogenei in quanto espressi su base giornaliera o su base mensile.

Dalla mappatura del vento realizzata mediante un opportuno codice di calcolo è stato possibile individuare come siti di interesse nel territorio del Comune di Perugia la sommità di Monte Tezio e l'area circostante la discarica di Pietramelina, ovvero i due rilievi significativi in questo ambito territoriale.

### **4. IL CODICE DI CALCOLO**

Il codice di calcolo impiegato per le simulazioni è Wind Atlas Analysis and Application Model (WasP 7.0), lo stesso utilizzato per redigere l'atlante europeo del vento [3].

Il modello WASP è composto da un set di modelli numerici che hanno il compito di correggere le misure anemometriche al fine di ottenere una climatologia del vento della zona considerata, ed in particolare:

- il modello per la stabilità;
- il modello per il cambio di rugosità;
- il modello per l'effetto barriera;
- il modello per l'orografia.

Il modello per la stabilità si basa su alcune correzioni da apportare al profilo logaritmico del vento al mutare delle condizioni di stabilità atmosferica e richiede come dati in ingresso le medie climatologiche e gli scarti quadratici medi del flusso di calore superficiale.

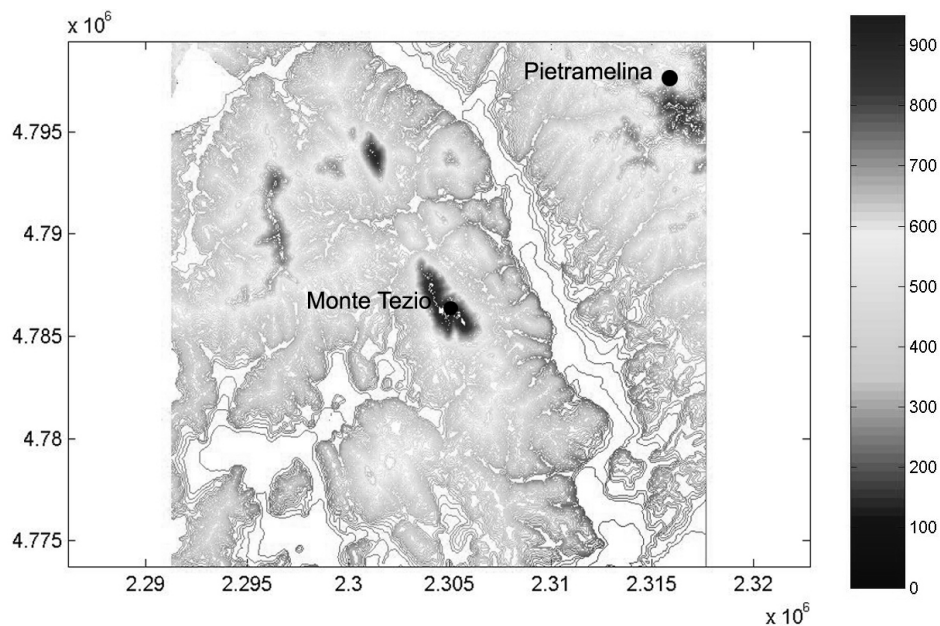
Il modello per il cambio di rugosità si basa su alcune correzioni da apportare al campo dei venti nel caso in cui il terreno non è omogeneo. In questo caso al terreno sono assegnate delle lunghezze di rugosità in modo tale che il flusso del vento, passando tra due superfici disomogenee, è calcolato da considerazioni sullo strato limite superficiale.

Il modello per l'effetto-barriera entra in gioco considerando gli effetti di attrito causati dalla resistenza aerodinamica dovuta ad eventuali ostacoli con dimensioni variabili vicini all'anemometro o al sito eolico. Infatti è noto come in prossimità di un ostacolo, a distanze o quote comparabili con la sua altezza, il profilo del vento ne viene perturbato. Questo modello permette così di "correggere" il dato anemometrico eliminando questi effetti.

Il modello per l'orografia viene infine utilizzato per correggere i dati del vento dagli effetti dovuti alle disomogeneità del terreno circostante; in questo caso vengono calcolati gli effetti indotti dalle variazioni altimetriche del terreno intorno alla stazione di misura.

Il codice di calcolo tiene conto dei fattori che influenzano la direzione e la velocità del vento, pertanto, è necessario immettere come dati di ingresso, le misure anemometriche, un modello orografico della zona interessata, la definizione della rugosità del territorio e la definizione di eventuali ostacoli presenti nelle vicinanze delle stazioni di rilevamento.

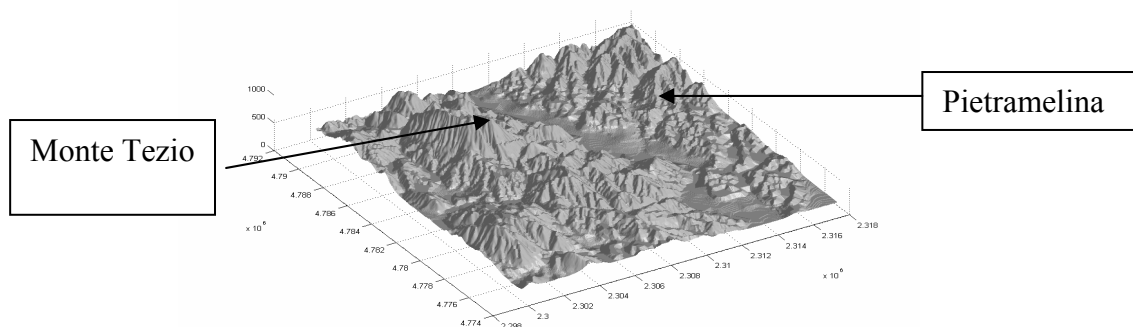
In figura 1 è mostrato il modello orografico del territorio settentrionale del Comune di Perugia impiegato per il calcolo; in ascissa ed ordinata sono indicate le coordinate gaussiane del luogo, mentre la legenda riporta la scala altimetrica.



*Fig. 1 - Modello orografico considerato per il calcolo.*

In figura 2 è mostrato il modello tridimensionale del terreno; si noti come la Valle del Tevere costituisca una via preferenziale per il vento e come Monte Tezio, essendo la cima più alta, si presenti come uno dei siti più interessanti per lo sfruttamento dell'energia eolica.

Il codice di calcolo WAsP, con il modello di orografia fornito, valuta la perturbazione indotta dal terreno su un flusso di potenziale corrispondente ad un vettore unitario diretto come la direzione del vento.



*Fig. 2 - Modello tridimensionale del terreno.*

In figura 3 è riportato il modello di rugosità adottato per il territorio in esame; la zona di minor rugosità risulta essere la radura in cima a Monte Tezio, seguita dalla valle del Tevere, prevalentemente caratterizzata da coltivazioni basse e rari casolari.



Fig. 3 - Modello per la rugosità.

Con i dati di ingresso descritti, il codice di calcolo WAsP fornisce in uscita, per ogni punto del dominio territoriale considerato, le distribuzioni statistiche di Weibull rispettivamente, per tutte le direzioni e per le direzioni prevalenti nord-est (settore che forma un angolo antiorario di  $45^\circ$  con la direzione nord) e sud ovest ( $225^\circ$ ); inoltre viene elaborata la rosa dei venti, espressa in percentuale su tutto il periodo (figura 4).

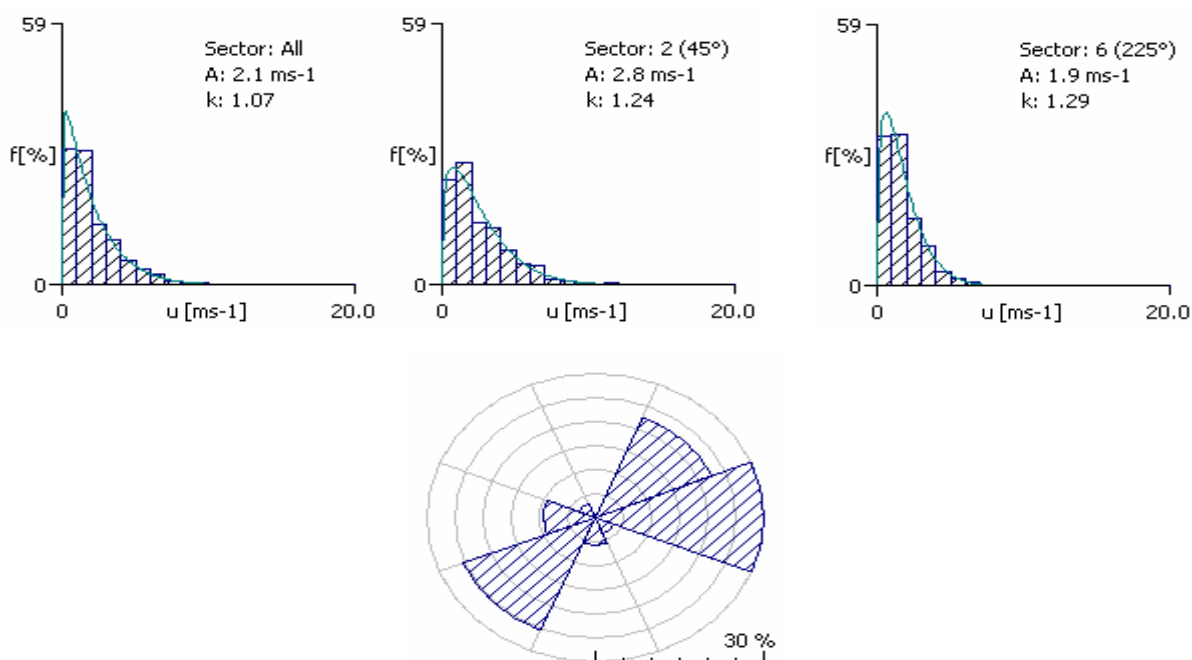


Fig. 4 - Distribuzione di Weibull a Perugia S. Pietro, e rosa dei venti.

Viene infine fornita la mappa del vento (figura 5), ovvero viene rappresentata la distribuzione spaziale della velocità del vento valutata dal codice di calcolo: le curve rappresentano le zone di confine tra le varie classi di rugosità, le parti in giallo sono le zone ove il vento presenta i maggiori valori della velocità, dunque le zone a maggiore densità energetica.

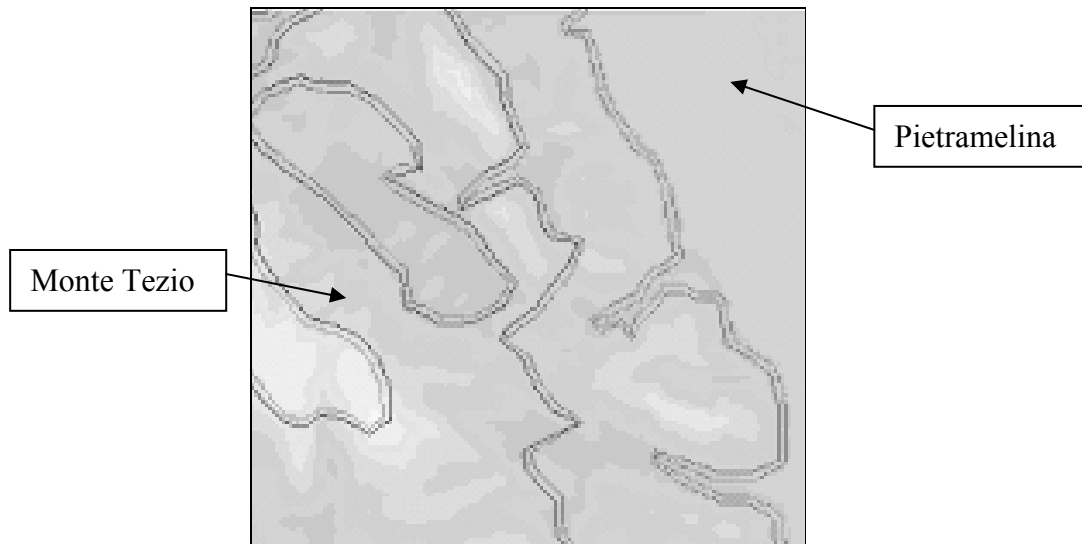


Fig. 5 – Mappatura del dominio territoriale relativa all'intensità della velocità del vento.

## 5. PROPOSTA DI INSTALLAZIONE DI UN CAMPO EOLICO E RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

La mappa del vento elaborata con il codice di calcolo mette in evidenza che una tra le zone di maggior disponibilità di vento è quella di Pietramelina (altitudine di circa 600 m s.l.m.), sede sin dai primi anni '80 di una discarica per i rifiuti solidi urbani.

Il posizionamento di primo tentativo delle macchine eoliche è stato effettuato cercando di seguire le preesistenti infrastrutture viarie, i crinali e le zone verdi [4].

Il codice di calcolo WAsP è in grado di valutare l'energia effettivamente producibile, scelta la tipologia di aerogeneratore, ovvero la sua curva caratteristica di potenza. Si è dunque considerato un aerogeneratore di 1650 kW di potenza, altezza di 67 m al mozzo e diametro delle pale di 66 m; la curva caratteristica di potenza è riportata in figura 6, la velocità di innesco corrisponde a circa 4.5 m/s, mentre quella di stacco è circa pari a 26 m/s.

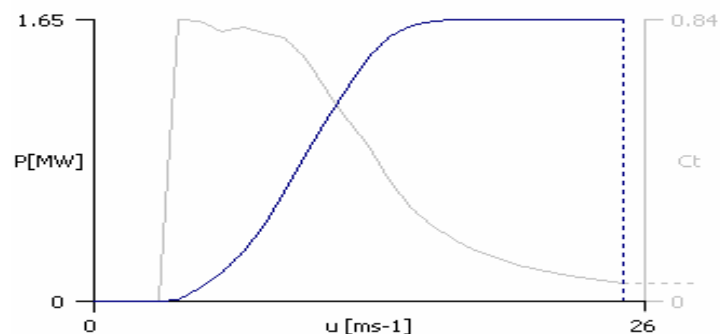


Fig. 6 – Curva caratteristica di potenza per l'aerogeneratore prescelto.

Per gli aerogeneratori si è considerato, in via cautelativa, un diametro del rotore di 70 m ed interasse tra i sostegni pari a tre diametri (210 m); ne risulta un campo costituito da 9 macchine eoliche. Si è così pervenuti ad una stima di primo tentativo del potenziale eolico; successivamente si è operata un'ottimizzazione dell'impianto da cui è stato ottenuto il posizionamento mostrato in figura 7.

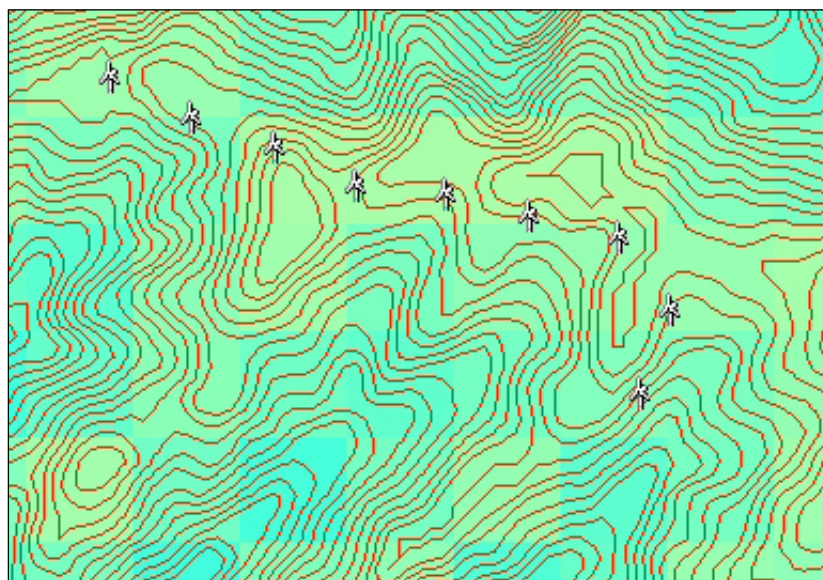


Fig. 7 – Posizionamento aerogeneratori ottimale per il sito di Pietramelina.

E' stata poi calcolata l'energia effettivamente producibile ottenendo un valore lordo di 18,018 GWh all'anno di cui 0,323 GWh persi per attrito, per cui rimane un quantitativo di energia netta pari a 17,696 GWh; in tabella 1 sono riportati i risultati delle simulazioni.

Tab. 1 – Risultati delle simulazioni per il sito di Pietramelina.

Velocità media del vento (m/sec)					4,91
N° aerogen.	Energia prodotta (GWh)	Energia prodotta (GWh)	% Persa	Vmedia vento(m/s)	Ore/anno di funz, a P <sub>nom</sub>
	Lorda	Netta			
1	2,154	2,122	01,5	5,13	1305,45
2	1,888	1,860	01,5	4,81	1144,24
3	1,931	1,862	03,6	4,93	1170,30
4	2,050	2,027	01,1	5,03	1242,42
5	2,073	1,995	03,8	5,01	1256,36
6	1,788	1,758	01,7	4,72	1083,64
7	1,907	1,879	01,5	4,87	1155,76
8	2,156	2,137	00,9	5,14	1306,67
9	2,071	2,055	00,8	5,08	1255,15

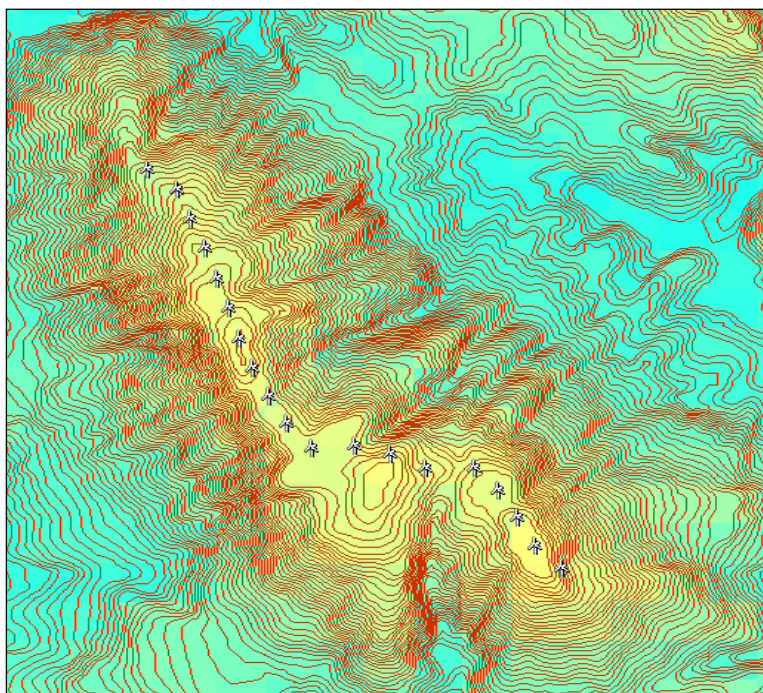
Se si assume come 2000 ore di funzionamento annuo alla potenza nominale la soglia secondo cui stabilire se una centrale eolica [6], risulti redditizia o non redditizia, si può notare come per Pietramelina tale valore (1213.3 ore/anno) è ben al di sotto della soglia citata. A ciò si

deve aggiungere il fatto che per un opportuno sfruttamento di un impianto eolico si richiede una velocità media annuale del vento nel range di  $5 \div 6$  m/s, mentre dall'elaborazione risulta che mediamente, nelle posizioni prescelte per gli aerogeneratori, la velocità media annua del vento a Pietramelina è 4.91 m/s.

Con la stessa metodologia illustrata per la valutazione del potenziale eolico nella zona di Pietramelina ed adottando la stessa tipologia di macchina eolica, si è provveduto ad applicare il codice di calcolo WAsP per la valutazione dell'energia ottenibile da un campo eolico dislocato sulla sommità di Monte Tezio.

Dall'analisi eseguita si è riscontrato che è proprio in questa zona che la risorsa eolica nel comune di Perugia risulta di maggior entità; per contro l'area di Monte Tezio è una zona di particolare pregio paesaggistico per cui è opportuno far seguire all'analisi energetica un'accurata analisi dell'impatto visuale generato dall'impianto eolico.

La configurazione ottimale per un campo eolico da installare su Monte Tezio è risultata essere composta da 15 aerogeneratori da 1650 kW di potenza nominale, posizionati lungo il crinale con orientamento sud-sud-ovest, come indicato in figura 8.



*Fig. 8 - Posizionamento degli aerogeneratori ottimale per il sito di Monte Tezio.*

Le simulazioni (tabella 2) mostrano che l'energia lorda effettivamente producibile è pari a 48,944 GWh all'anno di cui 2,778 GWh persi per attrito, per cui rimane un quantitativo di energia netta pari a 46,166 GWh.

Si osservi come tutte le macchine eoliche sono posizionate in punti in cui la velocità media annuale del vento risulta al di sopra del range di  $5 \div 6$  m/s, ritenuto come range di soglia per un opportuno sfruttamento della risorsa eolica; inoltre le ore di funzionamento medio annuo risultano essere 1977,48, valore molto prossimo alla soglia di redditività fissata intorno alle 2000 ore/anno. Considerato che i consumi elettrici annui relativi al settore residenziale nel

Comune di Perugia è pari a circa 173 GWh, la produzione annua netta di energia elettrica nel sito di Monte Tezio potrebbe ricoprire circa il 26% di tale fabbisogno.

*Tab. 2 - Risultati delle simulazioni per il sito di Monte Tezio.*

Velocità media del vento (m/sec)					6,32
N° aerogen.	Energia prodotta (GWh)	Energia prodotta (GWh)	%	Vmedia vento(m/s)	Ore/anno di funz, a P <sub>nom</sub>
	Lorda	Netta	Persa		
1	3,488	3,452	01,1	6,54	2113,94
2	3,497	3,333	04,7	6,55	2118,39
3	3,439	3,231	06,0	6,49	2084,24
4	3,157	2,955	06,4	6,20	1913,34
5	3,194	2,951	07,6	6,23	1935,76
6	3,132	2,972	05,1	6,16	1898,19
7	3,338	3,171	05,0	6,41	2023,23
8	3,221	3,008	06,6	6,27	1952,12
9	3,108	2,993	03,7	6,13	1883,64
10	3,107	2,961	04,7	6,13	1883,03
11	3,253	3,058	06,0	6,31	1971,51
12	3,383	3,095	08,5	6,45	2050,30
13	3,223	3,004	06,8	6,30	1953,34
14	3,201	2,929	08,5	6,28	1940,00
15	3,203	3,053	04,7	6,29	1941,21

## 6. ASPETTI AMBIENTALI

Per il sito di monte Tezio si sono valutate le emissioni di anidride carbonica evitate con l'installazione del campo eolico prima descritto, ottenendo un valore pari a circa 32.000 ton CO<sub>2-eq</sub> all'anno. Il quantitativo di CO<sub>2-eq</sub> risparmiato è stato desunto dai dati di emissione riferiti al parco centrali termoelettriche attualmente funzionante in Italia: il valore ottenuto è pari a 700 g CO<sub>2-eq</sub> per ogni kWh di energia elettrica prodotto [5]. Nell'ambito degli obiettivi indicati dall'Amministrazione Comunale per la riduzione dei gas serra, il contributo del campo eolico risulta significativo, soprattutto in termini assoluti, in quanto garantirebbe la disponibilità di un ingente quantitativo di energia elettrica senza oneri aggiuntivi in termini di emissioni di gas climalteranti.

Dall'analisi energetica è emerso che nel territorio del Comune di Perugia il sito di Monte Tezio è da ritenersi il più opportuno per lo sfruttamento della risorsa energetica eolica; l'eventuale installazione del campo eolico in detta zona necessita tuttavia di uno studio di impatto visivo al fine di scegliere gli aerogeneratori, le opere di costruzione e di allaccio alla rete elettrica più idonei. A partire dall'ubicazione delle macchine eoliche da considerarsi di massimo rendimento energetico, lo studio è stato articolato in due fasi:

- valutazione delle zone di impatto visuale;
- verifica dell'interferenza visiva mediante fotoinserimenti.

L'area in cui si può ritenere significativo l'impatto visuale di una centrale eolica può essere valutata con la relazione [6]:

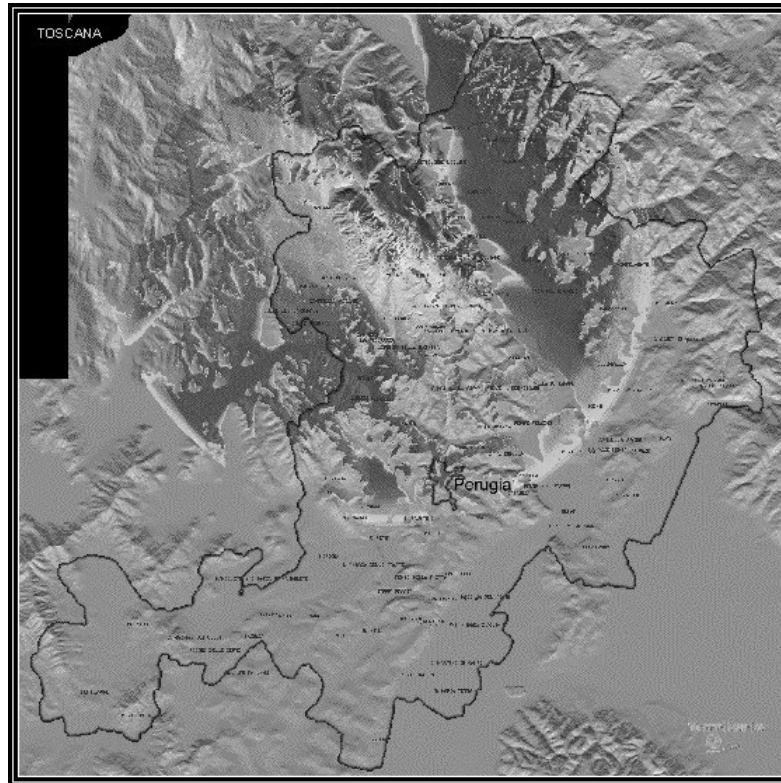
$$R = (100 + E) \times H$$

dove

R: raggio dell'area di impatto visuale. dell'aerogeneratore

E: numero degli aerogeneratori

H: altezza dell'aerogeneratore, intesa come somma di altezza del mozzo e raggio del rotore.



*Fig. 9 – Analisi di impatto visuale.*

Si è pertanto proceduto all'inserimento georeferenziato degli aerogeneratori nel modello tridimensionale del terreno del territorio comunale e, all'interno dell'area circolare avente per centro il baricentro dell'impianto e per raggio R, si è andato a valutare il numero di aerogeneratori visibili ad un osservatore posto ad m 1,5 dal suolo, ottenendo il risultato riportato in fig. 9. Le diverse gradazioni stanno ad indicare il numero di aerogeneratori che risultano visibili (il grigio scuro equivale al massimo numero di turbine eoliche mentre il grigio più chiaro rappresenta il minimo).

Dall'integrazione della mappa che definisce le zone a più alto impatto visuale con una ricognizione sul territorio e con considerazioni sulla sensibilità a tale impatto di diverse parti del territorio stesso si sono individuati alcuni recettori sensibili.

Per ciascuno di questi è stata realizzato un fotoinserimento, al fine di valutare l'effettivo impatto visivo della realizzazione della centrale eolica; nelle figure 10 e 11 sono riportati a titolo di esempio due fotoinserimenti, rispettivamente dal centro storico della città di Perugia e da un importante svincolo stradale.



*Fig. 10: vista dal centro città.*

Tale strumento può costituire un ulteriore elemento di valutazione degli effetti della realizzazione del campo eolico, anche per i momenti partecipativi della cittadinanza nel processo di condivisione delle scelte dell'amministrazione.



*Fig. 11: vista dallo svincolo stradale.*

## **7. CONCLUSIONI**

Nel presente lavoro è stata realizzata un'indagine sulla disponibilità della risorsa eolica nel territorio del Comune di Perugia; la valutazione della risorsa e della producibilità degli impianti è stata effettuata grazie ad un codice di calcolo, inserendo il modello altimetrico del terreno e la modellazione accurata della rugosità del territorio esaminato. Si sono quindi scelti degli aerogeneratori di taglia medio-alta e si sono condotte numerose simulazioni per i due siti prescelti, al fine di ottimizzare la produzione complessiva su base annua. Si sono quindi valutati i benefici ambientali delle installazioni eoliche ed il loro contributo agli obiettivi fissati nel Piano Energetico e Ambientale del Comune di Perugia in termini di riduzioni delle emissioni di gas climalteranti nel territorio. Si è infine condotta un'analisi, mediante una procedura originale, dell'impatto visivo causato dagli impianti eolici nel territorio comunale, ponendo particolare attenzione ad alcuni ricettori sensibili (punti panoramici privilegiati, centro storico della città di Perugia). I risultati mostrano che uno dei due siti è idoneo per la realizzazione di un parco eolico da circa 25 MW, con 15 aerogeneratori, ed una producibilità annua di circa 30 GWh. La prosecuzione del lavoro prevede la esecuzione di misure anemometriche in situ e l'approfondimento delle analisi energetiche ed ambientali.

## **Bibliografia**

- [1] "Piano Energetico e Ambientale del Comune di Perugia, Piano Definitivo", Ottobre 2003.
- [2] Pandolfi S. – Nardi M. – Pitzalis M. (1986): "Il vento a Perugia", Ed. Baltadori, Perugia 1986.
- [3] Troen I., Lundtang Petersen E. (1990): "European wind atlas", Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1990.
- [4] Fedele L. (1996): "Stato dell'arte delle fonti energetiche nuove e rinnovabili in Italia", Ises-Italia, Roma, 1996.
- [5] Governo italiano (1999): "Libro bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili", aprile 1999.
- [6] Giunta Regionale della Regione Toscana (1998): "Linee Guida per la valutazione dell'impatto ambientale", 1998.