



Comune di SAN SEVERO



Comune di RIGNANO GARGANICO



REGIONE PUGLIA

PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO "FLORIO"

Nei Comuni di San Severo e Rignano Garganico

N.32 aerogeneratori di potenza fino a 7,2MW

PREVISIONE DELL'IMPATTO DOVUTO ALLE VIBRAZIONI

Integrazione per riscontro al punto 5.5 del Comitato

ISO 2631-2

UNI 9614

EC 1 - UNI 11048

ISO 9916

Committente:



NVA S.r.l.
Via Lepetit, 8
20045 Lainate (MI)
info@nvarenewables.com
nva.srl@pecimprese.it

Visti:

Progettazione:



Tecnico Competente:

Ing. Francesco Di Cosmo

Elaborazione:

Maggio 2024

PREMESSA

Il presente documento viene redatto, oltre che al fine di attestare la compatibilità alle norme di settore ambientali, di sicurezza e igienico-sanitarie, in ottemperanza alla richiesta del comitato di valutazione del MASE di cui al punto 5.5 che di seguito si riporta:

Si richiede inoltre di produrre una valutazione di tipo quantitativo anche del possibile impatto dalla matrice vibrazioni nelle diverse fasi (realizzazione, esercizio e dismissione) del progetto in valutazione.

Il presente progetto è costituito da 32 aerogeneratori e opere di connessione da ubicare nei Comuni di San Severo e Rignano Garganico.

L'aerogeneratore che in intende installare presenta le seguenti caratteristiche: marca Vestas V172-7.2, potenza nominale fino a 7,2MW, diametro rotore m.172, altezza mozzo m.175, altezza complessiva m.261, rpm 9,5.

La presente relazione, nel dettaglio, si pone lo scopo di valutare l'entità delle vibrazioni trasmesse durante la fase di cantiere, per la realizzazione del progetto e dismissione, e durante la fase di esercizio del parco eolico al fine di verificare che queste non arrechino disturbo alle attività circostanti, alla popolazione umana ed in generale ai recettori sensibili.

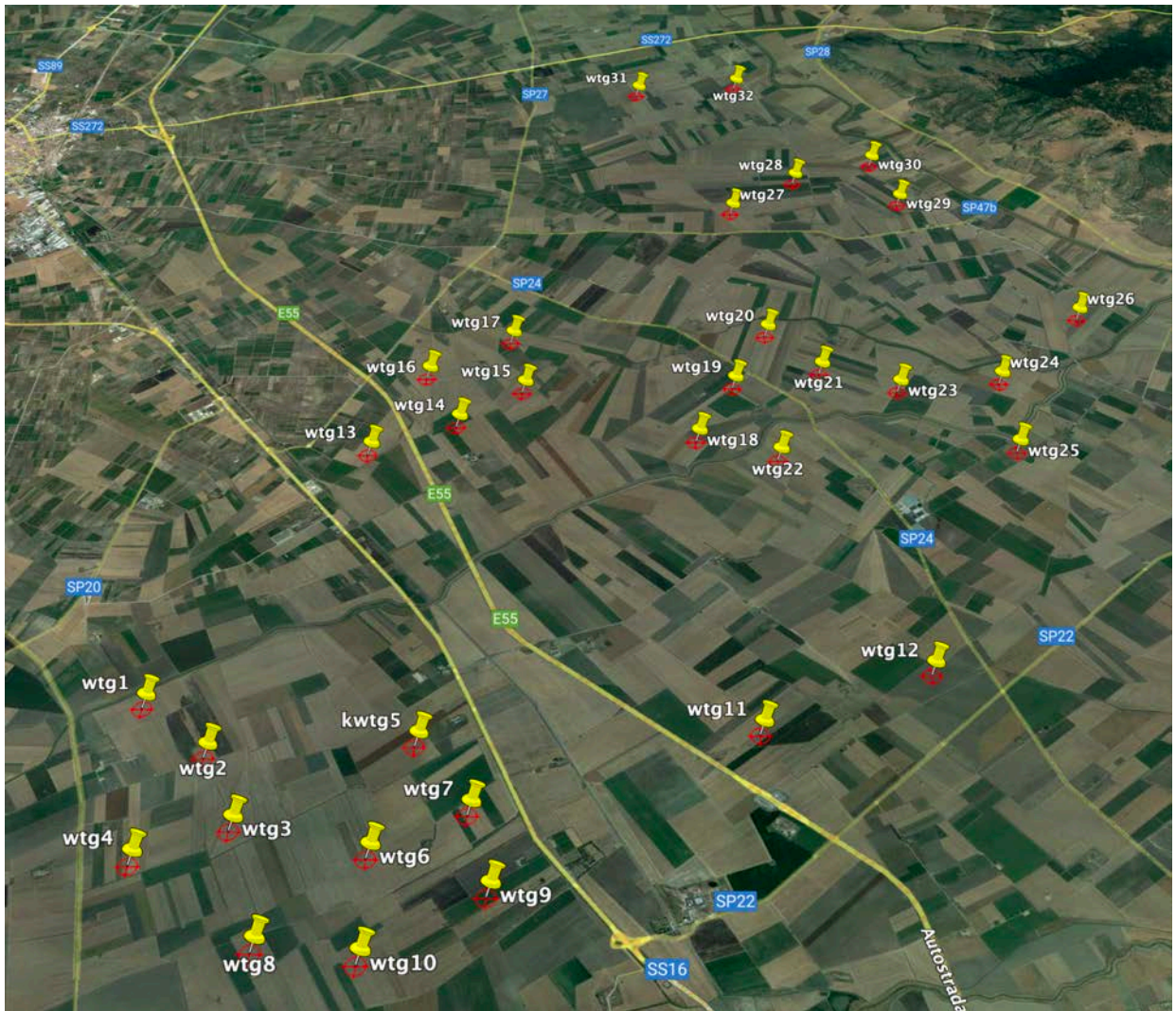
La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione agli effetti delle vibrazioni deve consentire di individuare e stimare le modifiche e/o le interferenze introdotte dall'intervento proposto e valutarne la compatibilità con gli standard esistenti, in riferimento alla verifica sia del disturbo sull'uomo, sia del danno agli edifici per la salvaguardia del patrimonio architettonico/archeologico.

INQUADRAMENTO TERRITORIALE E DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO

L'area prevista per l'installazione dell'impianto eolico è ubicata a sud-est del centro abitato di San Severo (FG). L'aerogeneratore n.13 è il più vicino al centro abitato (area industriale) di San Severo e dista circa km 5,7.

Il progetto prevede la costruzione di:

- un impianto eolico di 32 aerogeneratori con cabina di trasformazione 0,6/36kV ubicati 30 nel Comune di San Severo e 2 nel Comune di Rignano Garganico.



- i cavidotti di interconnessione in A.T. (36kV) interni all'impianto
- una cabina di raccolta e trasformazione 36/150kV, ubicata tra gli aerogeneratori n.11 e n.12
- il cavidotto esterno che parte dalla cabina di interconnessione fino al punto di consegna dell'energia prodotta, previsto nella Stazione Primaria del GSE (Terna SpA). In sostanza il cavidotto esterno sarà costituito da una dorsale principale (in colore rosso nella ortofoto seguente) a 150kV che parte dalla cabina di raccolta e trasformazione 36/150kV e arriva alla sottostazione di consegna al GSE.



La numerazione e le coordinate geografiche sono le seguenti:

wtg	COORDINATE UTM 33N WGS84	
	est	nord
1	535794.0963	4605545.0320
2	536485.7283	4604951.6200
3	536863.4638	4604127.2815
4	536038.5356	4603751.0683
5	538426.9995	4605099.5548
6	538126.9723	4603834.7242
7	538981.0000	4604308.0001
8	537261.7296	4602865.5075
9	539220.0000	4603434.0001
10	538172.0000	4602751.0001
11	541651.0000	4605254.0001
12	543328.0000	4606000.0000
13	537502.9047	4609131.8154
14	538422.7671	4609593.8051
15	539113.0295	4610179.6884
16	538016.7923	4610420.5089
17	538924.6698	4611066.5214
18	541068.0000	4609364.0000
19	541480.0000	4610270.0001
20	541875.0000	4611202.0000
21	542470.0000	4610523.0000
22	541952.0000	4609066.0000
23	543337.0000	4610213.0000
24	544500.0000	4610366.0000
25	544555.5749	4609211.2393
26	545553.0616	4611543.3824
27	541514.1826	4613659.3505
28	542323.9719	4614333.4034
29	543628.3258	4613867.3850
30	543337.0000	4614747.0000
31	540281.0117	4616440.1598
32	541613.4292	4616627.2147

Coordinate relative all'ubicazione georeferenziata delle singole turbine nel sistema di riferimento UTM 84-33N.

Le principali caratteristiche degli aerogeneratori sono:

marca Vestas V172-7.2, potenza nominale fino a 7,2MW, diametro rotore m.172, altezza mozzo m.175, altezza complessiva m.261, rpm 9,5.

All'interno di ogni torre è ubicato l'impianto di trasformazione per il collegamento alla cabina di raccolta e trasformazione (cabina di interconnessione), questo consentirà l'elevazione della tensione al valore di trasporto: da 720 V (tensione in uscita dal generatore) a 36 kV (tensione in uscita dal trasformatore). L'energia prodotta verrà trasportata alla cabina di interconnessione tramite cavidotti interrati (a 36kV) che saranno ubicati quasi sempre lungo la rete viaria esistente, tranne i primi tratti a partire da ogni pala e fino al raggiungimento della viabilità secondaria.

CENSIMENTO DEI RICETTORI CHE SARANNO INTERESSATI DA EVENTUALI VIBRAZIONI

L'indicazione più efficace per la definizione di "Ricettore sensibile" la troviamo nel D.M. 01/06/2022 "Determinazione dei criteri per la misurazione del rumore emesso dagli impianti eolici" all'art. 2, comma 1, lettera k e lettera l che qui si riportano testualmente.

k. Ricettore: qualsiasi edificio adibito ad ambiente abitativo individuato dagli strumenti urbanistici comprese le relative aree esterne di pertinenza, o ad attività lavorativa e ricreativa...;

l. Ricettore sensibile: edificio adibito a scuola, ospedale, casa di cura o casa di riposo;

La definizione di ambiente abitativo la troviamo all'art. 2, comma 1, lettera b della legge 447/1995 che recita: "*b) ambiente abitativo: ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o di comunità ed utilizzato per le diverse attività umane, fatta eccezione per gli ambienti destinati ad attività produttive per i quali resta ferma la disciplina di cui al D.Lgs. 15 agosto 1991, n. 277 (legge in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro), salvo per quanto concerne l'immissione di rumore da sorgenti sonore esterne ai locali in cui si svolgono le attività produttive*".

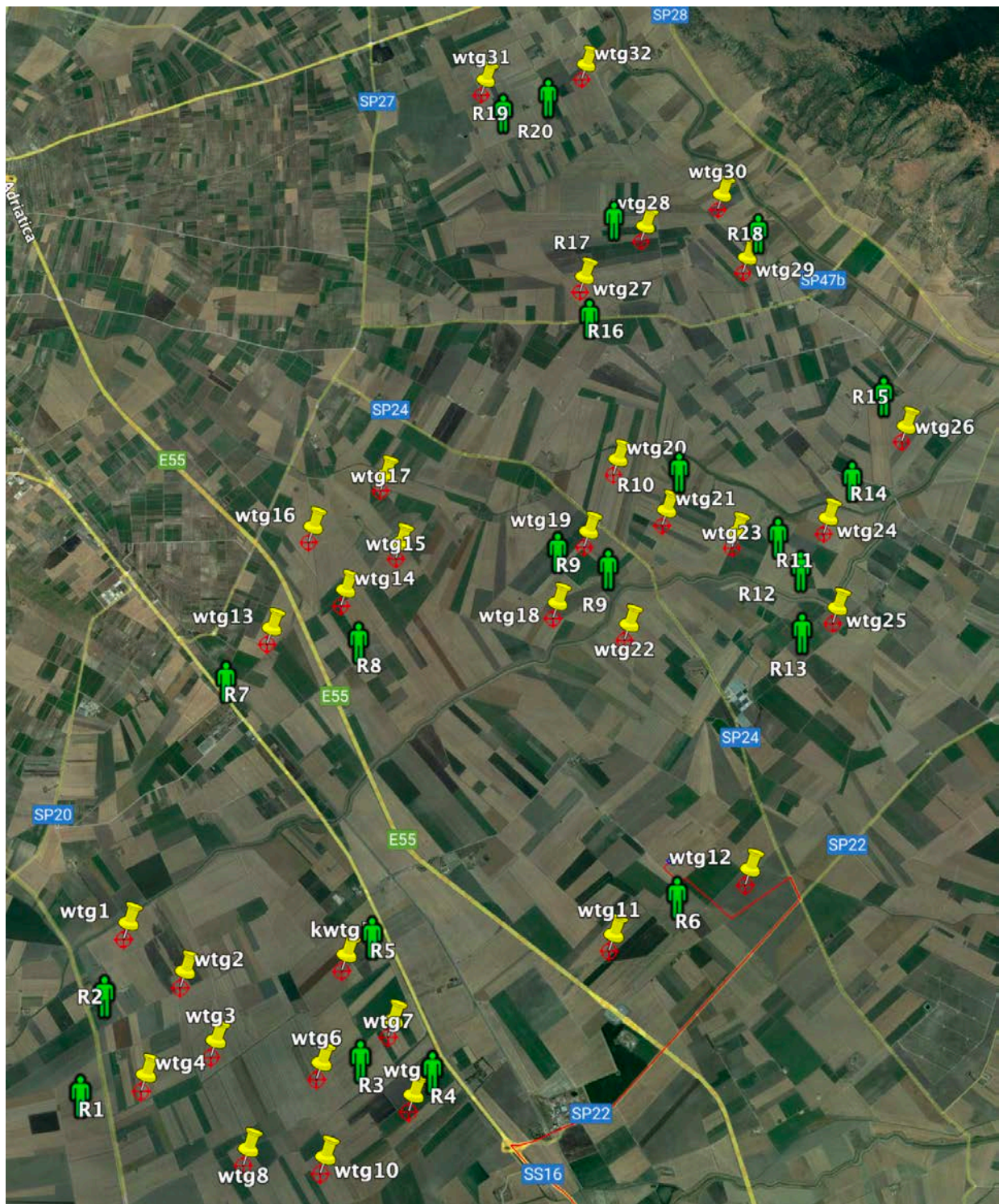
Ulteriore legislazione di protezione da campi elettromagnetici, descrive l'ambiente abitativo quando la permanenza dell'uomo sia superiore alle 4 ore giornaliere.

In sintesi, dunque, un ricettore per essere tale deve essere un ambiente abitato da persone per più di 4 ore giorno.

Un ricettore per essere sensibile deve essere un edificio adibito a scuola, ospedale, casa di cura o casa di riposo.

Sulla base di tali definizioni si è svolta l'indagine per individuare i ricettori più prossimi all'impianto onde verificare l'impatto vibrazionale ad essi indotto.

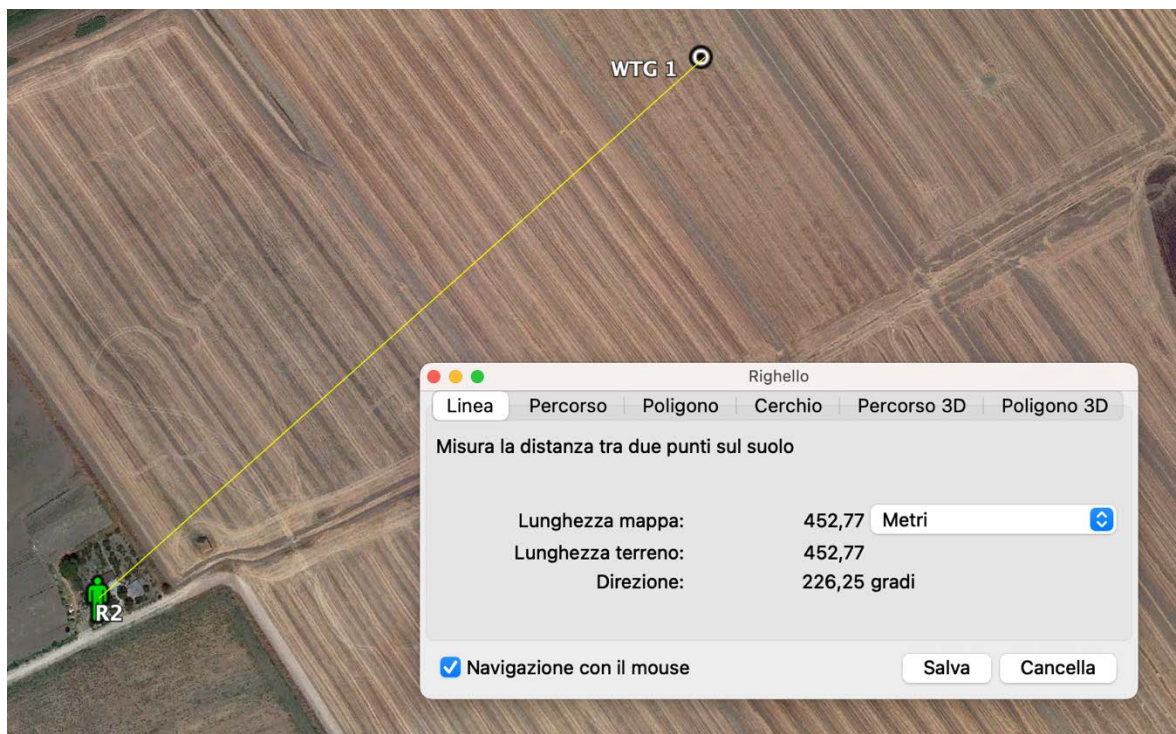
La zona in cui si intende sviluppare l'impianto, risulta priva di ricettori sensibili, ma presenta 20 ricettori non sensibili.



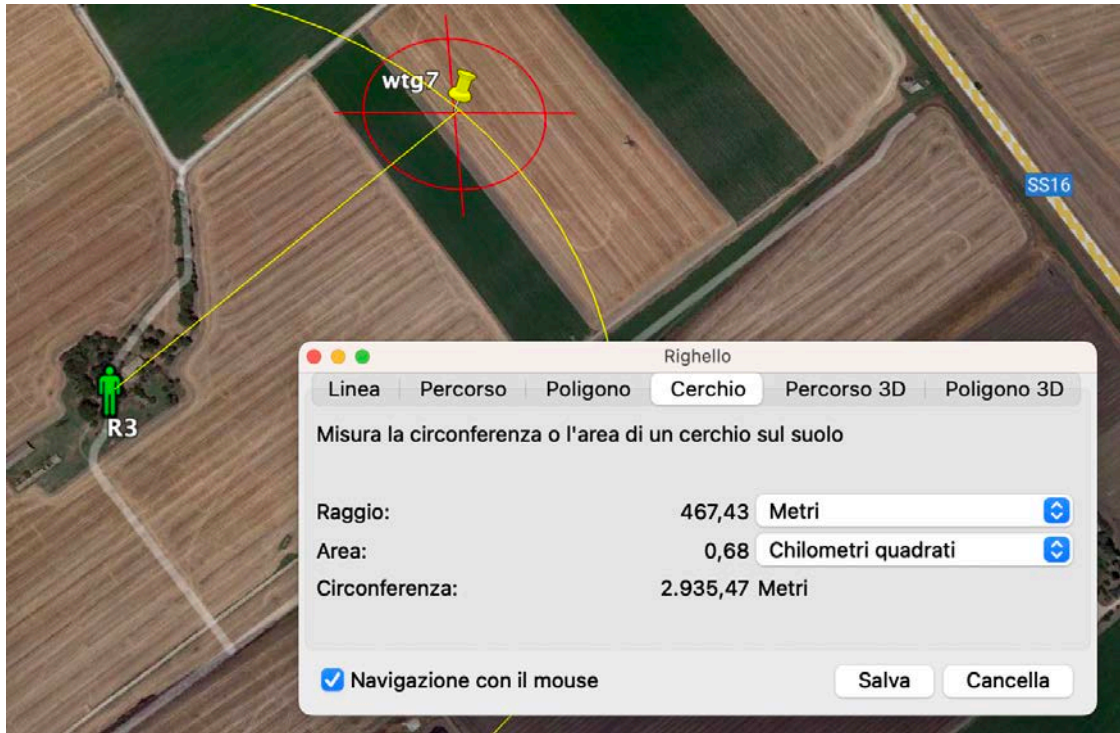
Si presentano le seguenti situazioni.



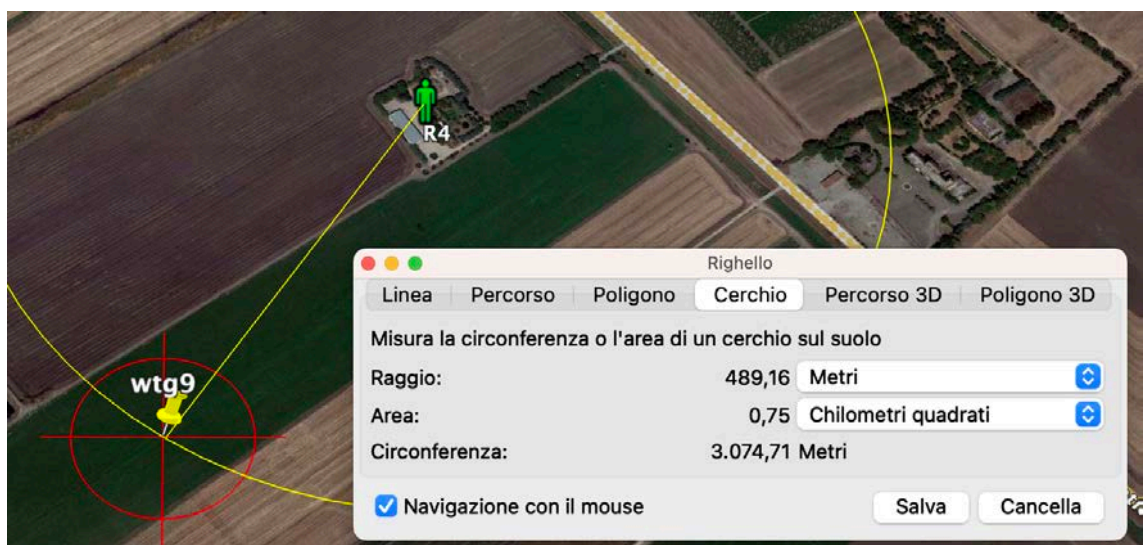
WTG 4 distanza da R1 m.719



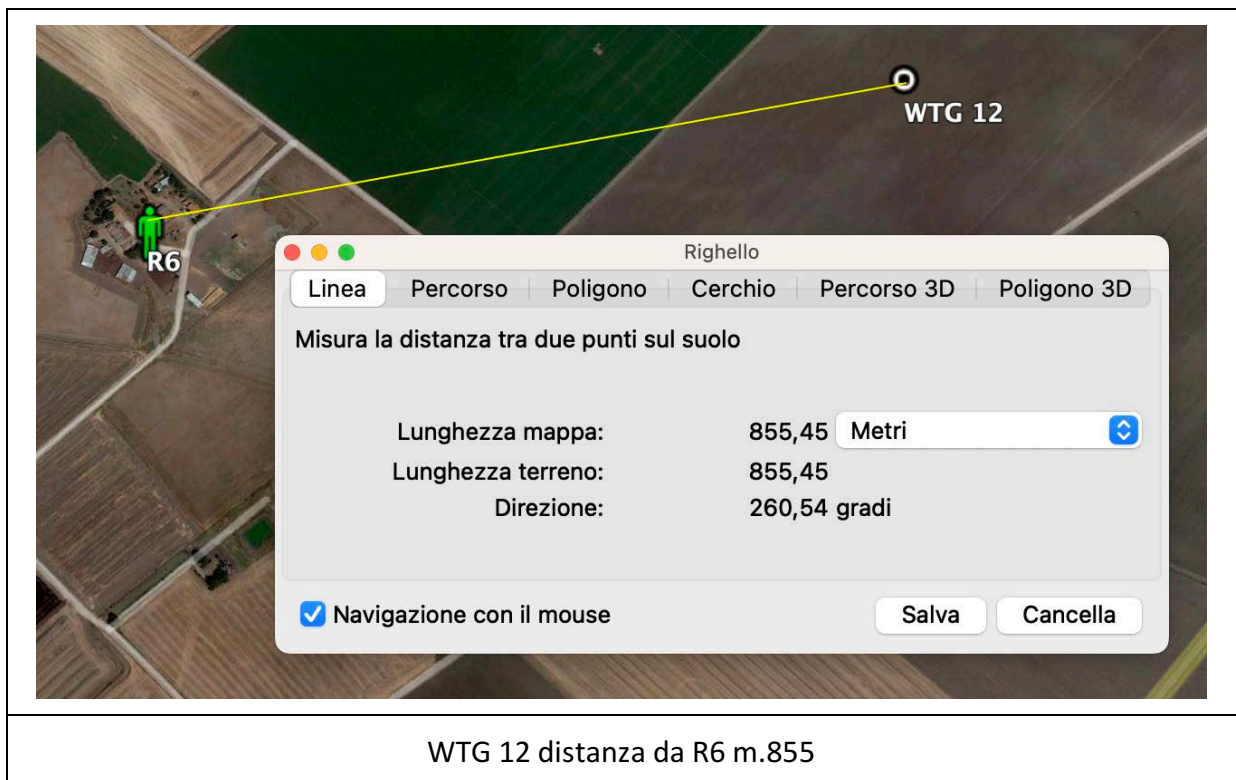
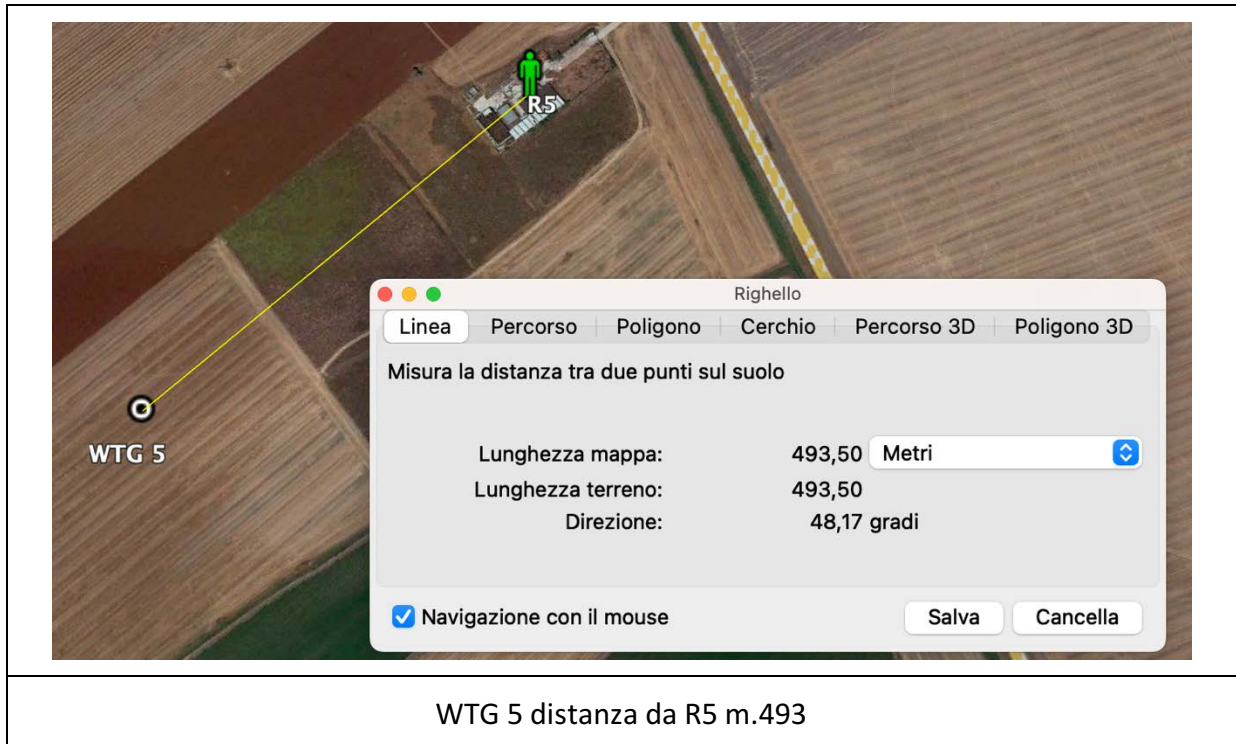
WTG 1 distanza da R2 m.452

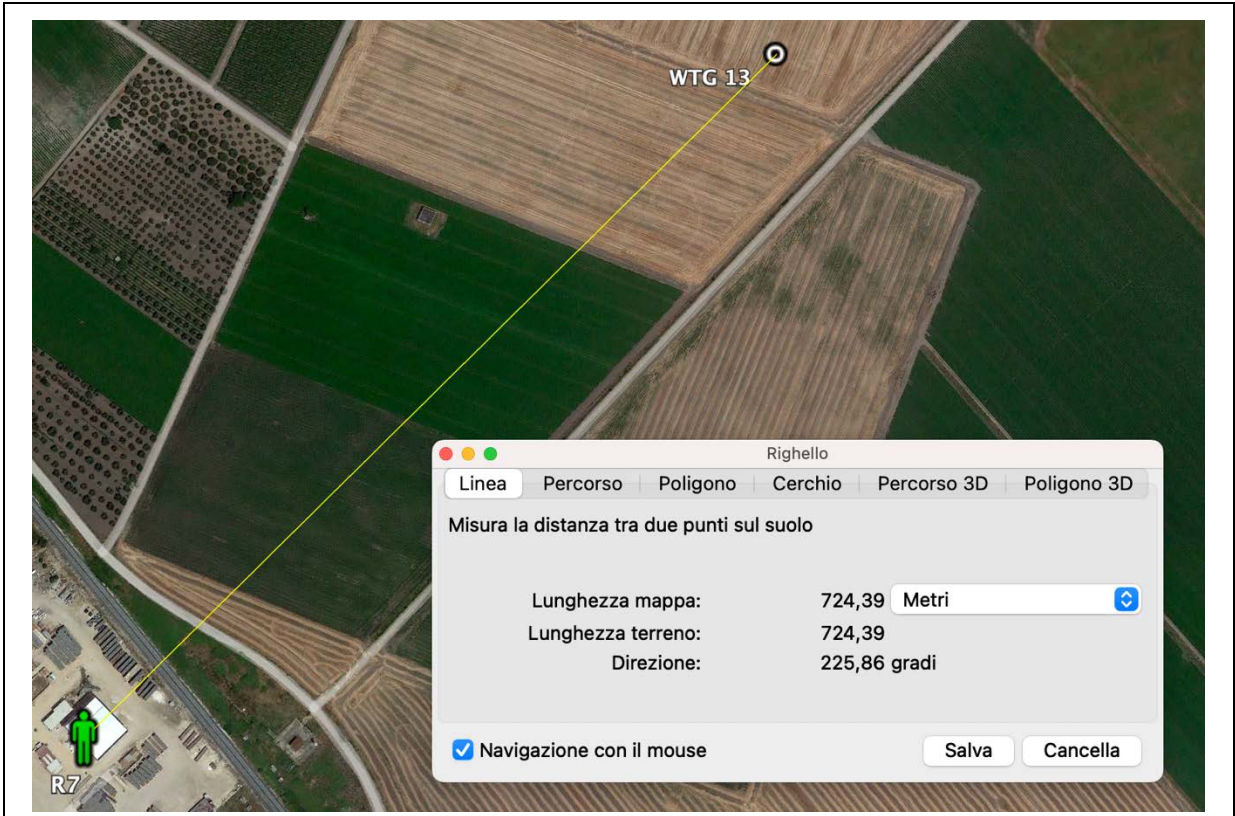


WTG 7 distanza da R3 m.467

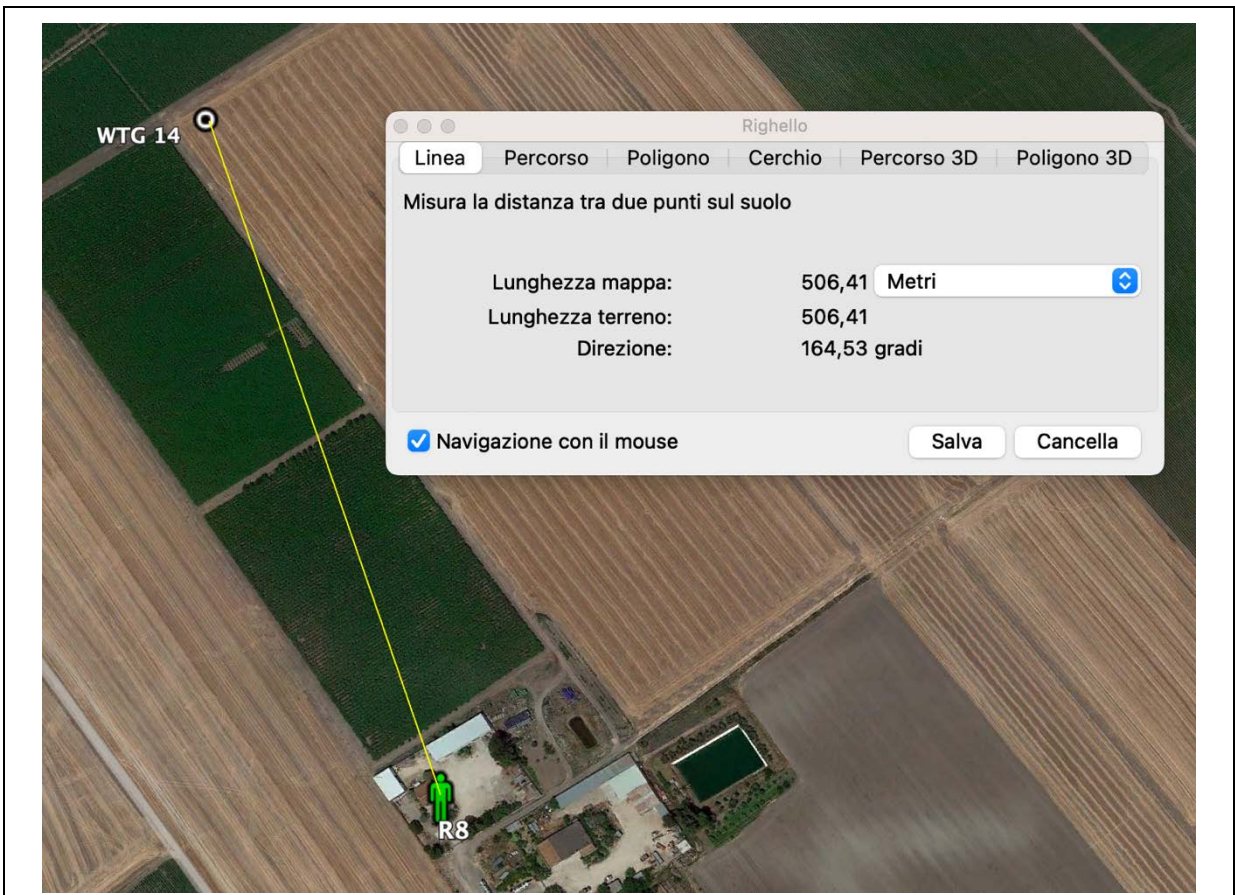


WTG 9 distanza da R4 m.489

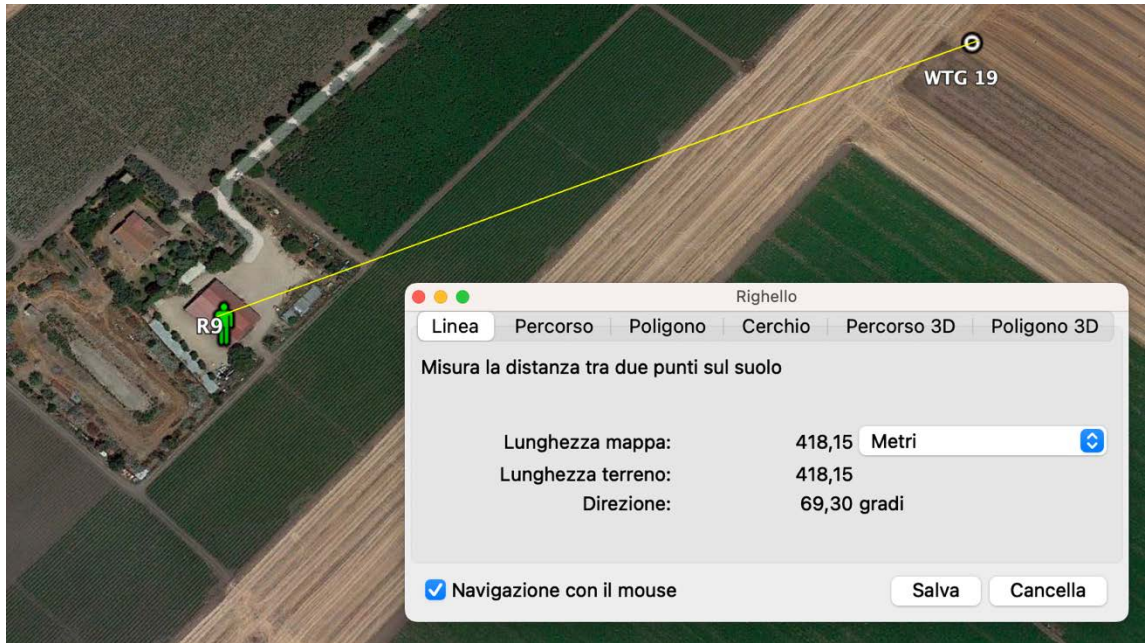




WTG 13 distanza da R7 m.724



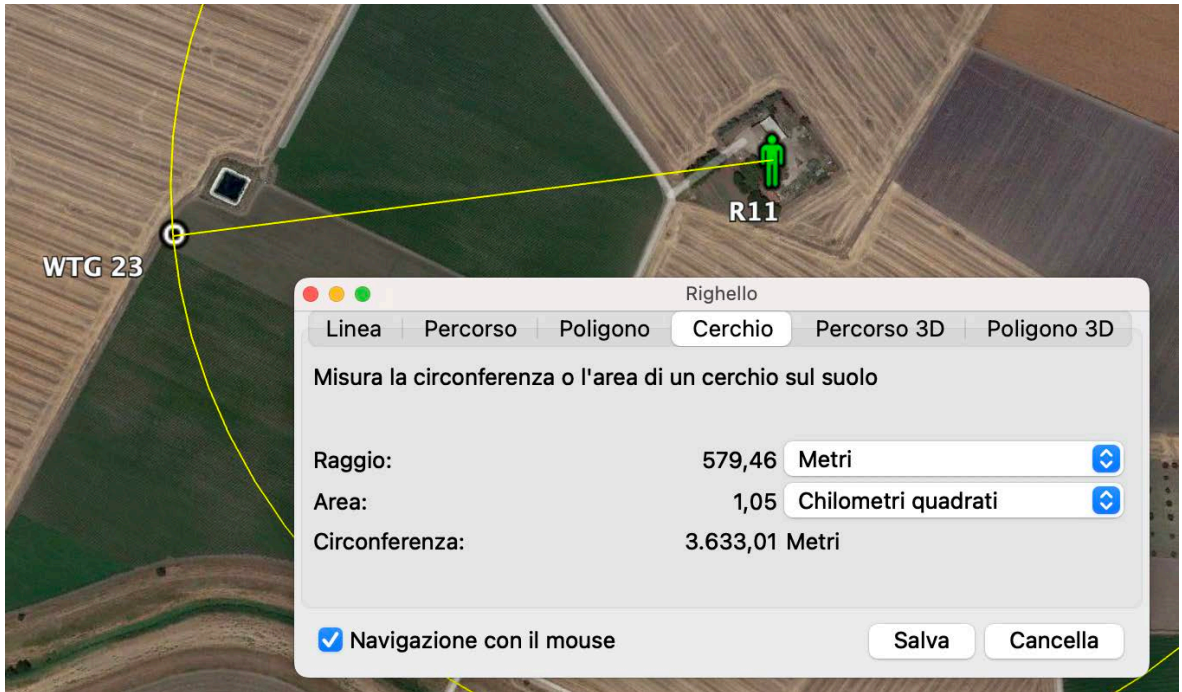
WTG 14 distanza da R8 m.506



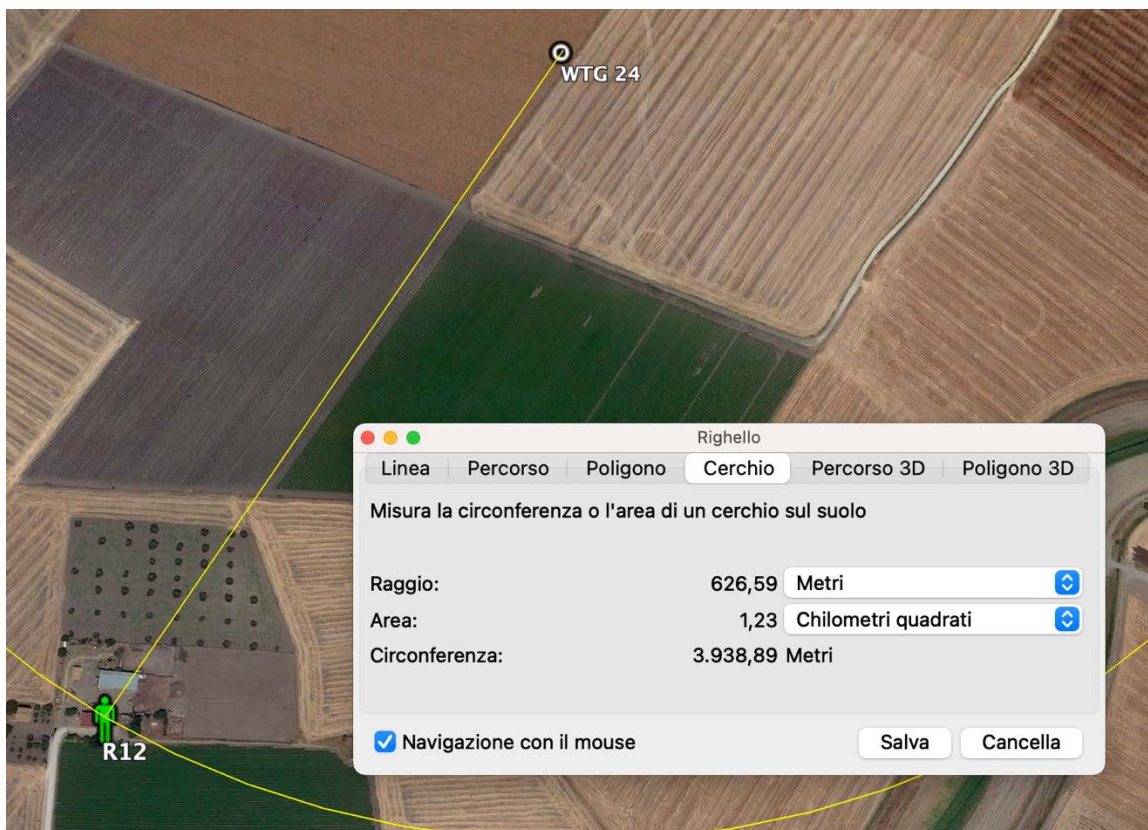
WTG 19 distanza da R9 m.418



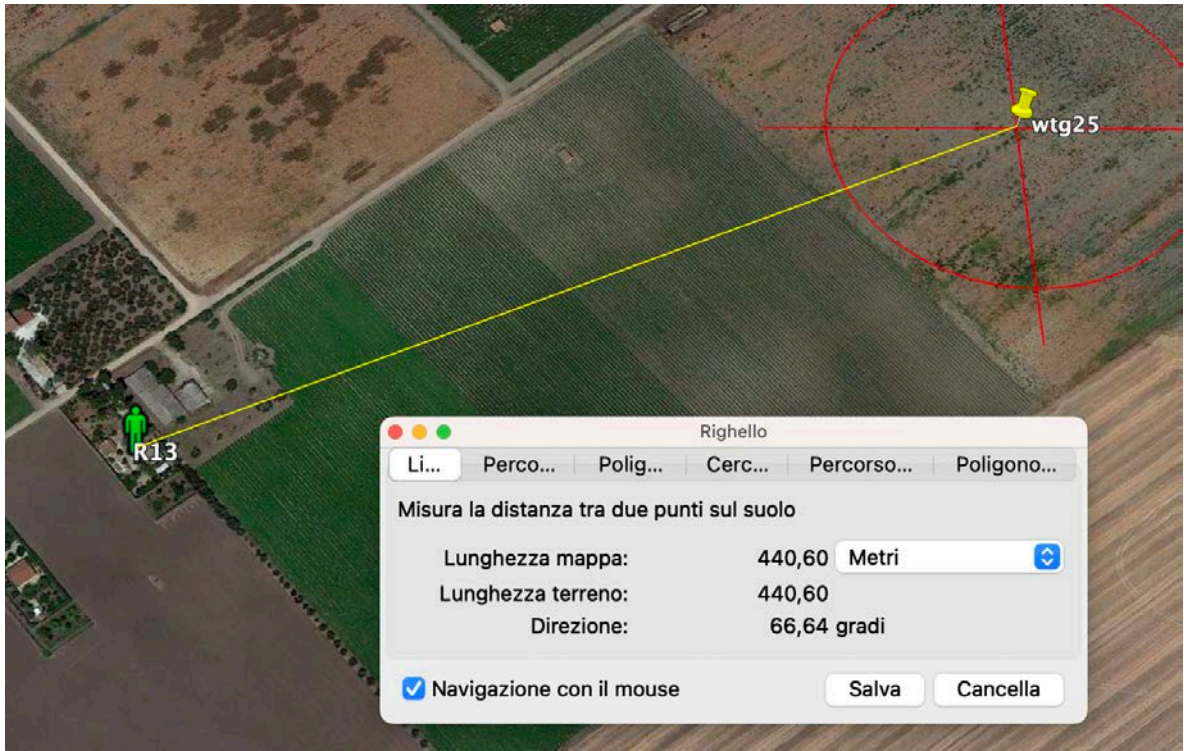
WTG 21 distanza da R10 m.676



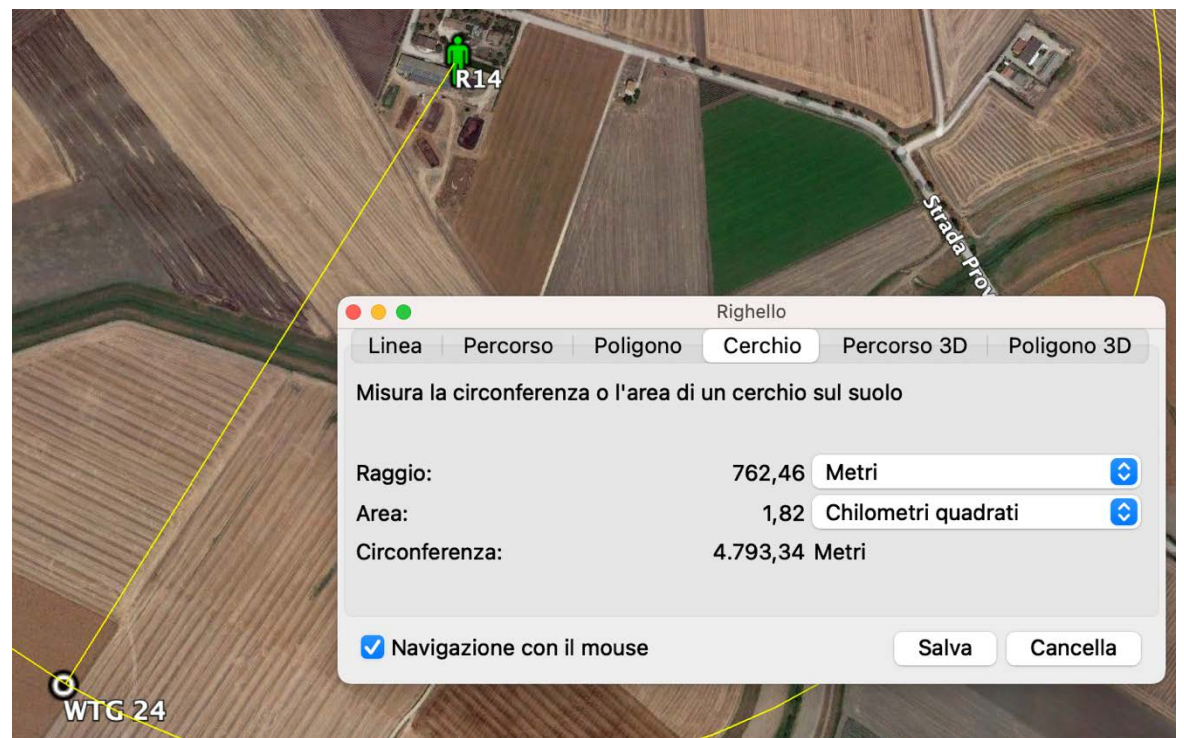
WTG 23 distanza da R11 m.579



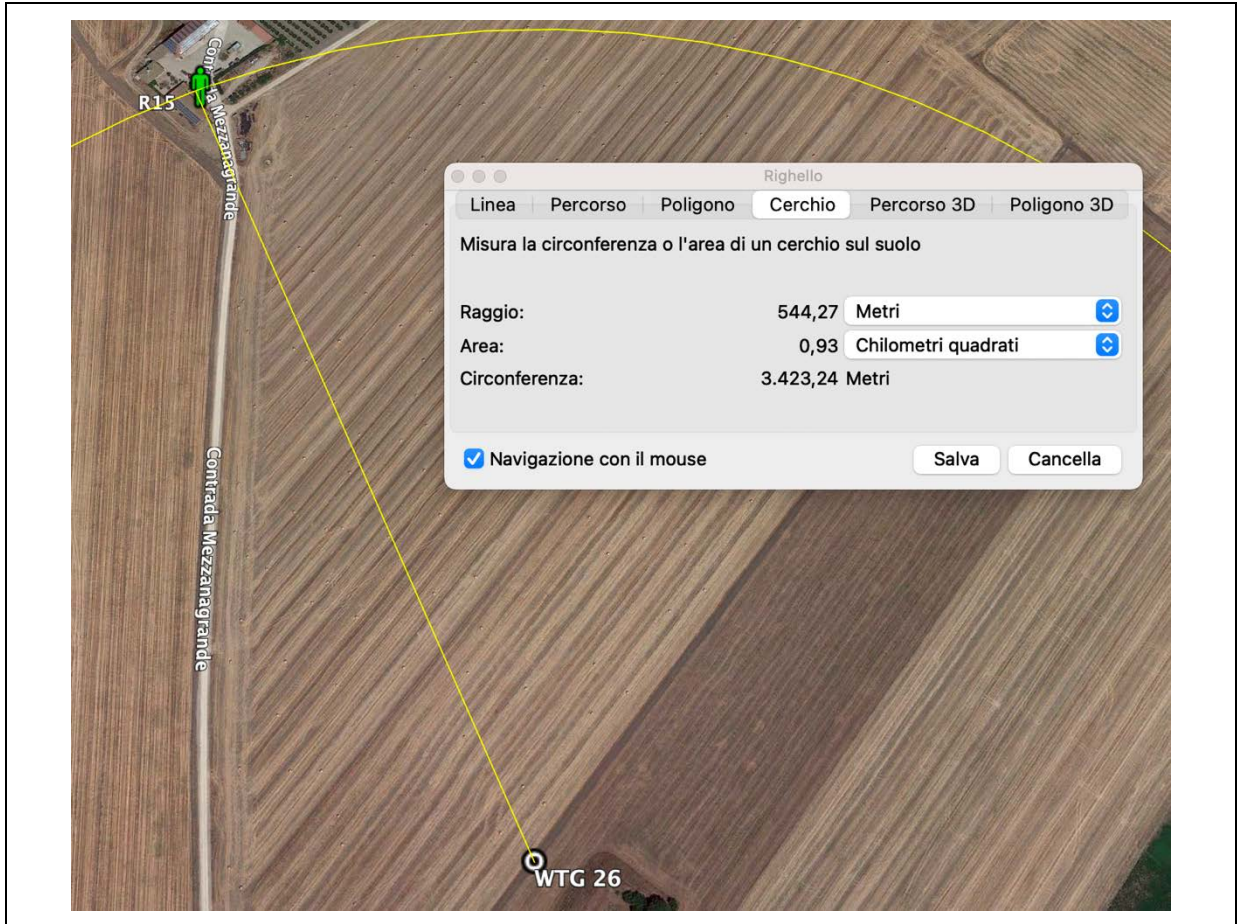
WTG 24 distanza da R12 m.626



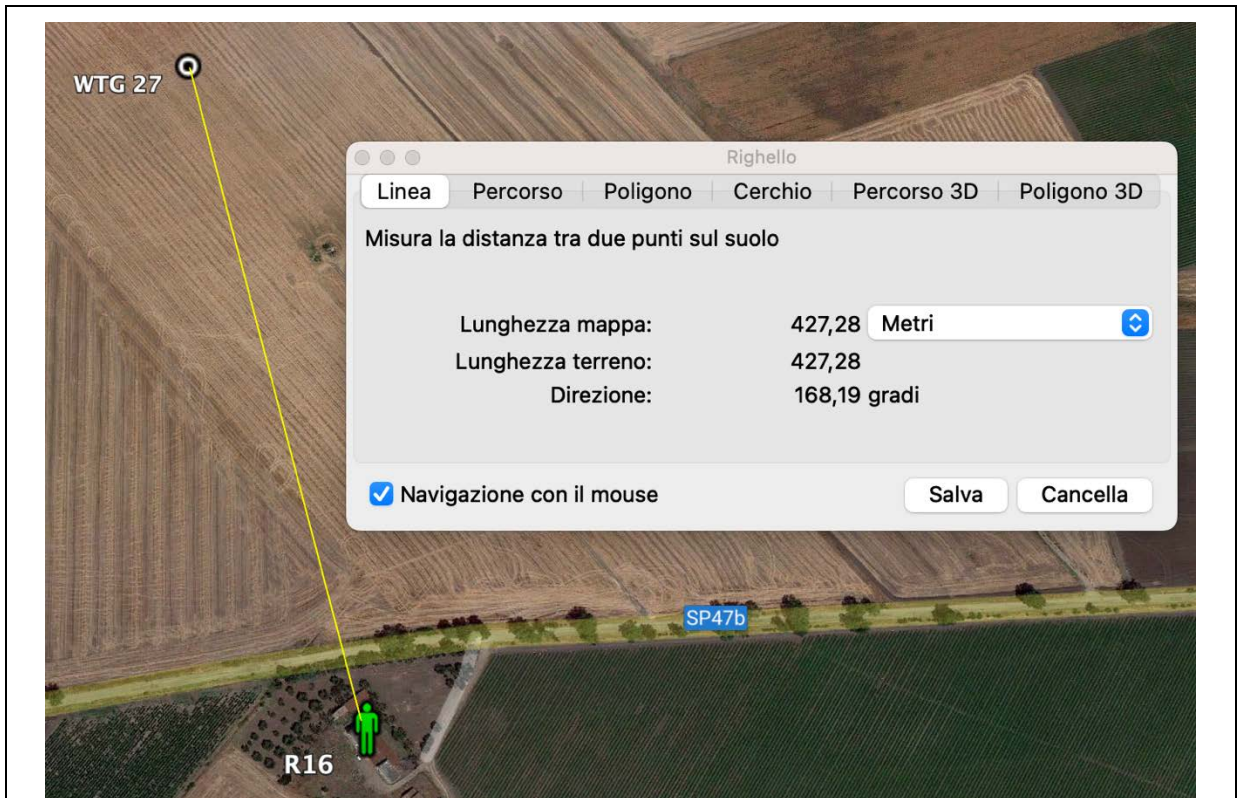
WTG 25 distanza da R13 m.440



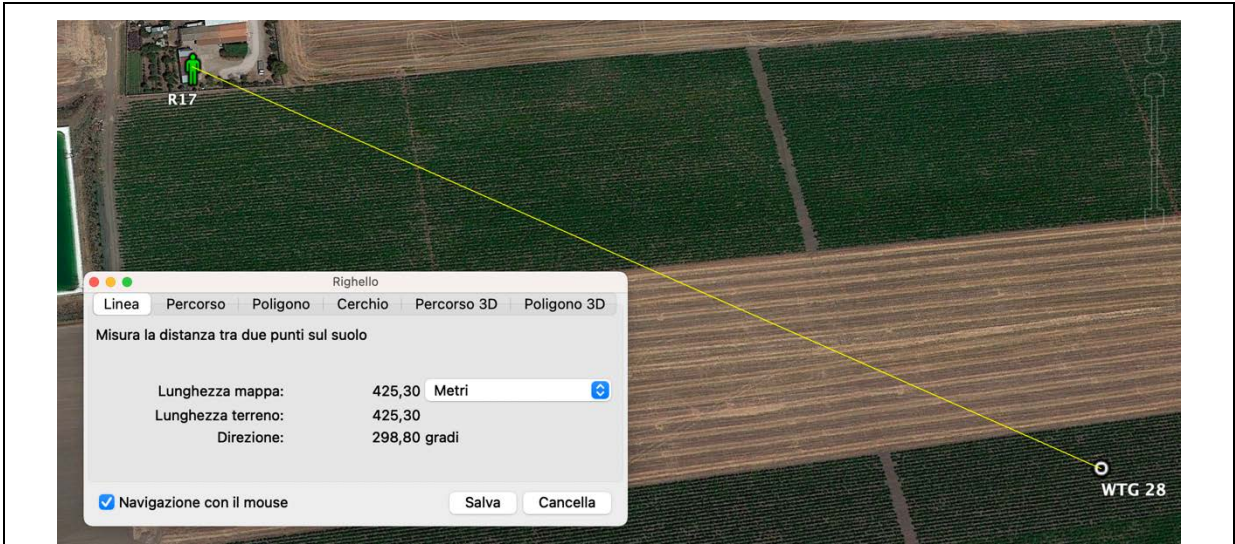
WTG 24 distanza da R14 m.762



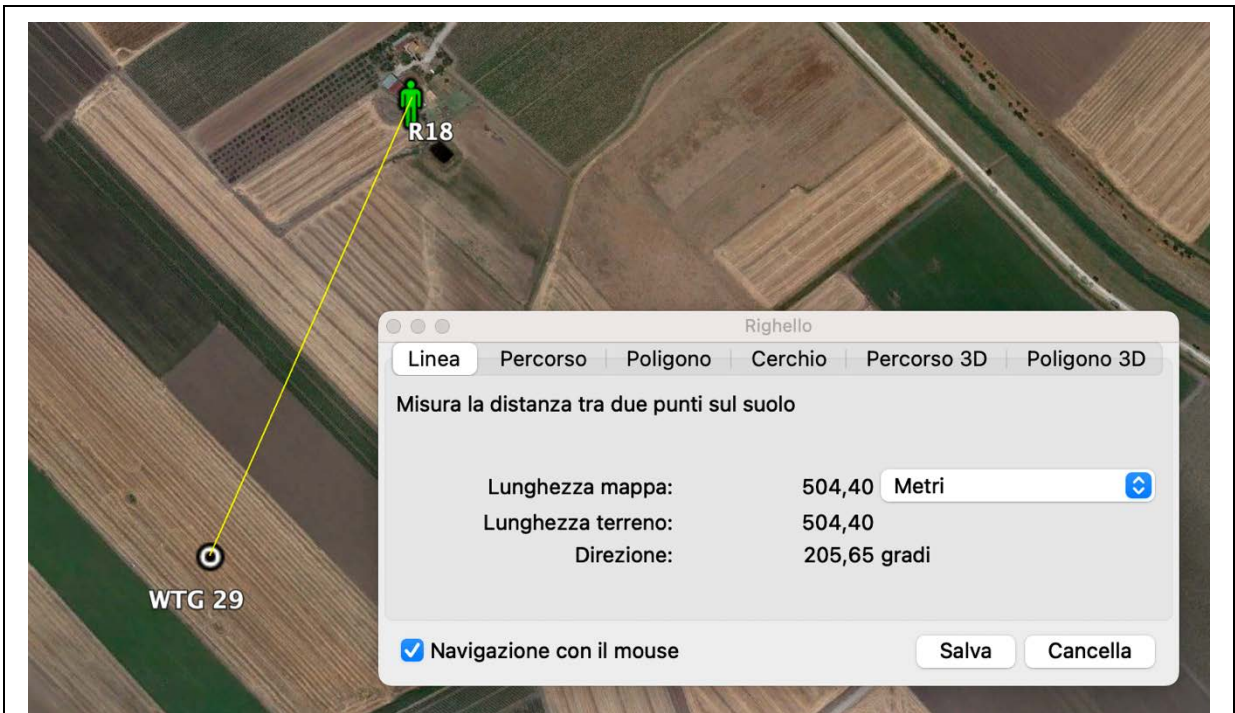
WTG 26 distanza da R15 m.544



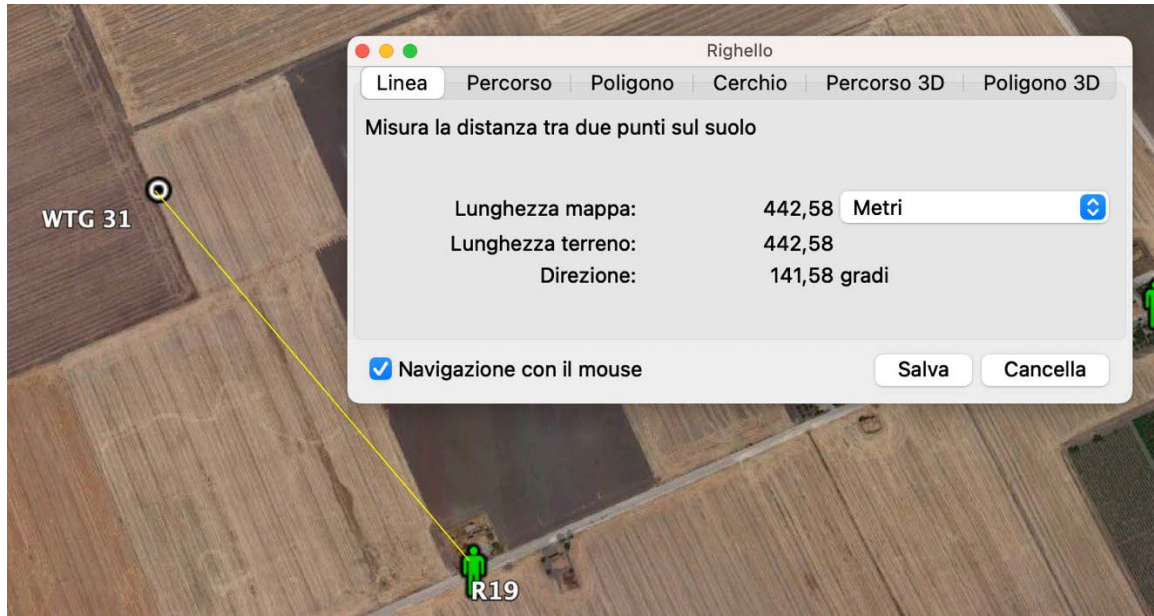
WTG 27 distanza da R16 m.427



WTG 28 distanza da R17 m.425



WTG 29 distanza da R18 m.504



WTG 31 distanza da R19 m.442



WTG 32 distanza da R20 m.531

DEFINIZIONI E NOZIONI GENERALI

Le vibrazioni sono oscillazioni meccaniche generate da onde di pressione che si trasmettono attraverso i corpi.

In sintesi è definito vibrazione un fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido, liquido o gassoso. Una vibrazione è costituita da una fluttuazione rapida intorno ad una posizione di equilibrio; il movimento netto dell'elemento posto in vibrazione è quindi nullo.

L'oscillazione è il movimento che un punto mobile compie per ritornare alla posizione di partenza.

Il tempo che intercorre tra due passaggi nel punto di equilibrio (o punto di partenza) è detto periodo (o ciclo).

Il numero di periodi al secondo costituisce la frequenza di una vibrazione, espressa in Hertz (Hz).

In funzione degli effetti fisiopatologici sull'uomo le vibrazioni sono suddivise in tre principali bande di frequenza:

- 0-2 Hz: oscillazioni a bassa frequenza, generate dai mezzi di trasporto (terrestri, aere marittimi)
- 2-20 Hz: oscillazioni a media frequenza, generate da macchine ed impianti industriali
- > 20-30 Hz: oscillazioni ad alta frequenza, generate da una gamma ampia di strumenti vibranti diffusi in ambito industriale.

Le vibrazioni sono caratterizzate inoltre da tre ulteriori parametri: l'ampiezza, la velocità e l'accelerazione dello spostamento.

Un'onda è una perturbazione di tipo elastico che si propaga da un punto ad un altro attraversando un materiale oppure sulla superficie dello stesso, anche se non è implicito il suo spostamento definitivo. Le onde si distinguono pertanto in onde di volume ed onde di superficie.

La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione agli effetti delle vibrazioni deve consentire di individuare e stimare le modifiche e/o le interferenze introdotte dall'intervento proposto e valutarne la compatibilità con gli standard esistenti, in riferimento alla verifica sia del disturbo sull'uomo, sia del danno agli edifici per la salvaguardia del patrimonio architettonico/archeologico.

Quando viene imposto sul terreno un prefissato livello di vibrazione, questo si propaga nel mezzo, subendo una attenuazione dipendente da natura del terreno, frequenza del segnale, distanza tra sorgente e ricevitore.

Il modello di propagazione valido per tutti i tipi di onde si basa sulla seguente relazione matematica:

$$w_2(d, f) = w_1(d_0, f) \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \cdot e^{-\alpha f(d-d_0)}$$

dove:

α è il coefficiente di attenuazione del materiale,

c la velocità di propagazione in m/s,

f la frequenza in Hz,

d la distanza in m

d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

Il modello semplificato di propagazione si riferisce ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, ipotizzato omogeneo ed isotropo.

Differenti tipologie di fondazioni forniscono diversi effetti di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Allo stato attuale non esiste una legge a livello nazionale che stabilisca valori limite per l'esposizione alle vibrazioni; tuttavia esistono alcune norme tecniche nazionali ed internazionali cui si può far riferimento e che possono fungere da indicatori. Tali norme sono distintamente orientate e relative a:

Esposizione Umana:

- ISO 2631-2: Valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione del corpo intero – Vibrazione negli edifici.
- UNI 9614: Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo
- EC 1 - UNI 11048: Vibrazioni meccaniche ed urti - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo

Danni ad edifici:

- ISO 9916: Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici

Le aree di cantiere per la realizzazione di impianti eolici, e le tematiche ad esse relative oggetto di tale relazione, interessano solitamente suoli e zone a carattere quasi esclusivamente di tipo rurale localizzate e pertanto in luoghi ove la presenza di strutture ed edifici è solitamente scarsa, poco concentrata e costituita per lo più da fabbricati per il ricovero di mezzi agricoli o, in casi meno frequenti, da strutture abitative di altezza comunque contenuta (max 2-3 piani).

In questo, risulta chiaramente evidente come la tematica legata ai potenziali danni agli edifici sia intrinsecamente esclusa, e quanto poco probabile e/o rilevante possano essere invece le ripercussioni in termini di esposizione umana essendo le aree di cantiere, di tipo temporaneo, dislocate in ambiente aperto ove la propagazione di rumore e vibrazioni è di tipo sferico (quindi proiettata lungo tutte le direzioni e non in modo esclusivo e diretto nei confronti di una o più zone edificate) e dove non sono valutati e considerati tutti gli elementi di tipo naturale e/o artificiale, la cui presenza esercita un effetto barriera alla propagazione delle onde.

Le vibrazioni possono essere valutate in due diverse modalità:

- in termini di spostamento (variazione della posizione di un corpo o di una particella, che è di solito misurata a partire dalla media delle posizioni assunte dal corpo o dalla particella stessa oppure dalla posizione di quiete);
- in termini di velocità (variazione dello spostamento rispetto al punto di riferimento, in un determinato intervallo di tempo):

La grandezza collegata alla risposta umana alle vibrazioni è il valore efficace della velocità (RMS), definito come la radice quadrata della media della velocità istantanea al quadrato. Infine si utilizza, come per le grandezze acustiche, il **livello associato al valore efficace della velocità L_V** , che si misura in dB ed è definito a seguire attraverso l'equazione:

$$L_V = 20 \log \left(\frac{v}{v_0} \right)$$

dove

v è il valore efficace della velocità istantanea

v_0 è il valore di riferimento ($v_0 = 10^{-9}$ m/sec)

In termini di accelerazione: le grandezze impiegate sono le corrispondenti a quelle descritte per la velocità.

In particolare il **livello dell'accelerazione LA (espresso in dB)** è definito come:

$$L_A = 20 \log \left(\frac{a}{a_0} \right)$$

dove

a è il valore efficace dell'accelerazione istantanea

a_0 è il valore di riferimento ($a_0 = 10^{-6}$ m/sec²)

I parametri fisici che influenzano le vibrazioni via terra si possono dividere in tre categorie:

- 1) Fattori legati a tipologie di sorgenti e modalità operative (Fase di Cantiere)
- 2) Fattori Geologici
- 3) Fattori Strutturali e caratteristiche dei recettori (Edifici-Strutture e Fabbricati)

1. Sorgenti e modalità operative:

In questa categoria sono inclusi tutti i parametri collegati ai mezzi di escavazione e sbancamento del materiale. Le attività connesse alla fase di escavazione generano livelli vibratori di vari gradi in relazione ai macchinari e ai mezzi impiegati. Le attività che tipicamente generano livelli di vibrazioni pericolosi sono associate all'uso di esplosivi e attrezzature d'impatto (battipalo) che, però questo nello specifico caso dell'eolico, non sono impiegati.

2. Fattori Geologici:

Le condizioni e la tipologia del suolo e del substrato influenzano fortemente i livelli vibratori, in particolare assumono particolare rilievo la rigidità, lo smorzamento interno del terreno e la profondità del substrato roccioso. Fattori quali la stratificazione del terreno e profondità delle falde acquifere possono avere effetti significativi sulla propagazione delle vibrazioni via terra.

3. Fattori Strutturali e caratteristiche dei recettori (Edifici-Strutture e Fabbricati):

I problemi legati alla vibrazione via terra si hanno quasi esclusivamente all'interno degli edifici. Quindi le caratteristiche dei recettori costituiscono una componente fondamentale nella valutazione delle vibrazioni. Le vibrazioni indotte da mezzi di escavazione possono essere percepite da persone che si trovano all'esterno, ma è raro che provochino lamentele. I livelli di vibrazione dentro un edificio dipendono dall'energia vibratoria che raggiunge le fondazioni, dall'accoppiamento tra le fondazioni ed il terreno e dalla propagazione della vibrazione attraverso la struttura dell'edificio. Come regola generale si può affermare che più è massivo l'edificio, minore è la sua risposta all'energia vibratoria incidente sul terreno. Le sorgenti di vibrazioni, provocano effetti che si propagano attraverso il terreno e diminuiscono di intensità con la distanza.

Gli edifici subiscono effetti che si possono classificare in una scala da non percepibili (livelli di vibrazione bassi), a suoni a bassa frequenza e vibrazioni percepibili (livelli di vibrazione medi) fino a livelli tali da provocare danni alle strutture.

IL MODELLO PREVISIONALE PER GLI IMPIANTI EOLICI

Gli aerogeneratori sono torri cilindriche fortemente accoppiate con il terreno attraverso fondazioni di pali in cemento armato. Le vibrazioni strutturali della torre e quelle associate al movimento delle eliche sono quindi trasmesse al suolo sia direttamente, che come radiazione infrasonica accoppiata al terreno. La loro intensità risulta funzione della geologia locale, del numero di aerogeneratori e della loro potenza.

Per quanto negli ultimi anni il ricorso all'energia eolica abbia conosciuto una notevole espansione, sono ancora pochi gli studi che riguardano l'impatto degli aerogeneratori in termini di vibrazioni microsismiche.

Le conclusioni raggiunte negli studi di maggior rilevanza applicabili agli aerogeneratori sono:

1. Turbine eoliche a velocità sia fissa che variabile generano vibrazioni a frequenze nell'ordine di 10 Hz, che sono multiple della frequenza di rotazione delle pale
2. Alle vibrazioni direttamente correlabili con la rotazione delle pale se ne aggiungono altre la cui origine è probabilmente da ricondursi alle oscillazioni armoniche del traliccio dell'aerogeneratore sollecitato dall'azione del vento;
3. La rotazione delle pale eoliche genera anche segnali sia infrasonici che acustici;
4. Tuttavia, la propagazione del segnale infrasonico è efficiente solo in condizioni di vento ridotto; unita alle caratteristiche di attenuazione con la distanza del segnale sismico, questa osservazione ha permesso di concludere che le vibrazioni si propagano come onde sismiche superficiali;
5. L'entità della vibrazione sismica generata da un parco eolico composto da aerogeneratori tutti eguali scala con la radice quadrata del numero di aerogeneratori; perciò 100 turbine sono 10, e non 100 volte più rumorose di una singola turbina.
6. All'aumentare del numero di parchi eolici, l'entità della vibrazione sismica attesa è data dalla somma in quadratura delle vibrazioni associate a ciascun parco eolico:

$$A_{tot} = \sqrt{(A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_N^2)};$$

7. La Potenza del segnale sismico è proporzionale alla velocità del vento secondo una legge di potenza: $P=v^{1.93}$, per cui l'ampiezza del segnale sismico dipende in modo quasi lineare dalla velocità del vento;
8. Poiché la potenza della produzione elettrica è proporzionale alla velocità del vento, allora l'ampiezza della vibrazione sismica è circa linearmente dipendente dalla potenza di produzione.

Il livello di vibrazione in corrispondenza di un ricettore ad una distanza x dalla sorgente è pari al livello alla distanza di riferimento x_0 diminuito della somma delle attenuazioni/amplificazioni che si verificano nel terreno tra x_0 e x :

$$L(x) = L(x_0) - \sum_i A_i$$

Il livello di base $L(x_0)$ è generalmente ricavato da misure sperimentali in prossimità della sorgente.

Le componenti di attenuazione/amplificazione delle vibrazioni sono:

- attenuazione per dissipazione interna del terreno;
- attenuazione geometrica, in relazione al tipo di sorgente e di onda
- attenuazione dovuta a ostacoli o discontinuità del terreno
- attenuazione dovuta all'accoppiamento terreno fondazione

- attenuazione dovuta alla propagazione in direzione verticale nel corpo dell'edificio
- amplificazione determinata dai solai

La valutazione previsionale viene elaborata attraverso l'utilizzo di un modello di propagazione classico, la cui procedura per la stima delle vibrazioni indotte viene riportata a seguire:

1. si determinano le apparecchiature impiegate e i relativi livelli di vibrazione forniti, generalmente, a una distanza di riferimento; nel caso in oggetto è stato considerato il valore relativo all'utilizzo della ruspa cingolata [rif. A. Farina "Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali, [rif. A. Farina "Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali, Normativa, tecniche di misura e di calcolo", (2006)] misurato a distanza di 5 m dal centro della sorgente
2. si applica il modello di propagazione classico per la stima del livello di accelerazione prevista descritto dalla seguente equazione (Dong-Soo, Jin-Sun Lee):

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-\alpha(r_2-r_1)}$$

dove

w_1 e w_2 rappresentano le ampiezze delle vibrazioni rispettivamente alla distanza r_1 e r_2 dalla sorgente;

n è il coefficiente di smorzamento geometrico (0,5 – 2);

α è il coefficiente di smorzamento del materiale.

e è il coefficiente di Poisson compreso tra 0 e 0,5

Il coefficiente di smorzamento geometrico rappresenta l'attenuazione che si verifica a causa della diminuzione della densità di energia all'aumentare della distanza dalla sorgente e può essere determinato conoscendo il tipo onda che si propaga, il tipo di sorgente e il luogo di emissione della vibrazione, che generalmente varia tra 0,5 e 2,0. Il coefficiente di smorzamento del materiale tiene conto della riduzione di energia delle vibrazioni a causa dell'attrito e della coesione tra le particelle di terreno, essendo quest'ultimo non perfettamente elastico. Questa attenuazione, dovuta allo smorzamento del materiale, è influenzata dal tipo di terreno e dalla frequenza delle vibrazioni: α può essere calcolato come:

$$\alpha = \frac{\pi \eta f}{c}$$

dove:

η rappresenta il fattore di perdita del terreno,

c rappresenta la velocità di propagazione dell'onda [m/s].

Ne consegue pertanto che per substrati meno duri (più soffici, con minore presenza di componente rocciosa), il valore di attenuazione del mezzo di propagazione risulta più elevato del corrispondente valore per i substrati duri (rocciosi). Tanto più sarà compatta la roccia del substrato, tanto meno sarà attenuato il fenomeno di propagazione. Inoltre, l'attenuazione della propagazione risulta essere maggiore per le vibrazioni ad alte frequenze rispetto alle vibrazioni a basse frequenze. Risulta quindi che la maggiore

propagazione delle vibrazioni si ottiene in presenza di substrati rigidi con trasmissioni a basse frequenze.

La tabella proposta, a seguire, evidenzia e sintetizza esempi di valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali in relazione ai differenti substrati litologici che si possono incontrare.

Tipologia di substrato	Velocità di propagazione onda longitudinale [m/s]	Fattore di perdita [n]	Massa volumica [kg/m ³]
Roccioso	3500	0,01	2650
Sabbioso	600	0,1	1600
Argilloso	1500	0,5	1700

Velocità di propagazione delle onde longitudinali, fattore di perdita e massa volumica per le differenti tipologie di substrato litologico

- Il valore dell'accelerazione determinato al punto 2 permette di calcolare il livello ponderato di accelerazione da confrontare con i criteri di valutazione del disturbo o del danno degli edifici in base alla loro destinazione d'uso.

LA VALUTAZIONE DEL DISTURBO

La valutazione del disturbo (UNI 9614) è effettuata sulla base del valore di accelerazione efficace - ponderato in frequenza - confrontato con una serie di valori limite dipendenti dalle destinazioni d'uso degli edifici e dal periodo di riferimento (giorno/notte).

<i>Limiti UNI 9614</i>				
Destinazione d'uso	Asse Z (m/s ²)	L(dB)	Asse X e Y (m/s ²)	L(dB)
Aree critiche	5.0*10 ⁻³	74	3.6*10 ⁻³	71
Abitazione (notte/giorno)	7.0*10 ⁻³ / 10*10 ⁻³	77/80	5.0*10 ⁻³ / 7.2*10 ⁻³	74/77
Uffici	20*10 ⁻³	86	14.4*10 ⁻³	83
Fabbriche	40*10 ⁻³	92	28.4*10 ⁻³	89

Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i suddetti limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto.

Ai fini pratici, si verifica - a tutte le frequenze - che il limite di disturbo per le persone è decisamente più restrittivo del limite di danno strutturale.

Rischio del danno a strutture ed edifici

Esplosioni, utilizzo ed operazioni effettuate da macchine battipalo, demolizioni, perforazioni, scavi in prossimità di strutture particolarmente sensibili rappresentano le principali attività che solitamente si valutano quando si parla di rischio per strutture derivanti da vibrazioni. I livelli di

impulso e di vibrazione di grande ampiezza devono essere valutati con riferimento ai loro potenziali effetti sui fabbricati e sulle strutture.

La definizione di un limite di sicurezza per la velocità di vibrazione non è univoca: una rassegna completa dei valori di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni, proprio in termini di velocità di picco puntuale (PPV) è riportata nella normativa di riferimento UNI 9916.

Il criterio adottato in questa sede pone i seguenti limiti:

- 5 mm/s per edifici residenziali (vibrazioni durature);
- 2.5 mm/s per edifici storici estremamente fragili (vibrazioni durature);

Tali valori rappresentano i limiti più cautelativi noti in letteratura.

Essi sono generalmente più elevati di quelli derivanti dal non disturbo alle persone. Solo in presenza di un fattore di cresta molto elevato, maggiore di 18 dB, potrebbe infatti verificarsi il caso di superamento del limite di danno strutturale senza che si verifichi il superamento del limite di disturbo alle persone.

Si definisce pertanto "fattore di cresta" la differenza fra il valore massimo di picco di una forma d'onda e il suo valore efficace.

Per una forma d'onda sinusoidale, il fattore di cresta risulta essere pari a 3 dB, per un segnale con più componenti e con forma d'onda molto "aspra", il fattore di cresta può facilmente essere superiore ai 10 dB, ed in alcuni casi (eventi impulsivi quali martellate, esplosioni, etc.) può anche superare i 20 dB.

La circostanza in oggetto risulta però altamente improbabile tanto che è possibile assumere che il rispetto dei limiti di non-disturbo alle persone, fornisce sufficienti garanzie, e quindi necessariamente implica, di non avere effetti dannosi per le strutture edilizie.

Rischio Esposizione Umana – Rischio Disturbo

Nelle strutture classificate come recettori, ed in generale in tutti i corpi di fabbrica o edifici il disturbo può essere percepito sia come vibrazione meccanica degli elementi edilizi (groundborne vibration), sia come rumore irraggiato nei locali dagli orizzontamenti, dalle pareti e dagli infissi (groundborne noise). Tali disturbi, in virtù dei differenti meccanismi dissipativi citati, diminuiscono con la distanza dalla sorgente in modo rapido. Come anticipato, l'entità dell'effetto disturbante legato alla vibrazione dipende da molti altri fattori oltre la distanza dalla sorgente. Tali fattori sono legati alle attenuazioni o amplificazioni nella struttura degli edifici, dovuti principalmente alla tipologia dei sistemi di fondazione.

La UNI 9614, norma di riferimento relativamente alla soglia di percezione delle vibrazioni individua il valore di riferimento.

Nella tabella a seguire viene sintetizzata ed evidenziata la soglia dei valori limite utili ad evitare il disturbo in relazione alle destinazioni d'uso delle aree/strutture oggetto di analisi.

Devono essere infine assegnate una classificazione di sensibilità dei recettori adiacenti alle sorgenti. Le classi di sensibilità devono essere definite sulla base della destinazione d'uso dell'immobile, in conformità con la Norma UNI 9614, prescindendo da considerazioni delle caratteristiche dei singoli fabbricati quali, ad esempio, lo stato di conservazione e la tipologia costruttiva dell'immobile. Nella tabella a seguire sono evidenziate le classi di sensibilità:

VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIONI COMPLESSIVE PONDERATE IN FREQUENZA VALIDI PER GLI ASSI x E y		
Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s ²	dB
Aree critiche	3,6 10 ⁻³	71
Abitazioni notte	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni giorno	7,0 10 ⁻³	77
Uffici	14,4 10 ⁻³	83
Fabbriche	28,8 10 ⁻³	89

VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIONI COMPLESSIVE PONDERATE IN FREQUENZA VALIDI PER L'ASSE z		
Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s ²	dB
Aree critiche	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni notte	7,0 10 ⁻³	77
Abitazioni giorno	10,0 10 ⁻³	80
Uffici	20,0 10 ⁻³	86
Fabbriche	40,0 10 ⁻³	92

Valutazione del disturbo UNI 9614 - Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza

Le aree critiche corrispondono alle aree archeologiche di importanza storico-monumentale, infrastrutture sanitarie, fabbricati scolastici di qualsiasi genere. Rientrano in tali classi aree anche le attività industriali che impiegano macchinari di precisione.

STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO

Le fonti di rumore e vibrazione emesse da una turbina eolica sono essenzialmente di natura aerodinamica, (causate dall'interazione tra il vento e le pale), meccanica (generate dagli attriti meccanici dei componenti del rotore e del sistema di trasmissione del generatore) e cinetica (generate dalle oscillazioni e dal passaggio e cambiamento di stato da stazionario a combinato). Le oscillazioni sono causate dal vento che insiste sul piano del rotore degli aerogeneratori generando momenti forzanti opportunamente controllati dalle strutture di fondazione, nonché dall'interazione aerodinamica e meccanica delle pale con la torre.

Diversi studi della BWEA (British Wind Energy Association) hanno mostrato che a distanza di poche decine di metri il rumore risultante dalle esigue vibrazioni prodotte dalle turbine eoliche risulta sostanzialmente poco distinguibile rispetto al rumore residuo.

In particolare per i fenomeni vibratorii è possibile analizzare come questi si trasmettono nel terreno circostante attraverso le fondazioni di sostegno delle torri degli aerogeneratori.

Le vibrazioni perdono energia durante la propagazione nel terreno e la loro ampiezza diminuisce con l'aumentare della distanza dalla sorgente.

Le vibrazioni vengono trasmesse attraverso la struttura metallica della torre, le fondazioni, il terreno e alle caratteristiche strutturali del recettore.

Al fine di valutare in termini quantitativi la distanza alla quale l'entità delle vibrazioni generate dal funzionamento a regime del parco eolico possa ritenersi tale da non arrecare disturbo alle attività circostanti, alla popolazione umana ed ai recettori in generale, applichiamo il modello

di calcolo appena esposto, utilizzando come dato di input i valori di vibrazione riferiti ad impianti simili ed associando gli stessi alla condizione in oggetto.

Nell'applicazione del modello previsionale al fine di valutare il potenziale possibile disturbo in termini quantitativi, sono stati ipotizzati i seguenti parametri come di seguito esplicitati:

In funzione della tipologia di substrato litologico si assumono i seguenti valori:

- $\eta = 0.1$ (fattore di perdita del substrato nell'ipotesi peggiore possibile nell'ottica della valutazione a maggior carattere cautelativo nei confronti dei recettori);
- c (velocità di propagazione dell'onda di Rayleigh VR) = 600 m/s (valore coerente con i dati geotecnici riportati nell'elaborato specialistico)

Livelli di riferimento per la sorgente in esercizio: sono stati considerati valori di accelerazione misurati presso strutture analoghe.

Potenziali fenomeni di attenuazione o amplificazione relativi alla tipologia di fondazioni cui sono dotati i recettori non sono stati tenuti in conto.

In particolare i valori r.m.s di accelerazione (non ponderati in frequenza) in corrispondenza della torre di sostegno lungo i tre assi (x, y, z), presi come riferimento per il calcolo in base a valori reali misurati su strutture analoghe sono:

$$w_1(x) = 0,0224 \frac{m}{s^2} \qquad w_1(y) = 0,01333 \frac{m}{s^2} \qquad w_1(z) = 0,0272 \frac{m}{s^2}$$

I valori dei coefficienti presenti nell'espressione sopra proposta, sono stati ricavati da dati misurati disponibili per strutture analoghe, facendo riferimento alle condizioni di funzionamento più gravose compatibili con le caratteristiche delle sorgenti, al fine di avere una valutazione cautelativa dell'entità delle vibrazioni trasmesse.

Nel dettaglio, al fine di eseguire il calcolo del potenziale possibile disturbo, sono stati assunti i parametri di input come esplicitati nella tabella seguente.

	Valore asse x	Valore asse y	Valore asse z
Vibrazione alla sorgente [dB]	87	82,5	88,7
Accelerazione alla sorgente [mm/s ²]	22,38	13,33	27,22
Distanza dalla sorgente [m]	1	1	1
Coefficiente di attenuazione geometrica	0,5	0,5	0,5
Tipologia di terreno	Litologia a prevalente componente arenitica		
Fattore di perdita del terreno	0,1	0,1	0,1
Velocità di propagazione nel terreno [m/s]	600	600	600
Densità del terreno [kg/mc]	1600	1600	1600
Velocità di rotazione di riferimento [rpm]	12	12	12
Frequenza onda di vibrazione di riferimento per il calcolo [Hz]	0,600	0,600	0,600
Pulsazione d'onda ω [rad/s]	3,768	3,768	3,768

Valori di input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte da un aerogeneratore in esercizio

Di seguito i risultati ottenuti in termini di distanza minima di rispetto dei valori soglia della norma UNI 9614. Poiché il fenomeno riguarda l'esercizio di macchine la cui vita utile è ultraventennale con funzionamento anche notturno, si riporta anche la distanza minima del

valore raccomandato per le **aree critiche**, che può essere preso a riferimento per aree particolarmente delicate sotto l'aspetto della stabilità territoriale.

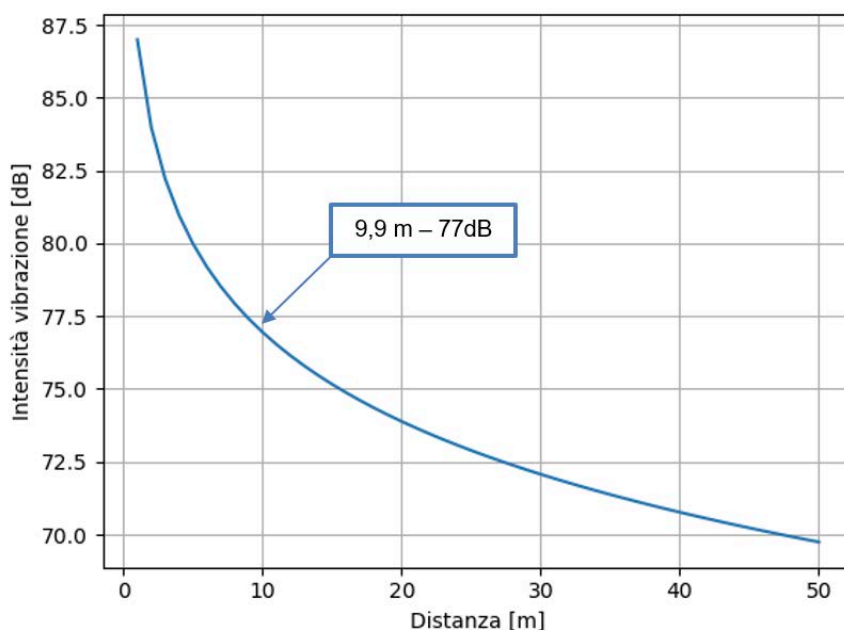
	Valore rif. asse x 77 dB	Valore rif. asse y 77 dB	Valore rif. asse z 80 dB
Distanza di rispetto del valore raccomandato UNI 9614 (Abitazioni giorno) [m]	9,9	3,5	7,4
	Valore rif. asse x 74 dB	Valore rif. asse y 74 dB	Valore rif. asse z 77 dB
Distanza di rispetto del valore raccomandato UNI 9614 (Abitazioni notte) [m]	19,5	7,0	14,6
	Valore rif. asse x 71 dB	Valore rif. asse y 71 dB	Valore rif. asse z 74 dB
Distanza di rispetto del valore raccomandato UNI 9614 (Aree critiche) [m]	38,0	13,9	28,5

risultati in termini di distanza di rispetto dei limiti UNI 9614

Poiché gli aerogeneratori di progetto sono distanti tra loro oltre 600 m, ed il primo recettore sensibile risulta dislocato a distanze molto superiori rispetto a quelle indicate nella precedente tabella, **si può senz'altro affermare che l'impatto causato dalle vibrazioni prodotto dal parco eolico in oggetto sia assolutamente trascurabile e che nessun recettore riceve un fenomeno vibrazionale tale da ingenerare disturbo.**

Si osserva come le distanze di sicurezza sono ampiamente al di sotto delle distanze in cui sono ubicati gli aerogeneratori.

Ciò risulta valido anche considerando l'effetto cumulato di tutti gli aerogeneratori.



Andamento del decadimento dell'intensità delle vibrazioni lungo l'asse x rispetto alla distanza dalla sorgente con evidenza della distanza di rispetto del valore raccomandato per le abitazioni nel periodo diurno.

I valori soglia raccomandati per le abitazioni di notte sono rispettati ad una distanza inferiore ai 20 m.

Ad una distanza di circa 40 m dagli aerogeneratori risultano rispettati anche i valori raccomandati per le aree critiche.

STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE

Premesso che le aree di cantiere per l'installazione di un impianto eolico sono solitamente dislocate in zone adibite a carattere agricolo e rurale, e che pertanto l'area è già interessata dal transito periodico dei mezzi pesanti ed agricoli per il raggiungimento e la lavorazione dei suoli coltivati in aree limitrofe, al fine di minimizzare le potenziali fonti di rumore e vibrazione, con conseguente potenziale temporanea sensazione di fastidio o disturbo indotto, potranno essere previsti alcuni accorgimenti operativi a carattere preventivo come ad esempio l'impiego di mezzi gommati al fine di contenere il rumore di fondo nell'area durante il passaggio su strada.

Per quanto concerne le fasi di cantiere per la costruzione di impianti eolici, non è in generale previsto l'impiego di esplosivi durante i lavori di scavo, e pertanto risulta assolutamente improbabile, o non plausibile, che vi possano essere danni alle strutture ed edifici nel corso delle escavazioni, anche per quei recettori posti a distanze relativamente più vicine. Si rammenta infatti che, anche nell'ottica delle verifiche dei limiti acustici, gli aerogeneratori di progetto sono posizionati a distanze generalmente non inferiori a 200 m in linea d'aria da strutture classificabili come recettori sensibili. In questo, anche considerando le linee mobili di cantiere per il raggiungimento dei punti di installazione delle turbine, si è sufficientemente sicuri che non possano configurarsi le condizioni e le circostanze tali da poter arrecare danni alle strutture.

Nell'applicazione del modello previsionale al fine di valutare il potenziale possibile disturbo in termini quantitativi, sono stati ipotizzati i seguenti parametri come di seguito esplicitati:

1. Livelli di riferimento per il mezzo meccanico impiegato in cantiere: si è scelto di effettuare un calcolo di propagazione delle vibrazioni per il mezzo più impattante tra quelli proposti nelle diverse fasi di lavorazione, che è risultato essere l'autobetoniera caratterizzato da fenomeni vibrazionali legati sia alla rotazione del bicchiere che del motore e degli organi meccanici dell'automezzo.
2. Livelli di riferimento – valore soglia limite di disturbo: Il valore soglia di livello ponderato di accelerazione è stato considerato essere pari a 77 VdB. Ciò in virtù del fatto che le attività di cantiere (e quindi anche di escavazione) sono concentrate esclusivamente nel periodo di riferimento diurno e che pertanto il potenziale disturbo non può essere associato al periodo di riferimento notturno e quindi non può incidere nelle ore dedicate al riposo e al sonno. Inoltre l'attività ha caratteristiche temporanee non compatibili con problematiche legate a prolungate azioni vibratorie eventualmente problematiche per le aree critiche.
3. Attenuazioni o Amplificazioni nella struttura degli edifici: potenziali fenomeni di attenuazione o amplificazione relativi alla tipologia di fondazioni, cui sono dotati i recettori, non sono stati tenuti in conto.

Nel dettaglio, al fine di eseguire il calcolo del potenziale possibile disturbo, sono stati assunti i parametri di input come di seguito esplicitati:

	Valore asse x	Valore asse y	Valore asse z
Vibrazione alla sorgente [dB]	88,4	95,3	96,5
Accelerazione alla sorgente [mm/s ²]	0,0263	0,0582	0,0668
Distanza dalla sorgente [m]	1	1	1
Coefficiente di attenuazione geometrica	0,5	0,5	0,5
Tipologia di terreno	Litologia a prevalente componente arenitica		
Coefficiente di assorbimento del terreno	0,1	0,1	0,1
Velocità di propagazione nel terreno [m/s]	600	600	600
Densità del terreno [kg/mc]	1600	1600	1600
Valore rotazione di riferimento [rpm]	15	15	15
Frequenza onda di vibrazione di rif. per il calcolo [Hz]	0,250	0,250	0,250
Pulsazione d'onda ω [rad/s]	1,571	1,571	1,571

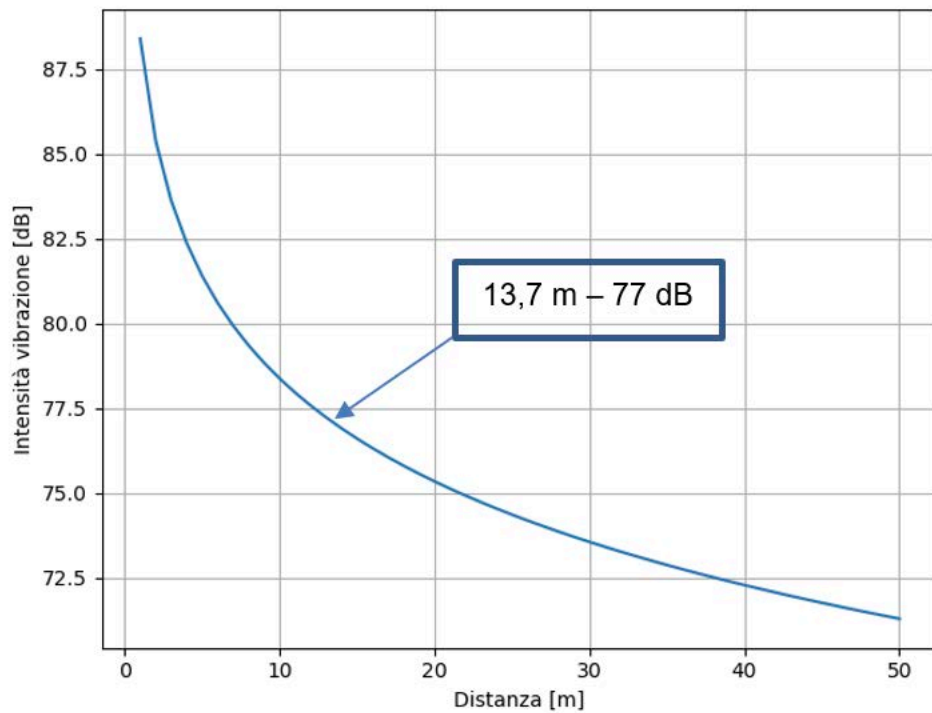
Valori di input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte dal mezzo di cantiere

	Valore rif. asse x 77 dB	Valore rif. asse y 77 dB	Valore rif. asse z 80 dB
Distanza di rispetto del valore raccomandato UNI 9614 (Abitazioni giorno) [m]	13,7	65,9	43,9

risultati in termini di distanza di rispetto dei limiti UNI 9614

Si osserva come le distanze di sicurezza sono ampiamente al di sotto delle distanze in cui sono ubicati i cantieri.

Di seguito si riporta l'andamento del decadimento delle vibrazioni calcolate per l'asse x:



Andamento del decadimento dell'intensità delle vibrazioni lungo l'asse x rispetto alla distanza dalla sorgente con evidenza della distanza di rispetto del valore raccomandato per le abitazioni nel periodo diurno (cantiere).

Anche in tal caso si può senz'altro affermare che l'impatto causato dalle vibrazioni prodotto in fase di cantiere durante la realizzazione del parco eolico in oggetto sia assolutamente trascurabile e che nessun recettore riceve un fenomeno vibrazionale tale da ingenerare disturbo. Ciò anche considerando l'effetto cumulato di diversi mezzi.

Ad una distanza di circa 66 metri risultano dunque rispettati i valori raccomandati dalla normativa.

VALUTAZIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

(FASE DI ESERCIZIO)

Per un impianto eolico **in fase di esercizio** si può concludere che, per quanto attiene al rumore o vibrazioni di natura aerodinamica, meccanica o cinetica generati dalle macchine, l'apporto in termini di effetti o sensazioni di vibrazione nei confronti di specifici recettori e/o strutture e fabbricati di qualsiasi tipologia, durante l'attività produttiva si attesta su livelli inferiori la soglia di percezione umana e pertanto il loro contributo può essere considerato trascurabile e/o nullo.

La componente "vibrazioni" è stata valutata in termini quantitativi con la metodologia di stima descritta attraverso la verifica del "criterio del danno strutturale" e del "criterio del disturbo".

Il dato previsionale ottenuto in base alle assunzioni sopracitate evidenzia che ad una distanza di circa 20 m delle sorgenti in fase di esercizio, le vibrazioni trasmesse sono già al di sotto dei valori da rispettare per le abitazioni nel periodo notturno e diurno (UNI 9614).

(FASE DI CANTIERIZZAZIONE: REALIZZAZIONE E DISMISSIONE)

Allo stesso modo il dato previsionale ottenuto per la **fase di cantiere** conferma che l'impatto causato dalle vibrazioni durante la realizzazione del parco eolico in oggetto sia assolutamente trascurabile e che nessun recettore riceve un fenomeno vibrazionale tale da ingenerare disturbo.

TABELLA RIPIANTANTE PER OGNI RICETTORE, IL LIVELLO DI ACCELERAZIONE DELLE VIBRAZIONI LUNGO I TRE ASSI

Recettore	Distanza aerogeneratore o cantiere più vicino	Limiti UNI 9614 PER destinazione d'uso AREE CRITICHE								
		W1 (x)	W1 (y)	W1 (z)	W2 (x)	W2 (y)	W2 (z)	Asse X e Y	Asse Z	
		m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²
1	719	0,0224	0,01333	0,0272	0,001180344	0,00070241	0,001433275	0,0036	0,0050	
2	452	0,0224	0,01333	0,0272	0,001868052	0,001111658	0,002268349	0,0036	0,0050	
3	494	0,0224	0,01333	0,0272	0,001711219	0,001018328	0,002077909	0,0036	0,0050	
4	458	0,0224	0,01333	0,0272	0,00184391	0,001097291	0,002239034	0,0036	0,0050	
5	493	0,0224	0,01333	0,0272	0,001714647	0,001020368	0,002082071	0,0036	0,0050	
6	855	0,0224	0,01333	0,0272	0,000993958	0,000591494	0,001206949	0,0036	0,0050	
7	724	0,0224	0,01333	0,0272	0,001172262	0,000697601	0,001423462	0,0036	0,0050	
8	506	0,0224	0,01333	0,0272	0,001671133	0,000994474	0,002029233	0,0036	0,0050	
9	418	0,0224	0,01333	0,0272	0,002017754	0,001200744	0,00245013	0,0036	0,0050	
10	676	0,0224	0,01333	0,0272	0,001254736	0,00074668	0,001523608	0,0036	0,0050	
11	579	0,0224	0,01333	0,0272	0,001462693	0,000870433	0,001776127	0,0036	0,0050	
12	626	0,0224	0,01333	0,0272	0,001353962	0,000805728	0,001644097	0,0036	0,0050	
13	440	0,0224	0,01333	0,0272	0,001918283	0,00114155	0,002329344	0,0036	0,0050	
14	762	0,0224	0,01333	0,0272	0,00111428	0,000663096	0,001353054	0,0036	0,0050	
15	544	0,0224	0,01333	0,0272	0,001555729	0,000925798	0,001889099	0,0036	0,0050	
16	427	0,0224	0,01333	0,0272	0,001975841	0,001175802	0,002399235	0,0036	0,0050	
17	425	0,0224	0,01333	0,0272	0,001985004	0,001181254	0,002410361	0,0036	0,0050	
18	504	0,0224	0,01333	0,0272	0,001677683	0,000998371	0,002037187	0,0036	0,0050	
19	442	0,0224	0,01333	0,0272	0,001909725	0,001136457	0,002318951	0,0036	0,0050	
20	531	0,0224	0,01333	0,0272	0,001593372	0,000948199	0,001934809	0,0036	0,0050	