

REGIONE PUGLIA
Città Metropolitana di Bari
COMUNE DI GRAVINA IN PUGLIA

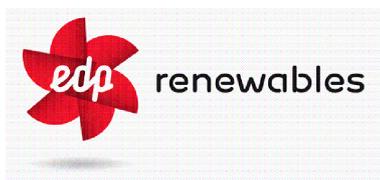
PROGETTO

PROGETTAZIONE PARCO EOLICO S. DOMENICO



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE

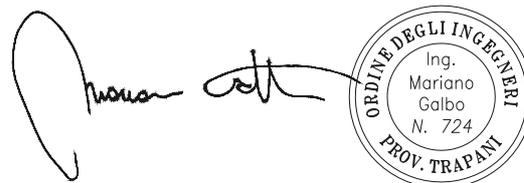


EDP Renewables Italia Holding S.r.l.
Via Lepetit 8/10
20124 - Milano

PROGETTISTA



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



OGGETTO DELL'ELABORATO

RELAZIONE COMPATIBILITA' IDRAULICA

REV.	DATA	ATTIVITA'	REDATTO	VERIFICATO	APROVATO
0	Giugno 2022	PRIMA EMISSIONE	FG	VF	MG

CODICE ELABORATO	DATA	SCALA	FORMATO	FOGLIO	CODICE COMMITTENTE
SDM-PD-R15.3				1di37	

INDICE

INDICE	2
1 PREMESSA	3
2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E IDROGRAFICO	4
2.1 RIFERIMENTI CARTOGRAFICI	4
2.2 INDIVIDUAZIONE DELLE AREE SOGGETTE A TUTELA DA PARTE DELL'ADB DISTRETTUALE.....	7
3 CARATTERISTICHE BACINI IDROGRAFICI	9
3.1 INDIVIDUAZIONE BACINI IDROGRAFICI.....	9
3.2 USO DEL SUOLO	10
3.3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	11
4 MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI	13
4.1 INDIVIDUAZIONE DELLA PIOGGIA CRITICA.....	13
4.2 IL COEFFICIENTE DI AFFLUSSO.....	14
4.3 CALCOLO DELLE PORTATE	15
5 MODELLAZIONE IDRAULICA	16
5.1 IL MODELLO DI SIMULAZIONE HEC-RAS	16
5.1.1 <i>Capacità del codice di calcolo HEC-RAS</i>	16
5.2 EQUAZIONI DI BASE DEL MODELLO	17
5.2.1 <i>Standard step method</i>	17
5.2.2 <i>Conservazione della quantità di moto</i>	18
5.3 INPUT DATI	19
5.3.1 <i>Modello del terreno</i>	19
5.3.2 <i>Geometrie del modello</i>	21
5.3.3 <i>Coefficiente di scabrezza</i>	23
5.3.4 <i>Levees e ineffective flow areas</i>	23
5.4 CONDIZIONI AL CONTORNO	24
5.4.1 <i>Dati di portata</i>	25
6 VERIFICA DI SUSSISTENZA DI SICUREZZA IDRAULICA	27
7 ALLEGATI	30

1 PREMESSA

La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata di redigere il progetto definitivo dell'impianto eolico denominato "San Domenico" composto da sei aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,00 MW, per una potenza complessiva di 36 MW, ubicato nel Comune di Gravina di Puglia (Provincia di Bari) e proposto dalla società EDP Renewables Italia Holding S.r.l. con sede in Milano Via Lepetit.

Le aree interessate dal posizionamento degli aerogeneratori ricadono nelle contrade *Serra Pozzo Fetente* (T1 e T2), *Le Grotte di Minnini* (T3) e *San Domenico* (T4, T5 e T6) tutte nel Comune di Gravina di Puglia, in provincia di Bari.

La **presente relazione** riporta i metodi e i risultati dello **Studio di compatibilità idrologica ed idraulica**, relativo agli aerogeneratori T3 e T4, dell'impianto eolico *S. Domenico*, che si trovano in prossimità del reticolo idrografico e, pertanto, si è proceduto con la redazione di questo studio come prescritto dagli artt. 6 e 10 delle N.T.A. del PAI, che dimostri l'esistenza di adeguate condizioni di sicurezza idraulica (riferite ad un evento meteorico con tempo di ritorno di 200 anni, così come definito all'art. 36 delle stesse N.T.A.), sulla base di un accurata individuazione dei bacini idrografici sottesi dalle opere interessate dai deflussi e conseguente modellazione dei deflussi idraulici sulla base delle caratteristiche morfologiche e idrologiche delle aree interessate.

La relazione, oltre il presente capitolo, è composta da ulteriori cinque capitoli, di cui di seguito un breve riepilogo:

- *Capitolo 2 – Inquadramento territoriale*: vengono riportate le informazioni necessarie per l'individuazione cartografica del sito.
- *Capitolo 3 – Caratteristiche bacini idrografici*: illustra la posizione del parco rispetto ai bacini idrografici esistenti e le caratteristiche principali di tali bacini.
- *Capitolo 4 – Modello afflussi deflussi*: illustra il metodo utilizzato per la stima della portata di piena.
- *Capitolo 5 – Modellazione idraulica*: descrive i metodi per lo sviluppo del modello idraulico in moto permanente attraverso il software HEC-RAS e presenta i dati di input e le condizioni al contorno definite.
- *Capitolo 6 – Verifica di sussistenza di sicurezza idraulica*: si riportano i risultati della modellazione idraulica e si dà evidenza della sussistenza di sicurezza idraulica per la piena duecentennale.

Si allegano alla presente relazione le mappe di allagamento per i tempi di ritorno T pari a 30, 200 e 500 anni.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E IDROGRAFICO

2.1 RIFERIMENTI CARTOGRAFICI

Le aree interessate dal posizionamento dei n°6 aerogeneratori ricadono nelle contrade *Serra Pozzo Fetente* (T1 e T2), *Le Grotte di Minnini* (T3) e *San Domenico* (T4, T5 e T6) tutte nel Comune di Gravina di Puglia, provincia di Bari. Da un punto di vista cartografico, le opere in progetto ricadono all'interno delle seguenti cartografie e fogli di mappa catastali:

- CTR: Fogli 453132, 453133, 453162, 471041, 471042, 472011, 472012, 472013, 472014
- IGM: 1882NE-Gravina di Puglia
- Fogli di mappa catastali parco eolico: Gravina di Puglia Fg. 94, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 130, 137, 138.

Di seguito (Figg. 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4) sono riportate un'immagine di inquadramento territoriale, il layout dell'impianto in progetto su IGM 1:25.000, CTR 1:10.000 ed su ortofoto.

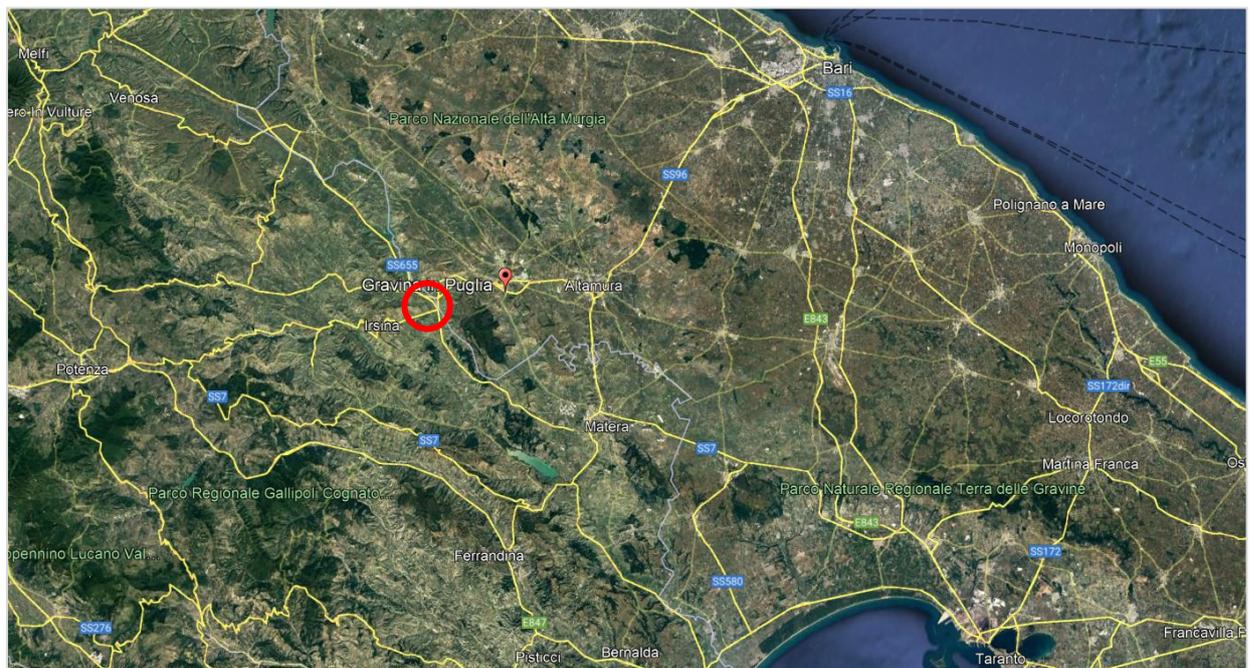


Figura 2.1: Ubicazione area di impianto da satellite

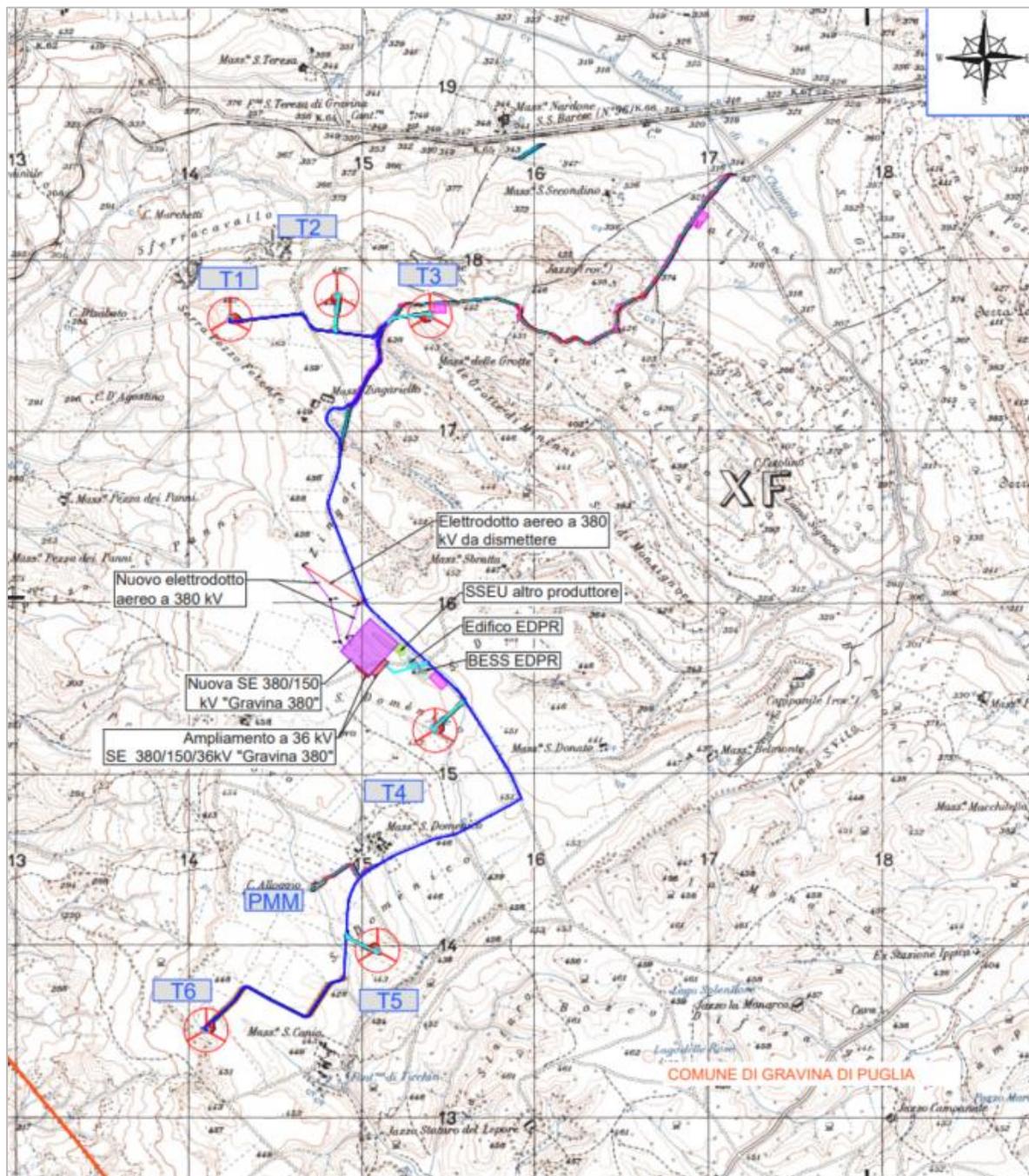


Figura 2.2: Inquadramento impianto su IGM 1:25.000

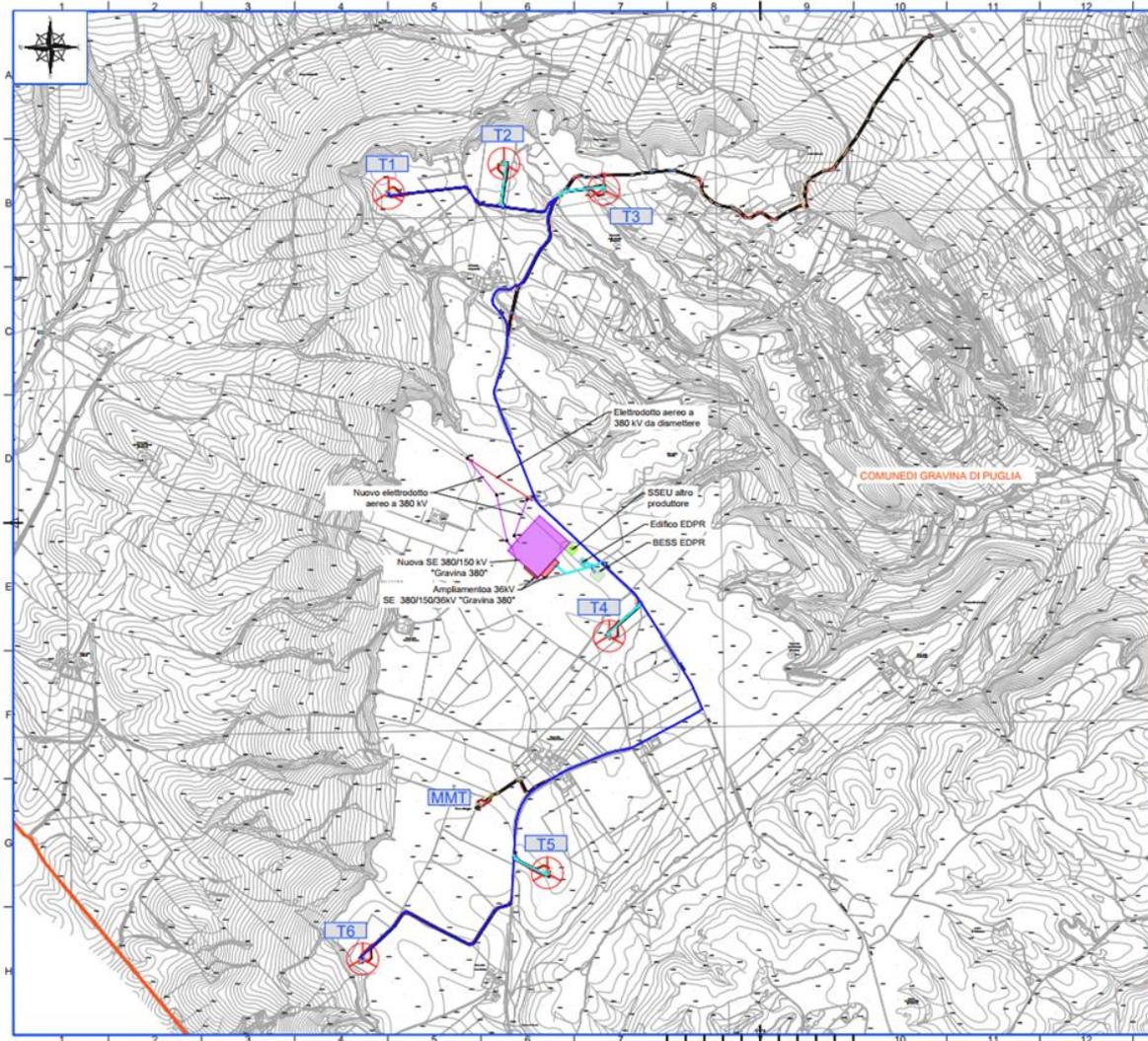


Figura 2.3: Inquadramento impianto su CTR 1:10.000

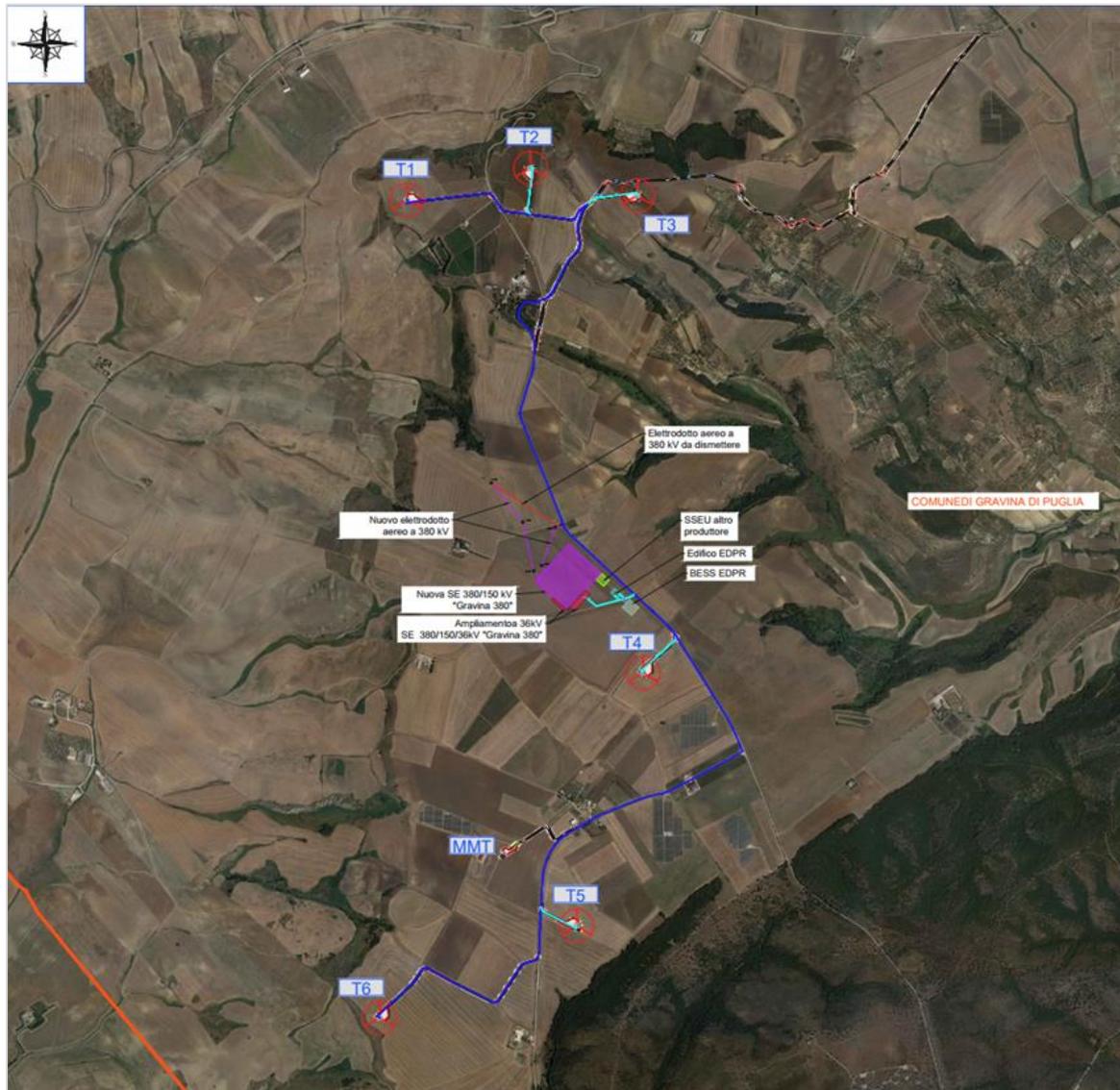


Figura 2.4: Inquadramento impianto su ortofoto

2.2 INDIVIDUAZIONE DELLE AREE SOGGETTE A TUTELA DA PARTE DELL'ADB DISTRETTUALE

Come si evince dalla cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) in scala 1:25.000, le torri T3 e T4 si trovano in prossimità di due aste del reticolo idrografico.



Figura 2.5 Particolare della planimetria delle opere su IGM 1:25.000: aerogeneratori T3 e T4

Le aree limitrofe a tali corsi d'acqua sono identificabili come “Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali”, quindi soggette alle disposizioni del Titolo II – Assetto Idraulico delle NTA del vigente PAI, in particolare degli artt. 6 e 10.

Dalla consultazione del PAI, la fascia di pertinenza fluviale di queste aste non è arealmente individuata nella cartografia; pertanto, secondo quanto previsto dall'art. 10 comma 3 delle N.T.A. del PAI, “quando la fascia di pertinenza fluviale non è arealmente individuata nelle cartografie in allegato, le norme si applicano alla porzione di terreno, sia in destra che in sinistra, contermina all'area golenale, come individuata all'art. 6 comma 8, di ampiezza comunque non inferiore a 75 m”.

Con riferimento alle opere in progetto, entrambi gli aerogeneratori si trovano a una distanza inferiore a 75 m dall'asse del reticolo idrografico.

Ai sensi dell'art. 10 comma 2 delle N.T.A. del PAI “All'interno delle fasce di pertinenza fluviale sono consentiti tutti gli interventi previsti dagli strumenti di governo del territorio, a condizione che venga preventivamente verificata la sussistenza delle condizioni di sicurezza idraulica, come definita all'art. 36, sulla base di uno studio di compatibilità idrologica ed idraulica subordinato al parere favorevole dell'Autorità di Bacino”. La sicurezza idraulica, come definita dall'art. 36, è la “condizione associata alla pericolosità idraulica per fenomeni di insufficienza del reticolo di drenaggio e generalmente legata alla non inondabilità per eventi di assegnata frequenza. Agli effetti del PAI si intendono in sicurezza idraulica le aree non inondate per eventi con tempo di ritorno fino a 200 anni”.

Le aree di impianto sono state rilevate (cfr. SDMPDT22.1) e pertanto è stato possibile identificare gli impluvi suddetti nel loro attuale assetto. Questi si presentano poco incisi e in parte modificati dalle lavorazioni agricole che insistono sull'area.

3 CARATTERISTICHE BACINI IDROGRAFICI

3.1 INDIVIDUAZIONE BACINI IDROGRAFICI

I bacini idrografici sottesi dalle opere in progetto sono stati individuati mediante l'uso del software Global Mapper®, in uno con il modello tridimensionale del terreno e la CTR (Carta Tecnica Regionale – 1: 10.000) e i dati acquisiti durante rilievo GPS delle aree.

I corpi idrici oggetto di analisi sono costituiti da due impluvi e, ai fini della modellazione idraulica che è presentata nell'elaborato SDMPDR15.3, per il tracciamento dei bacini sottesi è stata considerata, rispettivamente, la sezione a valle (interna all'area rilevata) delle opere in progetto.

Di seguito si riportano su ortofoto e sul rilievo i bacini idrografici di interesse.



Figura 3.1 Bacino idrografico relativo all'asta idrica in prossimità della torre T3



Figura 3.2 Bacino idrografico relativo all'asta idrica in prossimità della torre T4

All'interno dei bacini si riscontra la presenza di alcune opere di progetto (parte della viabilità relativa alla torre T3 e piazzola della torre T4). Tuttavia, come riportato nella relazione idraulica allegata al presente progetto (elaborato SDMPDR15.2), a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti, la realizzazione delle opere in progetto mantiene inalterata, a scala globale, l'equilibrio tra afflussi e deflussi dei bacini sottesi ai punti di immissione nei corpi idrici ricettori. Infatti, le nuove opere a servizio del parco eolico rispettano i principi di invarianza idrologica e idraulica, non modificando le caratteristiche di permeabilità dei bacini interessati dalle opere e rispettando, attraverso le opere idrauliche previste in progetto, il regime *ante operam*.

3.2 USO DEL SUOLO

Da un'analisi del "Corine Land Cover 2012 – IV Livello", le aree in corrispondenza delle quali saranno ubicate le opere in progetto sono caratterizzate prevalentemente da superfici agricole utilizzate (*seminativi in aree non irrigue e zone agricole eterogenee*).



Figura 3.3: Corine Land Cover 2012 – IV Livello per le aree oggetti di intervento.

La definizione dell'uso del suolo consente, unitamente alla conoscenza delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche del sito, una più accurata definizione dei parametri per la modellazione idrologica e idraulica dei bacini.

3.3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Per conoscere le condizioni nelle quali si trovano i terreni in esame, si espongono alcuni brevi cenni sui caratteri geologici, geomorfologici e idrogeologici dell'area del Parco eolico "S. Domenico", come riportati nell'elaborato SDMPDR13 "Relazione geologica, geomorfologica e sismica".

Dal punto di vista geologico nei siti di intervento affiorano i seguenti depositi:

- Depositi alluvionali dell'Olocene
- Conglomerati e sabbie del Villafranchiano
- Argille grigio-azzurre del Pleistocene

Dal punto di vista geomorfologico le aree risultano stabili, in relazione alla favorevole giacitura dei terreni presenti, nonché alla natura degli stessi ed alle loro caratteristiche fisico-meccaniche. A tal proposito, è opportuno sottolineare che sono state consultate le carte allegare al Piano Stralcio di Bacino per la difesa dal Rischio Idrogeologico redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale che non inserisce il sito di progetto in

nessuna delle tipologie di rischio previste.

Dal punto di vista idrogeologico è stato verificato che tutti gli aerogeneratori ricadono all'interno di un complesso caratterizzato da una permeabilità da media ad alta per porosità e fratturazione. Tale complesso è tamponato alla base da depositi argillosi impermeabili pertanto non si esclude la presenza di livelli idrici che potranno interferire con le eventuali fondazioni indirette delle torri eoliche.

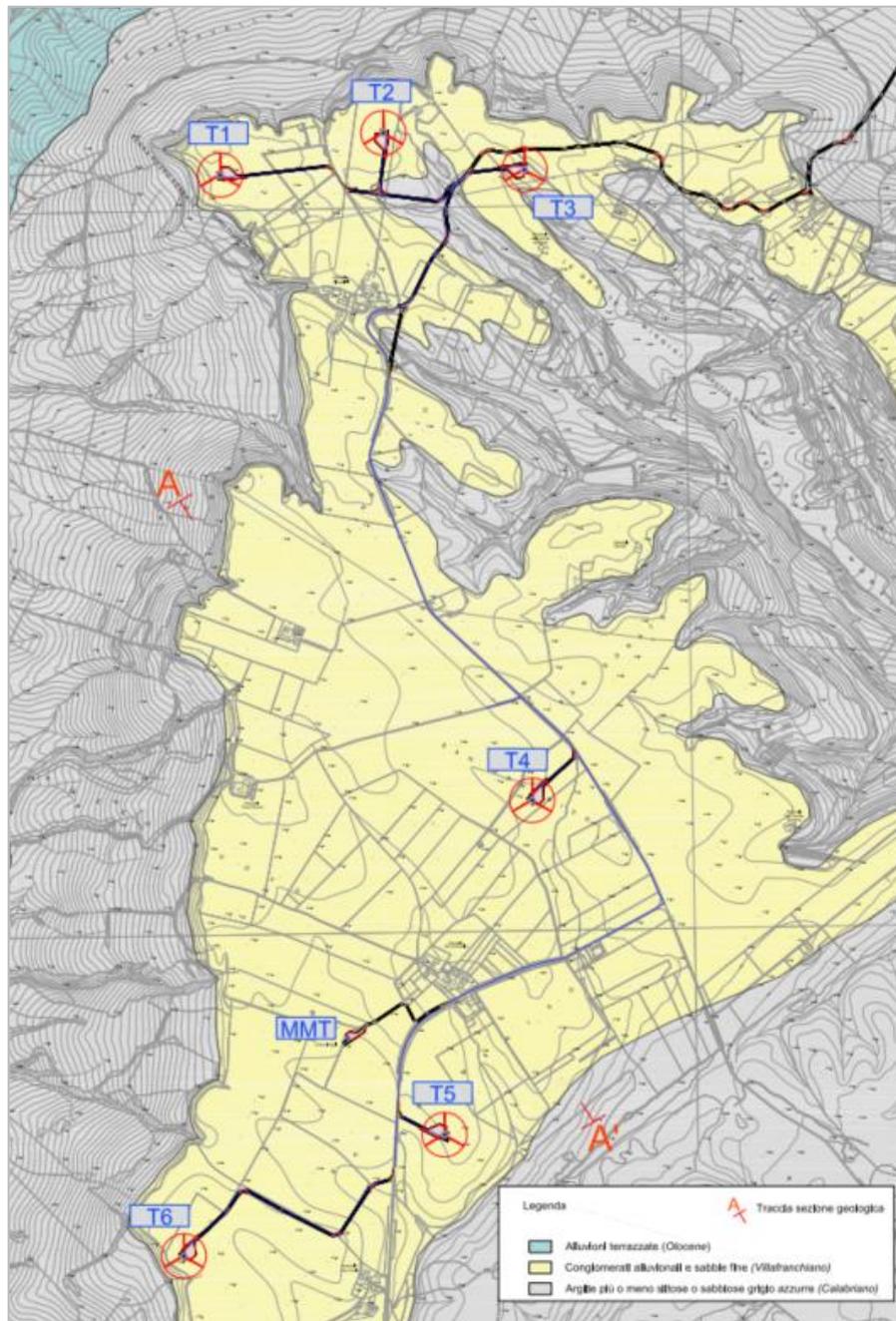


Figura 3.4 Stralcio carta geologica 1:10.000

4 MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI

Le portate di progetto sono state calcolate attraverso *metodi indiretti*, che consentono la determinazione delle portate di piena a partire dalle precipitazioni che si abbattano sui diversi bacini. Nello specifico, si è valutata la portata di piena con la *formula razionale*.

La *formula razionale* consente la valutazione della portata di piena di assegnato tempo di ritorno T mediante la seguente relazione:

$$Q_T = \frac{\varphi \cdot i_T \cdot S}{3,6}$$

ove:

- Q_T è la portata di piena di assegnato tempo di ritorno T ed è espressa in m³/s;
- φ è il coefficiente di afflusso, adimensionale;
- i_T è l'intensità critica della precipitazione di assegnato tempo di ritorno (corrispondente al tempo di corrivazione) in mm/h;
- S è la superficie del bacino espressa in km²;
- 3,6 è un fattore di conversione delle unità di misura.

La modellazione matematica dei fenomeni idrologico-idraulici, innescati dalle precipitazioni sull'area di progetto, segue il processo descritto nei paragrafi seguenti.

4.1 INDIVIDUAZIONE DELLA PIOGGIA CRITICA

Dopo avere ricostruito le relazioni intensità-durata-frequenza (IDF, espresse dalla c.p.p.) è necessario individuare la *l'intensità critica* della precipitazione, cioè l'intensità costante di quella pioggia, supposta anche uniformemente distribuita sul bacino, che determina la portata massima nell'idrogramma di piena di tempo di ritorno T.

La pioggia critica è quella di intensità pari al *tempo di corrivazione* o di *concentrazione* τ_c , definito come segue:

- il tempo di corrivazione di un bacino è quello necessario alla goccia di pioggia che cade nel punto idraulicamente più lontano per raggiungere la sezione di chiusura del bacino;
- il tempo di corrivazione è quel tempo che, una volta eguagliato dalla durata della precipitazione (precipitazione *critica*, ovvero che mette in crisi la rete idrografica), determina il raggiungimento del valore più elevato di portata nella sezione di chiusura del bacino.

Esso può essere calcolato tramite diverse formule; nel caso in esame, e cioè per piccoli bacini (aventi estensione inferiore a 1 km²), il tempo di corrivazione è calcolato attraverso la formula di Kirpich:

$$t_c = 0.01947 \frac{L^{0.77}}{i^{0.385}}$$

dove τ_c è espresso in minuti, L (lunghezza dell'asta principale, a partire dallo spartiacque) è espressa in metri ed i è la pendenza media del percorso (m/m).

4.2 IL COEFFICIENTE DI AFFLUSSO

L'infiltrazione costituisce il fenomeno di maggiore rilevanza per la determinazione del bilancio tra pioggia sul bacino e pioggia efficace ai fini del deflusso nei bacini scolanti. Nell'applicare un modello afflussi-deflussi risulta pertanto necessario quantificare le perdite per infiltrazione allo scopo di potere valutare la pioggia netta, ovvero quella che dà effettivamente luogo al deflusso. Nel presente studio, all'interno della formula razionale, è stato utilizzato il *metodo del coefficiente di afflusso* Φ . Tale coefficiente rappresenta il rapporto tra il volume totale di deflusso e il volume totale di pioggia caduto sull'area sottesa ad una data sezione, e il suo uso comporta considerare le perdite proporzionali all'intensità media di pioggia.

La stima del valore di ϕ , relativamente a ciascuna superficie omogena (tipo di suolo, tessitura, caratteristiche locali di permeabilità) è stata condotta facendo riferimento ai valori tabellati da Benini (*Sistemazioni idraulico-forestali*, 1990) riportati di seguito Figura 4.1.

La scelta del coefficiente di afflusso è stata condotta tenendo conto sia del tipo di "uso" del suolo (cfr. paragrafo 3.2) che costituisce il bacino preso in analisi sia la litologia dei terreni dal punto di vista granulometrico e di conseguenza della permeabilità (cfr. paragrafo 3.3).

Tabella 3.12 Valori del coefficiente di deflusso C della Formula Razionale^[12].

Tipo di suolo	Copertura del bacino		
	Coltivazioni	Pascoli	Boschi
Molto permeabile (sabbioso o ghiaioso)	0.20	0.15	0.10
Mediamente permeabile (Terreni di medio impasto, Terreni senza strati di argilla)	0.40	0.35	0.30
Poco Permeabili (Suoli argillosi, con strati di argilla in prossimità della superficie, suoli poco profondi su substrato roccioso impermeabile)	0.50	0.45	0.40

Tipo di suolo				
Copertura del bacino	Pendenza dei versanti	Terreni Leggeri	Terreni di medio impasto	Terreni compatti
Boschi	> 10%	0.13	0.18	0.25
	< 10%	0.16	0.21	0.36
Pascoli	> 10%	0.16	0.36	0.56
	< 10%	0.22	0.42	0.62
Colture agrarie	> 10%	0.40	0.60	0.70
	< 10%	0.52	0.72	0.82

Figura 4.1: Valori del coefficiente ϕ del metodo razionale per diversi tipi di superficie, in funzione della tipologia di suolo e della copertura del bacino (Benini, 1990 e Ferro, 2006).

Nello specifico, per il presente modello di afflussi-deflussi, si è utilizzato il seguente valore del coefficiente di afflusso φ :

- $\varphi=0.3$ per l'intera area drenante appartenente allo strato superficiale dell'area occupata dai bacini.

4.3 CALCOLO DELLE PORTATE

Per il bacino preso in analisi è stato effettuato il calcolo delle portate Q per i tempi di ritorno di interesse: $T=30$ anni, $T=200$ anni e $T=500$ anni. Per la determinazione delle portate sono stati calcolati alcuni parametri propedeutici e riassunti nelle tabelle sottostanti. Nello specifico, le grandezze caratteristiche poste a base dei calcoli, insieme alle rispettive U.M. sono:

- ID Bacino idraulico affluente al canale in oggetto;
- Superficie del bacino drenante S (sia in m^2 che in km^2);
- Lunghezza dell'asta principale L (in m);
- Quota massima dell'asta principale, H_{max} (m);
- Quota minima dell'asta principale, H_{min} (m);
- Dislivello geodetico tra gli estremi dell'asta, Δh (m);
- Pendenza media del percorso i (%);
- Durata dell'evento pluviometrico critico, pari al tempo di corrivazione t_c (in minuti);
- Coefficiente di afflusso φ ;
- Valore dell'intensità critica i_T (mm/h);
- Portata al colmo della piena, Q , (in m^3/s);

Le tabelle che seguono sono pertanto relative al calcolo della portata causata da un evento pluviometrico critico di fissati tempi di ritorno T .

Caratteristiche del bacino

ID Bacino	Superficie S		Lunghezza asta L (m)	H max	H min	Δh	Pendenza media i	Tempo di corrivazione t_c
	[m^2]	[km^2]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[min]
B1 (T3)	63419.9	0.06342	449.8	458.0	444.0	14.00	3.11%	8.17
B2 (T4)	170944	0.17094	562.0	452.4	445.0	7.40	1.32%	13.51

ID Bacino	Intensità critica (h<1 ora) T30	Intensità critica (h<1 ora) T200	Intensità critica (h<1 ora) T500	Coefficiente di afflusso φ_A	Portata Q_A T30	Portata Q_A T200	Portata Q_A T500
	[mm/h]	[mm/h]	[mm/h]	[-]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]
B1 (T3)	260.2	363.91	413.98	0.30	1.38	1.92	2.19
B2 (T4)	176.4	246.74	280.69	0.30	2.51	3.51	4.00

5 MODELLAZIONE IDRAULICA

5.1 Il modello di simulazione HEC-RAS

Il modello di simulazione HEC-RAS (*River Analysis System*) è stato inizialmente sviluppato dall'*US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center* per lo studio delle reti di canali aperti, attraverso la ricostruzione dei profili idraulici di moto permanente in regime subcritico e supercritico, operando nell'ipotesi di flusso monodimensionale.

La versione attuale, utilizzata nel presente lavoro, è HEC-RAS v.6.0.0, rilasciata dall'USACE nel 2020.

Attualmente il modello costituisce un sistema integrato per l'analisi idraulica di reti di canali a maglie aperte e chiuse, operante in regime di moto permanente o vario, che sfrutta le medesime informazioni relative alla geometria dei corsi d'acqua e dei manufatti idraulici presenti

Il modello può essere applicato per la soluzione di sistemi dalla geometria complessa che includono congiunzioni, biforcazioni, reti chiuse, con la possibilità di simulare gli effetti dovuti alla presenza di strutture, quali paratoie, sistemi di pompaggio, ponti, salti di fondo, ecc. Inoltre, il modello è dotato di ulteriori algoritmi che permettono di indagare in dettaglio alcuni fenomeni di interesse nell'ingegneria idraulica, quali ad esempio fenomeni erosivi intorno alle pile ed alle spalle dei ponti senza platea ed effetti causati dalla parziale ostruzione di una sezione di deflusso a causa dei depositi alluvionali, oppure tenere in conto gli effetti dell'eventuale formazione di ghiaccio sulla superficie libera.

L'utilizzo del modello nell'ipotesi di moto vario aggiunge la capacità di analizzare i fenomeni di propagazione di un'onda di piena e valutare gli effetti di laminazione dovuti alla naturale conformazione del corso d'acqua o alla presenza di dispositivi artificiali.

5.1.1 Capacità del codice di calcolo HEC-RAS

- Il calcolo simultaneo di profili di corrente lenta e veloce;
- La simulazione del flusso attraverso i ponti e tombinature;
- Il dimensionamento di interventi di ottimizzazione della sezione di deflusso e della pendenza del fondo del canale;
- Il calcolo dei presidi arginali;
- Il calcolo dello scalzamento alla base delle pile e delle spalle dei ponti;
- L'analisi delle aree di esondazione;
- L'analisi di ponti e tombinature ad apertura multipla;
- L'analisi di scolmatori, diversivi e casce di espansione;
- L'analisi in presenza di copertura di ghiaccio;

- L'interazione con sistemi informativi geografici (GIS).

5.2 Equazioni di base del modello

Le principali caratteristiche della corrente (livello idrico e velocità media) vengono calcolate a partire da una sezione alla successiva, posta a monte o a valle, a seconda che il regime sia rispettivamente supercritico o subcritico, risolvendo, con la procedura iterativa dello *standard step method*, l'equazione che esprime il bilancio di energia della corrente tra le medesime sezioni:

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} + \Delta H$$

dove, indicando con i pedici 1 e 2 le grandezze che si riferiscono alle due sezioni che individuano il volume di controllo:

- h_1 e h_2 sono le altezze idriche;
- z_1 e z_2 sono le quote del fondo alveo rispetto ad un riferimento prefissato;
- V_1 e V_2 sono le velocità medie;
- α_1 e α_2 sono i coefficienti di ragguglio delle potenze cinetiche o coefficienti di Coriolis;
- ΔH è la perdita di carico tra le due sezioni.

L'equazione esprime il ben noto principio per cui la variazione tra due sezioni dell'energia specifica della corrente è pari alle perdite distribuite, derivanti dagli attriti interni dovuti all'esistenza di strati a diversa velocità nell'interno della massa liquida, ed alle perdite localizzate, in genere dovute alla presenza di strutture in alveo che inizialmente producono un restringimento della corrente e un successivo allargamento con formazione di vortici.

La perdita di carico tra le due sezioni viene, infatti, valutata come la somma di due termini: una componente di attrito h_f , dovuta alla scabrezza di fondo, calcolata per mezzo dell'equazione di Manning, e una componente h_0 che rappresenta le perdite dovute a contrazioni ed espansioni della vena fluida, calcolata come frazione del carico cinetico:

$$\Delta H = h_f + h_0 = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} \right|$$

con \bar{S}_f cadente della linea dei carichi totali e C coefficiente di contrazione/espansione.

5.2.1 Standard step method

Per illustrare lo *standard step method* utilizzato da HEC-RAS per la soluzione dell'equazione si

possono descrivere i passi necessari per il calcolo del profilo relativo a condizioni di moto subcritico con l'equazione dell'energia.

Si suppongano quindi due sezioni di cui si conosca la quota della superficie libera della sezione di valle; il problema che si vuole risolvere è la conoscenza della quota corrispondente alla sezione di monte.

Assumendo che la geometria delle sezioni sia nota, i termini incogniti dell'equazione sono h_1 , V_1 e ΔH . V_1 è desumibile direttamente dal valore di h_1 , per cui le incognite possono essere ridotte a due.

Con due incognite è necessaria una seconda equazione, riguardante le perdite di energia ed espressa da $h_e = h_f + h_o$, per poter ottenere una soluzione. Stante la tipologia delle equazioni, la ricerca della soluzione sarà del tipo “*trail and error*”, per successivi tentativi.

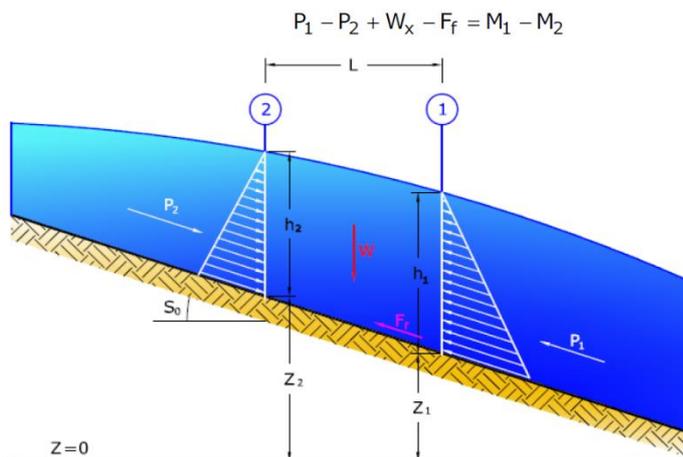
I passi attraverso cui avviene il calcolo sono i seguenti:

1. Viene supposta una quota di pelo libero per la sezione di monte. Un primo tentativo può essere fatto imponendo la pendenza della linea dell'energia pari alla pendenza del tronco d'alveo; quindi, $\Delta h = (Q/K)^2 L$, dove Δh rappresenta la variazione nella quota del pelo libero, Q è la portata, K il termine di trasporto e L la distanza dalla sezione a monte.
2. Sulla base della quota di pelo libero assunta e della geometria della sezione, vengono determinati i termini cinetico e il trasporto totale per la sezione a monte.
3. Con i valori calcolati del termine cinetico e di trasporto del passo 2, viene calcolato il valore di h_e .
4. Con il valore calcolato di h_e , viene calcolata l'altezza di pelo libero della sezione a monte utilizzando l'equazione dell'energia.
5. Viene fatto un confronto fra il valore calcolato al passo 4 e il valore impostato al passo 1. Se la differenza non è inferiore a una prefissata tolleranza (di default pari a 3 mm), il ciclo riprende cambiando il valore al passo 1.

Questa tecnica richiede tempi di elaborazione brevissimi e non incontra problemi di convergenza nemmeno in presenza di discontinuità geometriche o idrauliche.

5.2.2 Conservazione della quantità di moto

In corrispondenza di particolari situazioni localizzate, per le quali il moto non può, a rigore, essere considerato gradualmente variato, come avviene in corrispondenza di ponti, tombini, stramazzi, risalti idraulici ecc. (passaggio attraverso lo stato critico), per il calcolo dei profili idrici viene utilizzata l'equazione di bilancio della quantità di moto:



dove:

- P1 e P2 sono le spinte agenti in corrispondenza delle sezioni 1 e 2;
- W_x è la componente della forza peso del volume di controllo nella direzione del moto;
- F_f è la forza resistente dovuta all'attrito;
- M2 e M1 sono i flussi della quantità di moto entranti ed uscenti dalla sezioni 2 e 1.

Esplicitando i vari termini si ottiene la formula funzionale dell'equazione di conservazione della quantità di moto utilizzata da HEC-RAS:

$$\frac{\beta_2 \cdot Q_2^2}{g \cdot \Sigma_2} + \Sigma_2 \cdot h_2 + \left(\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right) \cdot L \cdot S_0 - \left(\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right) \cdot L \cdot \bar{S}_f = \frac{\beta_1 \cdot Q_1^2}{g \cdot \Sigma_1} + \Sigma_1 \cdot h_1$$

5.3 Input dati

5.3.1 Modello del terreno

Per definire l'assetto geometrico complessivo dell'area studiata occorre pervenire a DTM sufficientemente precisi e dettagliati dell'intera area interessata in quanto, dal dato geometrico, dipende la correttezza della simulazione. Nel caso in oggetto, le fonti topografiche sono riassumibili come di seguito elencato.

- Rilievo topografico dell'area mediante drone;
- Rilievo topografico mediante GPS.

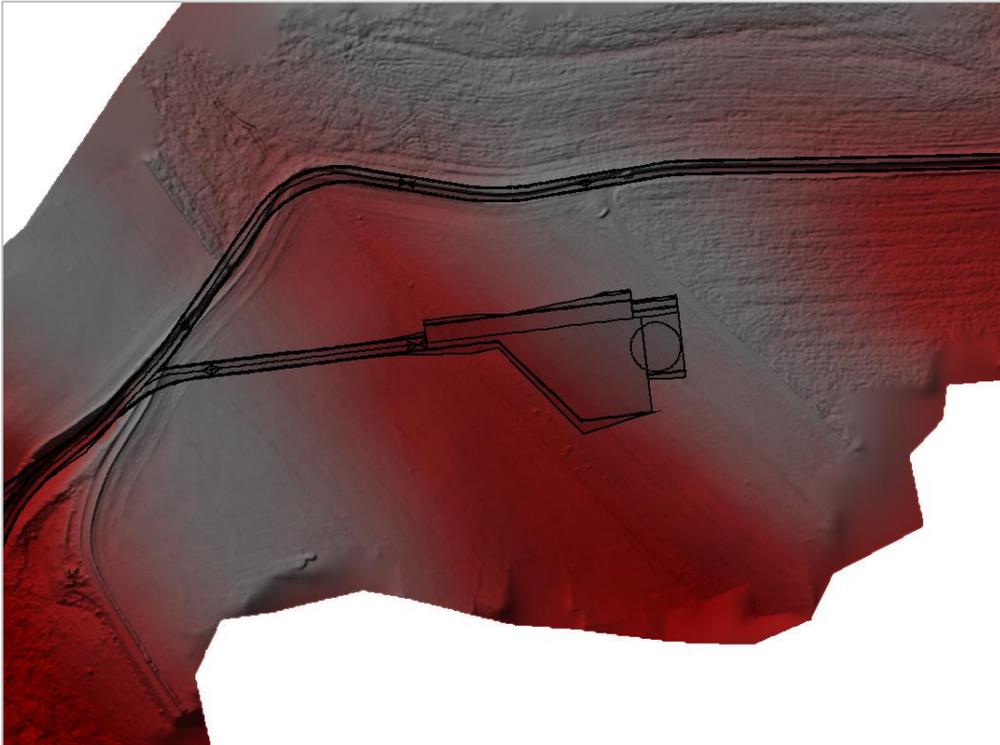


Figura 5.1 Modello del terreno HEC-RAS: aerogeneratore T3

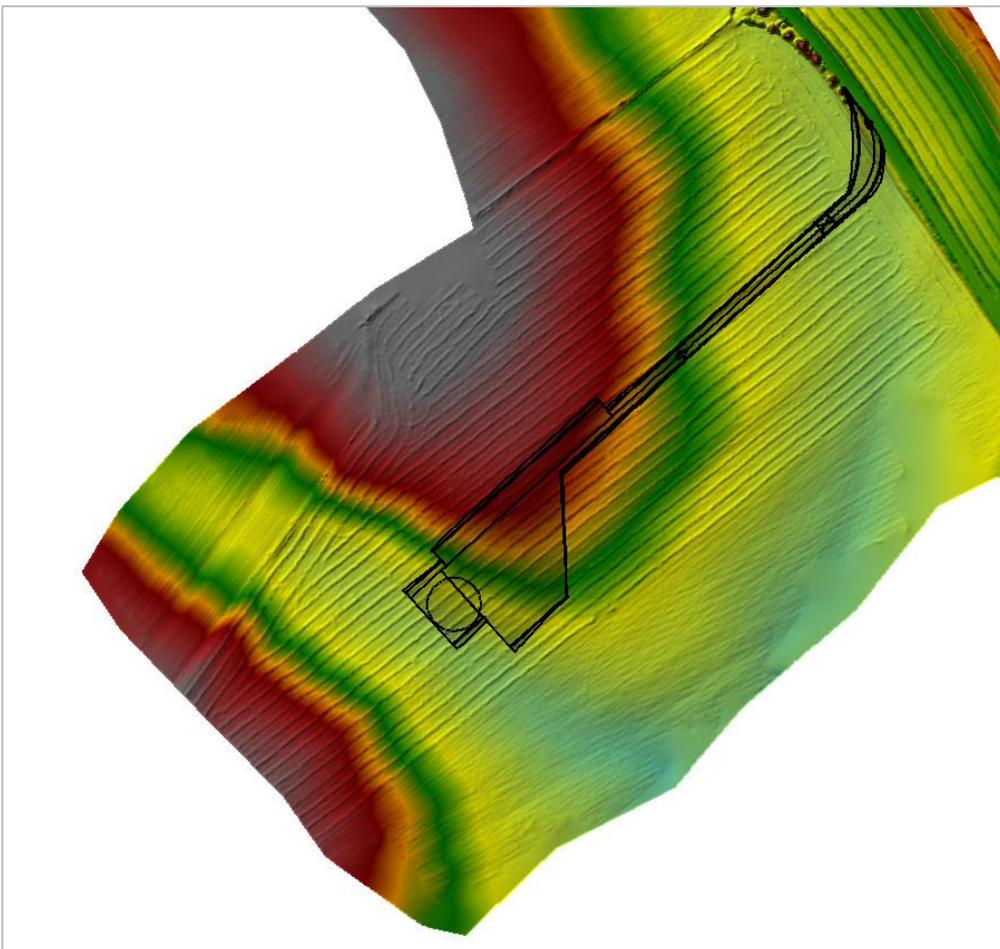


Figura 5.2 Modello del terreno HEC RAS: aerogeneratore T4

5.3.2 Geometrie del modello

I corpi idrici oggetto di analisi, come già anticipato, sono due impluvi (denominati, per comodità di identificazione, Asta 1 e Asta 2).

Dapprima sono stati inseriti lo sviluppo della rete idrografica “*River reach*” ed i dati geometrici delle sezioni di interesse dei canali in modo tale da fornire al programma un quadro dello sviluppo plano-altimetrico del sistema.

La geometria delle sezioni “*Cross sections*” è stata definita a partire dal modello del terreno ed è caratterizzata da:

- coordinate (x,z): si indicano le quote altimetriche (*Elevation, z*) corrispondenti ai punti assegnati sul piano orizzontale (*Station, x*);
- distanza relativa tra le sezioni (*Downstream reach length*), inferiore a 10 volte la larghezza media del corso d’acqua, è la distanza relativa della sezione rispetto a quella successiva di valle. In particolare, poiché si considera la sezione trasversale costituita da due golene e alveo centrale, si indica in *LOB* la distanza relativa alla golena di sinistra, in *Channel* la distanza relativa al canale centrale, in *ROB* la distanza relativa alla golena di destra. Tali valori (LOB/ROB) sono calcolati in automatico dal modello una volta definito il posizionamento delle sezioni trasversali.
- Coefficiente di scabrezza: si definiscono i coefficienti di scabrezza di Manning relativi alle tre parti in cui è suddivisa la sezione (vedi paragrafo 6.3.3).
- Coefficienti di contrazione/espansione (*Cont/Exp Coefficients*): il coefficiente di contrazione delle sezioni è stato posto pari a 0,1 ed il coefficiente di espansione è stato posto pari a 0,3.
- Bank stations: si definiscono le ascisse iniziali e finali della parte di alveo considerata come canale principale.

La progressiva delle sezioni “*River station*”, per necessità del programma, è decrescente.

Di seguito, sono riportati il modello (Figure 6.3 e 6.4) con indicazione delle aste (*Rivers*) e delle sezioni (*Cross Sections*), come modellati in HEC-RAS.

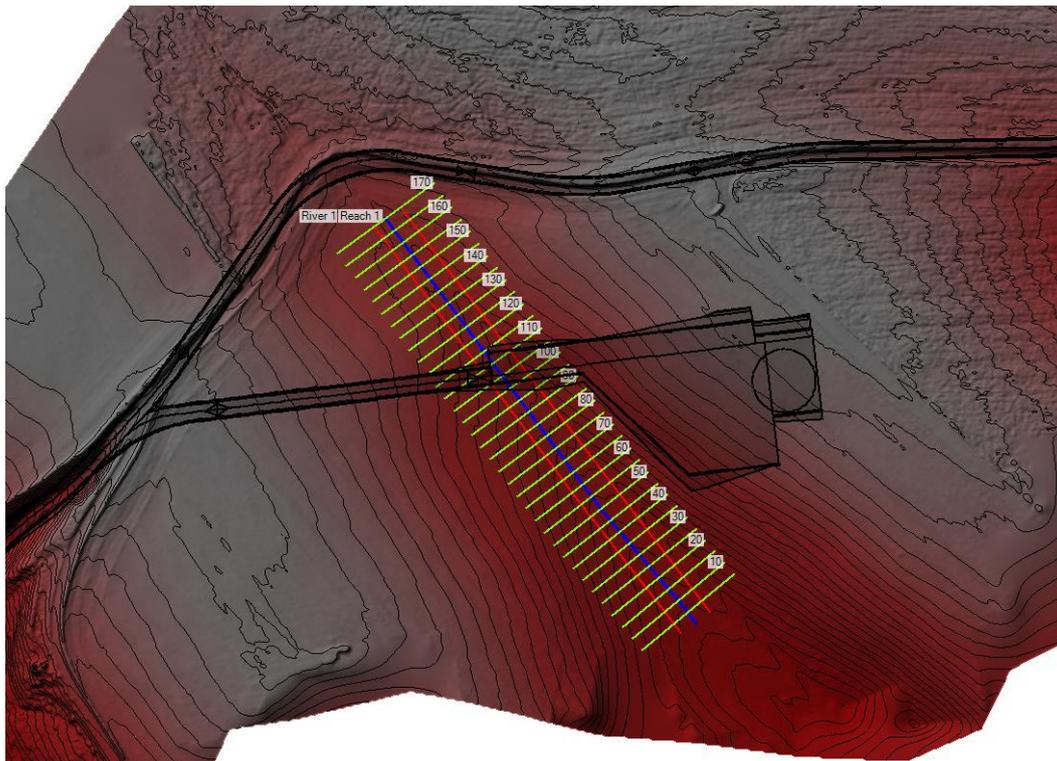


Figura 5.3 Modello in HEC RAS con indicazione delle aste (Rivers), delle sponde (Bank lines) e delle sezioni di calcolo (Cross Sections) relativo al River 1 (aerogeneratore T3)

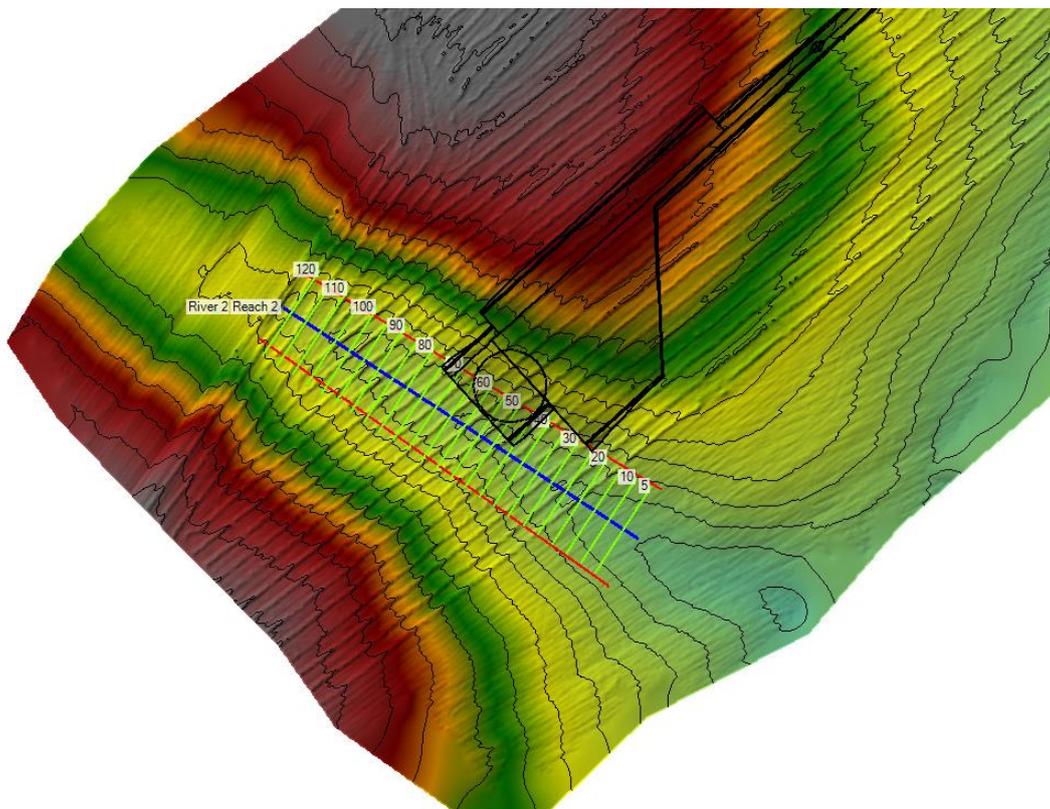


Figura 5.4 Modello in HEC RAS con indicazione delle aste (Rivers), delle sponde (Bank lines) e delle sezioni di calcolo (Cross Sections) relativo al River 2 (aerogeneratore T4)

5.3.3 Coefficiente di scabrezza

Di seguito sono riportati i valori dei singoli coefficienti utilizzati per la definizione della scabrezza di Manning del tratto di canale considerato e nelle aree golenali.

- $n_{\text{canale}}=0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ in quanto, nonostante la occasionale presenza di ghiaia, il letto del canale è sostanzialmente uniforme con moderata vegetazione;
- $n_{\text{golene}}=0,17 \text{ s/m}^{1/3}$ per le aree golenali, in accordo con quanto previsto nel caso di ruscellamento diffuso per “seminativi semplici in aree irrigue / non irrigue” per la regione Puglia.

5.3.4 Levees e ineffective flow areas

Per una corretta modellazione idraulica del canale è necessario introdurre argini “*Levees*” e definire aree che non contribuiscono al deflusso “*Ineffective flow areas*”.

Le *Ineffective Flow Areas* sono utilizzate per modellare porzioni di sezione in cui può essere presente dell’acqua, ma con velocità pari a zero: possono quindi essere pensate come delle aree di ristagno.

Tali aree sono tenute in conto ai fini del calcolo dei parametri idraulici (es. contorno bagnato), ma non sono considerate “attive” ai fini del convogliamento dell’acqua; la loro attivazione avviene nel momento in cui l’altezza idrica supera il valore limite impostato, definito da una coppia (*Station, Elevation*).

L’introduzione dei *Levees* si rende necessaria in tutti quei casi in cui la monodimensionalità del modello produce risultati non rappresentativi della realtà: senza l’inserimento di tale opzione osserveremmo lo stesso livello idrico presente nella parte destra della sezione anche nell’area golenale sinistra posta al di là dell’argine.

Il *levee*, simulato come se fosse un muro verticale, impedisce quindi all’acqua di andare oltre i limiti fissati fintato che non viene sormontato.

Dal punto di vista computazionale tali elementi producono un aumento del contorno bagnato nel momento in cui l’acqua viene in contatto con essi.

La metodologia per l’introduzione di questa opzione è del tutto simile a quella descritta in precedenza: in input vengono richieste la *Station* e l’*Elevation* del *levee* (che può essere posizionato a sinistra, a destra o su entrambi i lati). La Figura 6.7 mostra un esempio di inserimento di *Levees* in una sezione trasversale.

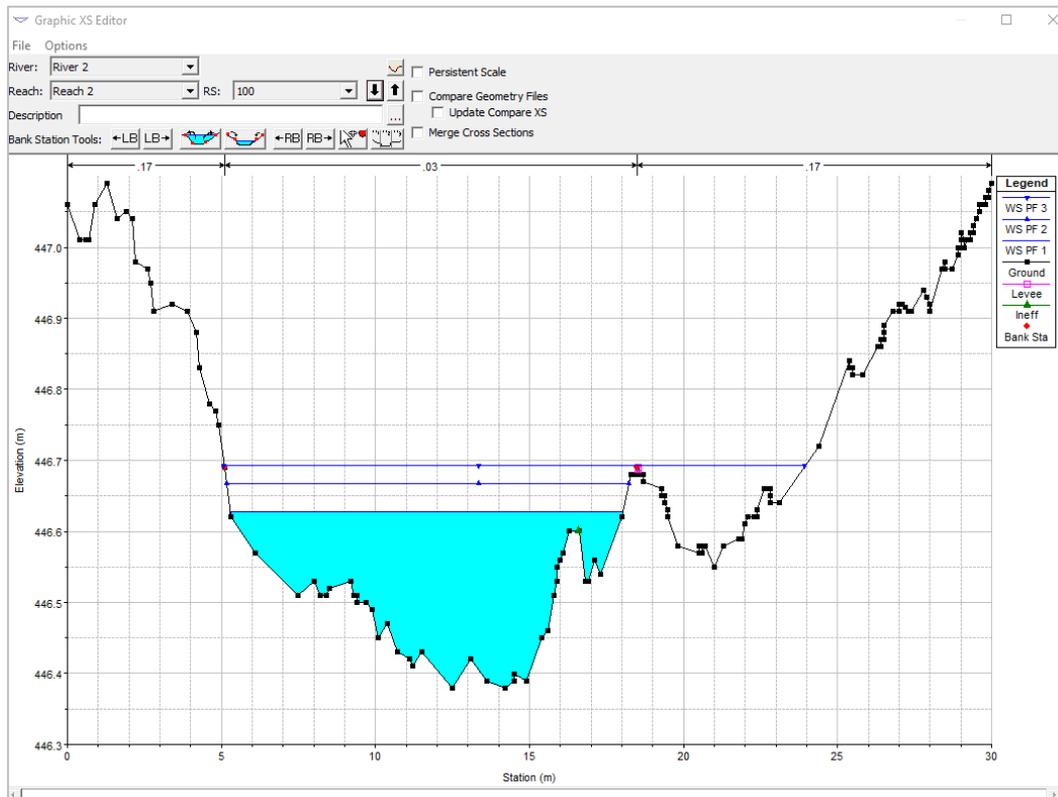


Figura 5.5 Esempio inserimento levees in una sezione trasversale.

5.4 Condizioni al contorno

In *Reach boundary conditions* si definiscono le condizioni al contorno (selezionando la posizione: monte/valle), per le quali HEC-RAS permette di scegliere fra quattro possibili opzioni:

- *Known W.S.*: si fornisce il valore noto di altezza del pelo libero, indicato rispetto alla quota del piano di riferimento assunto per le quote relative alle sezioni trasversali.
- *Critical depth*: si assume come altezza del pelo libero l'altezza critica, automaticamente calcolata per ogni profilo.
- *Normal depth*: si assume come altezza del pelo libero l'altezza relativa al moto uniforme che il programma calcola per ogni profilo; bisogna fornire in questo caso la pendenza della linea dei carichi totali, che si può approssimare con la pendenza del tratto di canale a monte.
- *Rating curve*: si fornisce la scala di deflusso relativa alla sezione considerata (curva altezza-portata), attraverso la quale il programma procede mediante interpolazione per la determinazione dell'altezza correlata.

Nel presente lavoro si è ipotizzato un moto in corrente veloce (*supercritical flow*)¹ ed è stata fornita la condizione al contorno a monte: non avendo a disposizione dati di portata per la calibrazione, si è optato per condizioni al contorno tipo “*Normal depth*”.

È stata scelta inoltre l’opzione per il calcolo dell’altezza critica su tutte le sezioni, “*Critical Depth Always Calculated*” (in caso contrario il programma avrebbe provveduto al calcolo di k solo nei casi in cui il numero di Froude è prossimo ad 1 o in cui non riesce a bilanciare l’equazione dell’energia entro il numero massimo di iterazioni fissate).

Di seguito le condizioni al contorno imposte per la simulazione in moto permanente.

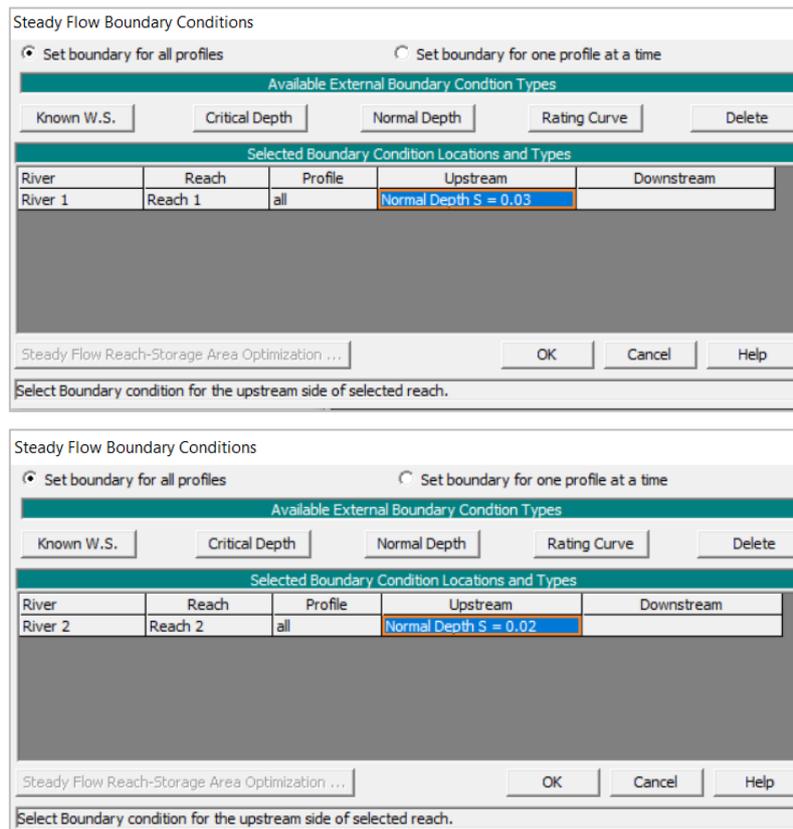


Figura 5.6 Condizioni al contorno per moto permanente per River 1 e River 2.

5.4.1 Dati di portata

La simulazione è stata condotta in moto permanente (*Steady flow analysis*).

Il valore della portata fornito in una sezione viene pertanto mantenuto costante nei calcoli per tutte le sezioni successive verso valle.

¹ La scelta del regime di moto è stata effettuata a valle dell’analisi dei risultati ottenuti per ciascun regime di moto (*subcritical, supercritical, mixed*), adottando quello che ha consentito un soluzione più stabile e rispondente alla realtà fisica del moto all’interno del canale.

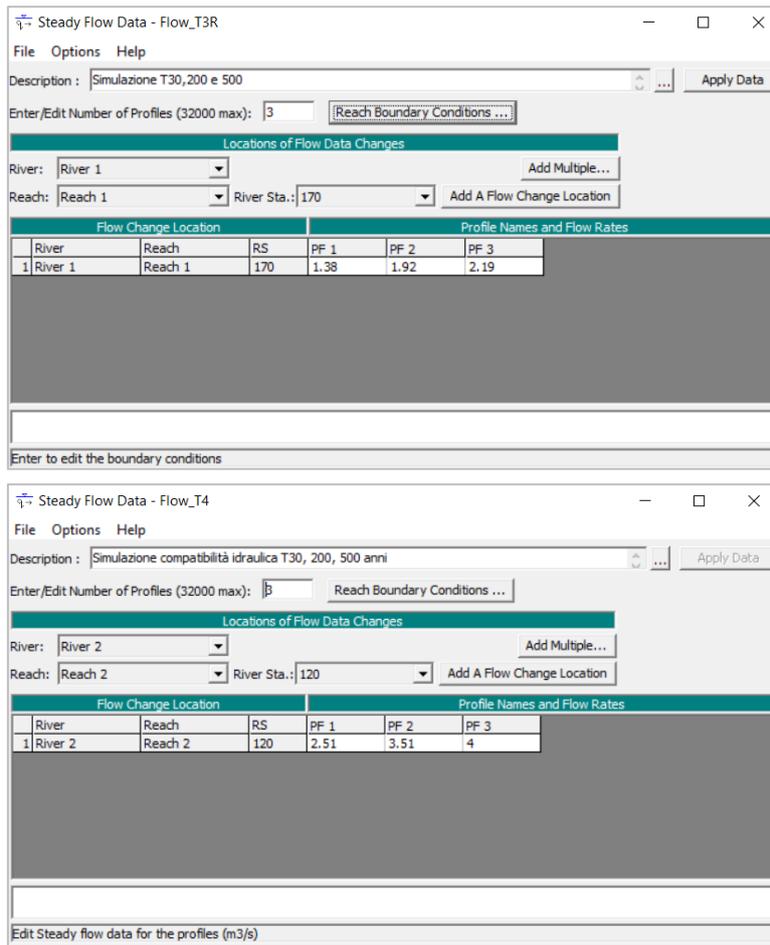


Figura 5.7 Dati di portata per River 1 e River 2

6 VERIFICA DI SUSSISTENZA DI SICUREZZA IDRAULICA

In relazione alla compatibilità con il PAI delle opere previste, questa può essere assentita solo a seguito della redazione di *un adeguato “Studio di compatibilità idrologico ed idraulica” redatto ai sensi degli artt. 4, 6 e 10 delle N.T.A. del PAI, che dimostri l'esistenza di adeguate condizioni di sicurezza idraulica (riferite ad un evento meteorico con tempo di ritorno di 200 anni, così come definito all'art. 36 delle stesse N.T.A.), sulla base di un accurata individuazione dei bacini idrografici sottesi dalle opere interessate dai deflussi e conseguente modellazione dei deflussi idraulici sulla base delle caratteristiche morfologiche e idrologiche delle aree interessate. Inoltre richiede di definire le aree inondabili con tempo di ritorno di 30, 200 e 500 anni.*

In Figura 6.1 e Figura 6.2 si riportano gli stralci delle mappe di allagamento per il tempo di ritorno di 200 anni, rispettivamente per l'impluvio in prossimità della torre T3 e della torre T4. Osservando i risultati si evince come l'aerogeneratore T3 è esterno alle aree inondabili e pertanto gli interventi risultano compatibili con le finalità e le prescrizioni del PAI. Per quanto riguarda l'aerogeneratore T4, i risultati mostrano una sovrapposizione con le aree allagate per una piccola porzione del plinto di fondazione della torre. Al fine di indagare meglio la consistenza di tale interferenza sono stati analizzati i tiranti idrici in prossimità del plinto. Questi, come desumibile dalla carta dei tiranti in allegato e riportata in Figura 6.3, sono inferiori a 10 cm. Preme inoltre sottolineare come l'allagamento, visti i modesti tiranti idrici (inferiori a 40 cm), sia influenzato dai solchi di aratura trasversali al deflusso.

Alla luce di quanto suddetto, si ritengono soddisfatte le verifiche di sussistenza di sicurezza idraulica per entrambi gli aerogeneratori.

Le mappe con le aree inondabili per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni sono riportate in allegato.

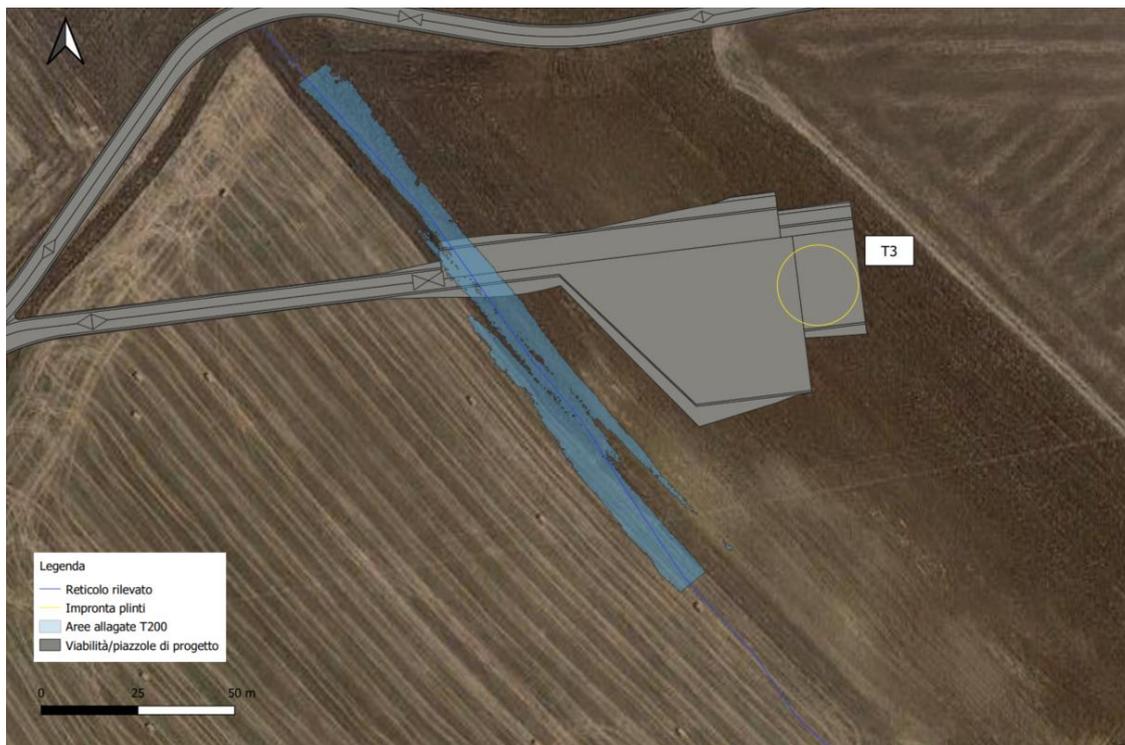


Figura 6.1 Aree allagate relative al tempo di ritorno $T=200$ anni per impluvio prossimo alla torre T3

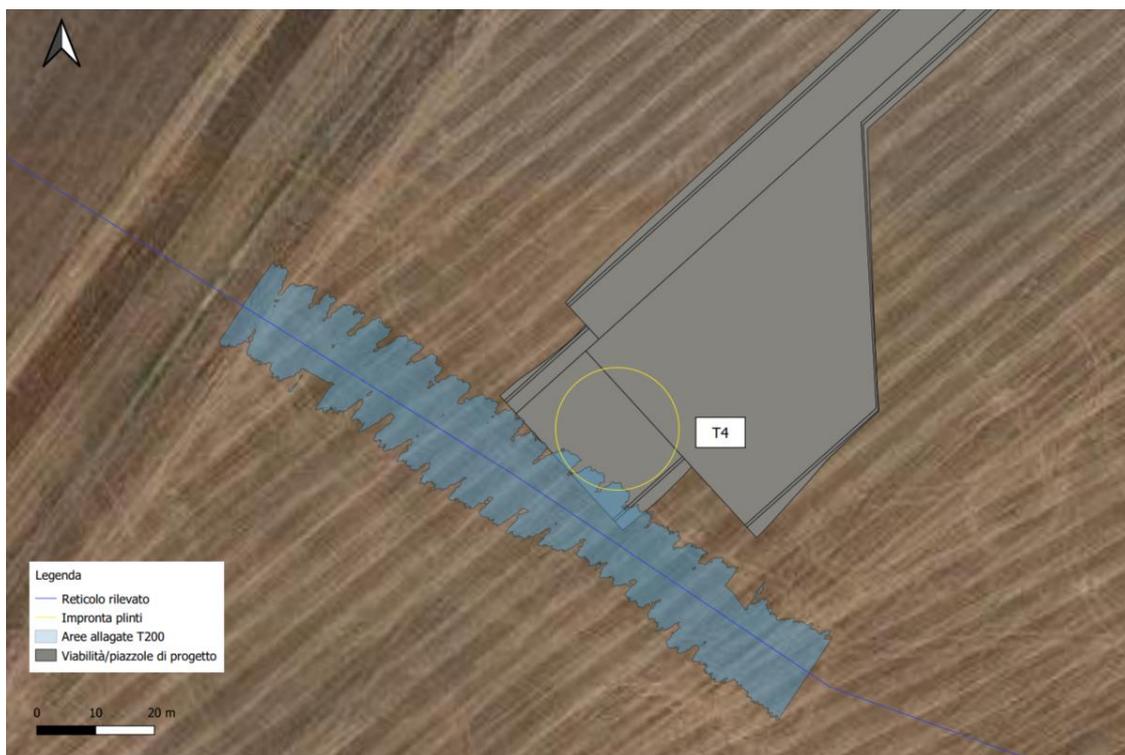


Figura 6.2 Aree allagate relative al tempo di ritorno $T=200$ anni per impluvio prossimo alla torre T4



Figura 6.3 Aree allagate relative al tempo di ritorno $T=200$ anni con indicazione dei tiranti idrici per l'impiuvio prossimo alla torre T4

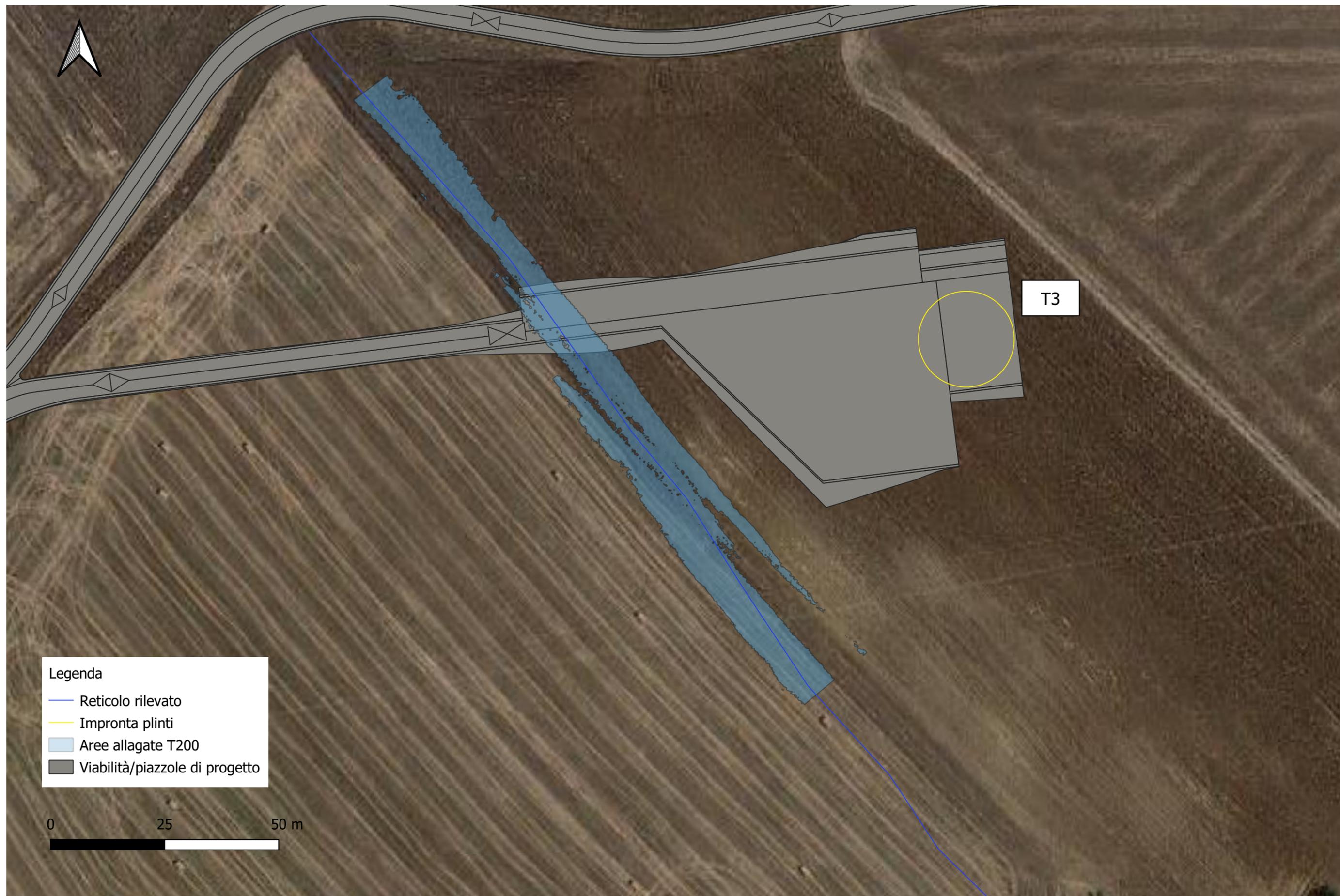
7 ALLEGATI

- Aerogeneratore T3: Mappa di allagamento con tempo di ritorno $T=30$ anni
- Aerogeneratore T3: Mappa di allagamento con tempo di ritorno $T=200$ anni
- Aerogeneratore T3: Mappa di allagamento con tempo di ritorno $T=500$ anni
- Aerogeneratore T4: Mappa di allagamento con tempo di ritorno $T=30$ anni
- Aerogeneratore T4: Mappa di allagamento con tempo di ritorno $T=200$ anni
- Aerogeneratore T4: Mappa di allagamento con tempo di ritorno $T=500$ anni
- Aerogeneratore T4: Mappa dei tiranti con tempo di ritorno $T=200$ anni

Aerogeneratore T3: Mappa allagamento con tempo di ritorno T=30 anni



Aerogeneratore T3: Mappa allagamento con tempo di ritorno T=200 anni



Aerogeneratore T3: Mappa allagamento con tempo di ritorno T=500 anni



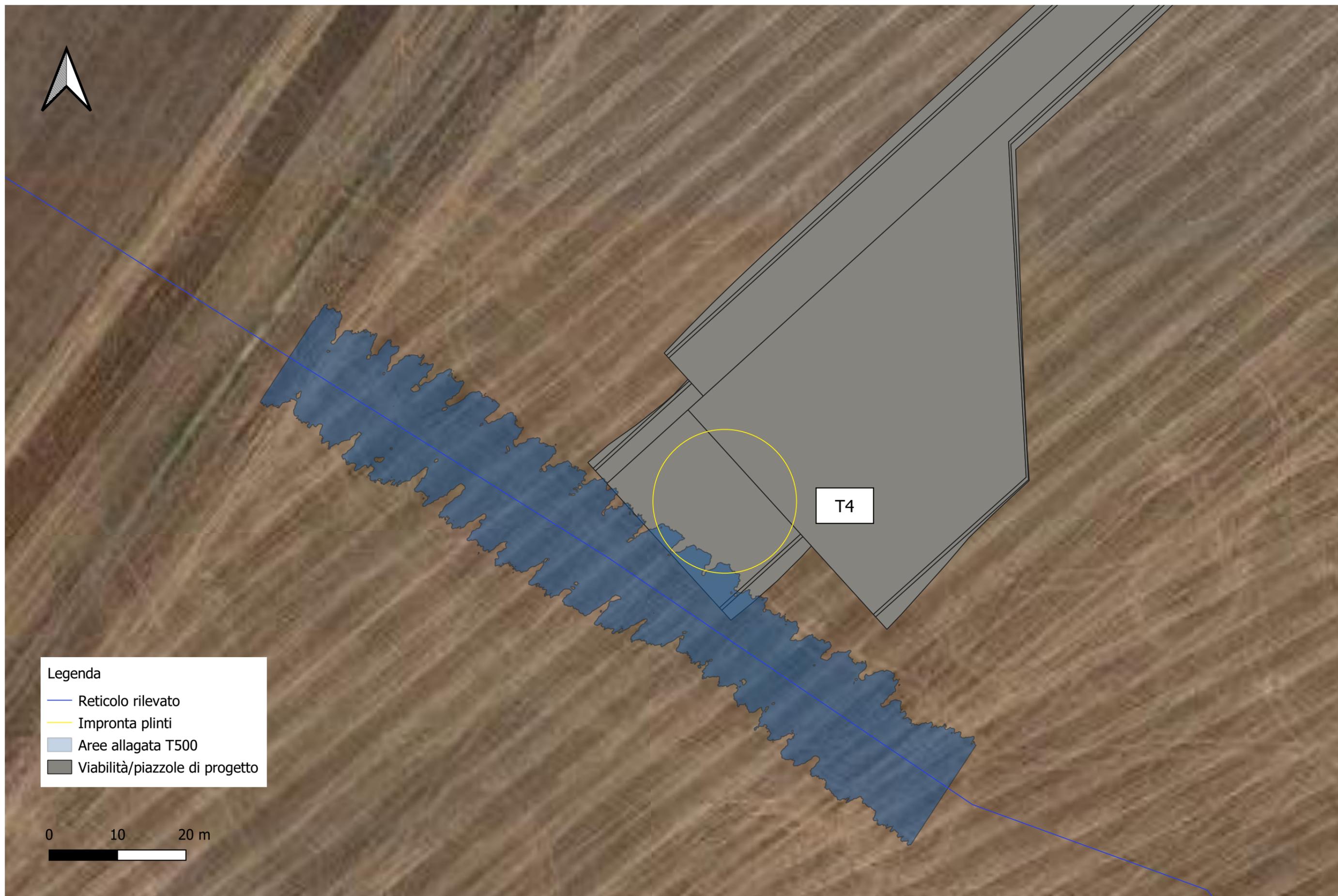
Aerogeneratore T4: Mappa allagamento con tempo di ritorno T=30 anni



Aerogeneratore T4: Mappa allagamento con tempo di ritorno T=200 anni



Aerogeneratore T4: Mappa allagamento con tempo di ritorno T=500 anni



Aerogeneratore T4: Mappa dei tiranti con tempo di ritorno T=200 anni

