

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Geotecnica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



Politecnico  
di Torino



MADA  
ENGINEERING

*Metodi e modellazioni funzionali allo sviluppo e alla verifica  
dei sistemi di mitigazione inerenti a un campo agrovoltico.*

Relatrice:

Prof.ssa Monica Barbero

Relatori aziendali:

Dott. Ing. Daniele Cianciolo

Ing. Adamo Cali

Studente

Silvio Giotti S278155



## SOMMARIO

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo l'analisi di un sistema di mitigazione a servizio di un campo agrovoltaiico sito in Sicilia.

L'opera di interesse è composta da diverse zone pannellabili e che secondo la carta di pericolosità del P.A.I. ricadono in zona di pericolosità P3. Per la realizzazione del progetto, è stato necessario ridurre il livello di pericolosità del sito, da un livello P3 ad un livello P2.

A tale fine, nell'ambito del presente lavoro di tesi, si è proceduto a verificare l'esattezza della classe di rischio dell'area, mediante analisi di dettaglio, e si è progettato il sistema di mitigazione seguendo il D.D.G 102 del 23/06/2021.

Alla progettazione del sistema segue la verifica del sistema progettato, mediante analisi numerica agli elementi finiti, utilizzando il programma "FEA NX" sviluppato da "Midas".

Si è quindi investigata l'operatività del sistema di mitigazione, a seguito di una precipitazione avente tempo di ritorno di 50 anni e si è valutato l'eventuale potenziamento del sistema di laminazione.

## **ABSTRACT**

This thesis work is devoted to the analysis of a mitigation system serving an agro-voltaic system located in Sicily.

The area, in which the mitigation system is located, is made up of different zones that can be paneled and which, according to the hazard map of the P.A.I., fall within the P3 danger zone. For the realization of the project, it was necessary to reduce the level of danger of the site, from a P3 level to a P2 level.

So the correctness of the risk class of the area has been verified by means of a detailed analysis and a mitigation system has been designed according to the D.D.G 102 of 06/23/2021. Then, it has been verified by means of numerical FEM model, implemented in the code "FEA NX" developed by "Midas".

The effectiveness of the mitigation system, composed of ditches and drainage system, was then investigated, under a precipitation with a return period of 50 years, and a possible enhancement of the lamination system has been investigated.

# Sommario

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>7</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	<b>11</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>12</b>
<b>2 DESCRIZIONE E INQUADRAMENTO DELL'OPERA</b> .....	<b>13</b>
2.1 PIANO STRALCIO DI BACINO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO P.A.I. ....	15
• <i>Azioni non strutturali</i> .....	18
• <i>Azioni strutturali per la mitigazione del rischio idraulico</i> .....	18
2.2 INDIVIDUAZIONE DELL'AREA A RISCHIO SECONDO IL P.A.I. ....	19
• <i>Metodologia semplificata</i> .....	20
• <i>Metodologia completa</i> .....	20
2.3 OPERE E ATTIVITÀ IN AREE A LIVELLO DI PERICOLOSITÀ P3 .....	21
2.4 INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO .....	24
<b>3 DESCRIZIONE IDROGEOLOGICA DEL BACINO DELL'AREA DI IMPIANTO</b> .....	<b>27</b>
3.1 BACINO DEL FIUME SIMETO .....	28
3.2 CARATTERISTICHE LITOLOGICHE .....	33
3.3 PERMEABILITÀ DEI TERRENI AFFIORANTI .....	35
3.4 STRATIGRAFIA DEL SITO DI INTERVENTO .....	37
• <i>Impianto EN513c</i> .....	38
• <i>Impianti EN513a-EN513b-EN566d-EN566e-EN800-EN801-EN802</i> .....	39
<b>4 VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ IDROGEOLOGICA DELLE OPERE IN PROGETTO</b> .....	<b>40</b>
4.1 OPERE DI MITIGAZIONE .....	42
• <i>Coefficienti di deflusso</i> .....	42
• <i>Determinazione dei volumi di laminazione</i> .....	45
• <i>Zona EN801</i> .....	46
• <i>Volume di laminazione zona EN802</i> .....	48
• <i>Volume di laminazione zona EN800+EN513b</i> .....	50
• <i>Volume di laminazione zona EN566e</i> .....	52
• <i>Volume di laminazione zona EN513c</i> .....	54
4.2 SISTEMA DI CONVOGLIAMENTO E LAMINAZIONE .....	56
4.3 DETERMINAZIONE DELLE LINEE DI FLUSSO .....	58

<b>5</b>	<b>MOTO DI FILTRAZIONE NEI MEZZI POROSI SATURI E INSATURI.....</b>	<b>68</b>
5.1	MEZZO POROSO SATURO.....	68
5.2	MEZZO POROSO INSATURO .....	70
	• <i>Curva di ritenzione</i> .....	71
	• <i>Funzione di permeabilità</i> .....	72
<b>6</b>	<b>MODELLAZIONE E ANALISI .....</b>	<b>74</b>
6.1	MODELLAZIONE TOPOGRAFICA DEL SITO IN ESAME .....	74
6.2	MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI MITIGAZIONE .....	79
	• <i>Sistema di mitigazione in zona EN802</i> .....	79
	• <i>Sistema di mitigazione in zona EN566e</i> .....	95
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>110</b>
	<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>113</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>114</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1- Inquadramento complessivo della zona d'intervento.	13
Figura 2.2- Inquadramento di dettaglio della zona di impianto.	14
Figura 2.3-Struttura di supporto (tracker monoassiale).	15
Figura 2.1.1- Distribuzione delle azioni di attuazione del Piano per l'Assetto Idrogeologico.	17
Figura 2.2.1- Pericolosità idraulica secondo la metodologia semplificata.	20
Figura 2.2.2- Pericolosità idraulica e battente idraulico.	21
Figura 2.4.1- Mappa di rischio idraulico e zone di impianto.	24
Figura 2.4.2- Mappa di pericolosità idraulica e zone di impianto (in rosso).	24
Figura 3.1- Estratto dalla carta pedologica.	27
Figura 3.1.1- Bacino fiume Simeto.	28
Figura 3.2.1- Distribuzione della litologia in Sicilia.	35
Figura 3.4.1-Ubicazione impianto EN513c (area pannellabile in chiaro).	38
Figura 3.4.2- Ubicazione degli impianti EN513a-EN513b-EN566d-EN566e-EN800-EN801-EN802 (area pannellabile in chiaro).	39
Figura 4.1- Tiranti idrici nelle zone pannellabili per tempi di ritorno di 50 anni.	41
Figura 4.2- Tiranti idrici nelle zone pannellabili per tempi di ritorno di 100 anni.	41
Figura 4.3- Tiranti idrici nelle zone pannellabili per tempi di ritorno di 300 anni.	41
Figura 4.1.1- Ubicazione sito EN801.	46
Figura 4.1.2- Ubicazione sito EN802.	48
Figura 4.1.3- Ubicazione sito EN800+EN513b.	50
Figura 4.1.4- Ubicazione sito EN566e.	52
Figura 4.1.5- Ubicazione zona EN513c.	54
Figura 4.2.1- Sistema di laminazione.	56
Figura 4.3.1- DEM cella 2x2 e zone di impianto (perimetro rosso).	59
Figura 4.3.2- Raster ritagliato e zone di impianto.	59
Figura 4.3.3- Curve di livello.	60
Figura 4.3.4- Linee di flusso nella zona di impianto EN801.	60
Figura 4.3.5- Linee di flusso nella zona di impianto EN802.	61

Figura 4.3.6- Linee di flusso nella zona di impianto EN800 e EN513b	61
Figura 4.3.7- Linee di flusso nella zona di impianto EN566e.	62
Figura 4.3.8- Linee di flusso nella zona di impianto EN513c.	63
Figura 4.3.9- Sistema drenante e bacino di laminazione preesistente zona EN801.	64
Figura 4.3.10- Sistema drenante zona EN802.	64
Figura 4.3.11- Sistema drenante zona EN800 e EN513b.	65
Figura 4.3.12- Sistema drenante zona EN800.	65
Figura 4.3.13- Sistema drenante zona EN513c.	66
Figura 4.3.14- Mappa complessiva ubicazione del sistema di mitigazione.	67
Figura 5.1- Rappresentazione volume di controllo.	69
Figura 6.1.1- Terrain Geometry Maker.	74
Figura 6.1.2- File di input per la modellazione del terreno.	75
Figura 6.1.3- Vista sul piano x-y delle curve di livello (componente planimetrica).	76
Figura 6.1.4- Vista sul piano y-z delle curve di livello (componente altimetrica).	76
Figura 6.1.5- Selezione dell'area di interesse da interpolare.	77
Figura 6.1.6-Rappresentazione continua del terreno.	77
Figura 6.1.7- Superficie del terreno nello spazio di modellazione.	78
Figura 6.1.8- Impostazioni comando "Extrude".	78
Figura 6.1.9- Modello del terreno.	79
Figura 6.2.1- Sistema di mitigazione zona EN802.	80
Figura 6.2.2- Sistema di mitigazione nello spazio di modellazione.	80
Figura 6.2.3- Differenza di quota del sistema di mitigazione.	81
Figura 6.2.4- Solido di interesse per l'analisi (in blu).	81
Figura 6.2.5- Volume di terreno rappresentate la zona di impianto.	82
Figura 6.2.6- Comando "Project".	82
Figura 6.2.7- Proiezione del sistema di mitigazione sul volume di terreno.	82
Figura 6.2.8- Visualizzazione in sezione del sistema in esame.	83
Figura 6.2.9- Imposizione del livello di falda nello strato di argilla.	84
Figura 6.2.10- Intensità di precipitazione in input al sistema.	85
Figura 6.2.11- Imposizione della precipitazione in input.	86
Figur 6.2.12- Mesh del terreno e del sistema di mitigazione.	86

Figura 6.2.13- Definizione dello stage “Steady state”.	87
Figura 6.2.14- Definizione dello stage “Transient”.	88
Figura 6.2.15- Grado di saturazione del sistema complessivo ad inizio precipitazione.	89
Figura 6.2.16- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 2 ore.	89
Figura 6.2.17- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 3 ore.	89
Figura 6.2.18- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 4 ore.	90
Figura 6.2.19- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 5 ore.	90
Figura 6.2.20- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 6 ore.	90
Figura 6.2.21- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 7 ore.	91
Figura 6.2.22- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 1 ora.	91
Figura 6.2.23- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 2 ore.	92
Figura 6.2.24- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 3 ore.	92
Figura 6.2.25- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 4 ore.	92
Figura 6.2.26- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 5 ore.	93
Figura 6.2.27- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 6 ore.	93
Figura 6.2.28- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 48 ore.	94
Figur 6.2.29- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 48 ore.	94
Figura 6.2.30- Sistema di mitigazione zona EN566e.	95
Figura 6.2.31- Sistema di mitigazione nello spazio di modellazione.	96
Figura 6.2.32- Differenza di quota del sistema di mitigazione.	96
Figura 6.2.33- Solido di interesse per l’analisi (in blu).	97
Figura 6.2.34- Volume di terreno rappresentate la zona di impianto.	97
Figura 6.2.35- Comando “Project”.	98
Figura 6.2.36- Proiezione del sistema di mitigazione sul volume di terreno.	98

Figura 6.2.37- Visualizzazione in sezione del sistema in esame.	99
Figura 6.2.38- Imposizione del livello di falda nello strato di argilla.	100
Figura 6.2.39- Intensità di precipitazione in input al sistema.	101
Figura 6.2.40- Imposizione della precipitazione in input.	101
Figura 6.2.41- Mesh del terreno e del sistema di mitigazione.	102
Figura 6.2.42- Definizione dello stage “Steady state”.	103
Figura 6.2.43- Definizione dello stage “Transient”.	103
Figura 6.2.44- Grado di saturazione del sistema complessivo ad inizio precipitazione.	104
Figura 6.2.45- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 2 ore.	104
Figura 6.2.46- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 3 ore.	105
Figura 6.2.47- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 4 ore.	105
Figura 6.2.48- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 5 ore.	105
Figura 6.2.49- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 6 ore.	106
Figura 6.2.50- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 1 ora.	106
Figura 6.2.51- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 2 ore.	107
Figura 6.2.52- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 3 ore.	107
Figura 6.2.53- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 4 ore.	107
Figura 6.2.54- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 5 ore.	108
Figura 6.2.55- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 6 ore.	108
Figura 6.2.56- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 48 ore.	108
Figura 6.2.57- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 48 ore.	109

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1- Caratteristiche geometriche dei campi agrovoltaiici.	14
Tabella 4.1.1- Valori del coefficiente di deflusso. Allegato 1 della legge regionale 29 aprile 2015, n.11	42
Tabella 4.1.2- Utilizzo uso del suolo ante-operam per le singole zone agro-fotovoltaiche e relativo coefficiente di deflusso.	43
Tabella 4.1.3- Utilizzo uso del suolo post-operam per le singole zone agro-fotovoltaiche e relativo coefficiente di deflusso.	44
Tabella 4.1.4- Utilizzo suolo post-operam EN801.	47
Tabella 4.1.5- Volumi di laminazione zona EN801.	47
Tabella 4.1.6- Utilizzo suolo post-operam EN802.	49
Tabella 4.1.7- Volumi di laminazione zona EN802.	49
Tabella 4.1.8- Utilizzo suolo post-operam EN800+EN513b.	51
Tabella 4.1.9- Volumi di laminazione zona EN800 e EN513b.	51
Tabella 4.1.10- Utilizzo suolo post-operam EN566e.	53
Tabella 4.1.11- Volumi di laminazione zona EN566e.	53
Tabella 4.1.12- Utilizzo suolo post-operam EN513c.	55
Tabella 4.1.13- Volumi di laminazione zona EN513c.	55
Tabella 4.2.1- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN801.	57
Tabella 4.2.2- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN802.	57
Tabella 4.2.3- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN800 e EN513b.	57
Tabella 4.2.4- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN566e.	58
Tabella 4.2.5- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN513c.	58
Tabella 6.2.1- Proprietà idrauliche dei terreni.	84
Tabella 6.2.2- Parametri dell'insaturo inerenti al suolo alluvionale e alla ghiaia.	84
Tabella 6.2.3- Proprietà dei terreni in esame.	99
Tabella 6.2.4- Parametri del modello dell'insaturo inerenti al suolo alluvionale e alla ghiaia.	100

# 1 INTRODUZIONE

---

La crescente richiesta di energia, sia da parte delle imprese che da parte dei privati cittadini, in concomitanza all'esigenza di ridurre l'emissione di CO<sub>2</sub> proveniente dall'utilizzo dei combustibili fossili, ha spinto sempre più verso l'utilizzo di fonti alternative e rinnovabili. Ad oggi una tra le tecnologie maggiormente adoperate per produrre energia, soprattutto elettrica, è rappresentata dall'uso dei pannelli fotovoltaici. Le zone che maggiormente si prestano a tale sistema, in quanto offrono maggiore superficie pannellabile, sono quelle rurali o spesso zone a vocazione agraria. Tali zone però per via delle caratteristiche geomorfologiche non sempre possono essere oggetto di intervento, spesso infatti ci si trova in zone in cui il livello di pericolosità idrogeologica è elevato

Nel presente elaborato è stato trattato l'intero iter progettuale che ha portato alla possibile realizzazione di un campo agro-fotovoltaico in una zona della Piana di Catania. Una volta definite da parte della committenza le zone di impianto, si è proceduto all'individuazione, secondo il P.A.I, del grado di pericolosità e rischio. Le zone pannellabili interessano una porzione di territorio caratterizzato da una pericolosità idraulica P3; quindi, per rendere possibile la realizzazione dell'opera è stato necessario condurre delle analisi, mediante procedure più avanzate, al fine di dimostrare che l'effettivo livello di pericolosità risultava essere inferiore. Successivamente sulla base dei dati geologici e geotecnici della zona oggetto di intervento, si è progettato un sistema di laminazione e deflusso confacente alla compagine geotecnica, geologica e idraulica del sito. L'analisi dei dati ha quindi poi permesso di scegliere il sistema drenante, nonché anche di laminazione, più idoneo; inoltre, principale attenzione è stata riposta nello studio del grado di saturazione del sistema di mitigazione, permettendo di analizzare nel tempo la sua capacità di laminazione. L'analisi e la modellazione è stata effettuata considerando il moto in regime transitorio e osservando la natura tridimensionale del problema, mediante modellazione numerica agli elementi finiti. Si è utilizzato allo scopo il software "FEA NX" sviluppato da *MIDAS*.

## 2 DESCRIZIONE E INQUADRAMENTO DELL'OPERA

---

L'impianto agro-fotovoltaico “*Mezzaluna*” possiede originariamente un'estensione complessiva di 139,92 ha e si compone di n. 6 zone oggetto di intervento. La zona di impianto è situata nella porzione della piana Catanese, nello specifico alla destra del fiume Gornalunga. L'inquadramento complessivo della zona e dei singoli campi è rappresentato in figura 2.1 e 2.2.



*Figura 2.1- Inquadramento complessivo della zona d'intervento.*

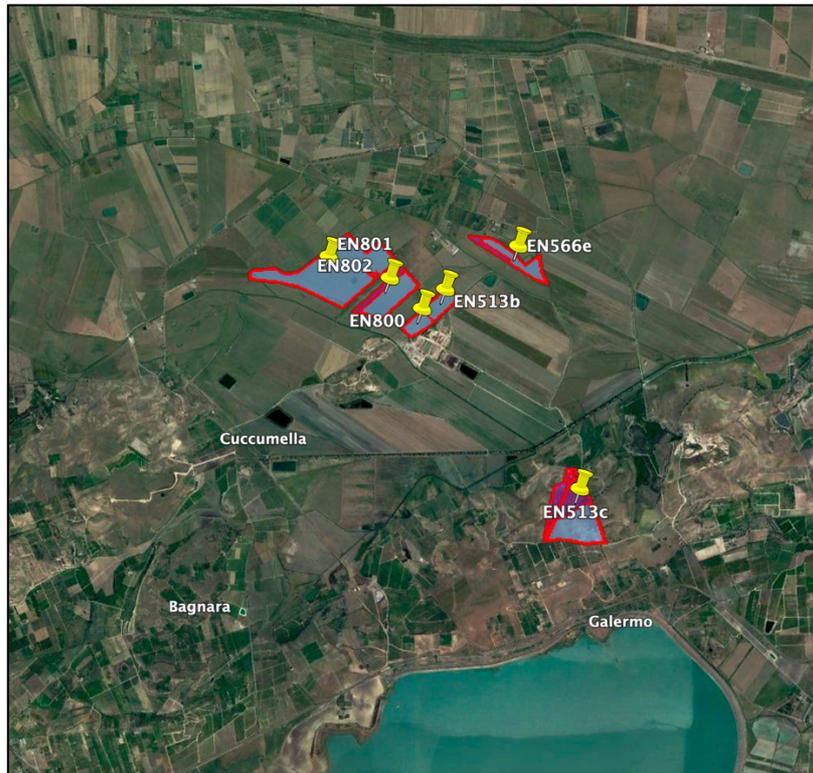


Figura 2.2- Inquadramento di dettaglio della zona di impianto.

Le principali caratteristiche geometriche dei campi sono riportati nella tabella 2.1.

Tabella 2.1- Caratteristiche geometriche dei campi agrovoltaici.

Lentini 2 - Mezzaluna	Superficie	L <sub>perimetro</sub>
[Id]	[ha]	[m]
EN801	46,127	3747,26
EN802	14,791	1529,50
EN800+EN513b	10,768	1494,34
EN566e	9,960	1822,00
EN566d+EN513a	30,930	2553,37
EN513c	27,351	1580,31

La potenza prevista dell'impianto è di 40 MW in A.C. e di 51,9904 MW in D.C.

I pannelli saranno disposti su strutture di supporto ad inseguimento mono-assiale con asse di rotazione disposto in direzione NORD-SUD costituite da telai metallici in acciaio zincato ed

ancorati a terra mediante pali di fondazione anch'essi in acciaio zincato. La modalità di ancoraggio è generalmente ad infissione diretta tramite battipalo e comunque viene determinata in funzione delle caratteristiche del terreno.



*Figura 2.3-Struttura di supporto (tracker monoassiale).*

Le strutture di supporto sono modulari e vanno a formare le cosiddette vele, quest'ultime sono disposte in file parallele con inclinazione variabile tra -5% e -15% in funzione della pendenza del terreno. Le vele sono distanziate lungo l'asse EST-OVEST in modo da minimizzare gli ombreggiamenti reciproci. L'altezza massima raggiunta è di 4,5 m, relativamente alle prime ore del mattino o nelle ore serali, quando la struttura è ruotata del suo angolo massimo pari a 60°.

La fattibilità dell'opera dipende fortemente dai vincoli idrogeologici del luogo, pertanto, dapprima si è consultato il Piano stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I).

## **2.1 PIANO STRALCIO DI BACINO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO P.A.I.**

Il P.A.I persegue tre funzioni:

- La funzione conoscitiva, ovvero lo studio dell'ambiente fisico e del sistema antropico e degli strumenti urbanistici e dei vincoli idrogeologici e paesaggistici;

- La funzione normativa e prescrittiva, ovvero l'insieme di norme e prescrizioni relativi alla tutela del territorio e delle acque fino alla valutazione della pericolosità del rischio idrogeologico;
- La funzione programmatica, che fornisce i possibili interventi finalizzati alla mitigazione del rischio.

Attraverso il P.A.I la Regione Sicilia si dota di uno strumento di pianificazione, di prevenzione e di gestione delle problematiche territoriali riguardanti la difesa del suolo. L'Atto di indirizzo e coordinamento distingue i metodi di indagine a seconda del tipo di dissesto e definisce quattro classi di rischio aventi gravosità crescente ovvero da moderato a medio e da elevato a molto elevato. La valutazione del rischio avviene attraverso il prodotto di tre fattori fondamentali:

$$R = P * E * V$$

Dove:

- R è il rischio;
- P è la pericolosità, ovvero la probabilità che un dato fenomeno di una determinata intensità si manifesti in un certo periodo di tempo in una data area;
- E è l'esposizione, ovvero la probabilità che un dato elemento a rischio sia presente nell'area e nel tempo in cui avviene il fenomeno;
- V è la vulnerabilità, ovvero la capacità dell'elemento a rischio di sopportare le sollecitazioni derivanti dall'evento.

Nell'Atto di indirizzo e coordinamento viene fornita la priorità generale degli elementi a rischio, mettendo innanzitutto a primo posto l'incolumità delle persone come elemento prioritario a maggiore rischio, a cui seguono:

- Agglomerati urbani, comprese le zone di espansione urbanistica;
- Le aree su cui insistono insediamenti produttivi, impianti tecnologici di rilievo, in particolare quelli definiti a rischio, ai sensi di legge;

- Le infrastrutture a rete, le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
- Le aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive ed infrastrutture primarie.

Per comprendere appieno le finalità del P.A.I bisogna dapprima comprendere il significato di *Assetto Idrogeologico*. Per assetto si intende una situazione di ordine che si contrappone ad una di disordine provocata dall'evento; dove l'ordine è rappresentato dall'equilibrio del territorio e delle acque, mentre il disordine non è altro che il dissesto idrogeologico. L'obiettivo che si prefigge il P.A.I è quello di predisporre una serie di azioni ed interventi che hanno come obiettivo quello di attenuare il dissesto.

Il P.A.I. viene attuato e gestito attraverso lo svolgimento di azioni che tendono a:

- Ridurre e/o mitigare le condizioni di rischio idraulico e di rischio di frana nelle zone individuate nel P.A.I.
- Assicurare la compatibilità degli strumenti di pianificazione e programmazione urbanistica e territoriale con le caratteristiche dei sistemi idrografici e dei versanti.

Le azioni che si possono intraprendere al fine di intervenire sulla causa dei dissesti si dividono in azioni non strutturali e azioni strutturali.

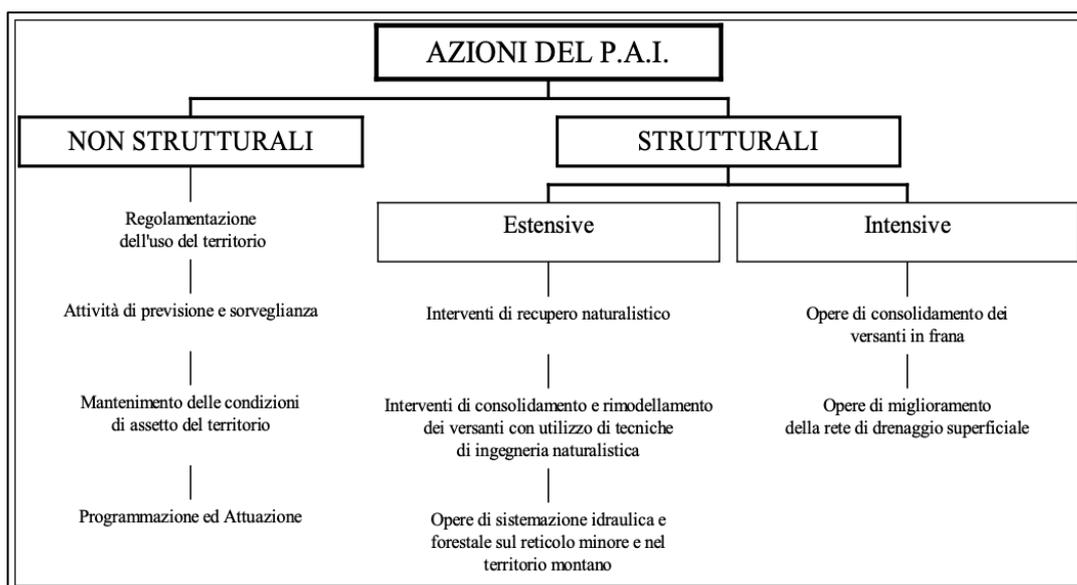


Figura 2.1.1- Distribuzione delle azioni di attuazione del Piano per l'Assetto Idrogeologico.

- **Azioni non strutturali**

Comprendono tutte le misure di tipo preventivo finalizzate ad evitare o ridurre i fenomeni di dissesto idrogeologico mediante attività di regolamentazione del territorio, che si esplicano con il controllo e la salvaguardia degli elementi a rischio e la tutela delle aree pericolose e il mantenimento, laddove esistente, delle condizioni di assetto del territorio. Si tratta di misure di competenza non esclusivamente ingegneristica, finalizzate alla riduzione dell'entità dei danni conseguenti ad un fenomeno franoso o ad un'alluvione.

Tali azioni possono esplicitarsi tramite:

1. Attività di regolamentazione dell'uso del territorio;
2. Attività di previsione e sorveglianza;
3. Mantenimento delle condizioni di assetto del territorio;
4. Programmazione ed attuazione.

- **Azioni strutturali per la mitigazione del rischio idraulico**

Sono interventi che basano la loro azione sulla presenza di infrastrutture artificiali, realizzate allo scopo di ridurre la probabilità di inondazione di particolari aree all'interno del bacino di un corso d'acqua, aumentando il valore del tempo di ritorno della portata di esondazione. Tali interventi limitano l'allagamento delle zone a rischio con differenti azioni.

I principali tipi di interventi strutturali sono:

- Serbatoi di piena: è il metodo più diretto per il controllo delle piene. I serbatoi di piena costituiscono uno degli interventi strutturali maggiormente utilizzati per la gestione degli eventi di piena. La funzione principale di un serbatoio è quella di provvedere alla detenzione dei volumi di piena a monte della sezione di interesse e di rilasciarli in maniera controllata.
- Casse di espansione, che a differenza dei serbatoi di piena sono realizzate lateralmente all'asta fluviale con un collegamento in parallelo ed entrano in funzione solo durante gli eventi di piena.

- Deviazione dei volumi di piena, adoperati nel caso non sia possibile e/o conveniente realizzare sistemi per il contenimento delle piene. Le portate vengono allontanate e poi canalizzate per giungere ad una depressione topografica in prossimità del fiume, dove l'acqua ha la possibilità di infiltrarsi nel terreno o di evaporare, oppure per essere rimesse in un lago o in un fiume, non appartenenti al sistema idrico in considerazione, o, ancora, in mare. Un metodo spesso utilizzato, è quello di ribassare gli argini per un certo tratto in modo da consentire la deviazione delle portate in eccesso in zone disabitate a basso valore agricolo.

## **2.2 INDIVIDUAZIONE DELL'AREA A RISCHIO SECONDO IL P.A.I.**

L'indagine per l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio per inondazione è stata svolta secondo un approccio metodologico analitico e omogeneo su tutto il territorio tenendo in debito conto le peculiari problematiche.

L'assetto idraulico del territorio risulta negativamente influenzato dall'alta densità della popolazione residente, dall'elevata urbanizzazione, spesso caratterizzata da un'alta percentuale di abusivismo, da insediamenti produttivi (agricoli ed industriali) frutto di una pianificazione che ha tenuto in scarsa considerazione la loro negativa incidenza sul territorio. La stima della pericolosità costituisce il presupposto essenziale per la valutazione del rischio sul territorio. Questa è stata valutata in maniera differente a seconda delle informazioni disponibili e dell'affidabilità della ricostruzione delle aree inondabili. Nel caso in cui la scala della cartografia disponibile e le connesse sezioni trasversali della valle fluviale non consentissero di ottenere un'affidabile distribuzione spaziale delle altezze idriche all'interno dell'area inondata (ottenuta peraltro utilizzando modelli monodimensionali, oppure bidimensionali semplificati), si è fatto riferimento ad una metodologia, cosiddetta "semplificata", che valuta la pericolosità soltanto in funzione del tempo di ritorno. Nel caso in cui, invece, i risultati della modellazione idraulica fossero supportati da elementi conoscitivi di dettaglio (cartografia 1:2000 e/o sezioni trasversali rilevate in loco), atti a consentire una notevole affidabilità relativa al calcolo della distribuzione spaziale delle grandezze idrauliche (ottenute tramite l'uso di modelli mono/bidimensionali o quasi-

bidimensionali), si è fatto ricorso ad una metodologia completa che valuta la pericolosità incrociando le informazioni relative al tempo di ritorno con quelle relative alla distribuzione spaziale delle altezze idriche.

- **Metodologia semplificata**

I dati e gli elementi conoscitivi a disposizione non permettono di determinare in maniera affidabile la distribuzione spaziale delle altezze idriche all'interno dell'area inondabile. La pericolosità viene allora determinata soltanto in funzione del tempo di ritorno, in particolare in modo inversamente proporzionale allo stesso. È possibile distinguere tre diverse rilevanze di piena (Figura 2.2.1):

- Aree ad alta probabilità di inondazione;
- Aree a moderata probabilità di inondazione;
- Aree a bassa probabilità di inondazione.

<b>T</b>	<b>P</b>
<b>50</b>	P3
<b>100</b>	P2
<b>300</b>	P1

*Figura 2.2.1- Pericolosità idraulica secondo la metodologia semplificata.*

- **Metodologia completa**

Nel caso in cui i risultati della modellazione idraulica, supportati da una buona qualità dell'informazione cartografica e morfologica disponibile, fornissero informazioni spazialmente distribuite delle altezze idrauliche, ricavate con l'applicazione attendibile di modelli mono/bidimensionali o quasi-bidimensionali, si fa ricorso ad una metodologia "completa" che valuta la pericolosità incrociando le informazioni relative al tempo di ritorno e alla distribuzione spaziale delle altezze idriche stesse. È evidente che il tirante idrico influisce sull'entità dei danni e, quindi, sulle potenzialità d'uso del territorio. Si può ritenere che per livelli di inondazione sino a 0.3 m i danni e i disagi siano ancora contenuti, mentre

per livelli di inondazione più elevati vi sia un notevole incremento sia dei danni sia del disagio percepito (Figura 2.2.2).

Battente Idraulico	Tempo di Ritorno		
	50	100	300
$H < 0.3$ m	P1	P1	P1
$0.3 < H < 1$ m	P2	P2	P2
$1 < H < 2$ m	P4	P3	P2
$H > 2$ m	P4	P4	P3

Figura 2.2.2- Pericolosità idraulica e battente idraulico.

### 2.3 OPERE E ATTIVITÀ IN AREE A LIVELLO DI PERICOLOSITÀ P3

Nelle aree a pericolosità idraulica elevata (P3) sono vietate tutte le opere e le attività di trasformazione dello stato dei luoghi e quelle di carattere urbanistico ed edilizio. Sono, in particolare, vietate le costruzioni e i manufatti che possano deviare la corrente verso rilevati e ostacoli nonché scavi o abbassamenti del piano di campagna che possano compromettere la stabilità delle fondazioni degli argini, laddove esistenti.

In tali aree sono consentite:

- La prosecuzione delle attività agricole e i cambi colturali, fermo restando che gli stessi non diano luogo a richieste di risarcimento del danno;
- Gli interventi volti alla ricostituzione degli equilibri naturali alterati e all'eliminazione, per quanto possibile, dei fattori incompatibili di interferenza antropica;
- Gli interventi di miglioramento statico, di adeguamento sismico e di demolizione e ricostruzione nel rispetto della volumetria e sagoma esistenti senza incremento dell'uso del suolo;
- Gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, gli interventi di restauro e risanamento conservativo e gli interventi di ristrutturazione edilizia degli edifici, come definiti dalla vigente normativa di settore, e senza cambio di destinazione d'uso che comportino aumento del carico urbanistico;

- Gli interventi volti a mitigare la vulnerabilità degli edifici esistenti e a migliorare la tutela della pubblica incolumità, senza aumenti di superficie e volume e cambiamenti di destinazione d'uso che comportino aumento del carico urbanistico;
- Gli interventi necessari per la manutenzione ordinaria, straordinaria e di consolidamento delle opere infrastrutturali e delle opere pubbliche o di interesse pubblico e gli interventi di consolidamento e restauro conservativo di beni di interesse culturale, compatibili con la normativa di tutela;
- Gli interventi di adeguamento del patrimonio edilizio esistente per il rispetto delle norme in materia di sicurezza e igiene del lavoro e di abbattimento di barriere architettoniche;
- Gli interventi necessari per la manutenzione ordinaria e straordinaria.

Sono inoltre consentite, previa verifica di compatibilità:

- Le opere di difesa, di sistemazione e di manutenzione idraulica, atte a mitigare i livelli di rischio atteso e pericolosità esistenti;
- La ristrutturazione delle infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico esistenti;
- Nuove costruzioni necessarie per la conduzione aziendale delle attività agricole esistenti, non realizzabili in aree non soggette a pericolosità P4 e P3, purché le superfici abitabili siano ubicate a quote compatibili rispetto al livello idrico definito dalla piena di riferimento con un franco adeguato, e purché le costruzioni siano costruite secondo i principi di *flood Proofing*, e l'azione statica e dinamica del più gravoso scenario di alluvione siano espressamente considerate nell'ambito delle verifiche strutturali e geotecniche;
- Opere per la permanenza o la sosta limitata nel tempo di persone, attrezzature leggere amovibili, servizi anche stagionali a supporto della balneazione, percorsi pedonali, aree destinate al tempo libero, alle attività sportive e alla fruizione turistica che non prevedano il pernottamento e non comportino edificazione permanente, purché siano previste opportune misure di allertamento, che siano realizzati gli opportuni interventi di mitigazione del rischio atteso e siano identificate vie d'esodo sicure nel caso in cui si verificano eventi alluvionali;

- Gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, gli interventi di restauro e risanamento conservativo e gli interventi di ristrutturazione edilizia parziale degli edifici, come definiti dalla vigente normativa di settore, a condizione che gli stessi non aumentino i livelli di pericolosità e di rischio;
- Le occupazioni temporanee di suolo (cantieri, deposito di materiali o esposizione di merci a cielo libero);
- Le opere di presa e di accumulo dei volumi idrici;
- Gli interventi finalizzati alla percorrenza e all'attraversamento dei corsi d'acqua relativo a infrastrutture a rete e viarie;
- La realizzazione di nuovi interventi infrastrutturali e nuove opere pubbliche a condizione che sia incontrovertibilmente dimostrata e dichiarata l'assenza di alternative di localizzazione e purché sia compatibile con la pericolosità dell'area.

## 2.4 INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

Il livello di pericolosità e di rischio idraulico secondo il PAI dell'area oggetto del presente studio, è stato ricavato attraverso la consultazione del dato informativo messo a disposizione dalla Regione Sicilia, le cui mappe sono rappresentate nelle figure 2.4.1 e 2.4.2

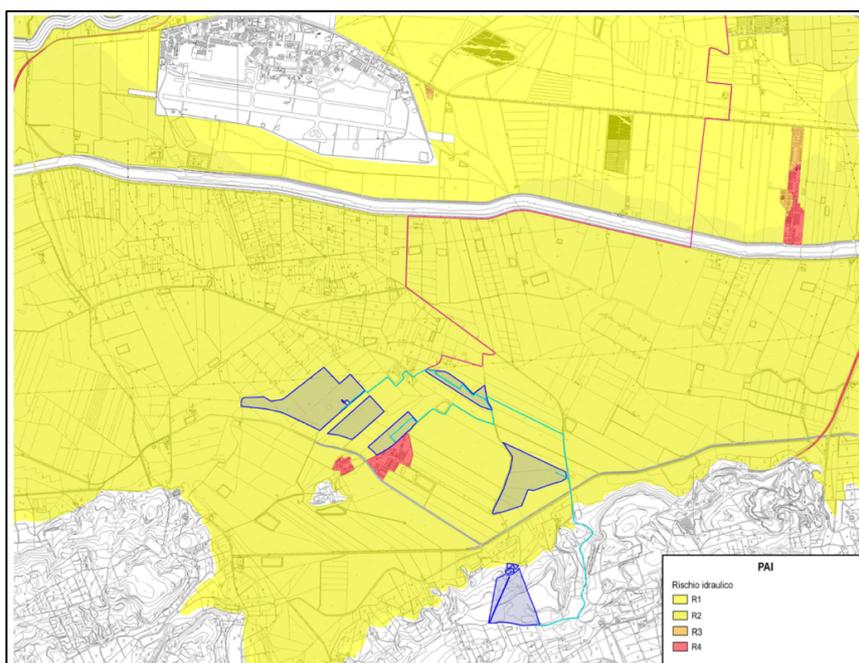


Figura 2.4.1- Mappa di rischio idraulico e zone di impianto.



Figura 2.4.2- Mappa di pericolosità idraulica e zone di impianto (in rosso).

Come si evince dalle mappe in figura 2.4.1 e 2.4.2, tutte le zone di impianto, ad eccezione della EN513C, si trovano in zona con rischio R2 e pericolosità P3. Ciò che risulta limitante per lo sviluppo dell'impianto agrovoltaiico è quindi il livello di pericolosità, che risulta essere elevato.

Partendo dai dati di input del P.A.I. si è condotto uno studio avente il fine ultimo di determinare, attraverso strumenti teorici e di calcolo attuali, un livello di pericolosità più accurato.

Il P.A.I. infatti è da intendersi come uno strumento dinamico, ovvero suscettibile nel tempo di aggiornamenti e modifiche. Si riporta a tal fine quanto descritto nell'articolo 7, *“Procedure di aggiornamento e revisione promosse da soggetti pubblici o privati*, del DP N. 09/ADB del 06/05/2021:

*“7.1 Il P.A.I. può essere aggiornato, su proposta di soggetti pubblici o privati, per stralci relativi a singoli dissesti, a centri abitati o infrastrutture lineari, o relativi a un bacino, a un sottobacino o ad un'area vasta classificata in condizioni di pericolosità, a seguito di:*

*a) indagini e studi di approfondimento o a scala di dettaglio eseguiti da pubbliche amministrazioni e/o privati;*

*b) Segnalazione di nuovi dissesti idrogeologici;*

*c) variazione delle condizioni di pericolosità, derivanti dalla realizzazione e/o completamento di interventi strutturali di mitigazione del rischio idrogeologico.*

*La documentazione necessaria ai fini dell'aggiornamento, differenziata per ognuno dei tre casi sopracitati, è indicata nell'Appendice A. La richiesta di aggiornamento viene valutata dall'Autorità competente che provvede, in caso di condivisione, ai successivi adempimenti.*

*7.2. Le proposte promosse da privati sono presentate per il tramite del Comune, che su di esse esprime un parere per gli aspetti di sua competenza.*

*7.3. Al fine dell'aggiornamento, nei casi di cui al comma 1, lettera c), il soggetto proponente trasmette all'Autorità il progetto degli interventi strutturali di mitigazione del rischio corredato, secondo il tipo di dissesto, da studi di compatibilità geomorfologica o di compatibilità idraulica o di idrodinamica costiera e morfodinamica costiera, redatti sulla base delle indicazioni contenute rispettivamente nelle Appendici B, C, D. L'Autorità competente esprime la valutazione d'idoneità della proposta alla mitigazione del rischio e preannunzia la classificazione che sarà attribuita all'area dopo la realizzazione*

*dell'intervento, fornendo eventuali prescrizioni. Dopo la realizzazione degli interventi il soggetto proponente integra la richiesta d'aggiornamento con l'ulteriore documentazione indicata nell'Appendice A.*

*Al termine della procedura di aggiornamento, l'area interessata dagli interventi verrà definita "Area interessata dagli effetti di interventi di mitigazione del rischio", alla quale si applicano le disposizioni di cui all'articolo 16.*

*7.4 Nei casi previsti dai commi precedenti gli uffici dell'Autorità competente procedono alla redazione della "previsione di aggiornamento" secondo le modalità sotto riportate:*

*a) sopralluogo di verifica (se necessario);*

*b) predisposizione elaborati (relazione e cartografie tematiche);*

*c) predisposizione del Decreto del Segretario Generale di adozione della proposta di aggiornamento contenente le misure di salvaguardia previste al successivo art.10*

*c) trasmissione del Decreto agli Enti di cui al successivo articolo, per l'affissione all'Albo pretorio.*

Pertanto, il P.A.I stabilisce che il livello di pericolosità e rischio possono variare se supportati da validi studi. Quindi nel caso in cui si dimostri un declassamento del livello di pericolosità e/o rischio, non solo vi è la possibilità di realizzare eventuali opere in zone in cui dapprima non era possibile, ma si contribuisce anche ad un perfezionamento del P.A.I stesso.

### 3 DESCRIZIONE IDROGEOLOGICA DEL BACINO DELL'AREA DI IMPIANTO

Da un punto di vista idrogeologico, l'area in studio ricade interamente nel dominio della Piana di Catania, caratterizzata dalla presenza di suoli alluvionali.

Gli impianti si sviluppano in aree prossime al corso d'acqua principale Gornalunga, come mostrato in figura.

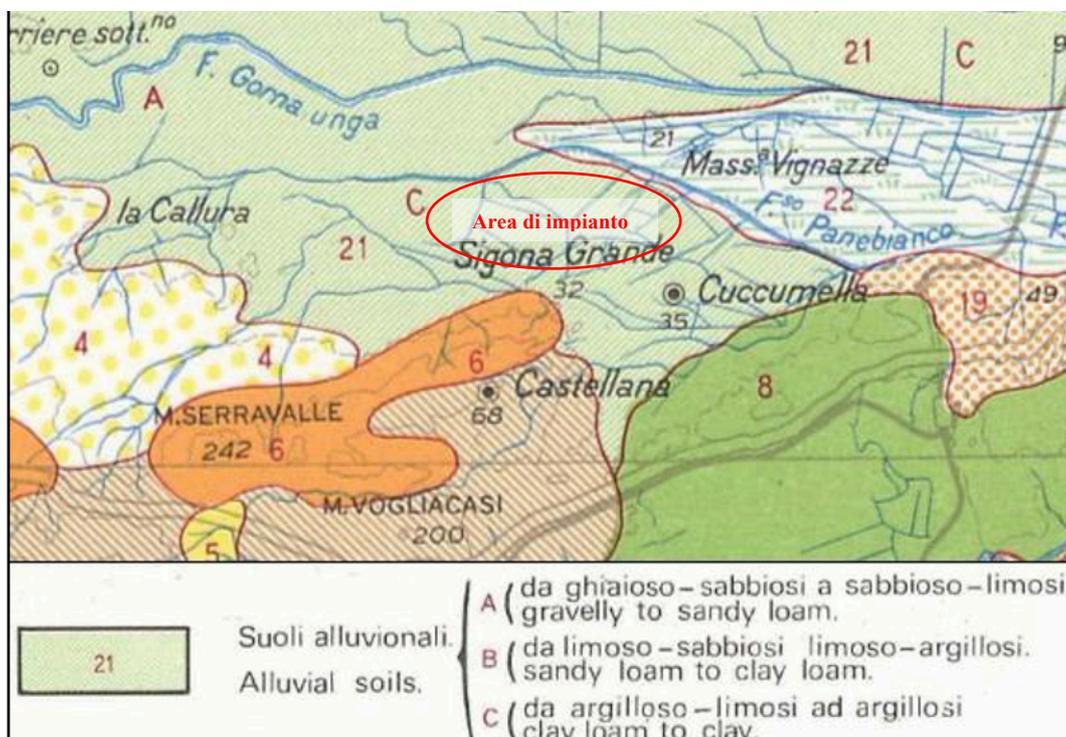


Figura 3.1- Estratto dalla carta pedologica.

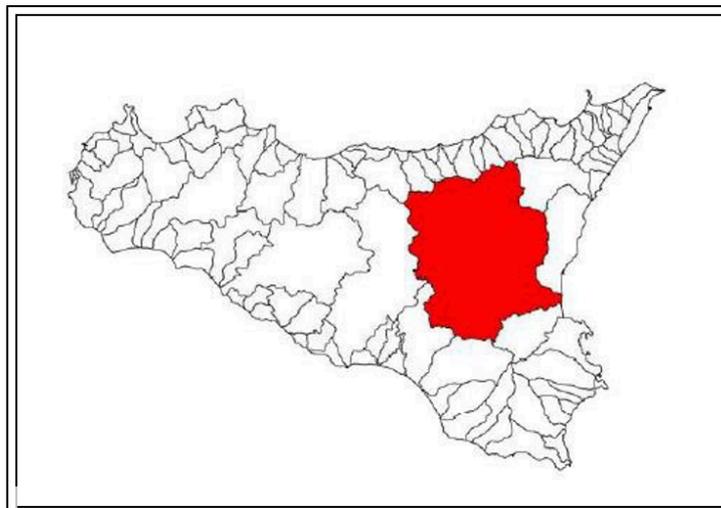
Il corso d'acqua Gornalunga fa parte del bacino imbrifero del Fiume Simeto. Nell'area oggetto di studio è possibile distinguere settori a diversa configurazione morfologica:

- Settore settentrionale prevalgono forme aspre e accidentate dovute alla presenza di affioramenti arenaceo-conglomeratici e quarzaneritici, che costituiscono il gruppo montuoso dei Nebrodi.

- Ad Ovest ed a Sud-Ovest sono presenti i monti Erei, di natura arenacea e calcarenitico-sabbiosa
- Nella porzione centro-meridionale è presente la serie gessoso solfifera che dà luogo ad un paesaggio collinare
- Il settore orientale è interessato dalla presenza del rilievo vulcanico dell'Etna e la morfologia è caratterizzata da pendii non molto accentuati
- Il settore sud-orientale presenta una morfologia pianeggiante in corrispondenza della “Piana di Catania”

### 3.1 BACINO DEL FIUME SIMETO

Il bacino idrografico del fiume Simeto ricade nel versante orientale dell'isola di Sicilia ed occupa un'area complessiva di 4.030 Km<sup>2</sup>.



*Figura 3.1.1- Bacino fiume Simeto.*

L'altitudine media del bacino del fiume Simeto è di 531 m.s.l.m. con un valore minimo di 0 m.s.l.m. e massimo di 3.274 m.s.l.m.

Il Fiume Simeto, propriamente detto, nasce dalla confluenza tra il Torrente Cutò, il Fiume Martello e il Torrente Saracena, nella pianura di Maniace. I suddetti corsi d'acqua si originano dai rilievi dei Monti Nebrodi, nella parte settentrionale del bacino.

Il limite del bacino interessa gran parte dei rilievi montuosi della Sicilia centro-orientale ricadenti nelle province di Catania, Enna, Messina, Palermo e Siracusa.

In particolare, lo spartiacque del bacino corre ad est in corrispondenza dei terreni vulcanici fortemente permeabili dell'Etna, a nord la displuviale si localizza sui Monti Nebrodi, ad ovest essa separa il bacino del Simeto da quello del Fiume Imera Meridionale. Infine, a sud-est ed a sud lo spartiacque corre lungo i monti che costituiscono il displuvio tra il bacino del Simeto e quello dei fiumi Gela, Ficuzza e San Leonardo.

Gli affluenti principali del Fiume Simeto sono il Torrente Cutò, il Torrente Martello, il Fiume Salso, il Fiume Troina, il Fiume Gornalunga e il Fiume Dittaino.

Procedendo da monte verso valle, il bacino del Fiume Simeto è distinto nei seguenti bacini principali: Alto e Medio Simeto, Salso, Dittaino, Gornalunga e Basso Simeto.

Il Bacino dell'Alto e Medio Simeto, fino alla confluenza con il F. Salso (733 Km<sup>2</sup>), comprende il versante meridionale dei Nebrodi e le pendici occidentali dell'Etna. Il reticolo idrografico è caratterizzato dalla presenza di numerosi affluenti in sponda destra dell'asta principale del Simeto (che prende tale nome dalla confluenza tra il T.te Saracena e il T.te Cutò) e dalla mancanza di una vera e propria rete idrografica principale sulle formazioni vulcaniche molto permeabili dell'Etna.

Il Bacino del Salso (808 Km<sup>2</sup>) comprende la parte più occidentale del versante meridionale dei Nebrodi e presenta una rete idrografica molto ramificata a monte (T.te di Sperlinga, T.te di Cerami, T.te Mande), un tronco centrale (a valle del serbatoio Pozzillo) che scorre nella vallata con andamento Ovest-Est e una parte finale che, dopo aver raccolto le acque del F. di Sotto Troina, sbocca nel Simeto. L'asta principale del Salso si sviluppa complessivamente per circa 65 km.

Il Bacino del Dittaino (959 Km<sup>2</sup>) è compreso tra il bacino del Salso a Nord e quello del Gornalunga a Sud e presenta una rete idrografica ramificata nella parte montana e con un andamento a meandri nella parte centrale e valliva. L'asta principale si sviluppa complessivamente per circa 93 km.

Il Bacino del Gornalunga (1001 Km<sup>2</sup>) ha origine dai Monti Erei e oltre al corso d'acqua principale, sul quale è stato realizzato il serbatoio Don Sturzo (o Ogliastro), comprende il bacino del suo principale affluente di destra, il F. Monaci, costituito da numerosi affluenti

(F.so Acquabianca, F.so Pietrarossa, F. Caltagirone, ecc). L'asta principale del Gornalunga si sviluppa complessivamente per circa 80 km.

Il Bacino del Basso Simeto, si estende dalla confluenza del Salso alla foce; esso comprende il tronco vallivo del Simeto il quale, attraversando la Piana di Catania, riceve le acque del Dittaino e successivamente quelle del Gornalunga.

Il fiume Simeto si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 87 km, inizialmente con prevalente direzione Nord-Sud per poi deviare progressivamente verso Est. L'asta, dal punto di vista idrografico, può suddividersi in cinque tratti principali:

- Dall'origine alla confluenza del F. Troina (5km);
- Dalla confluenza con il F. Troina alla confluenza con il F. Salso(24 km);
- Dalla confluenza con il F. Salso alla confluenza con il F. Dittaino (46 Km);
- Dalla confluenza con il F. Dittaino alla confluenza con il F. Gornalunga (9 Km);
- Dalla confluenza con il F. Gornalunga alla foce.

Le caratteristiche dell'alveo variano sensibilmente anche all'interno dei singoli tratti sia a causa delle diversità geolitologiche e morfologiche dei terreni attraversati, della variazione delle pendenze di fondo e della variazione spaziale dell'ordine di grandezza delle portate, sia in relazione agli interventi di sistemazione effettuati. Tali differenze sono particolarmente rilevanti nei tratti compresi tra le confluenze del Troina e del Salso e tra le confluenze del Salso e del Dittaino. In modo semplificato si possono distinguere due tratti:

- dall'origine alla traversa Barca (ubicata tra la confluenza del Salso con il Dittaino), tratto in cui l'alveo ha dimensioni modeste e gli interventi di sistemazione sono discontinui e finalizzati alla stabilizzazione delle sponde;
- dalla traversa Barca alla foce ove si riscontrano le caratteristiche tipiche dell'alveo di pianura e le sistemazioni sono costituite da argini continui per la difesa della piana di Catania dalle inondazioni.

In riferimento alla suddivisione in cinque tratti si riportano di seguito le caratteristiche peculiari dell'asta principale:

- Il primo tratto (origine-confluenza F. Troina) presenta caratteristiche di transizione tra quelle dei corsi d'acqua montani e di pianura. Persistono ancora vistosamente i fenomeni di trasporto e deposito di materiale più grossolano. In questo tratto non sono stati realizzati interventi di sistemazione dell'alveo.
- Il secondo tratto (confluenza F. Troina-confluenza Salso) è caratterizzato da una sistemazione continua costituita da muri di sponda e repellenti in calcestruzzo nei soli 3,5 km a monte della confluenza del F. Salso, ove il corso d'acqua scorre in un fondovalle intensamente coltivato. Più a monte, invece, l'alveo si sviluppa tra il pendio dei Nebrodi, in sponda destra, e i terreni dolcemente ondulati ed intensamente coltivati della fascia pedemontana etnea, in sponda sinistra. Ricade in questo tratto la traversa di S. Domenica utilizzata ai fini idroelettrici ed irrigui. Nella parte più alta, per molti chilometri, il fondovalle in sinistra è delimitato da una ripida parete lavica che determina un salto di quota di alcune decine di metri rispetto ai terreni adiacenti.
- Il terzo tratto (confluenza F. Salso-confluenza F. Dittaino) è diviso in due parti distinte dalla traversa Barca. La parte di monte, che si sviluppa per circa 22 km, non completamente regimentata, nonostante interessi aree estensivamente coltivate. All'inizio di questa prima parte è ubicata la traversa Contrasto che determina un piccolo invaso utilizzato sempre ai fini elettrici ed irrigui. L'alveo, che è inizialmente imposto in sinistra ad una ripida scarpata in dissesto che delimita i terreni agricoli superiori, costeggia poi al rilievo di sponda destra provocando problemi erosivi e lasciando prevalentemente in sinistra le superfici coltivate fino a giungere al piccolo invaso determinato dalla traversa Barca di Paternò, che costituisce fonte di approvvigionamento idrico ai fini irrigui. La parte dell'alveo a valle della traversa Barca è arginata con sezione sistemata con alveo di magra e un solo piano di golena, all'inizio, e con doppi piani di golena, più a valle. I piani golenali superiori, e a volte anche quelli inferiori, sono largamente utilizzati per coltivazioni estensive. I terreni attraversati sono interessati da coltivazioni agrumicole.

- Nel quarto tratto (confluenza F. Dittaino-confluenza F. Gornalunga) si riscontrano le medesime caratteristiche del tratto immediatamente precedente. Varia la pendenza media (dello 0,05%) e le accresciute portate che vengono convogliate in una sezione che raggiunge larghezza complessiva anche superiore a 500 metri.
- Nel quinto tratto (confluenza F. Gornalunga-foce) il fiume giunge, circa 3 km, alla costa ionica convogliato tra argini che si allargano progressivamente sino alla foce lasciando in ultimo una sezione di larghezza superiore al chilometro. La sezione terminale risulta interessata per tutta la larghezza da un banco di sabbia e in gran parte anche da una striscia di fitta boscaglia che lascia comunque un varco attraverso il quale le acque defluiscono al mare avvicinandosi all'argine sinistro. Quest'ultimo tratto lambisce in sinistra l'area dell'Oasi del Simeto ed è costituito da un drizzagno che lascia sempre in sinistra una vecchia ansa e la vecchia foce a mare. Questa porzione del corso d'acqua ormai abbandonata dal Simeto riceve solo le acque del Buttaceto (che in passato afferiva invece al F. Simeto più a monte dell'immissione del F. Gornalunga) e del fosso Iungetto, che costituisce l'attuale recapito di gran parte delle fognature di Catania. *Il fiume Dittaino* trae origine, sotto il nome di torrente Bozzetta, a quota 925 m s.m. dalle pendici orientali dei monti Erei nella zona centrale della Sicilia. Sul Bozzetta è stato realizzato il serbatoio Nicoletti che raccoglie i deflussi di circa 50 kmq di bacino diretto. Nel bacino sotteso dal Nicoletti sono state realizzate solo opere di sistemazione trasversali, costituite in prevalenza da briglie semplici in calcestruzzo. Tali interventi interessano il Bozzetta, il torrente Manna ed il vallone dell'Ammaro. A valle della diga i maggiori affluenti del Dittaino sono il torrente Calderari ed il vallone Sciaguana.

### 3.2 CARATTERISTICHE LITOLOGICHE

Sulla base delle zone geologico-strutturali sopra descritte, si possono individuare i seguenti raggruppamenti litologici:

1. Complesso Alluvionale, comprendente depositi alluvionali, depositi litorali e lacustri. Sono localizzati nella pianura alluvionale di Catania e lungo i principali affluenti del Fiumi Simeto. Sono costruiti prevalentemente da lenti e livelli discontinui di ghiaie e di sabbie limo-argillose.
2. Detrito, accumuli di materiale eterogeneo di disgregazione meccanica, presenti alla base di scarpate rocciose (falde detritiche), con prevalenza di granulometrie superiore alle sabbie.
3. Vulcaniti, comprendente le colate laviche attuali, storiche o antiche dell'Etna e le vulcaniti antiche degli Iblei. Si tratta di lave compatte e subordinati prodotti piroclastici associati.

Calcareniti ed Arenarie plio-quadernarie, comprendenti gli affioramenti del settore centrale; si tratta di calcareniti e/o arenarie fratturate sovrastanti pendii marnoso-argillosi. La prevalenza di rocce carbonatiche determina un paesaggio aspro e inciso, con pareti rocciose scoscese; queste ultime sono spesso la testimonianza di piani di frattura o dislocazione prodotti dalla complessa attività tettonica che ha interessato in più fasi le unità quadernarie.

4. Argille Brecciate, termine di riferimento di una successione pliocenica caratterizzata da corpi litologiche alloctoni per frane sottomarine e quindi con delle caratteristiche geomeccaniche particolarmente eterogenee.
5. Marne, più o meno calcaree, denominate localmente Trubi, del Pliocene inferiore, a luoghi coinvolte nei corpi franosi, quando intercalate alle argille brecciate.
6. Argille sabbiose, terreni prevalentemente argillosi, con intercalazioni sabbiose e marnose; vi si comprendono le formazioni del pliocene medio e del Pleistocene inferiore, nonché i termini pelitici delle sequenze post-orogene del Miocene medio-superiore.

7. Depositi evaporitici, comprendenti i litotipi della Formazione Gessoso-Solfifera. In particolare, Marne, Calcarea di Base, Gessi, argille e depositi di Salgemma e Sali di potassio. La formazione affiora sia in aree limitate, all'interno di depressioni tettoniche presenti nel fronte meridionale della Catena settentrionale, che nel più vasto areale, in parte intercettato dal bacino idrografico del Simeto, denominato "Fossa di Caltanissetta".
8. Conglomerati ed Arenarie, corpi sedimentari a prevalenza di sabbie, conglomerati ed arenarie, connesse con la Formazione "Terravecchia" del Miocene medio-superiore.
9. Complesso carbonatico degli Iblei, che comprendono litologie calcaree, calcarenitiche, marnose e calcareo-dolomitiche, considerate nel loro insieme in ragione di un limitato affioramento e delle similitudini di comportamento alle dinamiche geomorfologiche.
10. Argille varicolori, e sequenze prevalentemente argillose delle successioni "Sicilidi", che presentano caratteristiche di elevato scompaginamento tettonico e, quindi, di particolare vulnerabilità geomorfologica.
11. Flysch arenacei e calcarei, si tratta di porzioni delle formazioni fliscioidi a prevalente composizione arenacea, diffuse soprattutto nel settore centro-settentrionale del bacino, in posizione sommitale; litologicamente sono costituite da banchi e livelli cementati di arenarie, siltiti, marne e calcarei, con intercalazioni più o meno spesse di livelli argillosi o argillosi-marnosi.
12. Flysch argillosi, ovvero le porzioni di Flysch a prevalenza argillitica e siltosa, con subordinati livelli arenacei e calcarei. La zona di affioramento è prevalentemente la porzione nord-occidentale del bacino e subordinatamente le zone centrali ed occidentali.
13. Complesso carbonatico mesozoico, raggruppa i limitati affioramenti presenti nella porzione occidentale dei Nebrodi. Le litologie presenti sono di natura calcarea, calcarea dolomitica, di età compresa tra il Mesozoico e l'Eocene.

In figura 3.2.1 si riporta la distribuzione delle varie litologie a scala regionale.

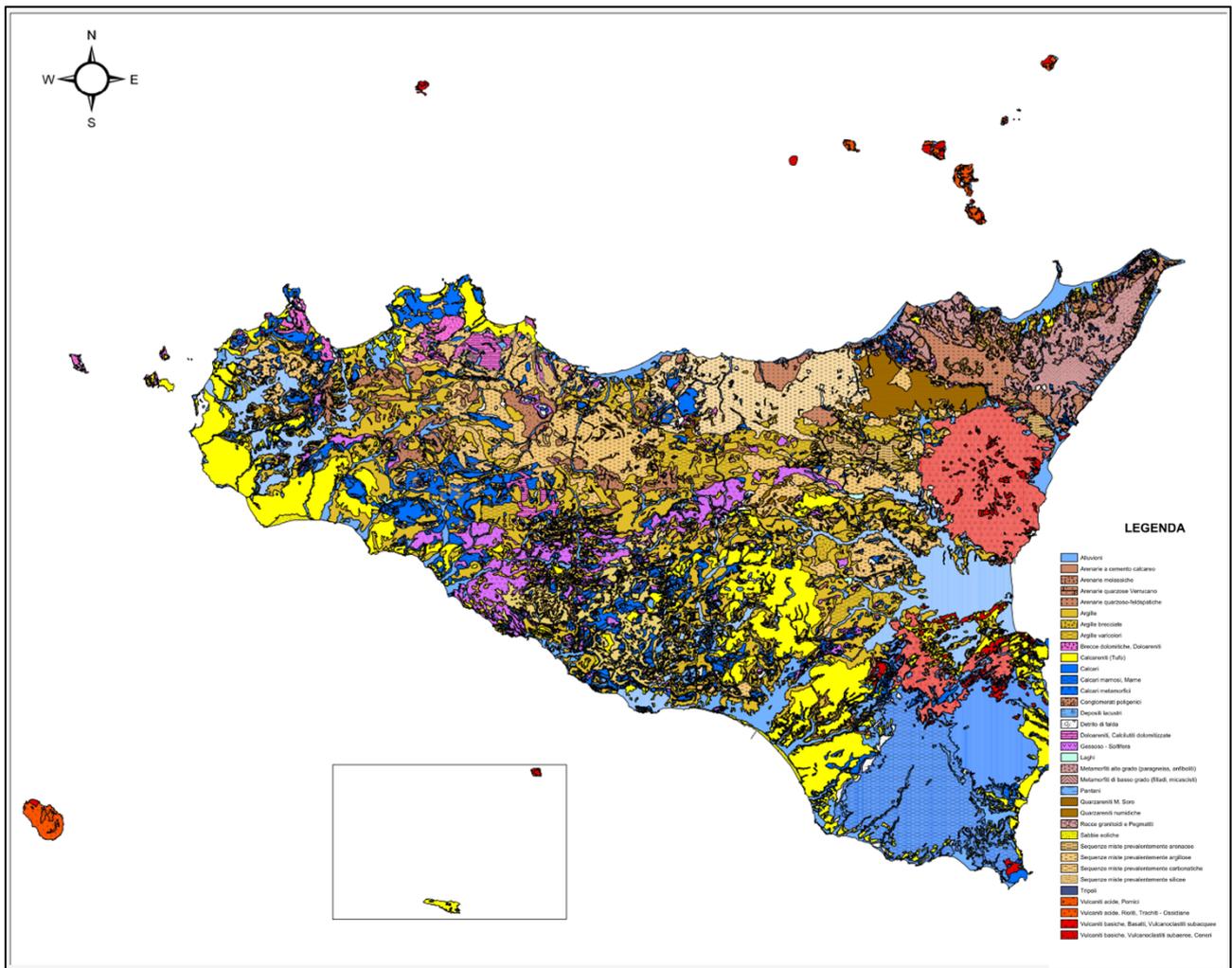


Figura 3.2.1- Distribuzione della litologia in Sicilia.

### 3.3 PERMEABILITÀ DEI TERRENI AFFIORANTI

I terreni affioranti all'interno del bacino del Fiume Simeto e delle aree attigue presentano condizioni di permeabilità molto diverse, in relazione alla varietà dei termini costituenti le varie successioni stratigrafiche nonché alla variabilità litologica e strutturale. È possibile effettuare una distinzione tra il settore NE del bacino, corrispondente alla zona vulcanica dell'Etna, e il settore SW, che si estende dagli Iblei sino ai Monti Nebrodi-Caronie. Quest'ultimo è caratterizzato da terreni impermeabili o a permeabilità bassa, presenta un elevato ruscellamento e un'infiltrazione efficace molto ridotta. I corsi d'acqua con direzione prevalente da ovest verso est confluiscono verso la "Piana di Catania", dove i terreni a media

permeabilità condizionano sia il ruscellamento che l'infiltrazione efficace. È possibile classificare i terreni presenti nel territorio in esame in quattro tipi:

1. Terreni molto permeabili per fessurazione e/o per porosità;
2. Terreni da media ed alta permeabilità;
3. Terreni con bassa permeabilità;
4. Terreni impermeabili.

I terreni del primo tipo prevalgono in corrispondenza del massiccio etneo, del complesso carbonatico e, in generale, degli affioramenti calcarei, dove l'alta permeabilità dei terreni rende, pressoché nullo il ruscellamento, mentre l'infiltrazione efficace assume i valori più alti. La porosità delle rocce laviche può variare in funzione della natura, delle strutture e del grado di alterazioni dei prodotti effusivi, con percentuali di porosità che raggiungono valori tra il 10% ed il 50% nelle colate di lava bollose e percentuali quasi sempre elevate nei prodotti piroclastici. La permeabilità delle vulcaniti è collegata essenzialmente alle fessure di raffreddamento, alle caverne di svuotamento lavico ed alle discontinuità

I terreni da media ed alta permeabilità sono rappresentati dai depositi clastici, dal detrito, dalle alluvioni. I depositi clastici sono diffusamente distribuiti con netta prevalenza determinate dai corsi d'acqua, nella "Piana di Catania" e al piede dei versanti. Il comportamento complessivo dei depositi alluvionali è determinato dall'alternarsi e dalle variazioni laterali dei livelli, talora prevalentemente ghiaiosi, talora prevalentemente sabbioso-limoso-argillosi. I livelli con classi granulometriche più grossolane presentano porosità, compresa generalmente tra il 20% ed il 30%, variabile in funzione della forma, dell'uniformità, e della disposizione degli elementi. I depositi prevalentemente sabbiosi e sabbioso-limosi hanno valori di porosità compresi tra il 30% ed il 45 %; passando ai livelli con prevalenza della frazione più fine si ha un aumento del valore della porosità, ma un abbassamento della capacità idrica effettiva.

La permeabilità dei termini della Serie Gessoso-Solfifera è legata principalmente alla presenza di fratture ed è crescente in funzione della solubilità della roccia; per il Calcare di Base è da considerarsi anche un certo grado di permeabilità dovuto alla porosità primaria.

I terreni a bassa permeabilità rappresentano in genere piccole isole sparse in modo difforme sia nel settore settentrionale sia in quelli occidentale e sud-occidentale. Si tratta dei termini calcarenitico-sabbiosi, conglomeratico-arenacei e arenacei; in corrispondenza dei livelli molto alterati si può avere un certo grado di porosità; la permeabilità risulta discreta a livello dei più grossi banconi diffusamente fessurati, altrove è molto bassa per influenza degli interstrati pelitici.

I terreni impermeabili sono presenti diffusamente in tutto il bacino, con maggiore diffusione nelle zone collinari e montane, laddove affiorano le formazioni prevalentemente argillose e argilloso-marnose. La presenza di terreni impermeabili rende massimo il ruscellamento, annullando quasi totalmente l'infiltrazione efficace. I termini calcarei o arenacei in seno alla massa argillosa permettono una circolazione idrica realmente molto limitata.

### **3.4 STRATIGRAFIA DEL SITO DI INTERVENTO**

Nell'area di studio, a seguito dei sopralluoghi e dell'interpretazione delle prove penetrometriche, è possibile suddividere l'impianto in due macroaree:

1. Impianto EN513c
2. Impianti EN513a-EN513b-EN566d-EN566e-EN800-EN801-EN802

- **Impianto EN513c**



*Figura 3.4.1-Ubicazione impianto EN513c (area pannellabile in chiaro).*

La zona di impianto presenta:

- Da 0 a 0,5 metri dal p.c.: Copertura detritica, da inconsistente a poco consistente, con trovanti centimetriche di natura calcarenitica.
- Da 0,50 a 30 metri dal p.c.: Calcareniti e sabbie giallastre, massive o a stratificazione parallela.

- **Impianti EN513a-EN513b-EN566d-EN566e-EN800-EN801-EN802**

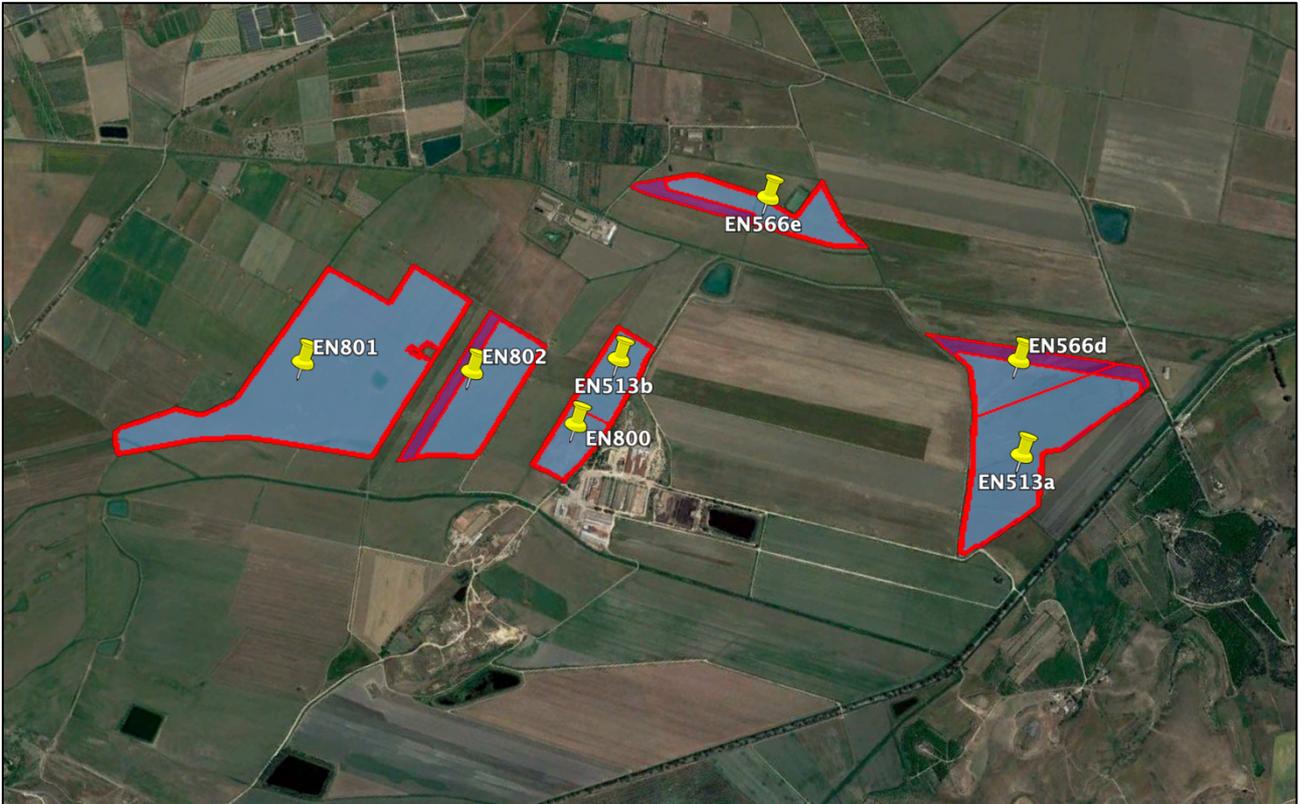


Figura 3.4.2- Ubicazione degli impianti EN513a-EN513b-EN566d-EN566e-EN800-EN801-EN802 (area pannellabile in chiaro).

- Da 0 a 0,4/0,8 metri dal p.c.: Risulta caratterizzato da copertura alluvionale in matrice limo-argillosa, da inconsistente a poco consistente.
- Da 0,4/0,8 fino a oltre 15 metri dal p.c.: Depositi alluvionali a matrice coesiva costituiti da limi argillosi, più raramente limi sabbiosi, poco consistenti.
- Da 15 a 30 metri dal p.c: Argille plioceniche.

Gli ultimi due dati derivano da un precedente studio geologico eseguito nella zona attigua anch'essa dallo sviluppo di ulteriori campi agro-fotovoltaici.

## 4 VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ IDROGEOLOGICA DELLE OPERE IN PROGETTO

---

La modellazione idraulica, eseguita dall'Ingegnere Adamo Cali, è stata effettuata, in accordo con quanto prescritto dal PAI, attraverso il software HEC-RAS della *US Army Corps of Engineers*. Al fine di valutare la compatibilità idraulica degli interventi in progetto, in considerazione dell'estensione e distribuzione degli stessi, sono state definite tre fasi di studio:

1. Si è definito l'assetto idraulico a scala di bacino attraverso una modellazione idrologica-idraulica dell'intera area oggetto di intervento avente l'obiettivo di valutare l'effetto combinato di piena dei tre corsi d'acqua presenti nel bacino, nella fattispecie nella zona in esame, per tre diversi periodi di ritorno 50-100-300 anni.
2. Definizione dell'assetto idraulico locale, ovvero partendo dalle singole componenti di esondazione individuate nella prima fase si è proceduto ad una modellazione di dettaglio.
3. Valutazione della compatibilità delle opere, ovvero attraverso i risultati ottenuti nella seconda fase, si è determinata la compatibilità idraulica confrontando le caratteristiche dell'esondazione in termini di tiranti idrici.

I risultati ottenuti sono raffigurati nelle figure 4.1, 4.2 e 4.3.

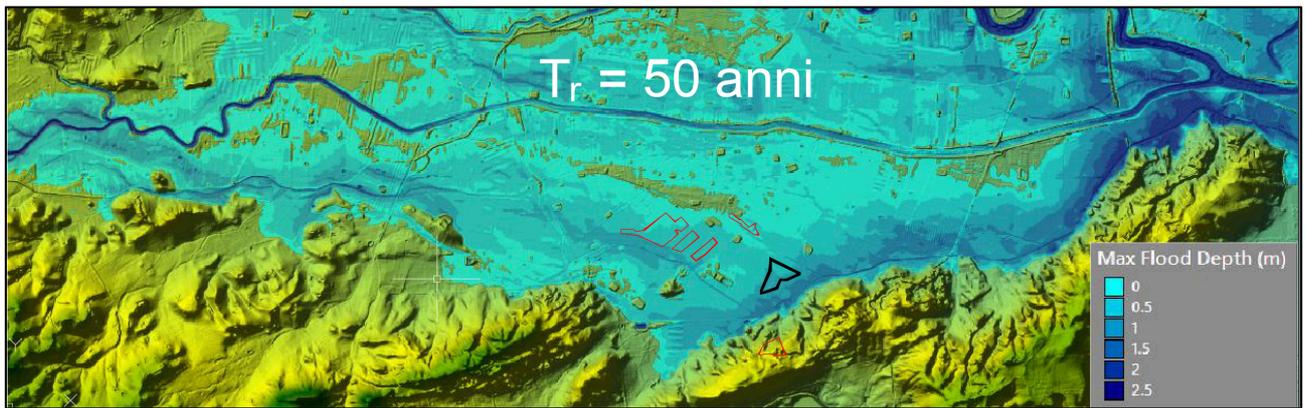


Figura 4.1- Tiranti idrici nelle zone pannellabili per tempi di ritorno di 50 anni.

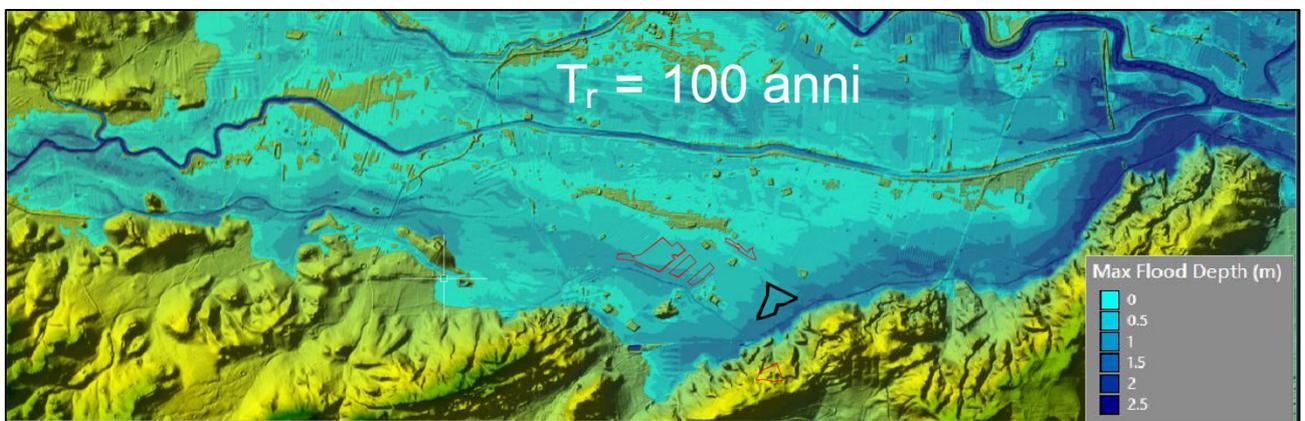


Figura 4.2- Tiranti idrici nelle zone pannellabili per tempi di ritorno di 100 anni.

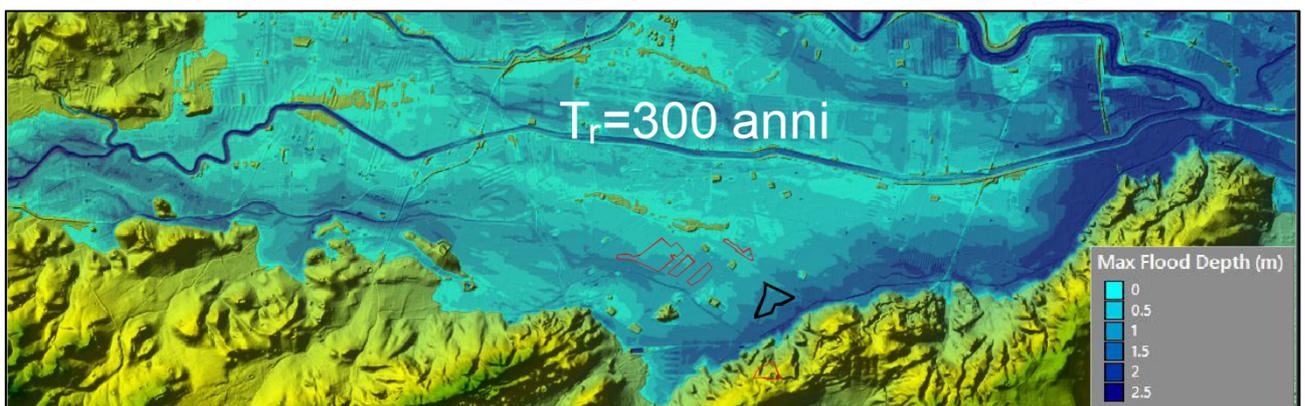


Figura 4.3- Tiranti idrici nelle zone pannellabili per tempi di ritorno di 300 anni.

Come si può notare, l'impianto EN566d+EN513a, rappresentato con il perimetro nero, presenta per il tempo di ritorno pari a 300 anni dei tiranti superiori a 1,5 metri e pertanto risulta ricadere in zona con pericolosità P3. Si è quindi abolita la zona pannellabile EN566d

e EN513a mentre si è proceduto con la progettazione delle altre aree di impianto, il cui livello di pericolosità risulta essere pari a P2.

#### **4.1 OPERE DI MITIGAZIONE**

In accordo alle prescrizioni e ai vincoli definiti dal D.D.G. 102 del 23/6/2021 e dal e dal Decreto n. 187 del 23.06.2022 sono state definite le opere necessarie per garantire l'invarianza idrologico-idraulica dell'area interessata dall'intervento. Si è effettuato un raffronto tra le condizioni ante e quelle post-operam e si sono previste contestualmente delle opere di compensazione. Queste consentono di far infiltrare le acque negli strati più profondi del terreno e di stoccare i volumi in eccesso derivanti dalla realizzazione delle opere, garantendo l'invarianza idraulica dell'intero sistema progettuale.

Al fine di progettare in maniera ottimale le opere di mitigazione idraulica si è provveduto ad analizzare singolarmente le aree agro-fotovoltaiche. Dapprima sono stati analizzati i coefficienti di deflusso ante e post operam, quindi, sono stati definiti i volumi di laminazione necessari a garantire l'invarianza.

- **Coefficienti di deflusso**

Per la fase ante operam, facendo riferimento al Decreto della Regione Sicilia, D.D.G. n.102 del 23/06/2021 – Allegato 2 – “Indirizzi tecnici per la progettazione di misure di invarianza idraulica e idrologica”, si è assunto in via cautelativa il seguente coefficiente di deflusso  $\varphi$ :

- Incolto e uso agricolo  $\varphi = 0$

Invece, per il calcolo dei diversi coefficienti di deflusso post operam, si è utilizzata da letteratura la tabella di seguito riportata.

*Tabella 4.1.1- Valori del coefficiente di deflusso. Allegato 1 della legge regionale 29 aprile 2015, n.11*

Uso del suolo	$\phi$
Tetti a falde	0.90-1.00
Tetti metallici	0.90-1.00
Tetti a tegole	0.80-0.90
Tetti piani con rivestimento in cls	0.70-0.80
Tetti piani ricoperti di terra	0.30-0.40
Coperture piane con ghiaietto	0.80-0.90
Coperture piane seminate ad erba	0.20-0.30
Rivestimenti bituminosi	0.90-1.00
Pavimentazioni asfaltate	0.80-0.90
Pavimentazioni con asfalto poroso	0.40-0.50
Massicciata in strade ordinarie	0.40-0.80
Pavimentazioni di pietra o mattonelle	0.80-0.90
Lastricature miste, clinker, piastrelle	0.70-0.80
Lastricature medio-grandi con fughe aperte	0.60-0.70
Strade e marciapiedi	0.80-0.90
Superfici semi-permeabili	0.60-0.70
Strade in terra	0.40-0.60
Rivestimenti drenanti, superfici a ghiaietto	0.40-0.50
Viali e superfici inghiaiate	0.20-0.60
Zone con ghiaia non compressa	0.10-0.30
Superfici boscate	0.10-0.30
Superfici di giardini e cimiteri	0.10-0.30
Prati di campi sportivi	0.10-0.20
Terreni coltivati	0.20-0.60
Terreni incolti, sterrati non compatti	0.20-0.30
Prati, pascoli	0.10-0.50

Si riportano a seguire le tabelle inerenti all'uso del suolo ante e post operam con specifico riferimento alle singole zone oggetto di intervento.

Tabella 4.1.2- Utilizzo uso del suolo ante-operam per le singole zone agro-fotovoltaiche e relativo coefficiente di deflusso.

Utilizzo suolo Ante-Operam								
	Area EN801 [ha]	Area EN802 [ha]	Area EN800+EN513b [ha]	Area EN566e [ha]	Area EN566d+EN513a [ha]	Area EN513c [ha]	Coeff. Deflusso $\phi$	Note
Area di intervento	46,127	14,791	10,768	9,960	30,930	27,351	0	Valore incolto e uso agricolo riportato in Allegato 2 del DDG 102 del 23/06/2021
<b>Media ponderata</b>							<b>Totale <math>\phi</math></b> <b>0,00</b>	

Tabella 4.1.3- Utilizzo uso del suolo post-operam per le singole zone agro-fotovoltaiche e relativo coefficiente di deflusso.

Utilizzo suolo Post-Operam									
	Area EN801 [ha]	Area EN802 [ha]	Area EN800+EN513b [ha]	Area EN566e [ha]	Area EN566d+EN513a [ha]	Area EN513c [ha]	Totale [ha]	Coeff. Deflusso $\phi$	Note
Area oggetto di studio	46,1267	14,791	10,768	9,960	30,930	27,351	139,926		Recinzione e fascia alberata
Superficie di proiezione al suolo occupata dai moduli fotovoltaici a 0° (Tracker)	9,8719	2,646	2,071	1,474	6,612	3,738	26,412	0,30	Valore riportato in Normativa
Fascia alberata	3,7999	1,572	1,536	1,861	2,597	1,619	12,986	0,20	Valore medio superfici boscate
Area coltivata	18,3632	5,045	3,895	2,765	11,926	6,796	48,791	0,40	Valore medio terreni coltivati
Altra mitigazione interna alla recinzione	12,1897	2,515	2,764	1,622	4,970	2,234	26,294	0,30	Valore medio superfici di giardini
Strade di servizio	1,4511	0,451	0,491	0,528	1,268	0,753	4,941	0,60	Valore cautelativo superfici inghiaiate
Cabine	0,0301	0,004	0,007	0,006	0,016	0,013	0,077	1,00	Superficie perfettamente impermeabile
Invasi esistenti	0,3779	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,378	0,00	Superficie perfettamente permeabile
Aree libere da interventi	0,0429	2,557	0,003	1,704	3,542	12,197	20,046	0,10	Valore ante operam cautelativamente aumentato
	<b>Totale EN801 <math>\phi</math></b>	<b>Totale EN802 <math>\phi</math></b>	<b>Totale EN800+EN513b <math>\phi</math></b>	<b>Totale EN566e <math>\phi</math></b>	<b>Totale EN566d+EN513a <math>\phi</math></b>	<b>Totale EN513c <math>\phi</math></b>		<b>Totale complessivo <math>\phi</math></b>	
<b>Media ponderata</b>	<b>0,339</b>	<b>0,298</b>	<b>0,336</b>	<b>0,291</b>	<b>0,320</b>	<b>0,238</b>		<b>0,307</b>	

- **Determinazione dei volumi di laminazione**

La D.D.G. 102/2021 prevede, per gli interventi con superficie maggiore di 10.000 m<sup>2</sup>, la redazione di uno studio di invarianza idraulica e idrologica, con l'adozione dei metodi di trasformazione afflussi-deflussi. Il periodo di ritorno delle piogge da adoperare nel calcolo dei volumi di laminazione/infiltrazione per garantire la necessaria invarianza è pari a 30 anni, mentre si adotta un periodo di ritorno di 50 anni per la verifica delle opere in condizioni limite. La stessa norma citata fornisce inoltre la seguente indicazione circa le soluzioni progettuali da perseguire: *“per l'applicazione del principio di invarianza idrologica e/o idraulica potranno essere progettate soluzioni di infiltrazione e/o laminazione dei deflussi meteorici e delle relative portate allo scarico*

Il calcolo del volume di laminazione delle acque meteoriche, secondo il D.D.G 102/2021, può essere condotto in via semplificata per aree impermeabilizzate a basso coefficiente di deflusso medio ponderale (<50%) adottando il *metodo semplificato delle piogge*, secondo cui il volume di laminazione è espresso dalla relazione (D.D.G 102 del 23/06/2021 Allegato 2 pagina 3):

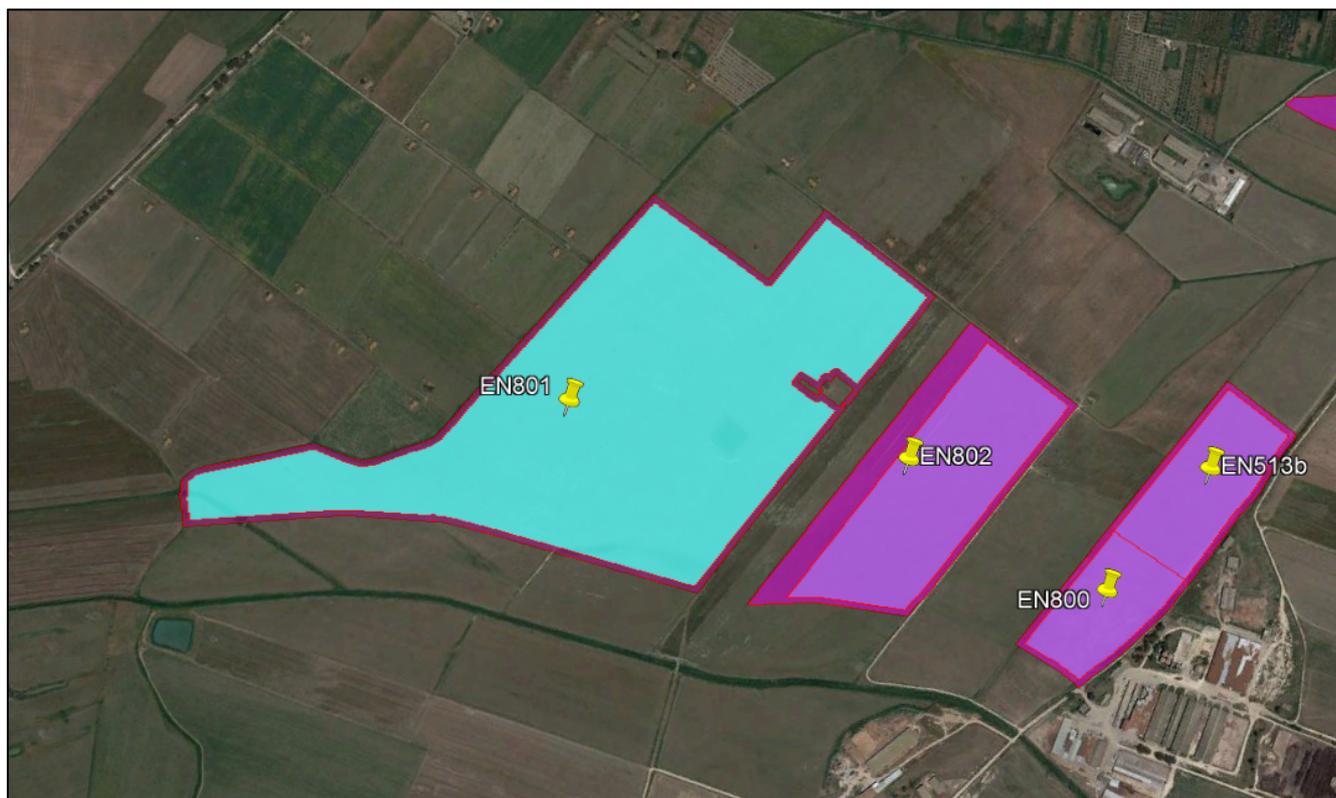
$$V_{max} = S * \varphi * a * \left( \frac{Q_{imp}}{S * \varphi * a * n} \right)^{\frac{n}{n-1}} - Q_{imp} * \left( \frac{Q_{imp}}{S * \varphi * a * n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Dove:

- $V_{max}$ , espresso in [m<sup>3</sup>], è il volume di invaso necessario per non superare la portata limite allo scarico;
- S è la superficie scolante a monte della vasca/invaso di laminazione;
- $\varphi$  il coefficiente di deflusso medio ponderale dell'area drenante;
- a ed n parametri delle curve di possibilità pluviometrica
- $Q_{IMP}$  portata limite ammessa allo scarico (in m<sup>3</sup>/s) corrispondente ad un coefficiente udometrico, a seconda della pericolosità, pari a 10-20 l/s per ettaro di superficie impermeabilizzata dall'intervento di urbanizzazione.

- **Zona EN801**

L'ubicazione della zona di intervento è rappresentata in figura 4.1.1.



*Figura 4.1.1- Ubicazione sito EN801.*

Nella tabella 4.1.4 si riporta l'utilizzo del suolo post-operam.

Tabella 4.1.4- Utilizzo suolo post-operam EN801.

Utilizzo suolo post-operam		
	Area EN801 [ha]	Note
Area oggetto di studio	46,127	recinzione+fascia alberata
Superficie di proiezione al suolo occupata dai moduli fotovoltaici a 0° (Tracker)	9,8719	Valore riportato in Normativa
Fascia alberata	3,7999	Valore medio superfici boscate
Area coltivata	18,3632	Valore medio terreni coltivati
Altra mitigazione interna alla recinzione	12,1897	Valore medio superfici di giardini
Strade di servizio	1,4511	Valore cautelativo superfici inghiaiate
Cabine	0,0301	Superficie perfettamente impermeabile
Invasi esistenti	0,3779	Superficie perfettamente permeabile
Aree libere da interventi	0,0429	Valore ante operam cautelativamente aumentato
<b>Media ponderata</b>	<b>Totale EN801 <math>\phi</math></b>	
	<b>0,339</b>	

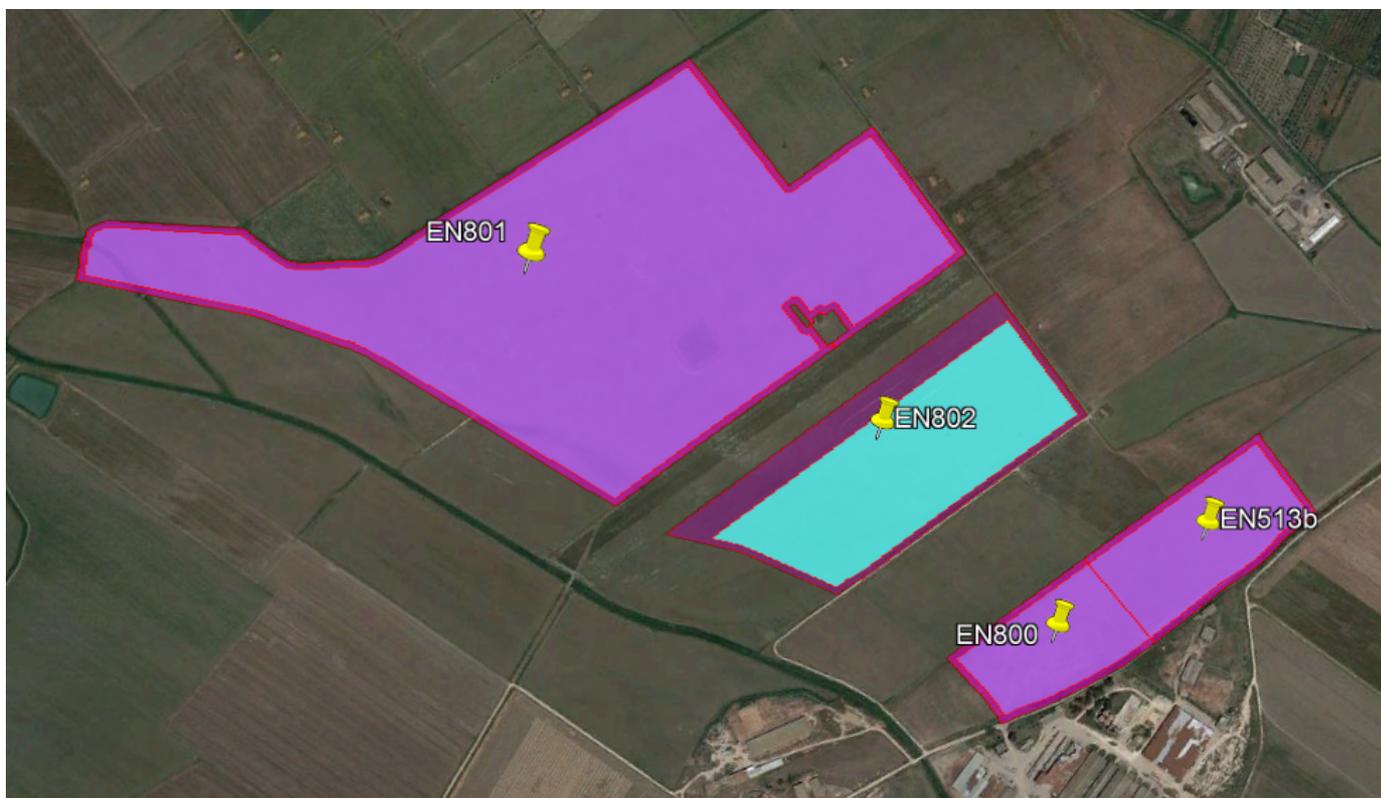
I volumi di laminazione, da cui dipende la progettazione del sistema di accumulo, sono calcolati nella tabella 4.1.5.

Tabella 4.1.5- Volumi di laminazione zona EN801.

CALCOLO VOLUMI DI LAMINAZIONE DA ALLEGATO 2 DDG 102/2021						
Zona di impianto	S [ha]	$\phi$	a	n	Q imp [m <sup>3</sup> /s]	Vmax [m <sup>3</sup> ]
EN801	15,629	0,339	65,677	0,3226	0,461267	3224,47

- **Volume di laminazione zona EN802**

L'ubicazione della zona di intervento è rappresentata in figura 4.1.2.



*Figura 4.1.2- Ubicazione sito EN802.*

Nella tabella 4.1.6 si riporta l'utilizzo del suolo post-operam.

Tabella 4.1.6- Utilizzo suolo post-operam EN802.

Utilizzo suolo post-operam		
	Area EN802 [ha]	Note
Area oggetto di studio	14,791	recinzione+fascia alberata
Superficie di proiezione al suolo occupata dai moduli fotovoltaici a 0° (Tracker)	2,6458	Valore riportato in Normativa
Fascia alberata	1,5716	Valore medio superfici boscate
Area coltivata	5,0452	Valore medio terreni coltivati
Altra mitigazione interna alla recinzione	2,5150	Valore medio superfici di giardini
Strade di servizio	0,4512	Valore cautelativo superfici inghiaiate
Cabine	0,0044	Superficie perfettamente impermeabile
Invasi esistenti	0,0000	Superficie perfettamente permeabile
Aree libere da interventi	2,5573	Valore ante operam cautelativamente aumentato
<b>Media ponderata</b>	<b>Totale EN802 <math>\phi</math></b>	
	<b>0,298</b>	

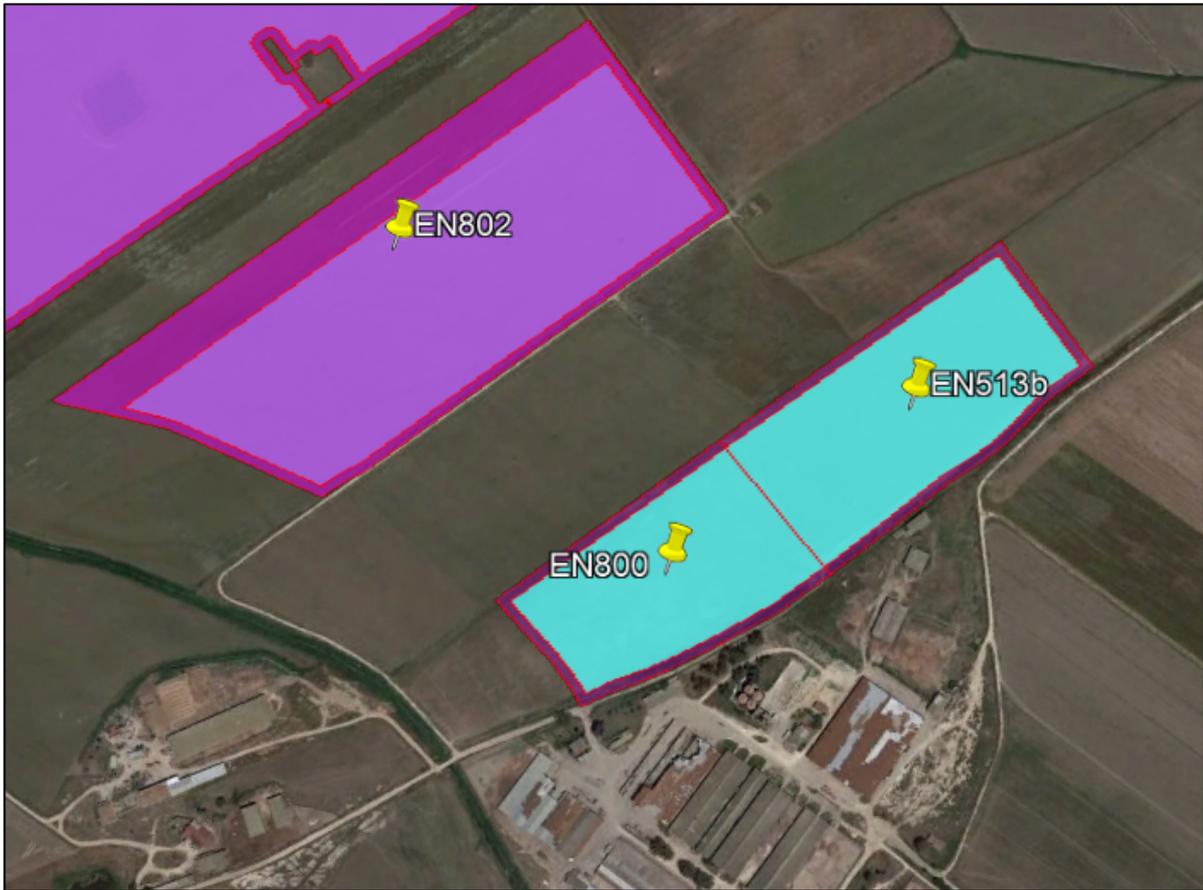
I volumi di laminazione, da cui dipende la progettazione del sistema di accumulo, sono calcolati nella tabella 4.1.7.

Tabella 4.1.7- Volumi di laminazione zona EN802.

CALCOLO VOLUMI DI LAMINAZIONE DA ALLEGATO 2 DDG 102/2021						
Zona di impianto	S [ha]	$\phi$	a	n	Q imp [m <sup>3</sup> /s]	Vmax [m <sup>3</sup> ]
EN802	4,411	0,298	65,677	0,3226	0,147905	709,59

- **Volume di laminazione zona EN800+EN513b**

L'ubicazione della zona di intervento è rappresentata in figura 4.1.3.



*Figura 4.1.3- Ubicazione sito EN800+EN513b.*

Nella tabella 4.1.8 si riporta l'utilizzo del suolo post-operam.

Tabella 4.1.8- Utilizzo suolo post-operam EN800+EN513b.

Utilizzo suolo post-operam		
	Area EN800+EN513b [ha]	Note
Area oggetto di studio	10,768	recinzione+fascia alberata
Superficie di proiezione al suolo occupata dai moduli fotovoltaici a 0° (Tracker)	2,0711	Valore riportato in Normativa
Fascia alberata	1,5361	Valore medio superfici boscate
Area coltivata	3,8950	Valore medio terreni coltivati
Altra mitigazione interna alla recinzione	2,7642	Valore medio superfici di giardini
Strade di servizio	0,4906	Valore cautelativo superfici inghiaiate
Cabine	0,0074	Superficie perfettamente impermeabile
Invasi esistenti	0,0000	Superficie perfettamente permeabile
Aree libere da interventi	0,0034	Valore ante operam cautelativamente aumentato
Media ponderata	Totale EN800+EN513b $\phi$	
	<b>0,336</b>	

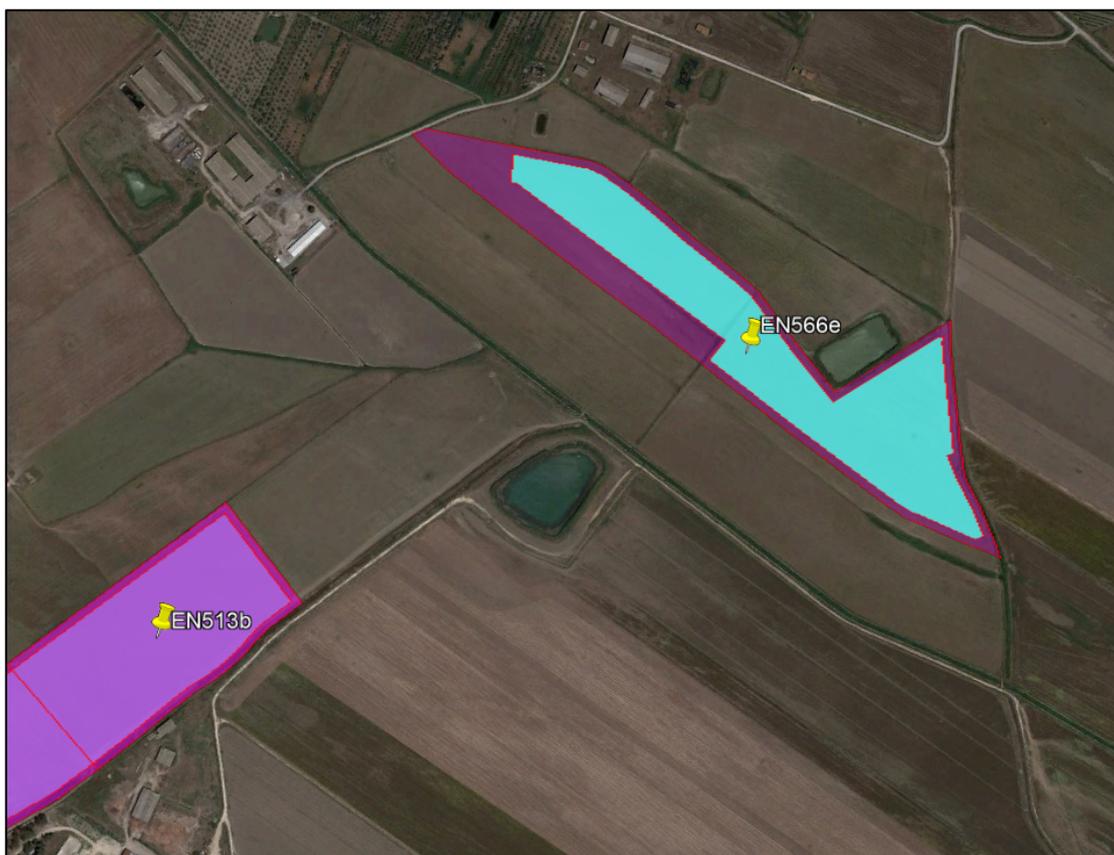
I volumi di laminazione, da cui dipende la progettazione del sistema di accumulo, sono calcolati nella tabella 4.1.9.

Tabella 4.1.9- Volumi di laminazione zona EN800 e EN513b.

CALCOLO VOLUMI DI LAMINAZIONE DA ALLEGATO 2 DDG 102/2021						
Zona di impianto	S [ha]	$\phi$	a	n	Q imp [m <sup>3</sup> /s]	Vmax [m <sup>3</sup> ]
EN800+EN513b	3,618	0,336	65,677	0,3226	0,107678	734,31

- **Volume di laminazione zona EN566e**

L'ubicazione della zona di intervento è rappresentata in figura 4.1.4.



*Figura 4.1.4- Ubicazione sito EN566e.*

Nella tabella 4.1.10 si riporta l'utilizzo del suolo post-operam.

Tabella 4.1.10- Utilizzo suolo post-operam EN566e.

Utilizzo suolo post-operam		
	Area EN566e [ha]	Note
Area oggetto di studio	9,960	recinzione+fascia alberata
Superficie di proiezione al suolo occupata dai moduli fotovoltaici a 0° (Tracker)	1,4737	Valore riportato in Normativa
Fascia alberata	1,8613	Valore medio superfici boscate
Area coltivata	2,7652	Valore medio terreni coltivati
Altra mitigazione interna alla recinzione	1,6217	Valore medio superfici di giardini
Strade di servizio	0,5283	Valore cautelativo superfici inghiaiate
Cabine	0,0059	Superficie perfettamente impermeabile
Invasi esistenti	0,0000	Superficie perfettamente permeabile
Aree libere da interventi	1,7035	Valore ante operam cautelativamente aumentato
Media ponderata	Totale EN566e $\phi$	
	<b>0,291</b>	

I volumi di laminazione, da cui dipende la progettazione delle trincee, sono calcolati nella tabella 4.1.11.

Tabella 4.1.11- Volumi di laminazione zona EN566e.

CALCOLO VOLUMI DI LAMINAZIONE DA ALLEGATO 2 DDG 102/2021						
Zona di impianto	S [ha]	$\phi$	a	n	Q imp [m <sup>3</sup> /s]	Vmax [m <sup>3</sup> ]
EN566e	2,900	0,291	65,677	0,3226	0,099596	445,16

- **Volume di laminazione zona EN513c**

L'ubicazione della zona di intervento è rappresentata in figura 4.1.5.



*Figura 4.1.5- Ubicazione zona EN513c.*

Nella 4.1.12 si riporta l'utilizzo del suolo post-operam.

Tabella 4.1.12- Utilizzo suolo post-operam EN513c.

Utilizzo suolo post-operam		
	Area EN513c [ha]	Note
Area oggetto di studio	27,351	recinzione+fascia alberata
Superficie di proiezione al suolo occupata dai moduli fotovoltaici a 0° (Tracker)	3,738	Valore riportato in Normativa
Fascia alberata	1,619	Valore medio superfici boscate
Area coltivata	6,796	Valore medio terreni coltivati
Altra mitigazione interna alla recinzione	2,234	Valore medio superfici di giardini
Strade di servizio	0,753	Valore cautelativo superfici inghiaiate
Cabine	0,013	Superficie perfettamente impermeabile
Invasi esistenti	0,000	Superficie perfettamente permeabile
Aree libere da interventi	12,197	Valore ante operam cautelativamente aumentato
Media ponderata	Totale EN513c $\phi$	
	<b>0,238</b>	

I volumi di laminazione, da cui dipende la progettazione delle trincee, sono calcolati nella tabella 4.1.13.

Tabella 4.1.13- Volumi di laminazione zona EN513c.

CALCOLO VOLUMI DI LAMINAZIONE DA ALLEGATO 2 DDG 102/2021						
Zona di impianto	S [ha]	$\phi$	a	n	Q imp [m <sup>3</sup> /s]	Vmax [m <sup>3</sup> ]
EN513c	6,519	0,238	65,677	0,3226	0,273508	676,66

## 4.2 SISTEMA DI CONVOGLIAMENTO E LAMINAZIONE

Al fine di rispettare l'invarianza idraulica si è adottato un sistema di drenaggio composto da canali superficiali di captazione e convogliamento e trincee drenanti perimetrali;

Tali sistemi sono stati progettati tenendo conto del trasporto di materiale fine che, come noto, tende ad occludere i pori del materiale di riempimento delle trincee, con conseguente riduzione della capacità filtrante. Il sistema di deflusso verso il corpo idrico ricettore (CIR) è stato progettato considerando:

- Realizzazione di fossi con funzione di captazione e convogliamento;
- Trincee drenanti poste al di sotto dei fossi.

Le trincee drenanti vengono realizzate mediante uno scavo di 1m sotto la base minore della sezione trapezoidale del fosso, con successivo riempimento in materiale arido drenante e rivestimento con telo in tessuto non tessuto come riportano nello schema di figura 4.2.1.

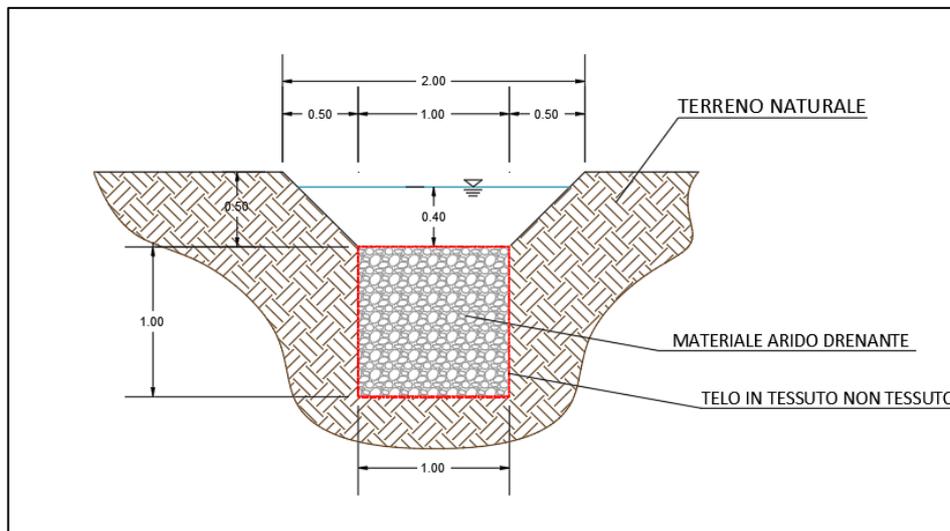


Figura 4.2.1- Sistema di laminazione.

Per il calcolo del volume di invaso si fa riferimento ad un'altezza idrica massima all'interno del fosso pari a 40cm consentendo un franco di sicurezza del 20%.

La lunghezza del sistema di mitigazione per ogni zona di impianto è stata ricavata attraverso il rapporto:

$$L_{trincee} = \frac{\text{Volume di laminazione}}{\text{Area totale del sistema di mitigazione}}$$

Si riportano nelle tabelle da 4.2.1 fino a 4.2.5 i valori ottenuti della lunghezza del sistema di laminazione per ogni zona di impianto.

Tabella 4.2.1- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN801.

CALCOLO DELLE OPERE DI COMPENSAZIONE PER LA LAMINAZIONE DEI VOLUMI IN ECCESSO						
Zona di impianto	Area fosso [m <sup>2</sup> ]	Area trincea [m <sup>2</sup> ]	Area tot [m <sup>2</sup> ]	Lunghezza fossi per compensazione [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto incrementati del 20% [m]
EN801	0,56	0,4	0,96	3358,83	3359,00	4030,80

Tabella 4.2.2- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN802.

CALCOLO DELLE OPERE DI COMPENSAZIONE PER LA LAMINAZIONE DEI VOLUMI IN ECCESSO						
Zona di impianto	Area fosso [m <sup>2</sup> ]	Area trincea [m <sup>2</sup> ]	Area tot [m <sup>2</sup> ]	Lunghezza fossi per compensazione [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto incrementati del 20% [m]
EN802	0,56	0,4	0,96	739,16	740	888

Tabella 4.2.3- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN800 e EN513b.

CALCOLO DELLE OPERE DI COMPENSAZIONE PER LA LAMINAZIONE DEI VOLUMI IN ECCESSO						
Zona di impianto	Area fosso [m <sup>2</sup> ]	Area trincea [m <sup>2</sup> ]	Area tot [m <sup>2</sup> ]	Lunghezza fossi per compensazione [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto incrementati del 20% [m]
EN800+EN513b	0,56	0,4	0,96	764,907	765,000	918

Tabella 4.2.4- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN566e.

CALCOLO DELLE OPERE DI COMPENSAZIONE PER LA LAMINAZIONE DEI VOLUMI IN ECCESSO						
Zona di impianto	Area fosso [m <sup>2</sup> ]	Area trincea [m <sup>2</sup> ]	Area tot [m <sup>2</sup> ]	Lunghezza fossi per compensazione [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto incrementati del 20% [m]
EN566e	0,56	0,4	0,96	463,704	464,000	557

Tabella 4.2.5- Determinazione della lunghezza del sistema di mitigazione zona EN513c.

CALCOLO DELLE OPERE DI COMPENSAZIONE PER LA LAMINAZIONE DEI VOLUMI IN ECCESSO						
Zona di impianto	Area fosso [m <sup>2</sup> ]	Area trincea [m <sup>2</sup> ]	Area tot [m <sup>2</sup> ]	Lunghezza fossi per compensazione [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto [m]	Lunghezza fossi drenanti da progetto incrementati del 20% [m]
EN513c	0,56	0,4	0,96	704,855	705,000	846

L'ubicazione del sistema di mitigazione viene valutato considerando la direzione e il verso delle linee di flusso. Quest'ultime sono state ricavate esaminando il DEM mediante applicativo QGIS.

### 4.3 DETERMINAZIONE DELLE LINEE DI FLUSSO

Il DEM fornito con estensione .ascii, ha una dimensione della cella 2x2 ed è stato importato nell'applicativo QGIS in formato raster. Nell'immagine 4.3.1 la visualizzazione in QGIS.



Figura 4.3.1- DEM cella 2x2 e zone di impianto (perimetro rosso).

Il DEM caricato ha un'estensione superiore rispetto la zona di impianto, pertanto, per una migliore visualizzazione si effettua un ritaglio del raster.



Figura 4.3.2- Raster ritagliato e zone di impianto.

Successivamente sono state ricavate le curve di livello con una variazione di quota di 1m.

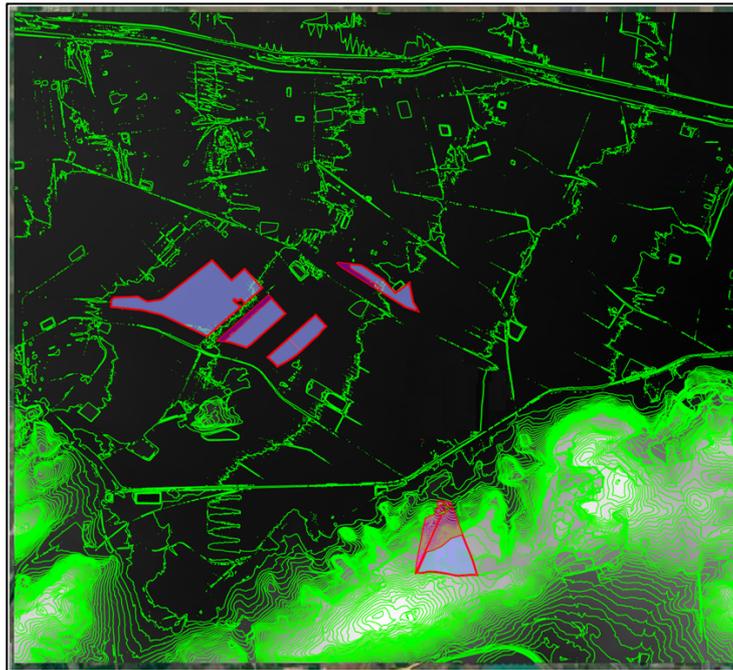


Figura 4.3.3- Curve di livello.

Ricavate le curve di livello si determinano le direzioni delle linee di flusso adoperando i plugin “PCRaster” e “Crayfish”. Il risultato ottenuto è rappresentato per ogni zona di impianto.

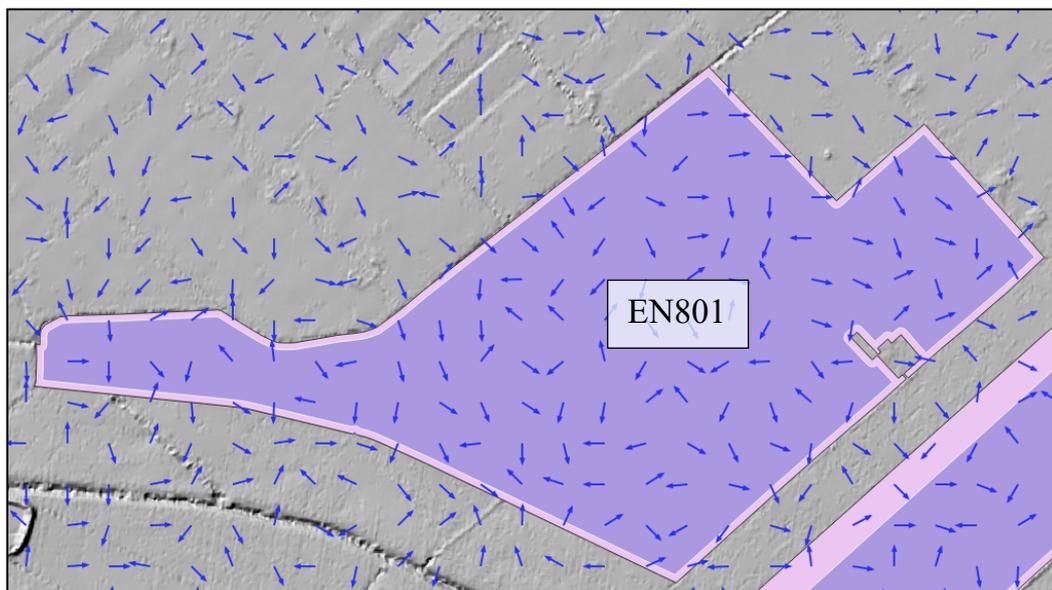
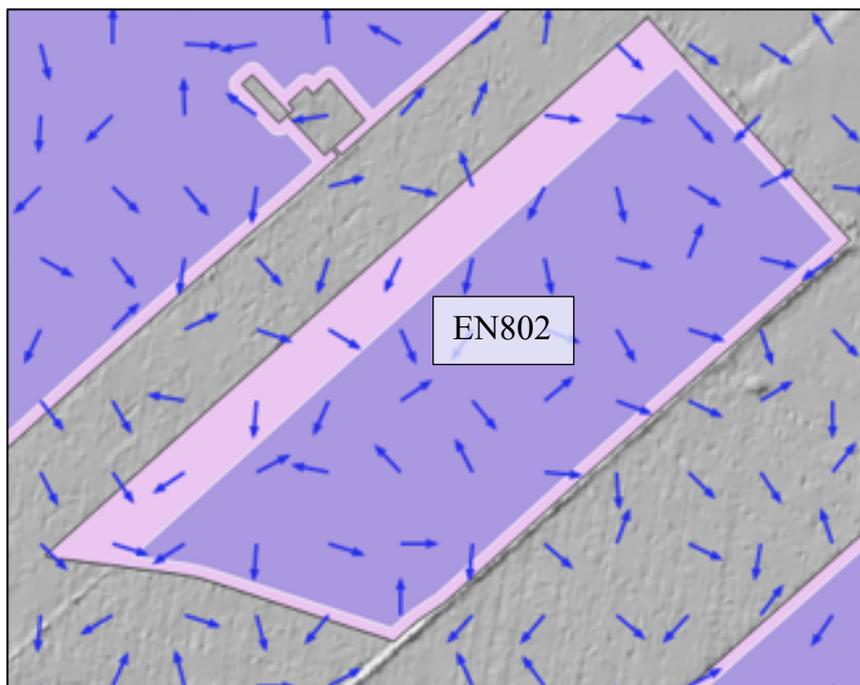
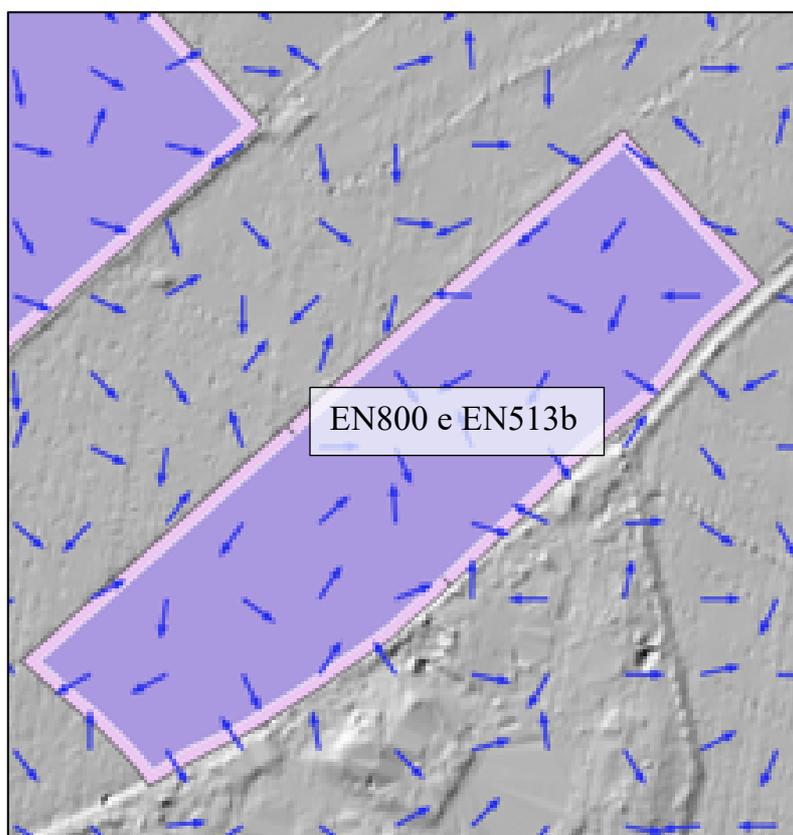


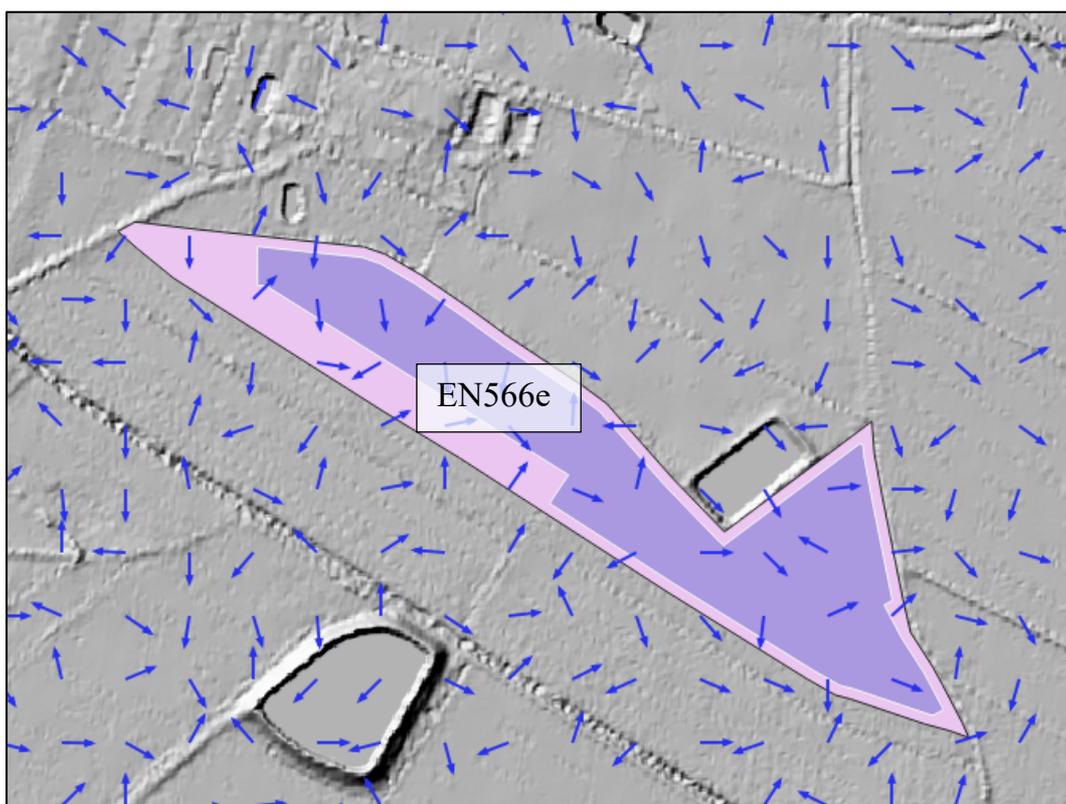
Figura 4.3.4- Linee di flusso nella zona di impianto EN801.



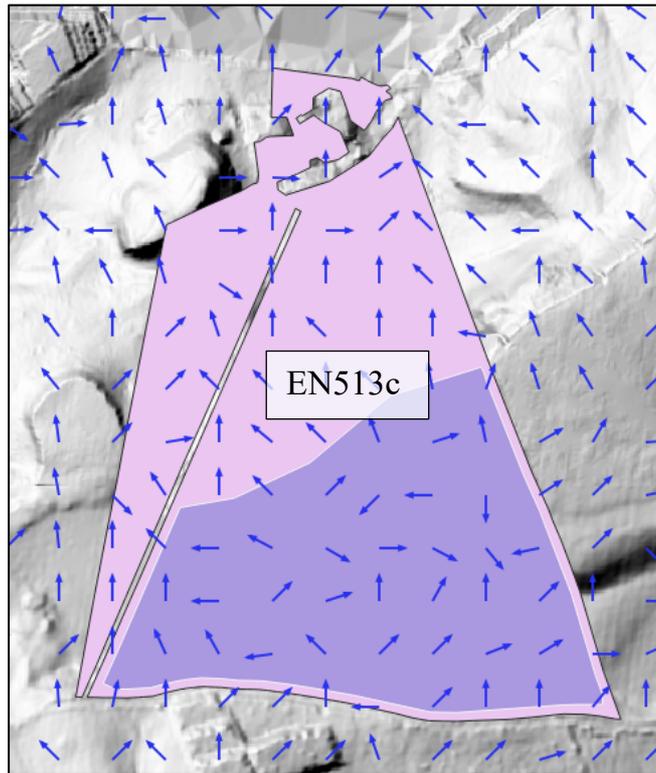
*Figura 4.3.5- Linee di flusso nella zona di impianto EN802.*



*Figura 4.3.6- Linee di flusso nella zona di impianto EN800 e EN513b*



*Figura 4.3.7- Linee di flusso nella zona di impianto EN566e.*



*Figura 4.3.8- Linee di flusso nella zona di impianto EN513c.*

Pur non essendo iso-orientati, è possibile notare come i flussi risultino essere entranti ed uscenti dalle zone perimetrali. Il sistema drenante pertanto è stato posto preferenzialmente su tutto il perimetro, e in taluni casi, ove vi è la presenza di interferenze (strade interne, cabine, etc...) è stato posto all'interno della zona pannellabile.



Figura 4.3.9- Sistema drenante e bacino di laminazione preesistente zona EN801.

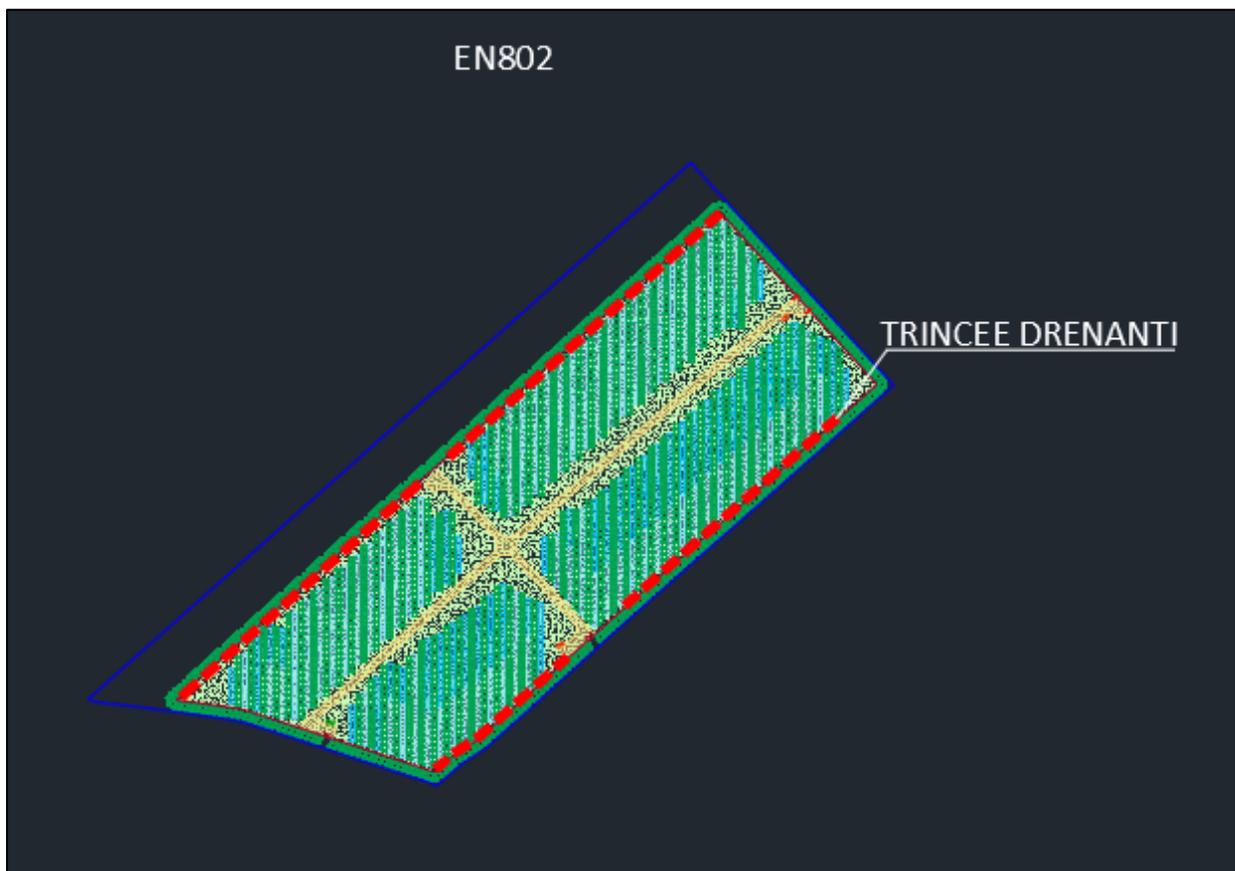


Figura 4.3.10- Sistema drenante zona EN802.

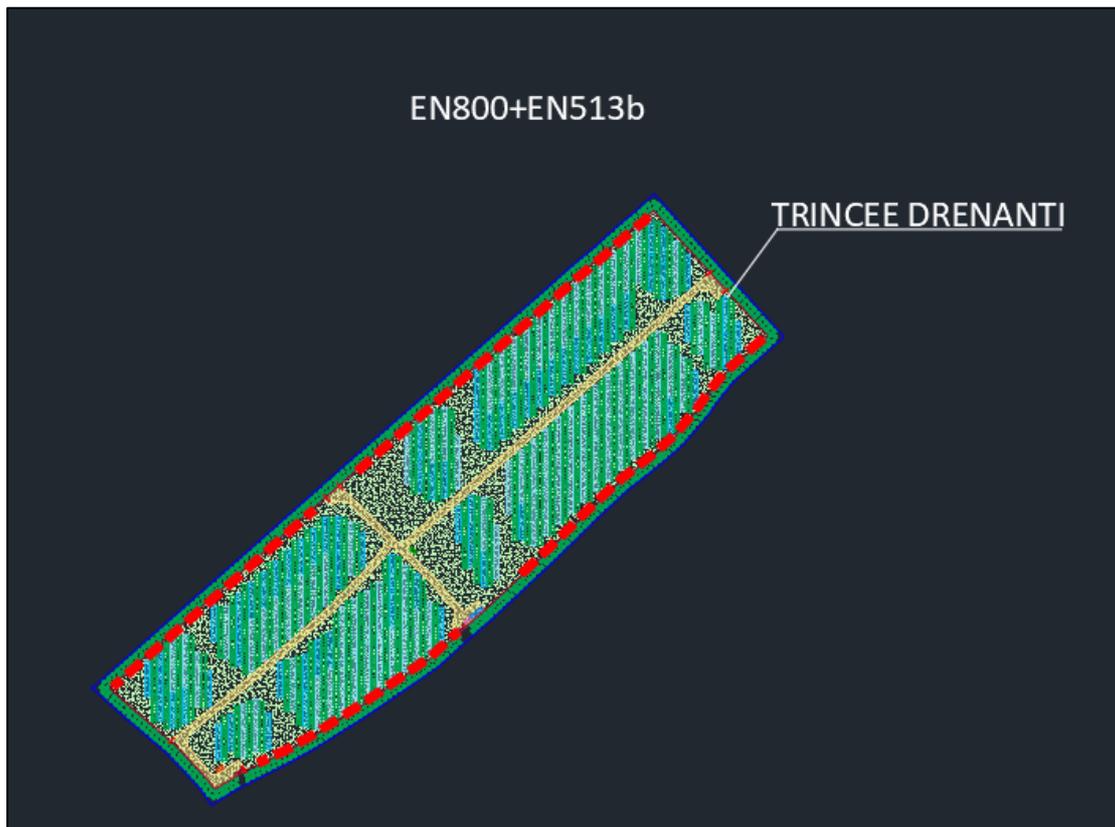


Figura 4.3.11- Sistema drenante zona EN800 e EN513b.

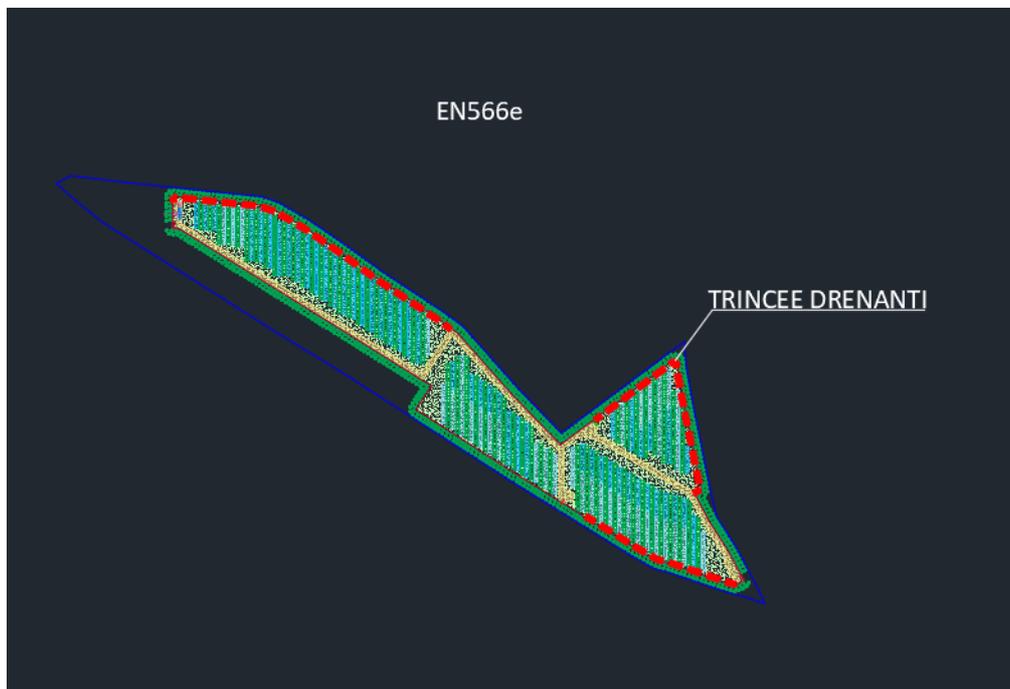
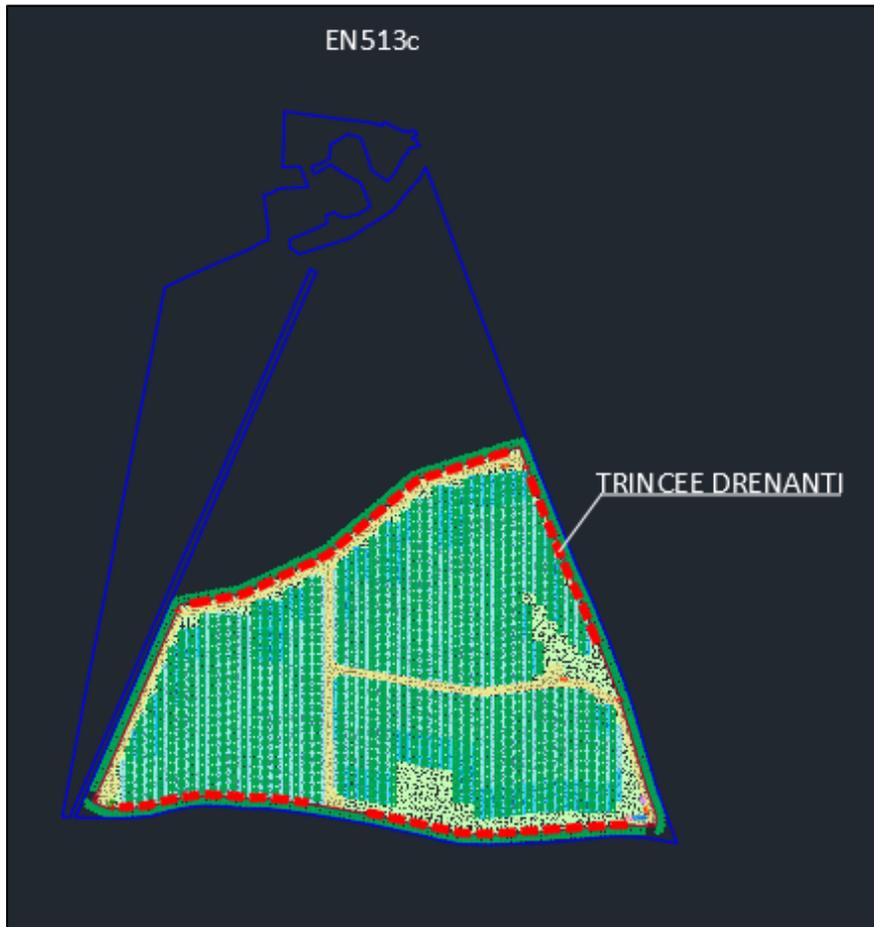


Figura 4.3.12- Sistema drenante zona EN800.



*Figura 4.3.13- Sistema drenante zona EN513c.*

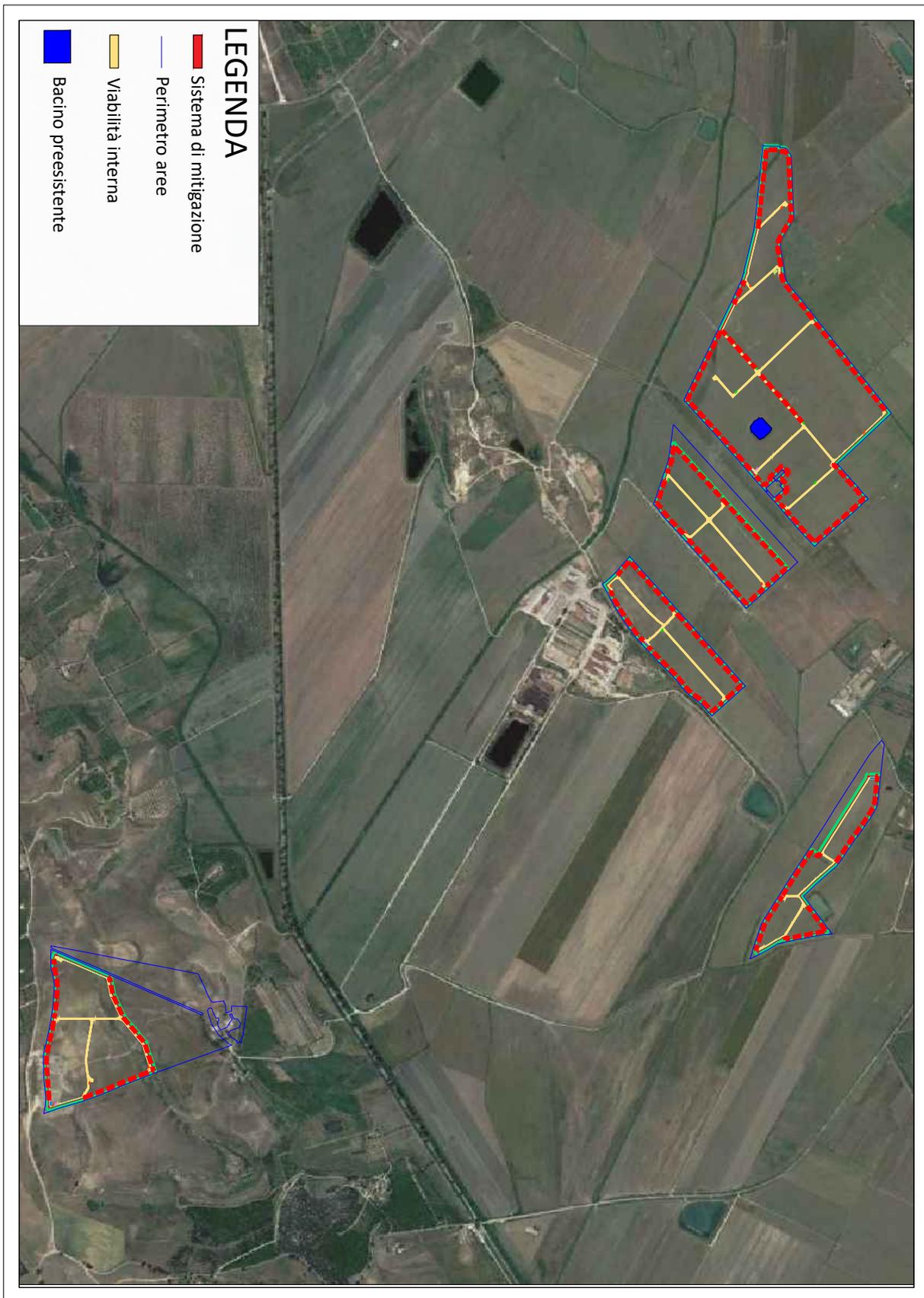


Figura 4.3.14- Mappa complessiva ubicazione del sistema di mitigazione.

## 5 MOTO DI FILTRAZIONE NEI MEZZI POROSI SATURI E INSATURI

---

### 5.1 MEZZO POROSO SATURO

Il moto di filtrazione in un mezzo poroso saturo dipende dal tipo di materiale costituente il mezzo poroso, dalla struttura dello stesso e dalle caratteristiche del fluido in moto.

I parametri fondamentali che caratterizzano il fenomeno della filtrazione nei mezzi porosi saturi sono:

- Porosità;
- Permeabilità.

La porosità viene definita come:

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

Dove:

- $V_v$  è il volume dei vuoti
- $V_t$  è il volume totale

Considerando il moto che avviene all'interno del mezzo saturo bisogna tener presente che non tutta l'acqua presente all'interno dei pori prende parte al moto, infatti parte dell'acqua risulta essere trattenuta all'interno di piccole cavità ed è impossibilitata a muoversi. Il contributo alla filtrazione è quindi dato dalla cosiddetta porosità efficace ovvero quella parte del volume totale dei vuoti in cui effettivamente avviene il moto dell'acqua.

La permeabilità viene definita come la velocità che il liquido assume quando è sottoposto ad un gradiente di carico piezometrico unitario, ed esso dipende dalle caratteristiche del mezzo poroso e da quelle del liquido.

È possibile descrivere matematicamente il fenomeno attraverso l'equazione di Darcy:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{K} \text{grad } h$$

La determinazione del moto di filtrazione dipende quindi dal carico totale  $h=h(x,y,z,t)$  e della conoscenza della permeabilità  $\mathbf{K}$ .

Si noti come  $\mathbf{K}$  è un tensore contenente i valori  $k_{ij}$ , che a seconda degli indici, ci danno un'informazione circa la velocità assunta dal fluido lungo la direzione  $i$ -esima per via dell'applicazione di un gradiente di carico piezometrico nella direzione  $j$ -esima.

La soluzione al problema viene ricavata aggiungendo all'equazione di Darcy l'equazione di conservazione della massa su un elemento di volume infinitesimo.

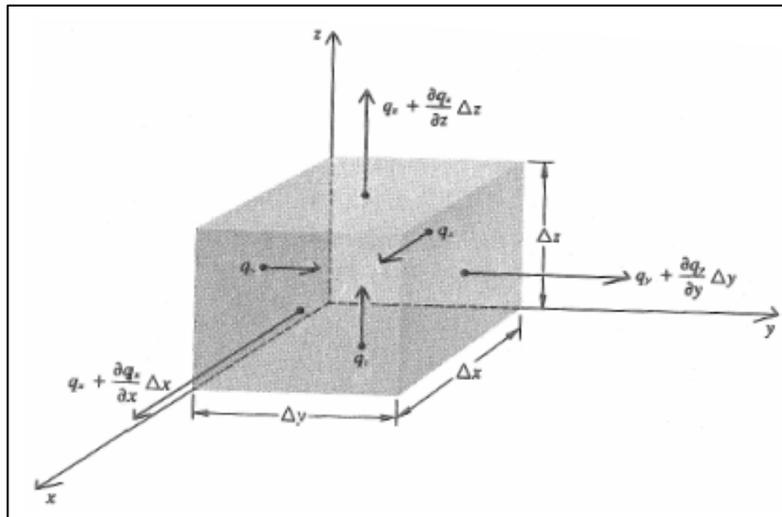


Figura 5.1- Rappresentazione volume di controllo.

L'equazione di conservazione della massa nel caso stazionario diviene:

$$\left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy\right) dx dz - q_x dy dz + \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx\right) dy dz - q_z dx dy + \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz\right) dx dy = 0$$

L'equazione alle derivate parziali che si ottiene dalla combinazione delle due equazioni risulta essere:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( -K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( -K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Nel caso più generale l'equazione del moto diventa:

$$-\rho_w \left( \frac{\partial q_y}{\partial y} dy dx dz + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz dx dy \right) dt = \frac{\partial(\rho_w n S_r)}{\partial t} dz dx dy dt$$

## 5.2 MEZZO POROSO INSATURO

Volendo tenere conto della parziale saturazione che si può avere in determinate zone del mezzo poroso, l'equazione di Darcy può essere riscritta come:

$$v = -K(\psi) \text{ grad}(h)$$

Tale espressione è dovuta a Fredlund e Rahardjo (1993) e differisce dall'equazione di Darcy solamente per il fatto che il coefficiente di permeabilità  $K$  risulta dipendere da  $\psi$  che rappresenta la suzione. La suzione è definita come la differenza tra la pressione atmosferica,  $p_a$ , e la pressione dell'acqua nel mezzo poroso,  $p_w$

$$\psi = p_a - p_w$$

Il mezzo poroso insaturo può quindi essere visto come un mezzo trifasico formato da aria, acqua e solido. La presenza di aria e acqua nel mezzo poroso, unitamente alle dimensioni dei pori fa sì che, a causa della tensione superficiale la superficie libera dell'acqua assuma una curvatura. Quest'ultima è tanto maggiore quanto minore è la dimensione dei pori, e tale curvatura provoca una tensione negativa che può essere definita come suzione. La suzione per alcuni materiali (alcune argille) è incrementata da un contributo osmotico dovuto alla

differenza di concentrazione di ioni tra acqua e materiale poroso, tuttavia in genere questo contributo può essere trascurato.

La suzione è legata al contenuto d'acqua volumetrico:

$$\vartheta_w = \frac{V_w}{V_t}$$

Dove:

- $V_w$  è il volume d'acqua contenuto nel suolo
- $V_t$  è il volume totale del suolo

Il moto di filtrazione, quindi, è sempre regolato dalla differenza del carico totale, tuttavia, il coefficiente di permeabilità subirà delle variazioni in funzione della variazione del contenuto d'acqua. La caratterizzazione del fenomeno sarà quindi possibile solamente una volta nota la funzione  $K(\vartheta_w)$  detta funzione di conducibilità idraulica la quale risulta direttamente dipendente dalla funzione  $\vartheta_w(\psi)$  detta curva caratteristica del contenuto d'acqua o curva di ritenzione. Sfruttando la dipendenza del contenuto idrico volumetrico dalla suzione, la funzione di conducibilità idraulica può essere scritta come direttamente dipendente da quest'ultima assumendo la forma  $K(\psi)$ .

La valutazione del moto di filtrazione nel mezzo poroso insaturo non può pertanto prescindere dalla conoscenza delle funzioni  $\vartheta_w(\psi)$  e  $K(\psi)$  le quali risultano essere funzioni non lineari. Tali curve non sono semplicemente misurabili e non risulta nemmeno semplice la loro estrapolazione mediante relazioni analitiche. Viste le difficoltà e le incertezze che si hanno nella determinazione sperimentale dei valori delle funzioni descritte, spesso sono utilizzate delle stime piuttosto che misurazioni puntuali delle stesse.

- **Curva di ritenzione**

La curva di ritenzione risulta essere isteretica, ossia immaginando di imbibire il mezzo poroso e andando a misurare il valore di contenuto idrico in funzione di diversi valori di suzione si troverà una certa curva di ritenzione. Immaginando in seguito di misurare il contenuto idrico in corrispondenza degli stessi valori di suzione, ma procedendo all'essiccamento del mezzo poroso, i valori di contenuto idrico ricavati non saranno quelli ottenuti nel ciclo di

imbibizione. Questo comporta un'ulteriore difficoltà nella determinazione della curva di ritenzione.

La curva di ritenzione risulta influenzata da:

- Tipo di terreno;
- Storia tensionale del terreno;
- Cambiamenti di volume;
- Rimaneggiamento dei campioni estratti.

Soprattutto dagli ultimi tre punti dipendono le incertezze di misurazione, in quanto vi è sempre un certo grado di manipolazione dei campioni durante la fase di estrazione e preparazione dei provini.

I metodi di misura della curva caratteristica sono molteplici, tuttavia questo tipo di analisi sono ancora poco diffuse nella maggior parte dei laboratori geotecnici. Inoltre, le misurazioni sono lunghe e costose e la dipendenza delle stesse dalla storia tensionale del provino sembra inficiare inevitabilmente la loro affidabilità.

Ad oggi i metodi maggiormente utilizzati sono quelli empirici i quali consentono di ottenere la curva di ritenzione sulla base di alcune proprietà del terreno. Uno tra i metodi più utilizzati si basa sulla stima dei parametri delle curve di Van Genuchten una volta noto il passante ad un determinato staccio o il limite liquido e plastico o sulla base di ulteriori proprietà.

Esistono infine dei modelli basati su database che contengono curve di ritenzione per differenti tipi di suolo, pertanto, una volta individuato il tipo di terreno si sceglie la curva che meglio rappresenta il terreno in esame.

- **Funzione di permeabilità**

La funzione di permeabilità rappresenta la relazione esistente tra i valori di contenuto idrico o di suzione del terreno e quelli di permeabilità. In generale, si osserva che la permeabilità del materiale decresce al diminuire del contenuto idrico volumetrico e questo può essere facilmente compreso dal fatto che, sottraendo acqua al materiale poroso, quella residua finirà per essere disposta nei pori più piccoli e meno trasmissivi dello stesso con conseguente decrescita della propria capacità di muoversi a parità di gradiente di carico piezometrico.

La forma della curva di permeabilità ha importanti effetti sul moto di filtrazione in quanto si possono verificare situazioni in cui materiali dotati di grande permeabilità nel mezzo poroso saturo come le sabbie possano trovarsi ad avere bassissima permeabilità nel mezzo poroso insaturo. Questo è dovuto alla brusca decrescita che si osserva per il contenuto idrico nei materiali a grana grossa non appena inizia a entrare aria nell'ammasso poroso.

Anche nel caso della curva di permeabilità si osserva un comportamento isteretico.

Un metodo comunemente utilizzato e per il quale esistono diverse procedure comprovate, per stimare la funzione di permeabilità è quello di misurare o stimare la permeabilità del materiale saturo, successivamente misurare o stimare la curva di ritenzione e in seguito da quest'ultima ottenere la funzione di permeabilità. In questo modo operano le procedure proposte da Van Genuchten (1980) e Fredlung & Xing (1994) le quali risultano ad oggi le più utilizzate per la caratterizzazione idraulica dei materiali per scopi ingegneristici.

## 6 MODELLAZIONE E ANALISI

---

La modellazione del sistema di mitigazione oggetto di studio è stata effettuata mediante applicativo “FEA NX” sviluppato da “Midas”. L’applicativo usato è un software di modellazione 3D che possiede un’interfaccia CAD che consente di modellare le varie geometrie direttamente sull’interfaccia grafica. La mesh 2D o 3D, può essere creata in maniera manuale, semiautomatica o automatica, e nel caso 3D, si può usufruire non solo di elementi tetraedrici ma anche di elementi cosiddetti ibridi (esagonali, tetraedrici e piramidali). Le analisi che si possono condurre possono essere lineari e non lineari ed è possibile considerare lo stato stazionario o transiente dei fenomeni, avvicinandosi il più possibile alle reali condizioni a cui un’opera può essere sottoposta. In particolare, si è simulata la precipitazione avente tempo di ritorno 50 anni e si è esaminata la risposta del sistema di mitigazione.

### 6.1 MODELLAZIONE TOPOGRAFICA DEL SITO IN ESAME

Come descritto nel capitolo 4, si dispone del DTM della porzione di territorio in cui ricade la zona di impianto. Il DTM possiede una dimensione della cella 2x2 e raffigura una vasta zona della Piana di Catania.

Al fine di poter rappresentare la sola estensione topografica che interessa la zona di impianto, si è proceduto al ritaglio del raster, come già rappresentato in figura 4.3.2. Il software consente di importare la geometria del terreno mediante il comando “Terrain Geometry Maker” (TGM).

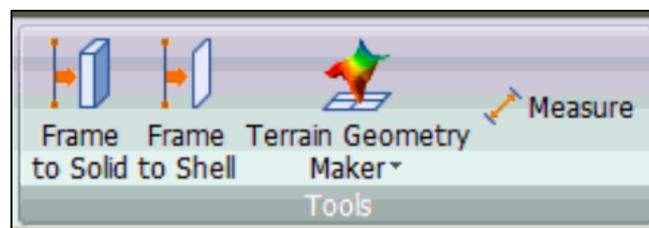
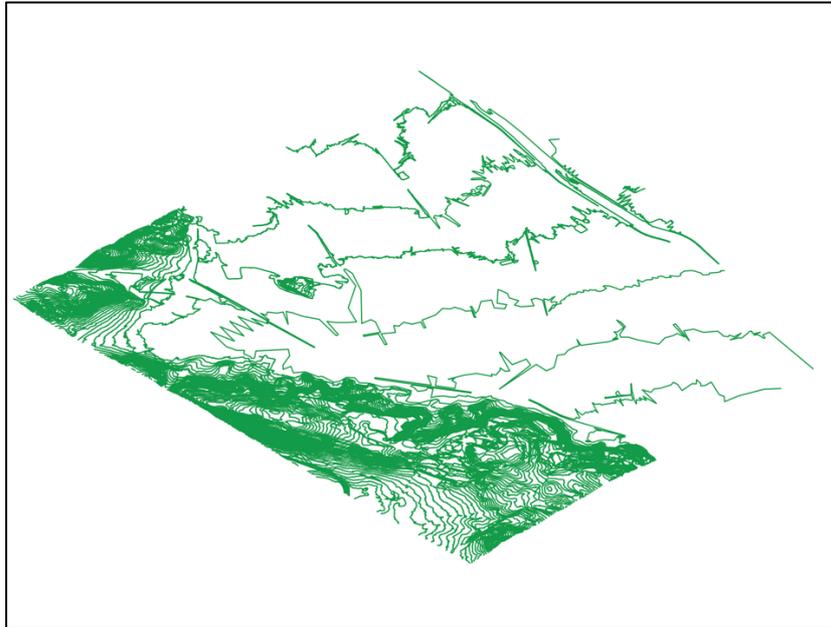


Figura 6.1.1- Terrain Geometry Maker.

Tale comando richiede in ingresso le curve di livello, dotate dell'attributo di quota, in un file formato dxf.

Dapprima, partendo dal DEM sono state ricavate le curve di livello mediante l'uso di QGIS e successivamente si è esportato lo shapefile in formato dxf. Nella figura a seguire si riporta il file di input per il Terrain Geometry Maker (TGM).



*Figura 6.1.2- File di input per la modellazione del terreno.*

Una volta importato il file è possibile visualizzare in pianta e in sezione le curve di livello. In particolare la visualizzazione in sezione ci consente di capire se l'importazione del file contiene l'informazione altimetrica o meno.

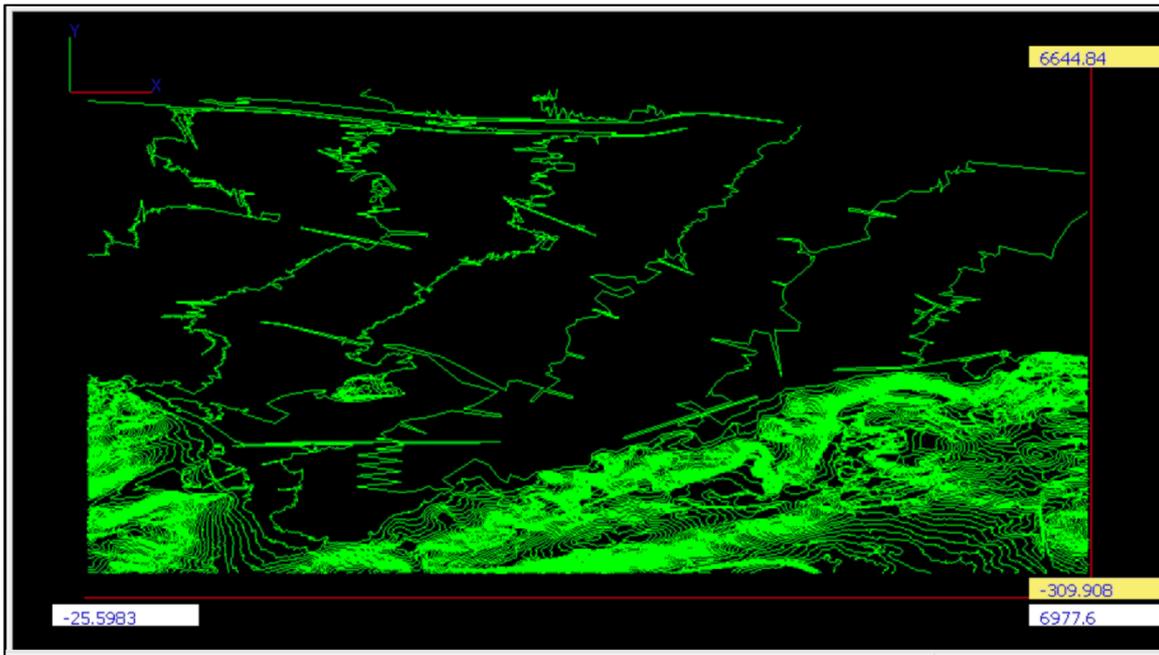


Figura 6.1.3- Vista sul piano x-y delle curve di livello (componente planimetrica).

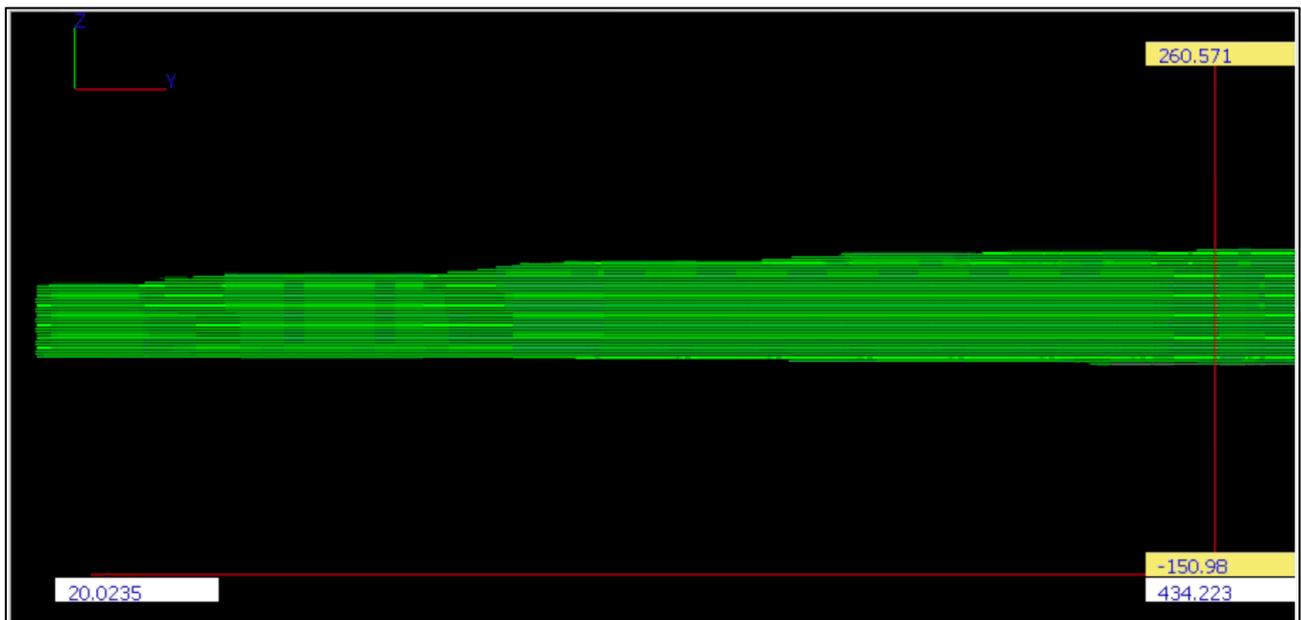


Figura 6.1.4- Vista sul piano y-z delle curve di livello (componente altimetrica).

Attraverso la finestra del TGM, in cui viene rappresentata la planimetria (figura 6.1.3), si seleziona l'area di interesse da interpolare al fine di ottenere una superficie continua del terreno.

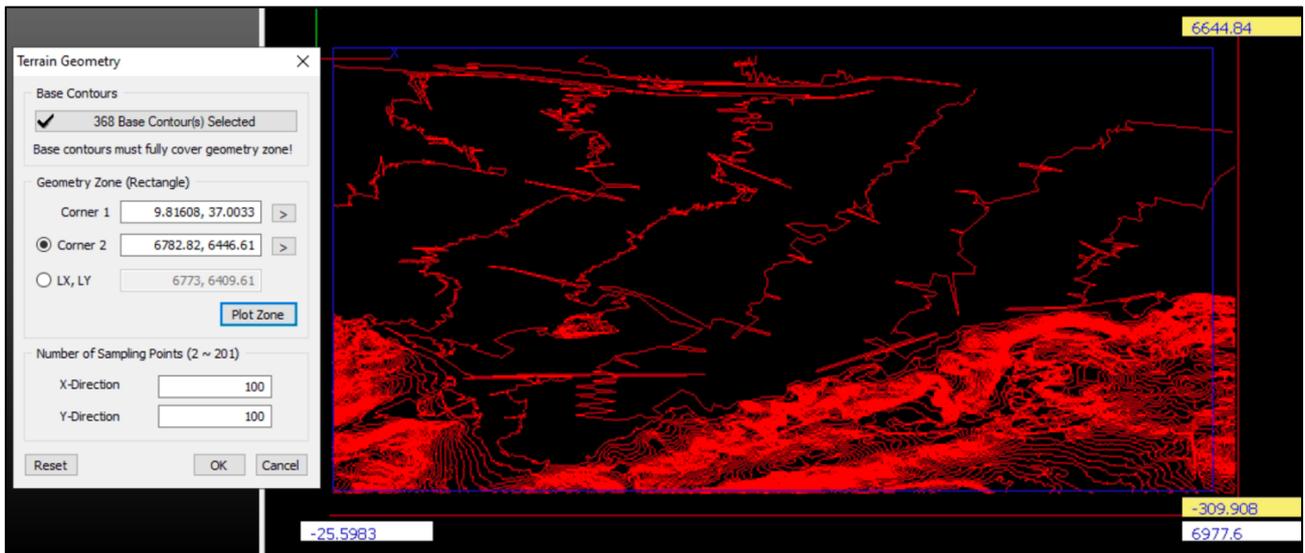


Figura 6.1.5- Selezione dell'area di interesse da interpolare.

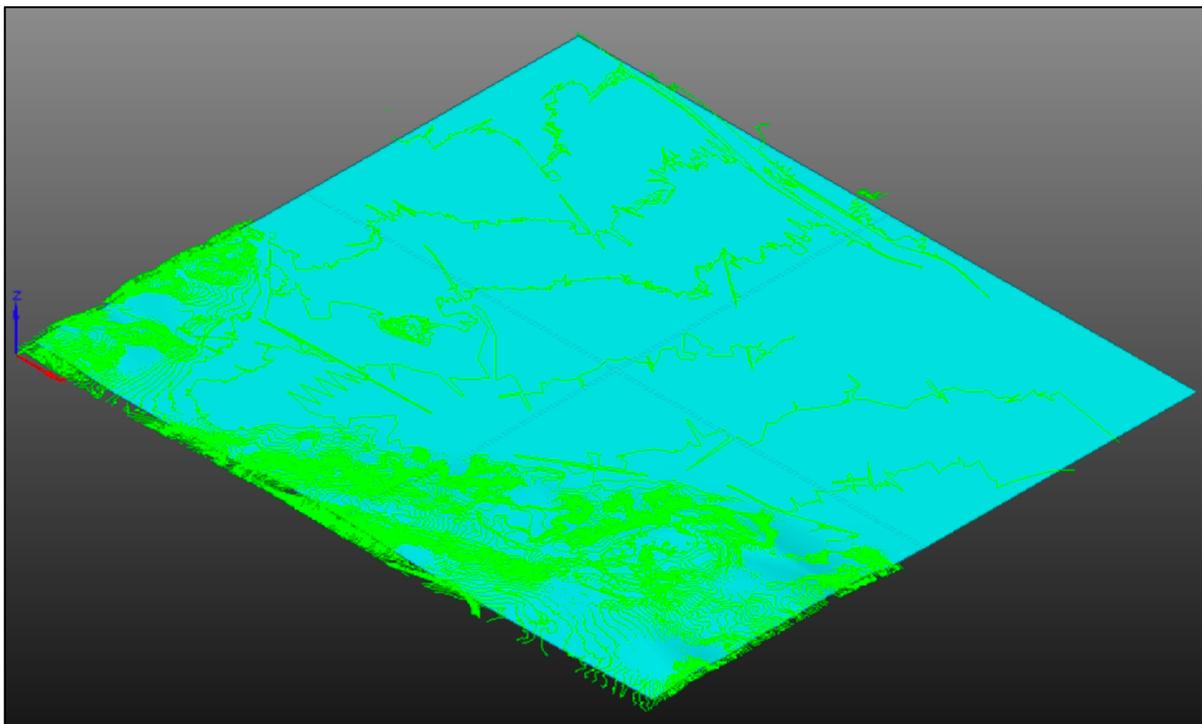


Figura 6.1.6-Rappresentazione continua del terreno.

Quindi si importa la superficie, creata attraverso il TGM, nello spazio di modellazione.

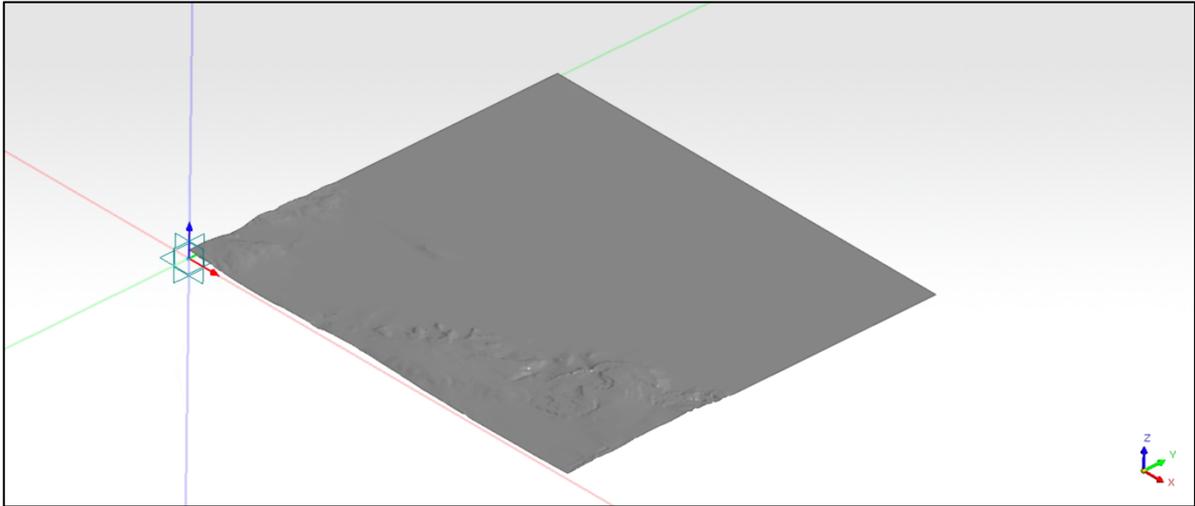


Figura 6.1.7- Superficie del terreno nello spazio di modellazione.

In base ai risultati delle indagini geologiche lo spessore di terreno che caratterizza la zona di impianto è di circa 45m:

- Da 0 a 15m, suolo alluvionale;
- Da 15 a 45m, argille.

Si modella quindi il banco di terreno attraverso l'estrusione della superficie mediante il comando "Extrude", ottenendo così un solido tridimensionale.

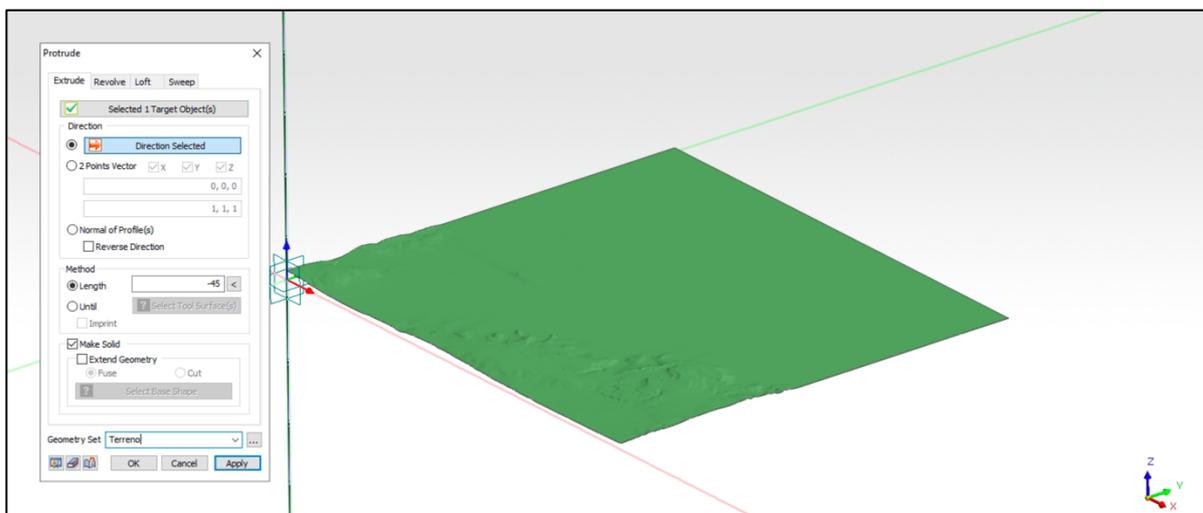


Figura 6.1.8- Impostazioni comando "Extrude".

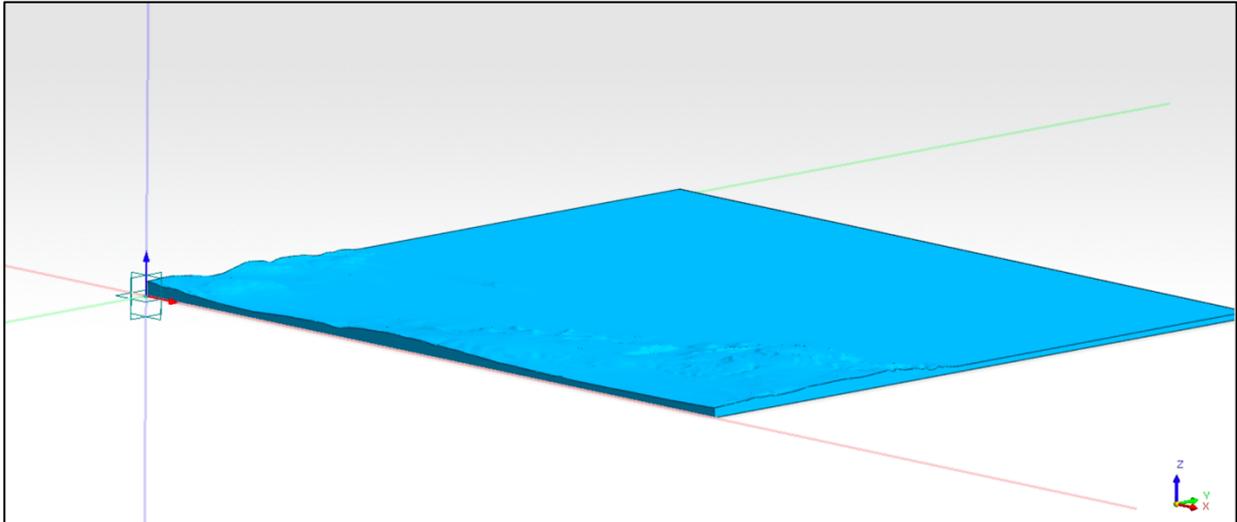


Figura 6.1.9- Modello del terreno.

## 6.2 MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI MITIGAZIONE

La modellazione e l'analisi del sistema di mitigazione è stata effettuata per le zone EN802 e EN800+EN513b. Nei paragrafi che seguono si analizza in dettaglio la modellazione per le singole zone.

- **Sistema di mitigazione in zona EN802**

Il sistema di mitigazione nella zona EN802 ha un'estensione di 888m. Tale sistema viene inserito perimetralmente alla zona di impianto prestando attenzione alle interferenze.

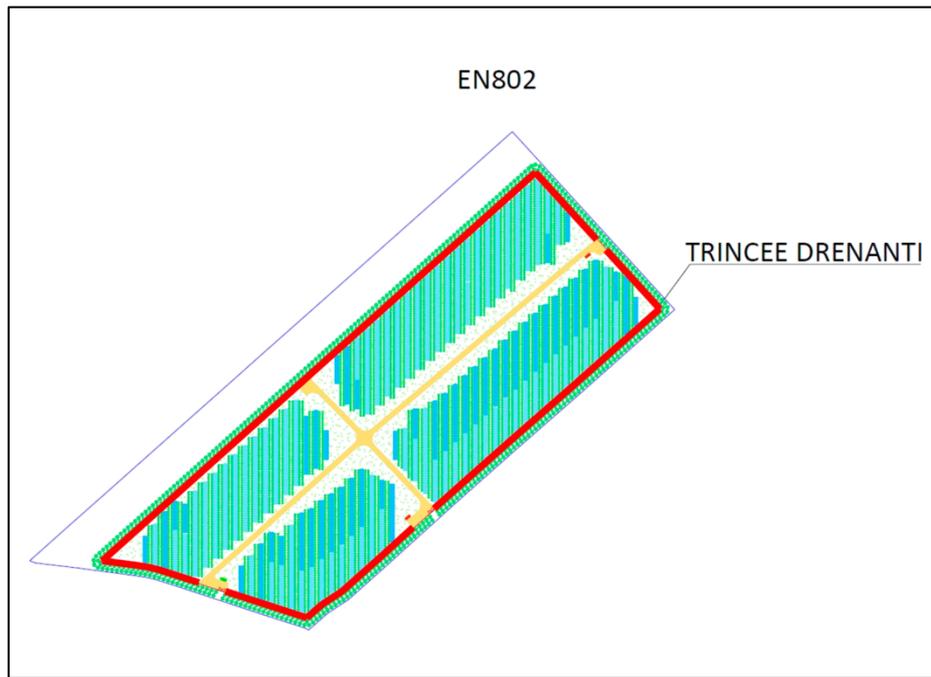


Figura 6.2.1- Sistema di mitigazione zona EN802.

Al fine di localizzare correttamente le trincee drenanti sullo spazio modello del software si è fatto uso del software QGIS. Si è tracciato il sistema di mitigazione in formato shapefile e successivamente è stato poi esportato in formato dxf al fine di rendere fruibile la gestione di tale geometria nello spazio di modellazione del software FEA NX. Nell'immagine 6.2.2 si rappresenta il sistema di mitigazione localizzato.

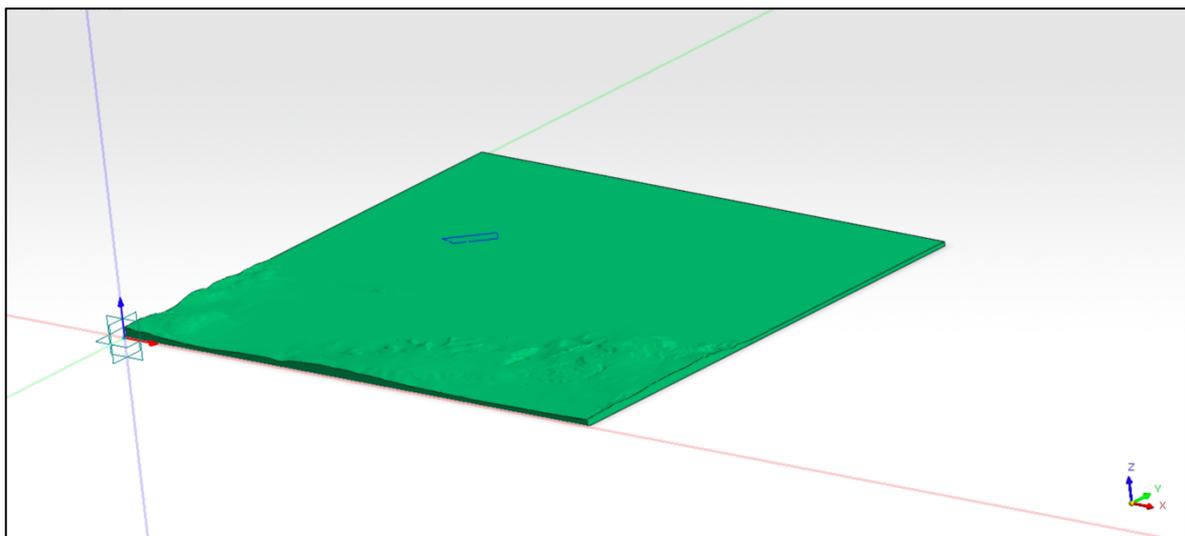


Figura 6.2.2- Sistema di mitigazione nello spazio di modellazione.

Tale sistema tuttavia non contiene l'informazione altimetrica, come è possibile notare in figura 6.2.3.

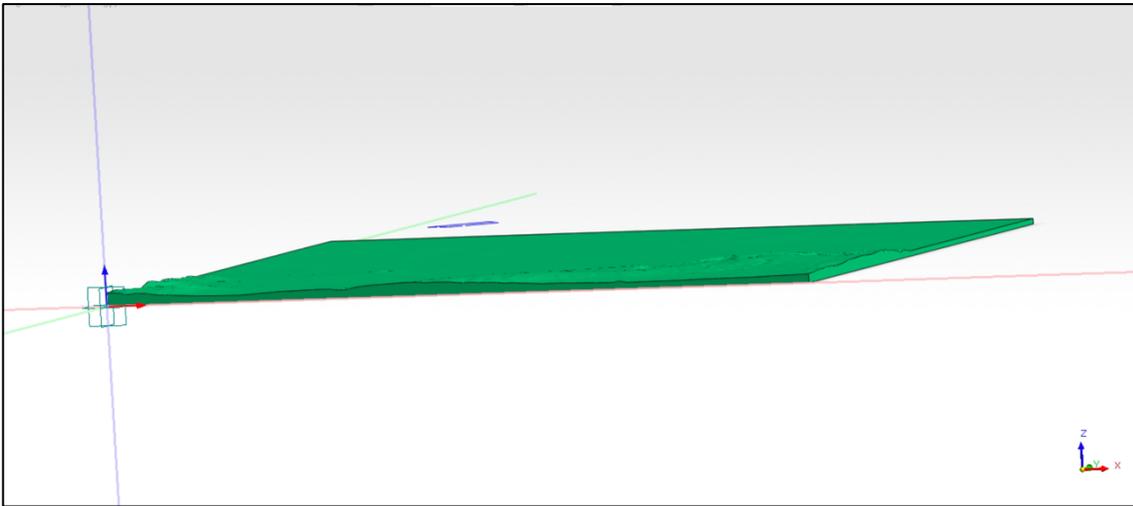


Figura 6.2.3- Differenza di quota del sistema di mitigazione.

Al fine di adattare il sistema di trincee alla superficie del terreno si è fatto uso del comando “Project”, prima però si è isolata la porzione di territorio a cui compete la zona EN802 in modo da semplificare le elaborazioni successive. Si è quindi creato un solido che racchiude l'area di interesse e mediante operazione booleane si è ricavato il volume su cui verrà eseguita l'analisi.

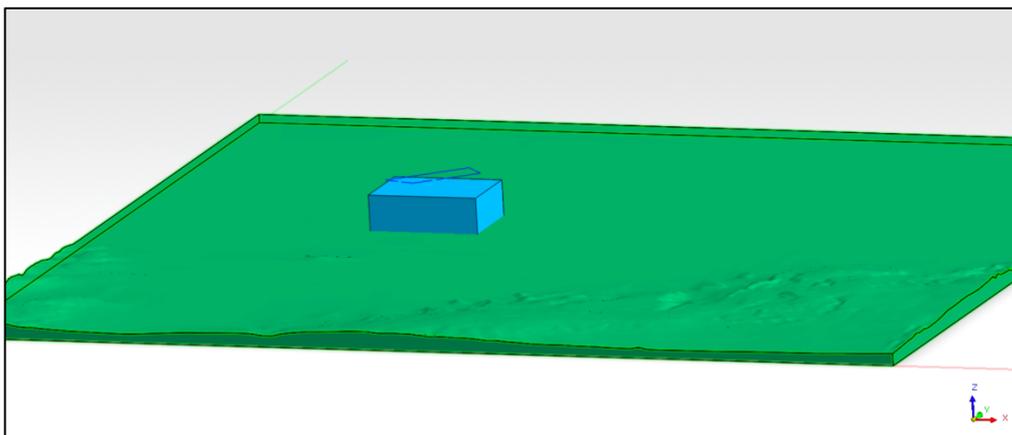


Figura 6.2.4- Solido di interesse per l'analisi (in blu).

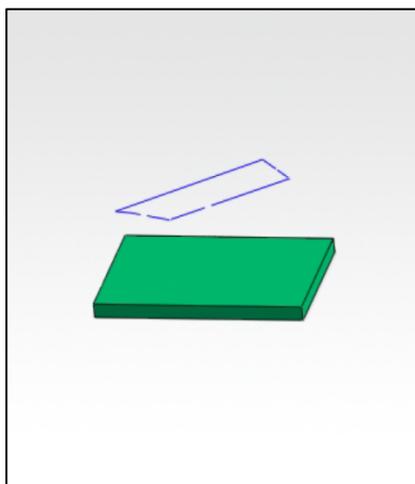


Figura 6.2.5- Volume di terreno rappresentate la zona di impianto.

Si è quindi proceduto alla proiezione del sistema di mitigazione.

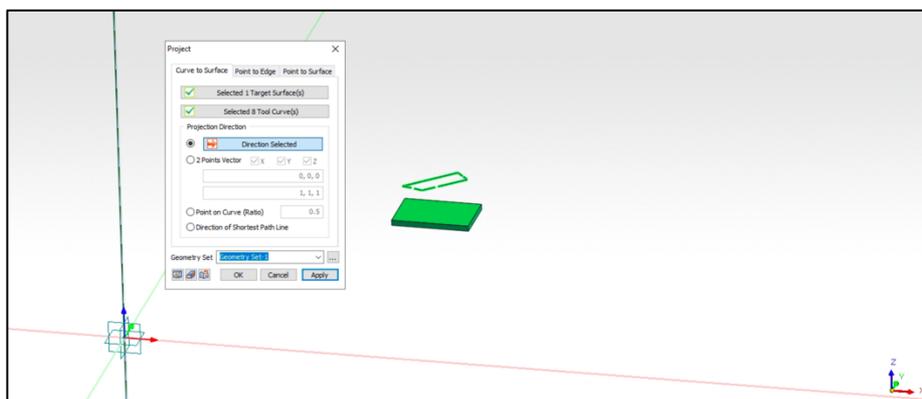


Figura 6.2.6- Comando "Project".

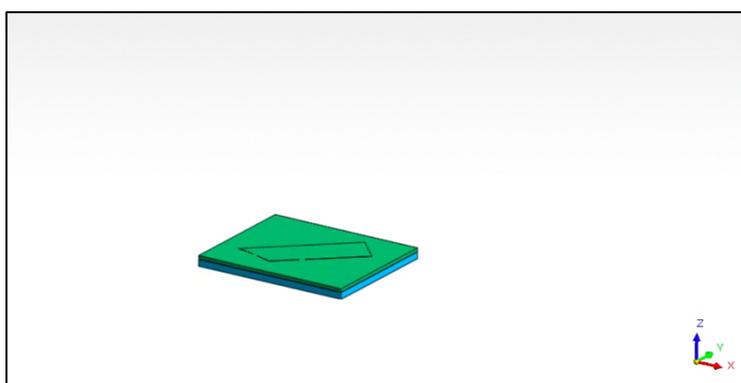


Figura 6.2.7- Proiezione del sistema di mitigazione sul volume di terreno.

Tuttavia il sistema di trincee deve essere ancora modellato come solido, infatti, la proiezione è stata effettuata tra il solido (il terreno) e linee (sistema di laminazione). Si è quindi adoperato

il comando “Sweep” che consente di creare un solido facendo traslare il baricentro della geometria piana lungo un percorso di riferimento. Nel caso specifico si è utilizzata come geometria piana il doppio della sezione trasversale del sistema di trincee, in quanto il comando prende come riferimento il baricentro; successivamente mediante operatore booleano si è considerata la sola porzione di trincea interna al terreno.

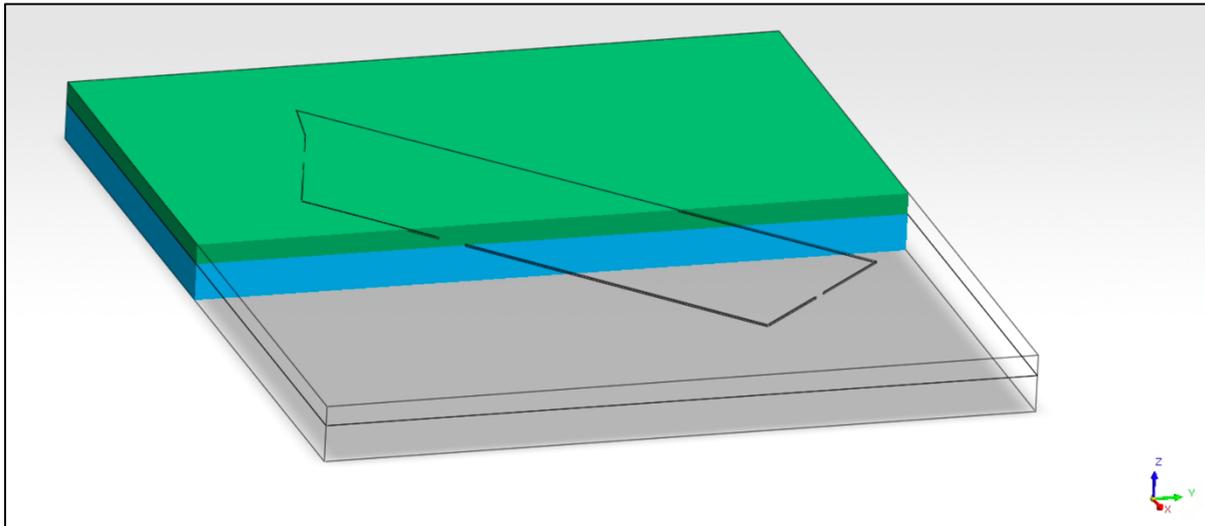


Figura 6.2.8- Visualizzazione in sezione del sistema in esame.

Le geometrie così modellate risultano però disaccoppiate, ovvero non vi è alcun legame fisico tra di esse. Questo comporterebbe un problema in fase di creazione della mesh e quindi di output dell’analisi. Al fine di creare un legame tra le geometrie si utilizza il comando “auto-connect” che crea automaticamente delle facce di condivisione tra i solidi.

Una volta creato il modello geometrico si assegnano i materiali, le condizioni al contorno e si crea la mesh.

I materiali da definire sono tre e riguardano:

- Suolo alluvionale;
- Suolo argilloso;
- Ghiaia di riempimento delle trincee.

Tabella 6.2.1- Proprietà idrauliche dei terreni.

Tipo di suolo	e [-]	$k_{sat}$ [m/h]	Saturo
Alluvionale	0,37	$1,98 \cdot 10^{-4}$	No
Argilla	0,30	$3,6 \cdot 10^{-6}$	Si
Ghiaia	0,40	0,36	No

Il suolo alluvionale e quello di riempimento delle trincee risultano essere asciutti, mentre il banco di argilla è saturo e la superficie piezometrica si attesta alla medesima profondità.

Le proprietà che interessa definire sono quelle che caratterizzano il moto di filtrazione nel terreno, in particolare si assegna la curva di ritenzione idrica e la funzione di permeabilità allo strato di suolo alluvionale. Tali relazioni sono state ricavate consultando il database implementato in FEA NX che riporta le leggi rappresentative in funzione dei differenti tipi di terreno.

Tabella 6.2.2- Parametri dell'insaturo inerenti al suolo alluvionale e alla ghiaia.

Tipo di suolo	$\theta_s$ [-]	$\theta_r$ [-]	a	n
Alluvionale	0,39	0,1	5,9	1,48
Ghiaia	0,43	0,045	14,5	2,68

Si è quindi imposta la condizione al contorno inerente alla posizione della falda, raffigurata in verde, nell'immagine 6.2.9.

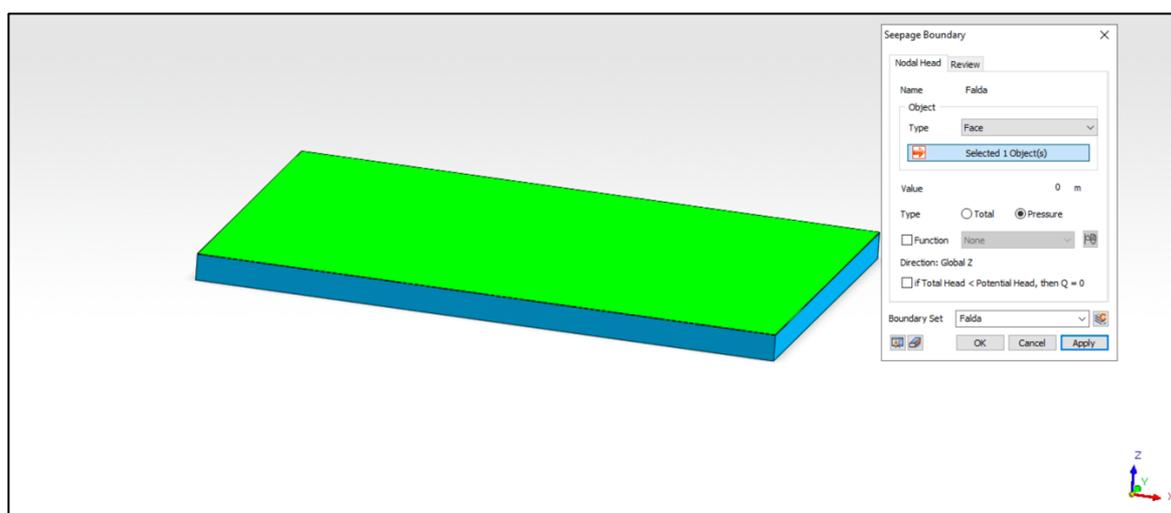


Figura 6.2.9- Imposizione del livello di falda nello strato di argilla.

In input al sistema si inserisce la precipitazione avente tempo di ritorno 50 anni al fine di simulare la condizione meteorologica che potrebbe portare in crisi il sistema di laminazione e la funzionalità dell'impianto. L'intensità di precipitazione è stata ricavata mediante la relazione:

$$i = a * t^{n-1}$$

$$a = 49,065$$

$$n = 0,3319$$

Dove:

- a ed n sono i parametri della curva di probabilità pluviometrica.

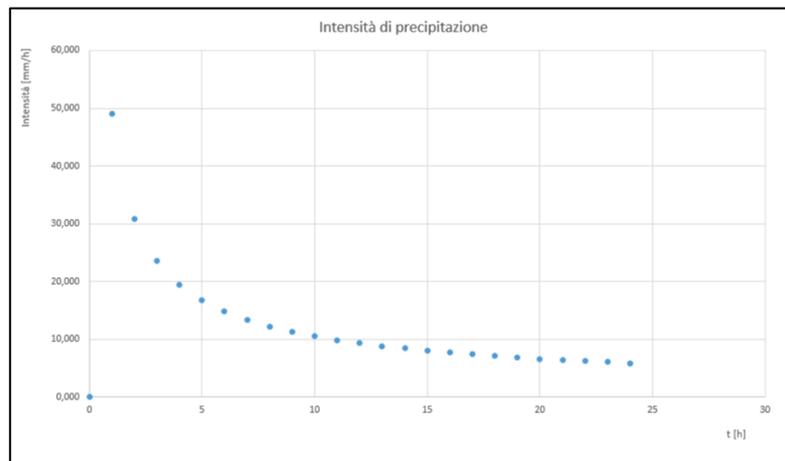


Figura 6.2.10- Intensità di precipitazione in input al sistema.

La precipitazione in ingresso al sistema è stata inserita nel modello mediante il comando “Flux” avendo dapprima definito la funzione che rappresenta l'intensità.

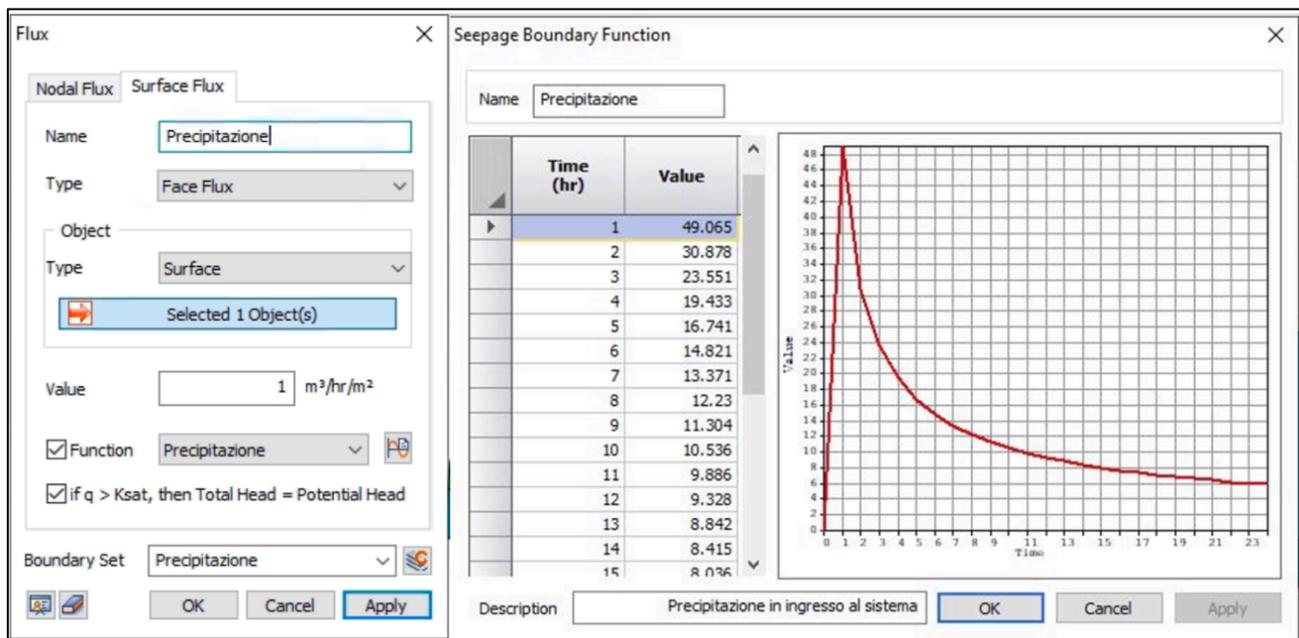
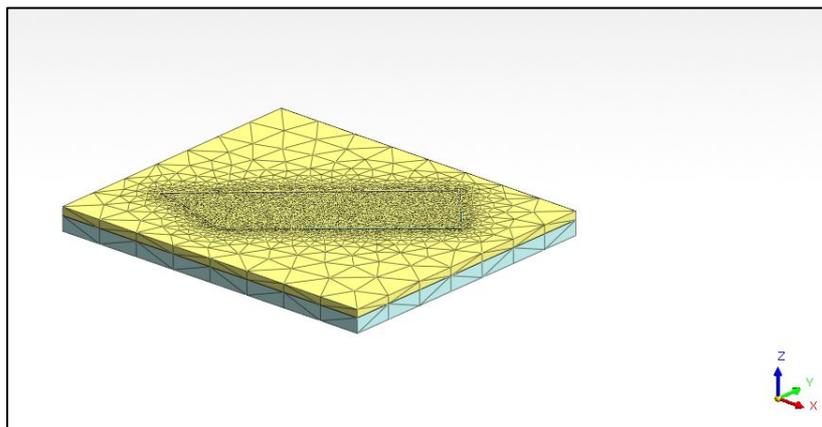


Figura 6.2.11- Imposizione della precipitazione in input.

Definite le condizioni al contorno si passa alla realizzazione della mesh utilizzando il meshatore automatico. Gli elementi utilizzati sono di tipo tetraedrico ed in particolare dapprima si applica la mesh al sistema di mitigazione e successivamente al terreno, in modo da costruire una mesh graduale avente un numero di nodi maggiore nella zona limitrofa e interna al sistema di trincee.



Figur 6.2.12- Mesh del terreno e del sistema di mitigazione.

Una volta realizzata la mesh sono stati definiti gli stage di costruzione. Quindi prima è stato definito uno stage definito “steady state” in cui si considerano le condizioni iniziali di pre-precipitazione e successivamente uno stage definito “transient” in cui si considera il regime

transitorio. Per quest'ultimo sono stati definiti dei time step di 1 ora dove si sono considerate 48 ore in cui nelle prime 24 ore agisce la precipitazione in ingresso.

L'obiettivo principale è quello di capire se il sistema di mitigazione entra in crisi durante l'evento di pioggia e entro quanto tempo dalla fine della precipitazione si ritorna ad una condizione di operatività.

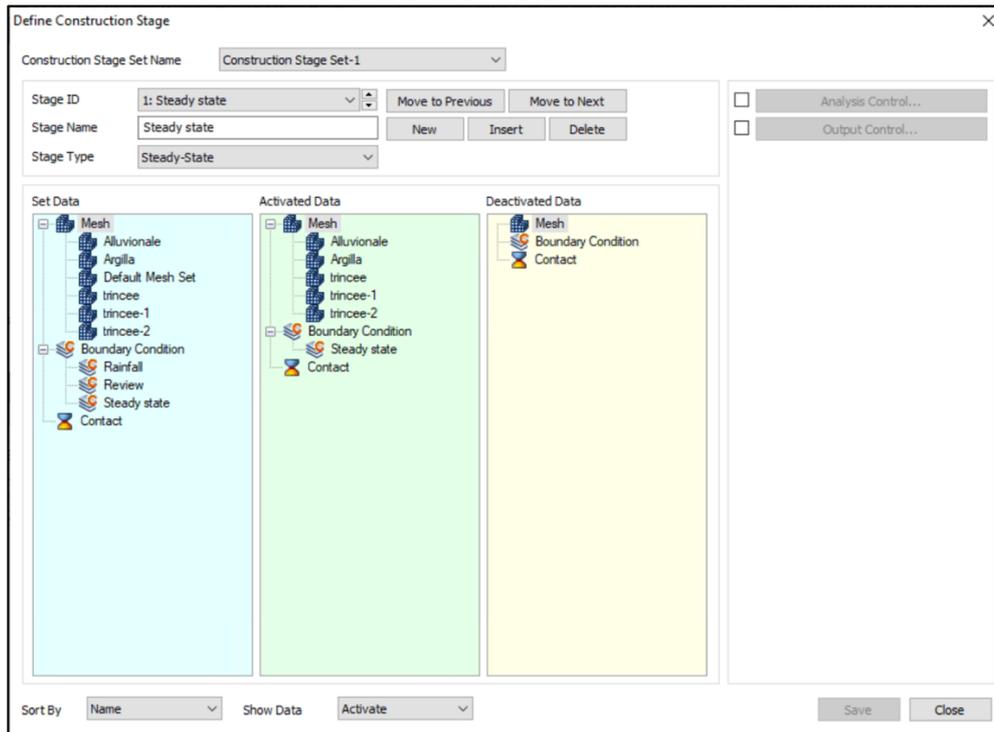


Figura 6.2.13- Definizione dello stage "Steady state".

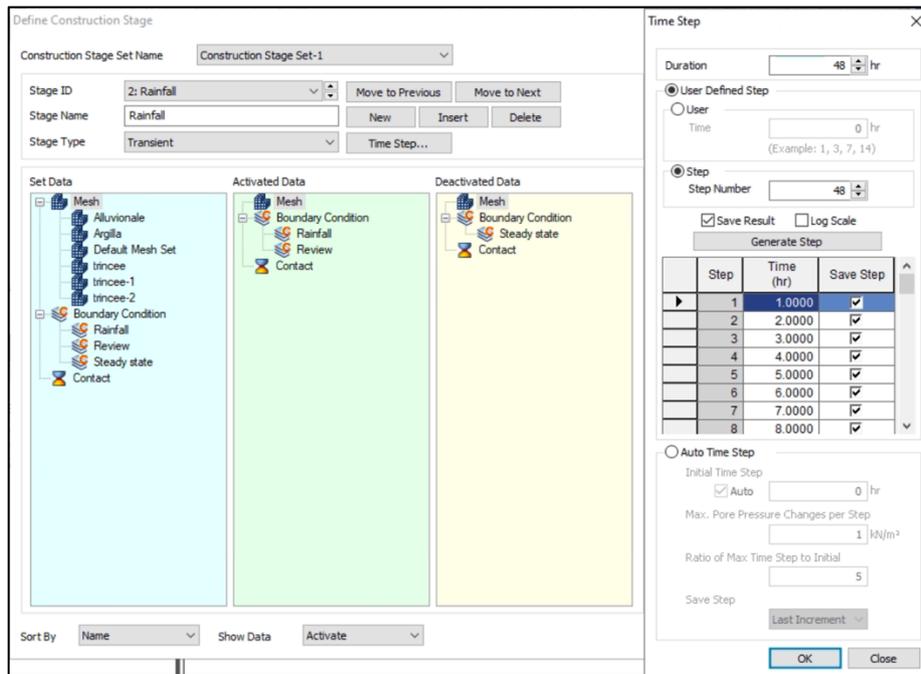


Figura 6.2.14- Definizione dello stage “Transient”.

In output all’analisi vengono forniti, per le geometrie del modello e per i differenti time step, i risultati dell’analisi del regime transitorio.

In particolare si è focalizzata l’attenzione sul grado di saturazione del sistema di mitigazione e sulla percentuale di elementi saturi. Si è quindi individuato, procedendo con time step a passo di un ora, l’istante in cui il sistema entra in crisi, ovvero quando la totalità, o quasi, del sistema di mitigazione risulta essere saturo. Raggiunto l’istante di completa saturazione si è poi esaminato il sistema per l’ultimo time step, ovvero a 48 ore, al fine di comprendere l’effettiva operatività del sistema ad un giorno dalla fine della precipitazione. Di seguito si rappresenta il sistema complessivo per i diversi time step fino alla completa, o quasi, saturazione.

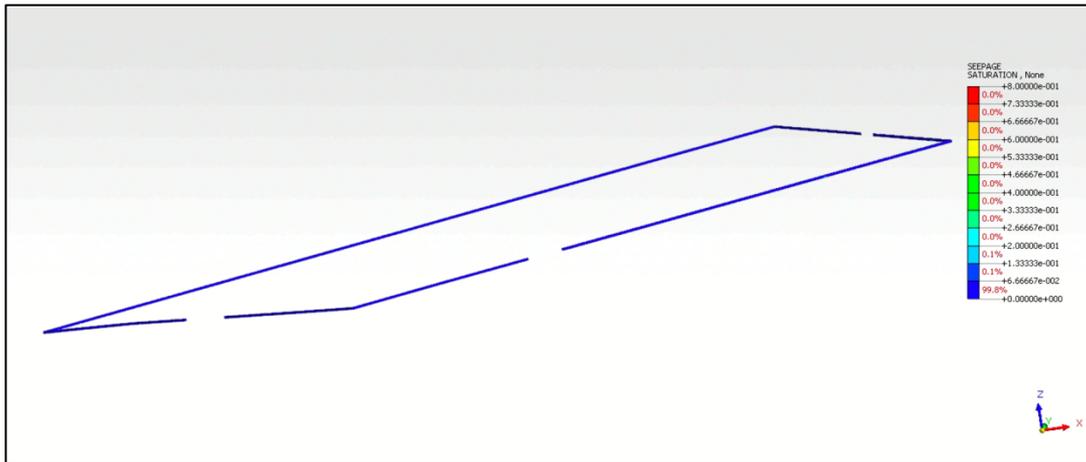


Figura 6.2.15- Grado di saturazione del sistema complessivo ad inizio precipitazione.

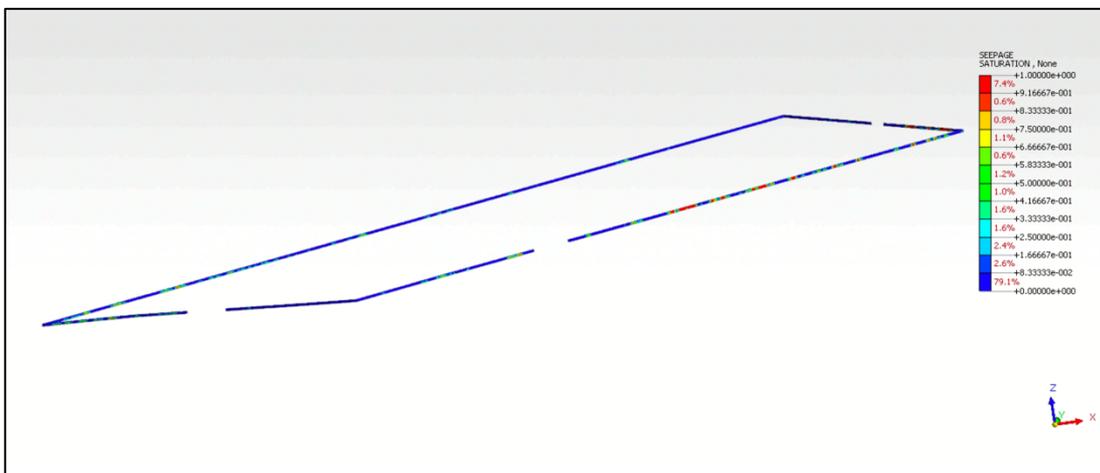


Figura 6.2.16- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 2 ore.

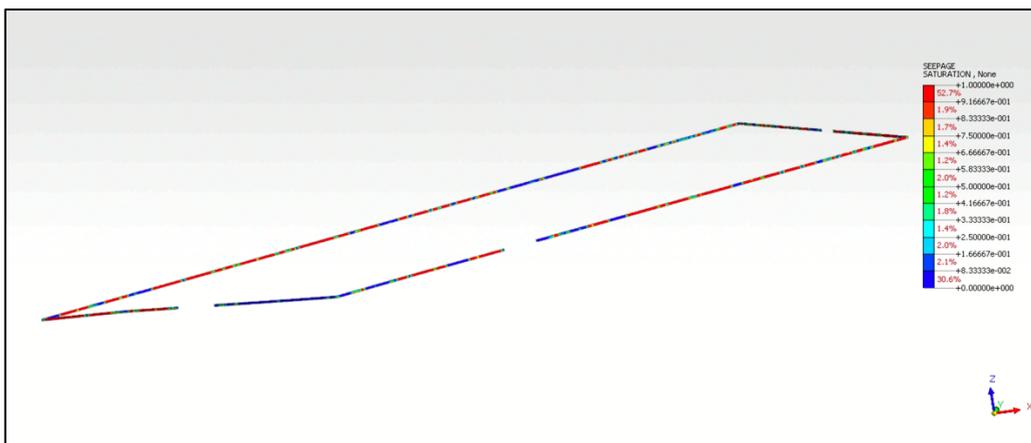


Figura 6.2.17- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 3 ore.

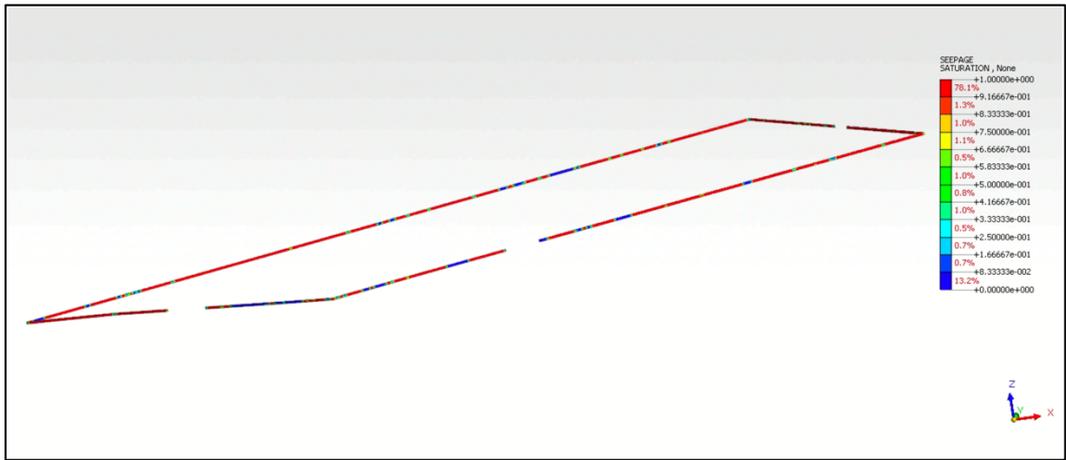


Figura 6.2.18- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 4 ore.

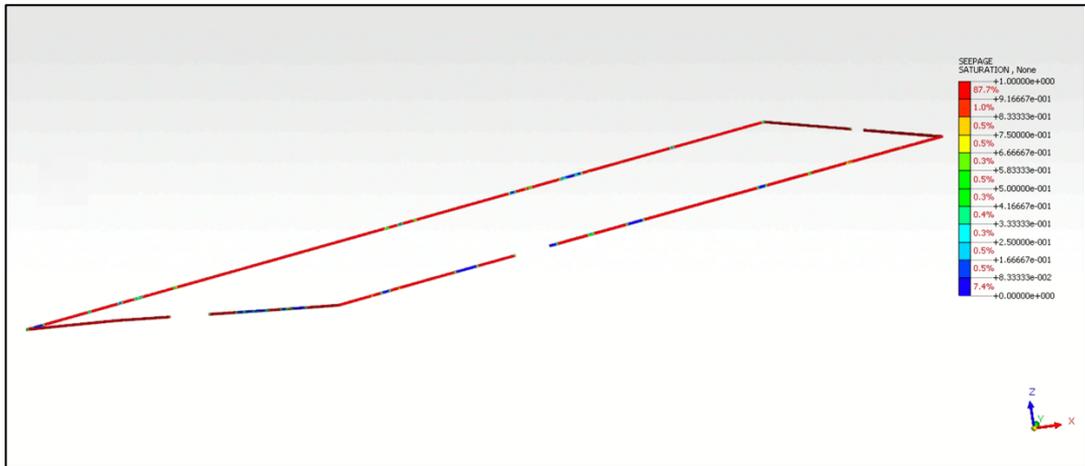


Figura 6.2.19- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 5 ore.

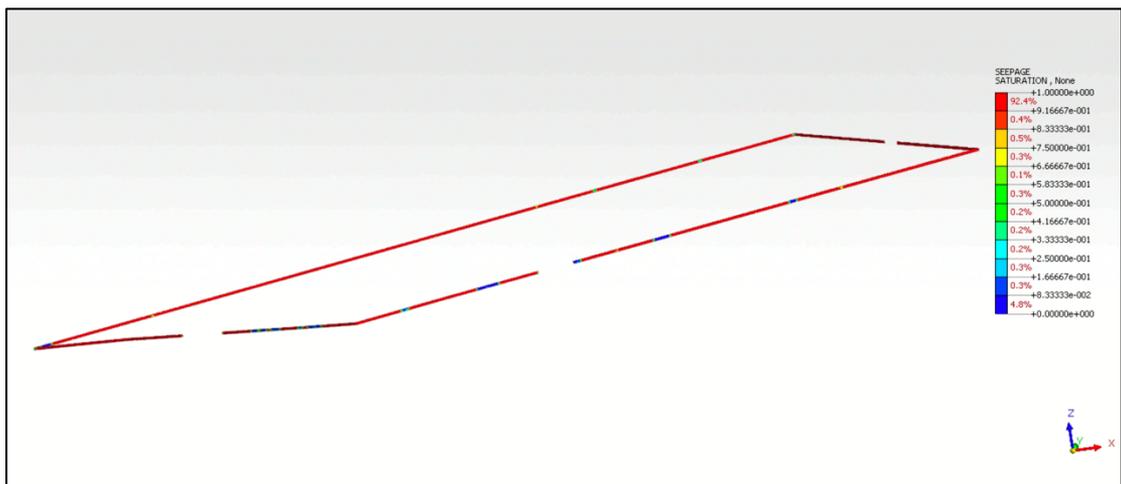


Figura 6.2.20- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 6 ore.

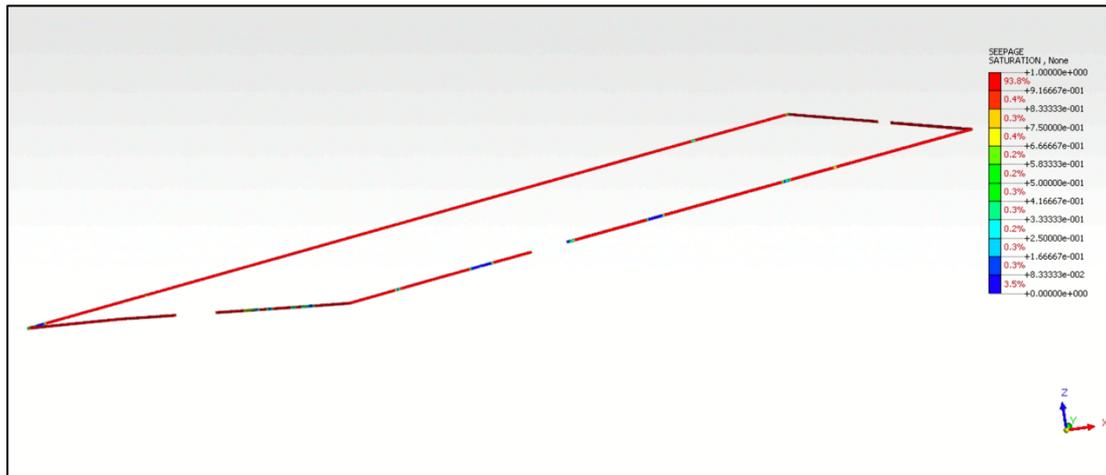


Figura 6.2.21- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 7 ore.

Il sistema al time step di 6 ore presenta una percentuale di elementi saturi del 92,4 ovvero il sistema può ritenersi completamente saturo e quindi entra in crisi prima della fine della precipitazione.

Si è inoltre analizzata una sezione del sistema a maggiore sviluppo lineare al fine di comprendere l'evoluzione del grado di saturazione all'interno dell'elemento.

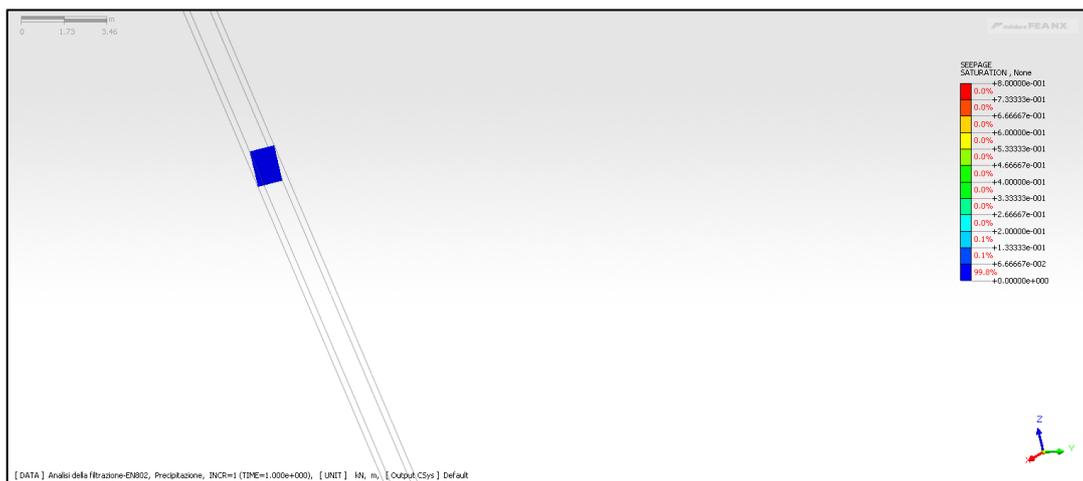


Figura 6.2.22- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 1 ora.

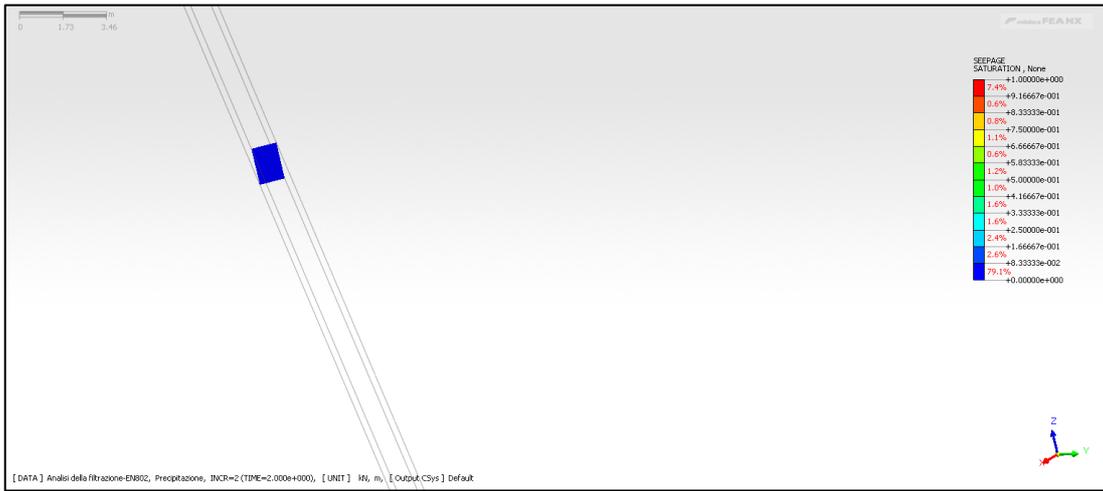


Figura 6.2.23- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 2 ore.

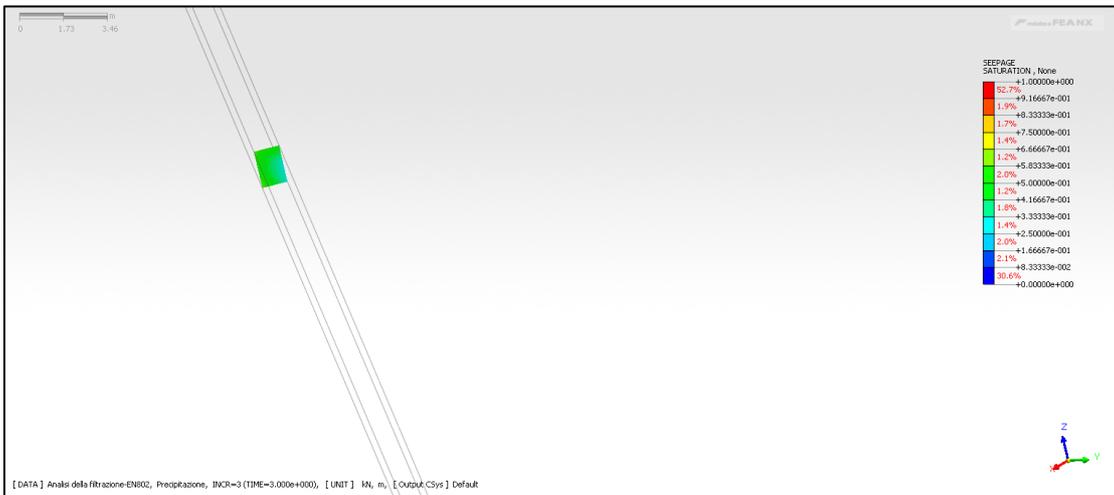


Figura 6.2.24- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 3 ore.

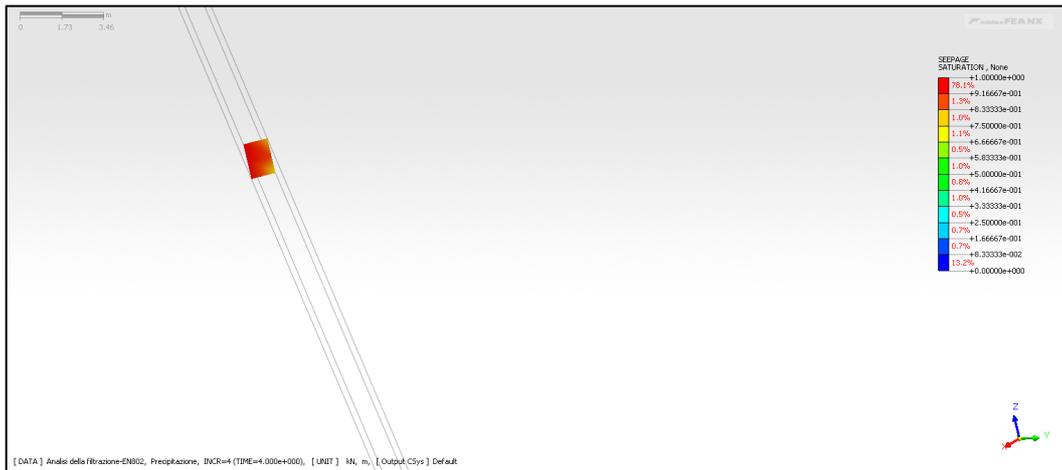


Figura 6.2.25- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 4 ore.



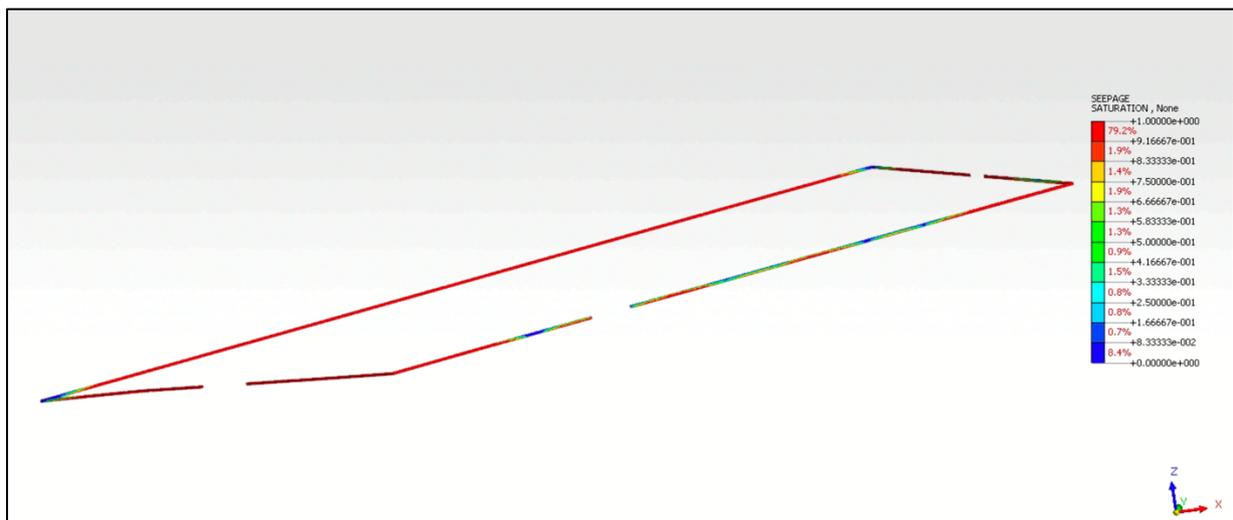
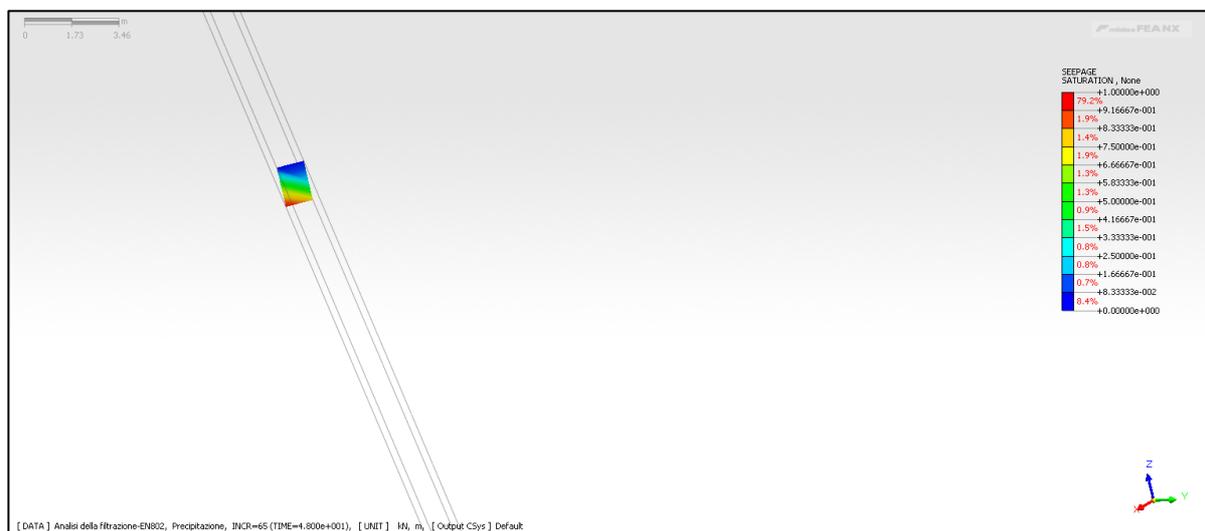


Figura 6.2.28- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 48 ore.



Figur 6.2.29- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 48 ore.

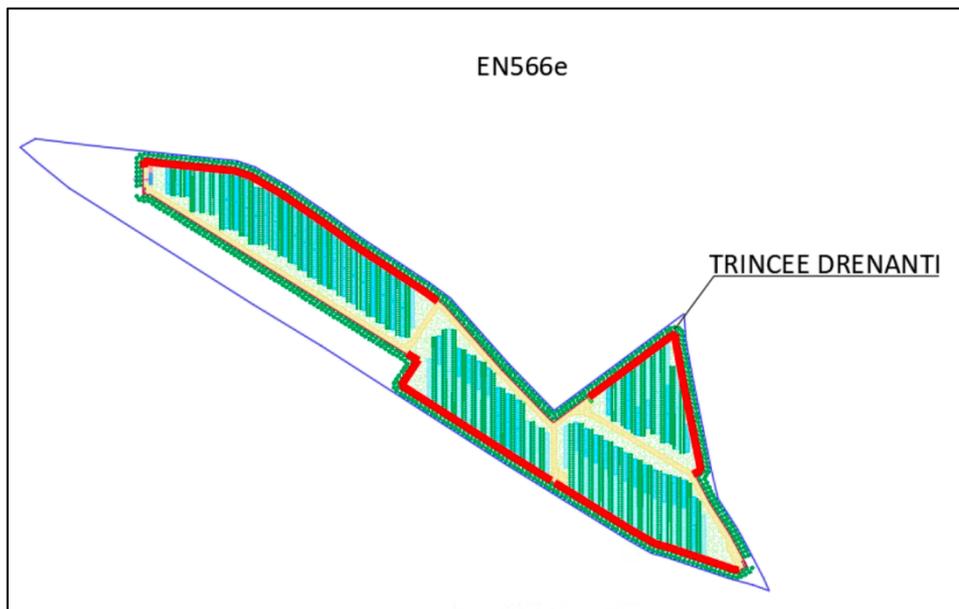
È possibile notare dalle figure 6.2.15 fino alla 6.2.20 che il sistema inizialmente è in grado di laminare i volumi in ingresso. Tuttavia al raggiungimento della 6<sup>a</sup> ora di precipitazione il sistema entra in crisi, ovvero è del tutto saturo, il ché si traduce in un aumento del tirante idrico. Questo meccanismo è legato alle condizioni e alle proprietà iniziali del terreno alluvionale che inizialmente è capace di assorbire tutta la precipitazione entrante. Quando lo strato iniziale si satura, i meccanismi di infiltrazione vengono governati dalla permeabilità degli strati sottostanti, in particolare dalla funzione di permeabilità.

Al termine della precipitazione si assiste ad un processo di drenaggio interno che sempre in funzione delle proprietà del terreno della conducibilità idraulica determina il rilascio dei

volumi infiltrati. In figura 6.2.28 è possibile osservare la percentuale di saturazione del sistema di laminazione alla 48<sup>a</sup> ora, ovvero alle 24 ore successive alla fine della precipitazione. Il sistema presenta ancora una percentuale elevata di elementi saturi, questo è legato ai processi di drenaggio interno e al volume d'acqua presente nella zona pannellabile.

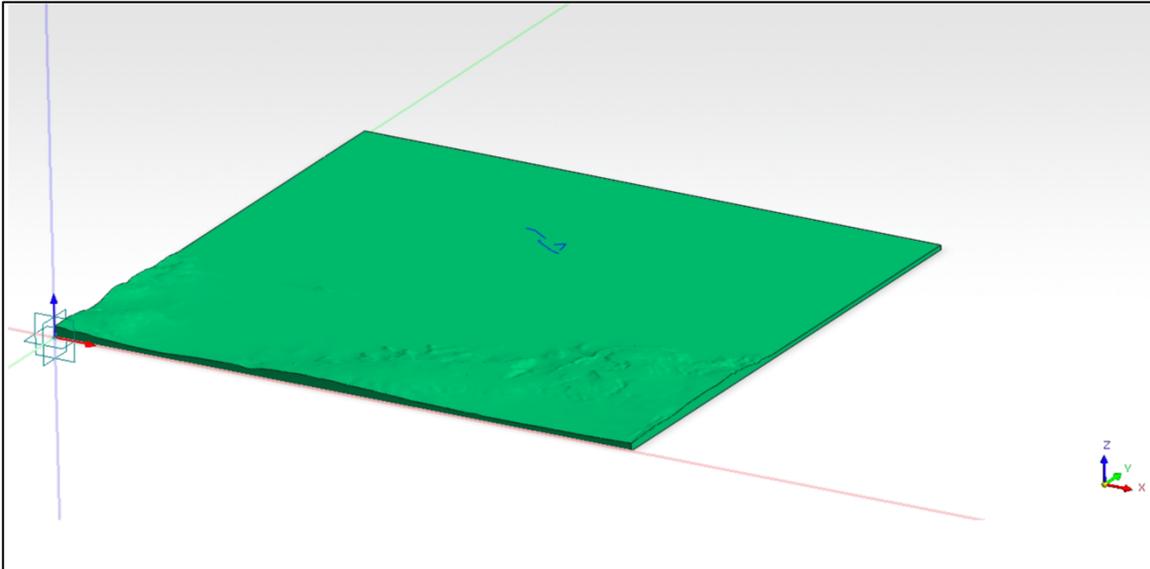
- **Sistema di mitigazione in zona EN566e**

Il sistema di mitigazione nella zona EN566e ha un'estensione di 557m. Tale sistema viene inserito perimetralmente alla zona di impianto prestando attenzione alle interferenze.



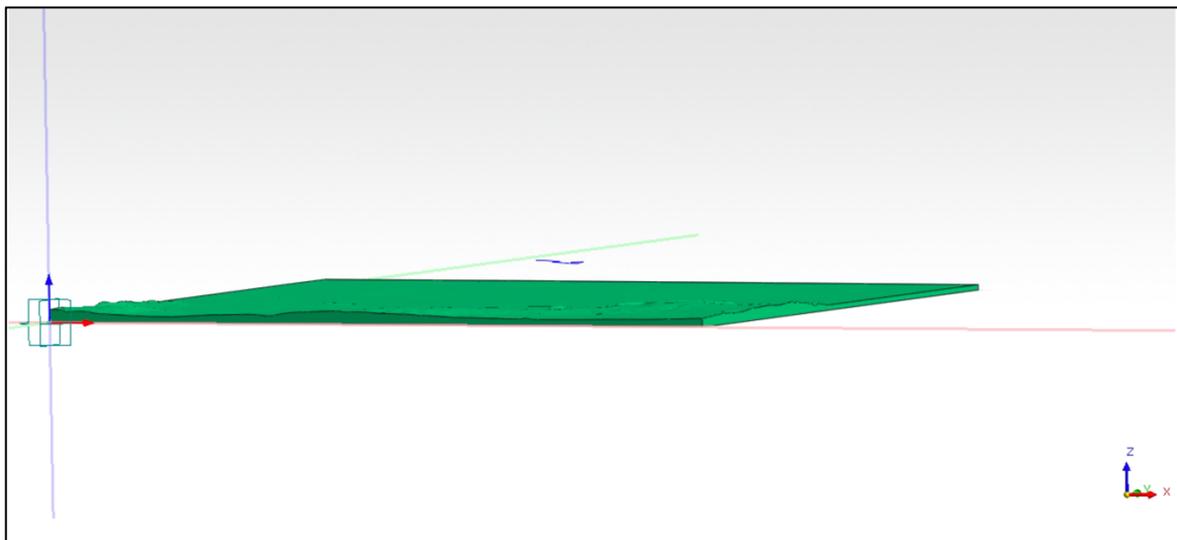
*Figura 6.2.30- Sistema di mitigazione zona EN566e.*

Al fine di localizzare correttamente le trincee drenanti sullo spazio modello del software si è proceduto come visto nella zona precedente. Nell'immagine 6.2.29 si rappresenta il sistema di mitigazione localizzato.



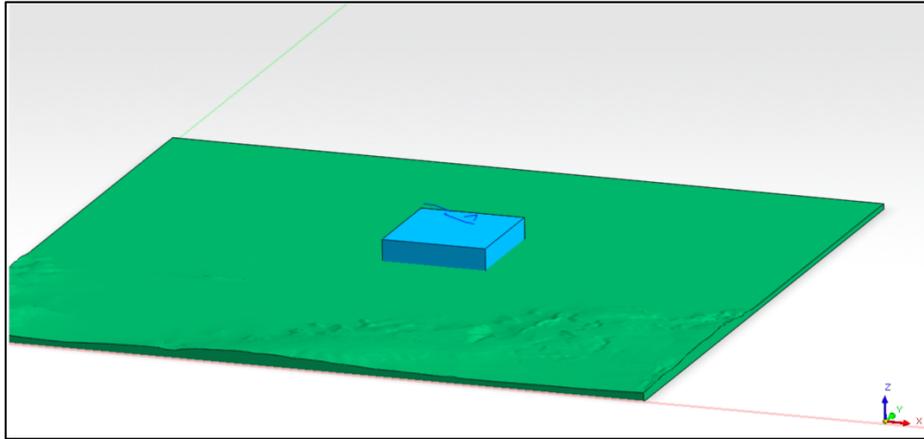
*Figura 6.2.31- Sistema di mitigazione nello spazio di modellazione.*

Tale sistema tuttavia non contiene l'informazione altimetrica, come è possibile notare nella seguente immagine.

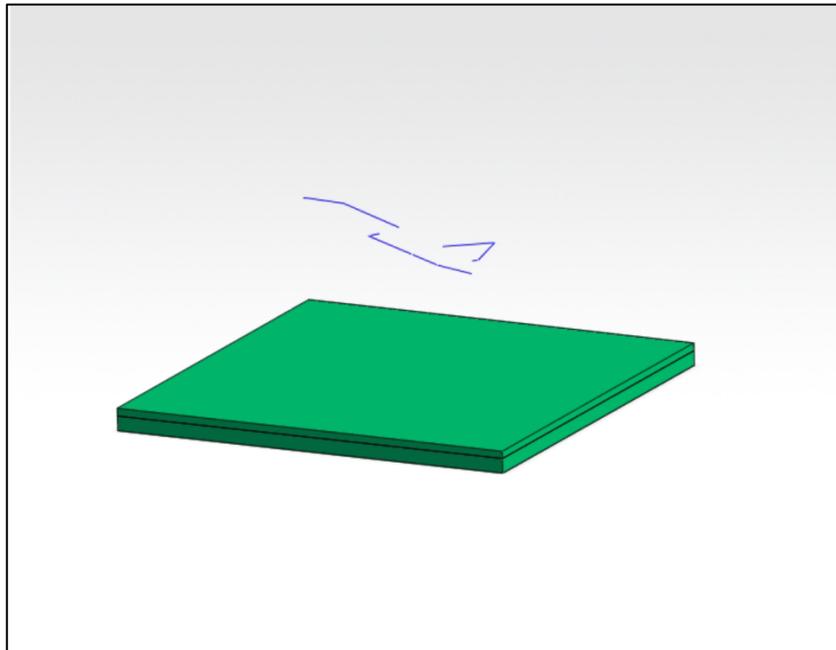


*Figura 6.2.32- Differenza di quota del sistema di mitigazione.*

Al fine di adattare il sistema di trincee alla superficie del terreno si è proceduto come visto per la zona precedente.



*Figura 6.2.33- Solido di interesse per l'analisi (in blu).*



*Figura 6.2.34- Volume di terreno rappresentate la zona di impianto.*

Si è quindi proceduto alla proiezione del sistema di mitigazione.

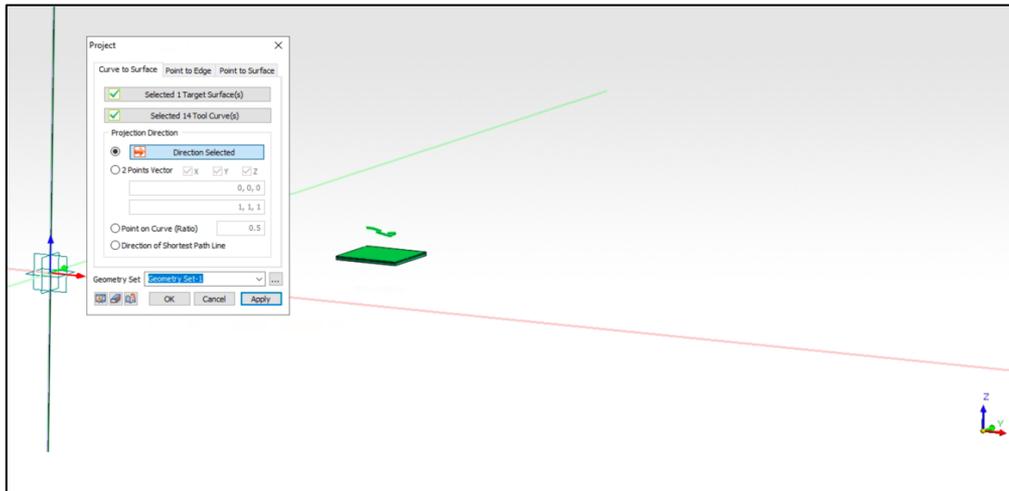


Figura 6.2.35- Comando "Project".

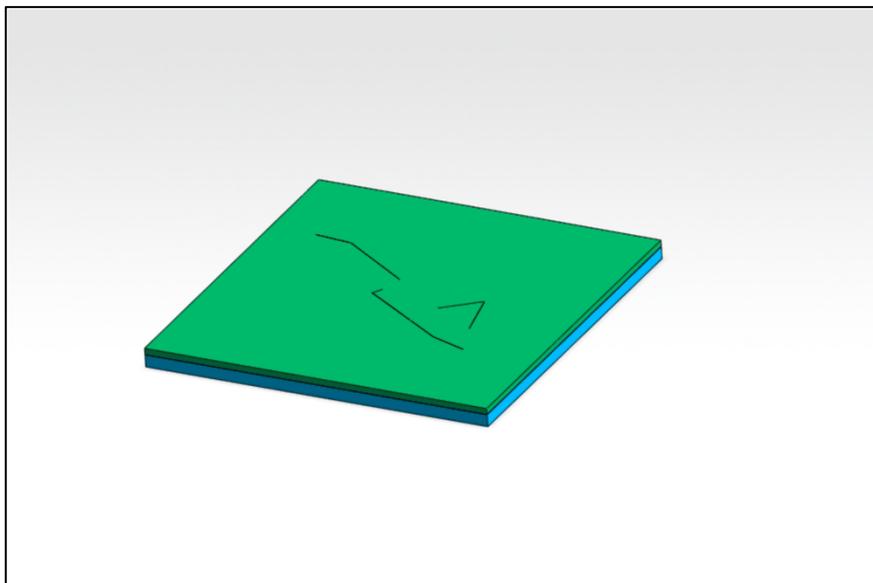


Figura 6.2.36- Proiezione del sistema di mitigazione sul volume di terreno.

Come visto per la zona precedente si è effettuata la modellazione solida del sistema di laminazione

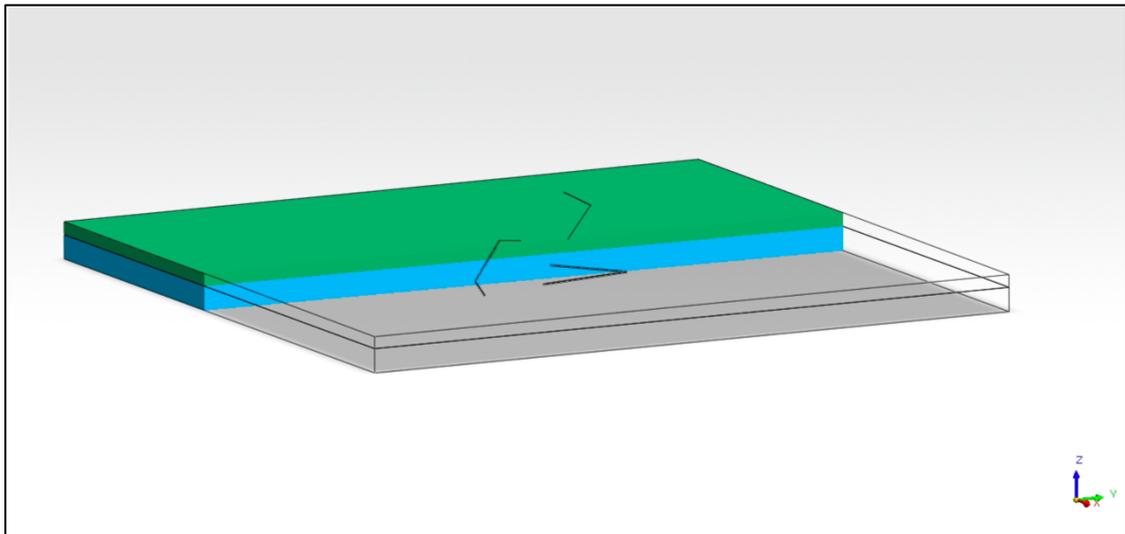


Figura 6.2.37- Visualizzazione in sezione del sistema in esame.

Le geometrie modellate risultano però disaccoppiate, ovvero non vi è alcun legame fisico tra di esse. Questo comporterebbe un problema in fase di creazione della mesh e quindi di output dell'analisi. Al fine di creare un legame tra le geometrie si è proceduto come visto per la precedente zona.

Una volta terminata la modellazione si assegnano i materiali, le condizioni al contorno e si crea la mesh.

I materiali da definire sono tre e riguardano:

- Suolo alluvionale;
- Suolo argilloso;
- Ghiaia di riempimento delle trincee.

Tabella 6.2.3- Proprietà dei terreni in esame.

Tipo di suolo	e [-]	$k_{sat}$ [m/h]	Saturo
Alluvionale	0,37	$1,98 \cdot 10^{-4}$	No
Argilla	0,30	$3,6 \cdot 10^{-6}$	Si
Ghiaia	0,40	0,36	No

Il suolo alluvionale e quello di riempimento delle trincee risultano essere asciutti, mentre il banco di argilla è saturo e la superficie piezometrica si attesta alla medesima profondità.

Le proprietà che interessa definire sono quelle che caratterizzano il moto di filtrazione nel terreno, in particolare si assegna la curva di ritenzione idrica e la funzione di permeabilità allo

strato di suolo alluvionale. Tali relazioni sono state ricavate consultando il database implementato in FEA NX che riporta le leggi rappresentative in funzione dei differenti tipi di terreno.

Tabella 6.2.4- Parametri del modello dell'insaturo inerenti al suolo alluvionale e alla ghiaia.

Tipo di suolo	$\theta_s$ [-]	$\theta_r$ [-]	$a$	$n$
Alluvionale	0,39	0,1	5,9	1,48
Ghiaia	0,43	0,045	14,5	2,68

Si è quindi imposta la condizione al contorno inerente alla posizione della falda, raffigurata in verde, in figura 6.2.36.

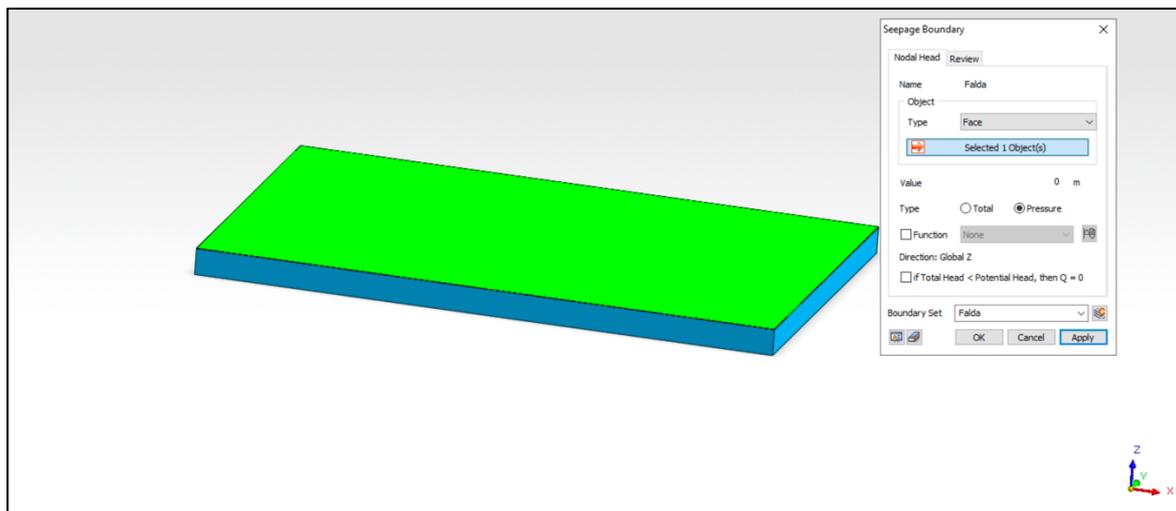


Figura 6.2.38- Imposizione del livello di falda nello strato di argilla.

In input al sistema si inserisce la precipitazione avente tempo di ritorno 50 anni al fine di simulare la condizione meteorologica che potrebbe portare in crisi il sistema di laminazione e la funzionalità dell'impianto.

L'intensità di precipitazione è stata ricavata mediante la relazione:

$$i = a * t^{n-1}$$

$$a = 49,065$$

$$n = 0,3319$$

Dove:

- a ed n sono i parametri della curva di probabilità pluviometrica.

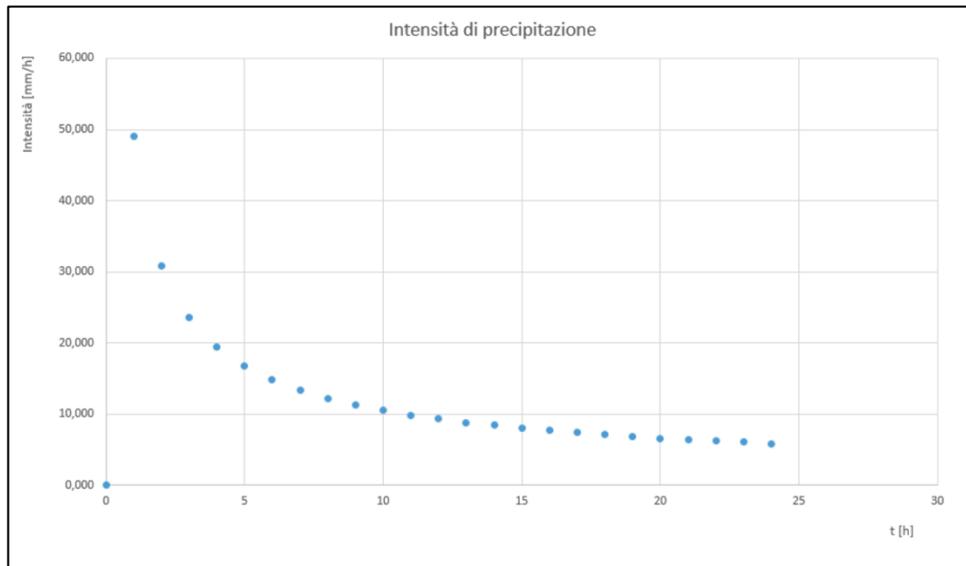


Figura 6.2.39- Intensità di precipitazione in input al sistema.

La precipitazione in ingresso al sistema è stata inserita come visto per la precedente zona.

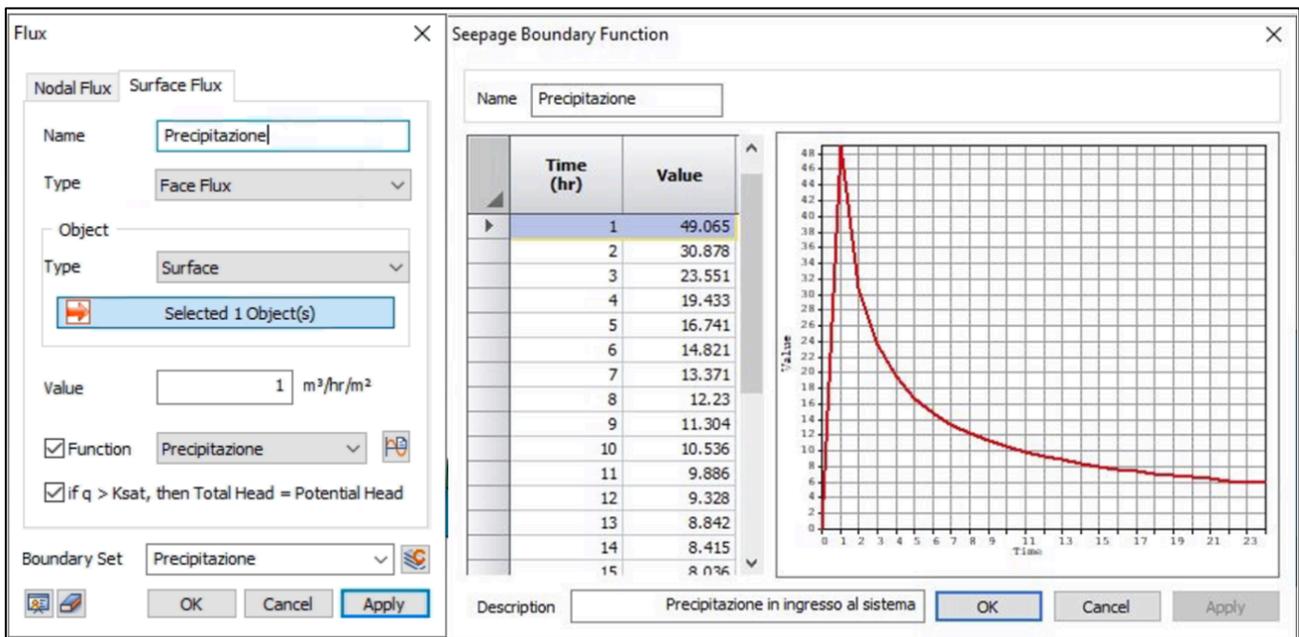
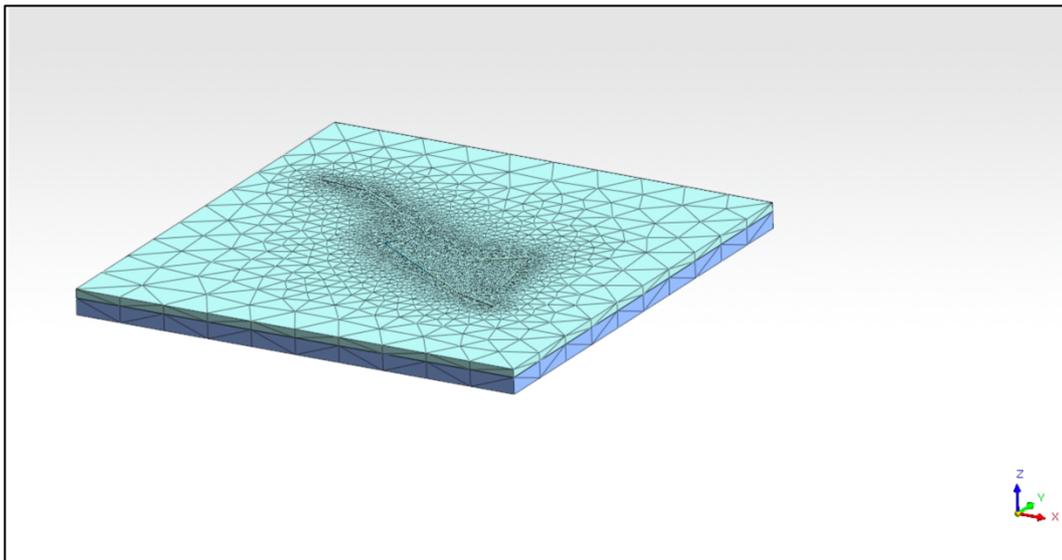


Figura 6.2.40- Imposizione della precipitazione in input.

Definite le condizioni al contorno si passa alla realizzazione della mesh utilizzando il meshatore automatico come visto nella zona precedente.



*Figura 6.2.41- Mesh del terreno e del sistema di mitigazione.*

Una volta realizzata la mesh sono stati definiti gli stage di costruzione con la medesima modalità con cui sono stati creati nella zona precedente.

L'obiettivo principale è quello di capire se il sistema di mitigazione entra in crisi durante l'evento di pioggia e entro quanto dalla fine della precipitazione si ritorna ad una condizione di operatività.

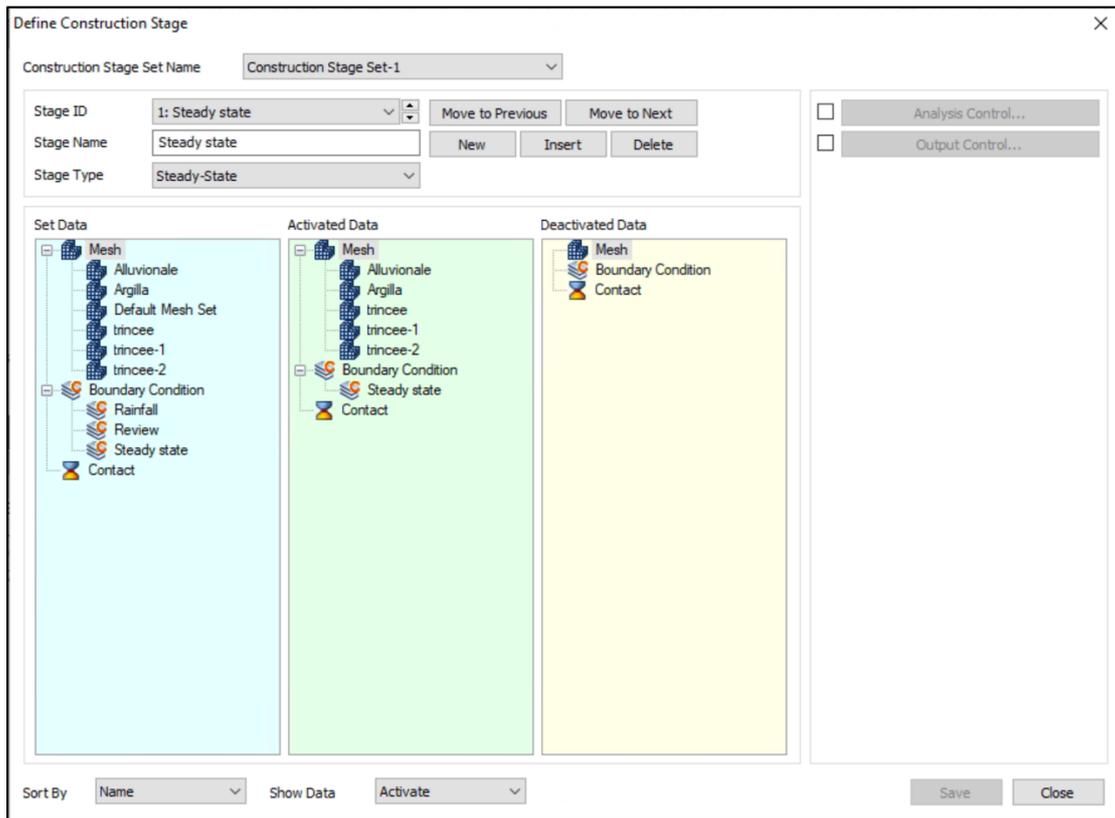


Figura 6.2.42- Definizione dello stage "Steady state".

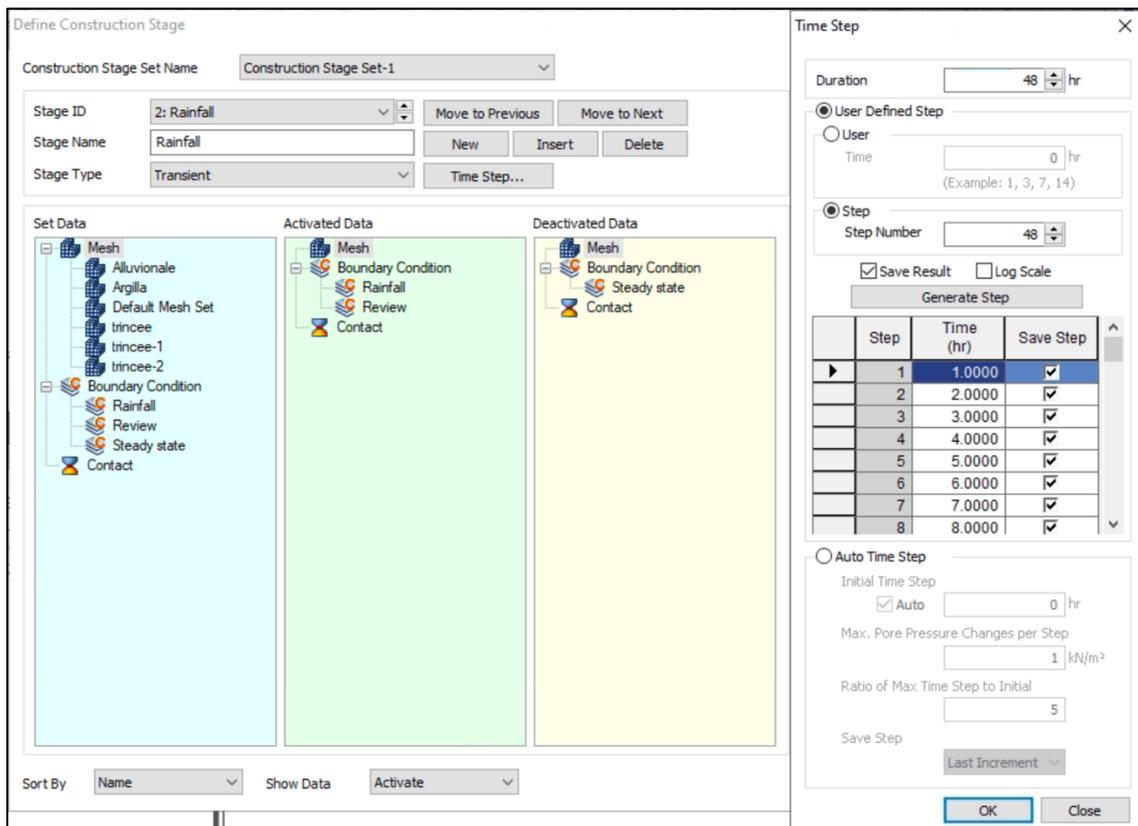


Figura 6.2.43- Definizione dello stage "Transient".

In output all'analisi vengono forniti, per le geometrie del modello e per i differenti time step, i risultati dell'analisi del regime transitorio.

In particolare si è focalizzata l'attenzione sul grado di saturazione del sistema di mitigazione e sulla percentuale di elementi saturi. Si è quindi individuato, procedendo con time step a passo di un ora, l'istante in cui il sistema entra in crisi, ovvero quando la totalità, o quasi, del sistema di mitigazione risulta essere saturo. Raggiunto l'istante di completa saturazione si è poi esaminato il sistema per l'ultimo time step, ovvero a 48 ore, al fine di comprendere l'effettiva operatività del sistema ad un giorno dalla fine della precipitazione. Di seguito si rappresenta il sistema complessivo per i diversi time step fino alla completa, o quasi, saturazione

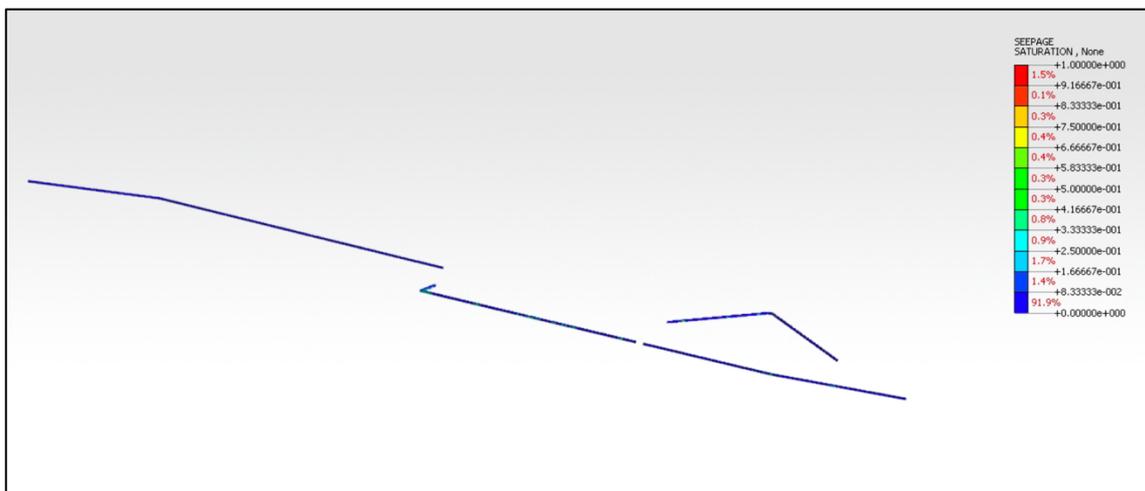


Figura 6.2.44- Grado di saturazione del sistema complessivo ad inizio precipitazione.

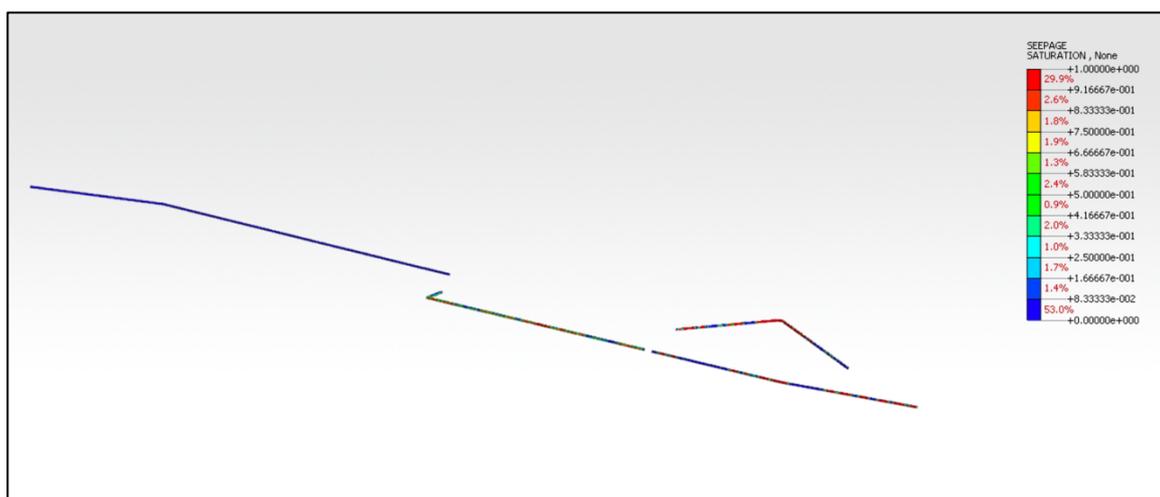


Figura 6.2.45- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 2 ore.

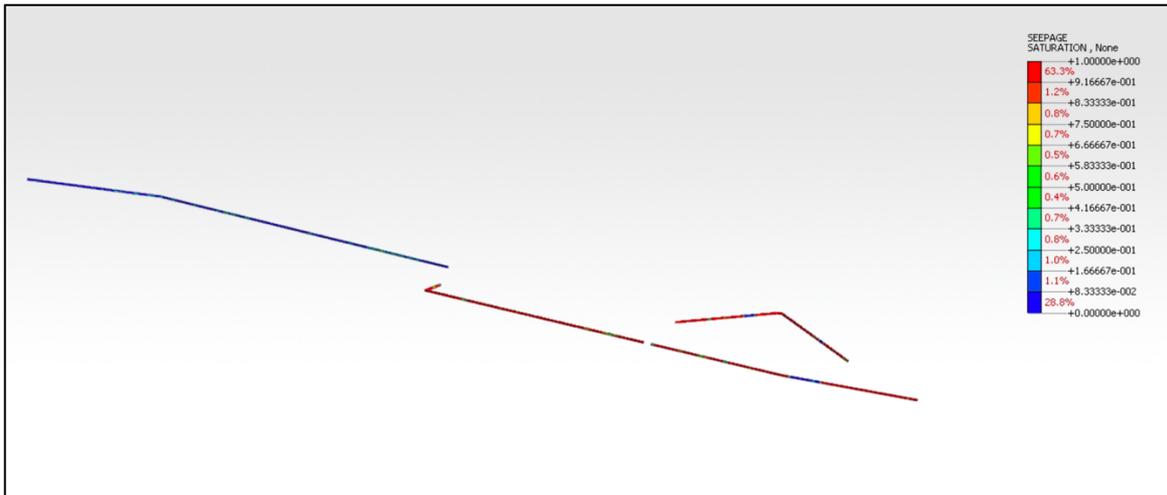


Figura 6.2.46- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 3 ore.

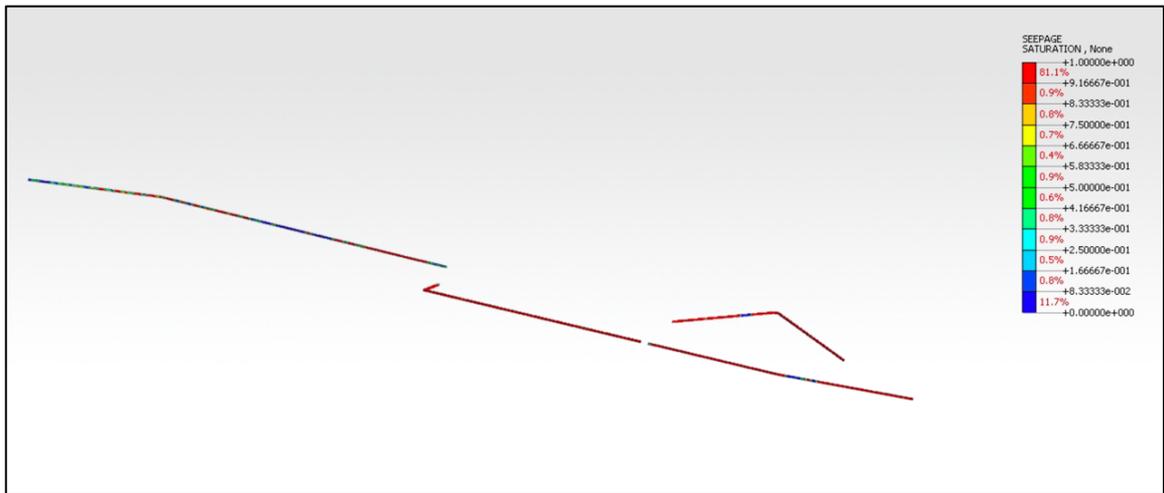


Figura 6.2.47- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 4 ore.

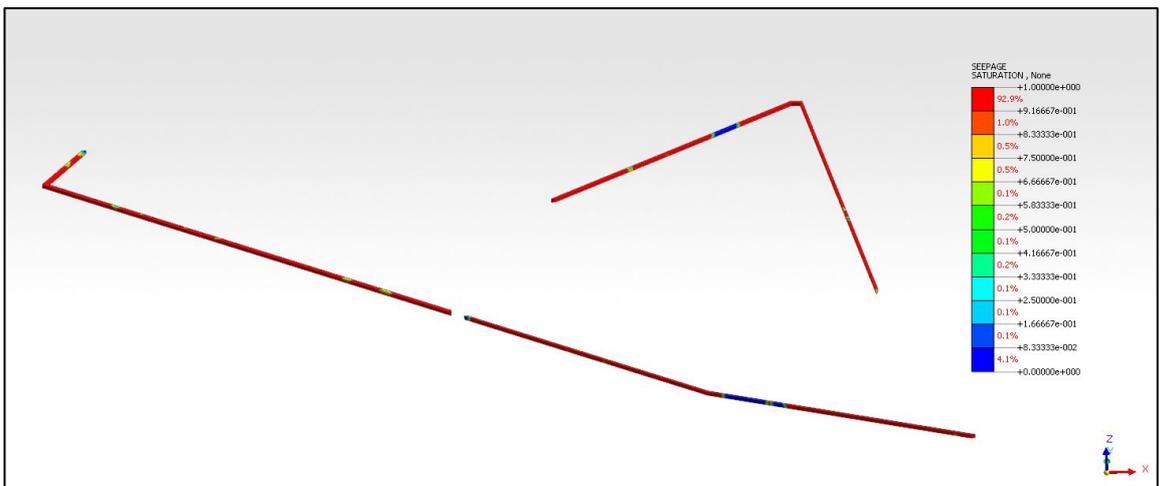


Figura 6.2.48- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 5 ore.

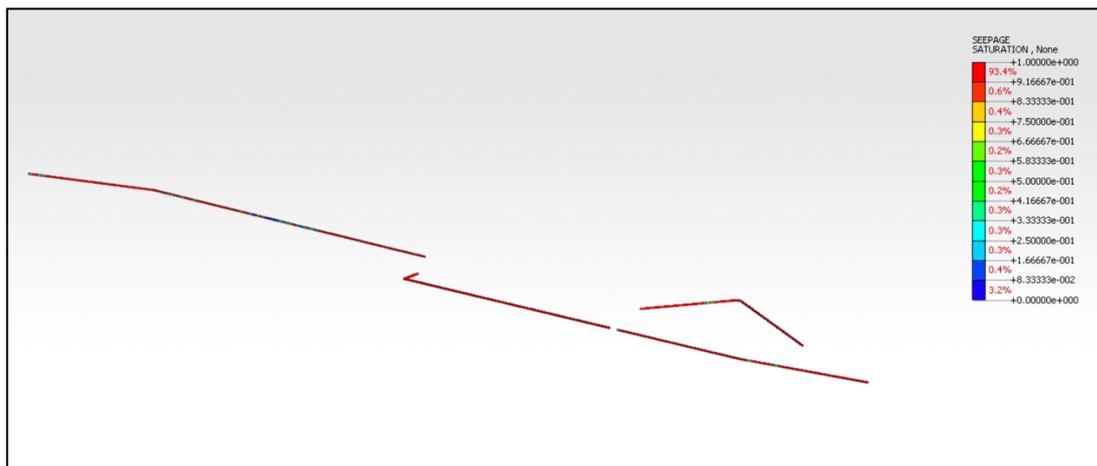


Figura 6.2.49- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 6 ore.

Il sistema al time step di 6 ore presenta una percentuale di elementi saturi del 94,8 ovvero il sistema può ritenersi completamente saturo e quindi entra in crisi prima della fine della precipitazione.

Si è inoltre analizzata una sezione del sistema a maggiore sviluppo lineare al fine di comprendere l'evoluzione del grado di saturazione all'interno dell'elemento.

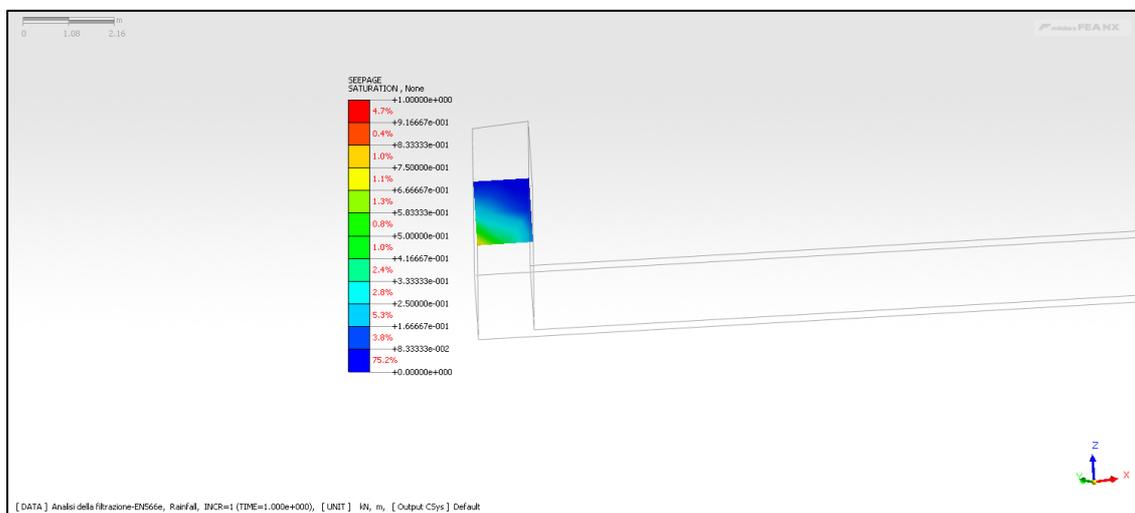


Figura 6.2.50- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 1 ora.

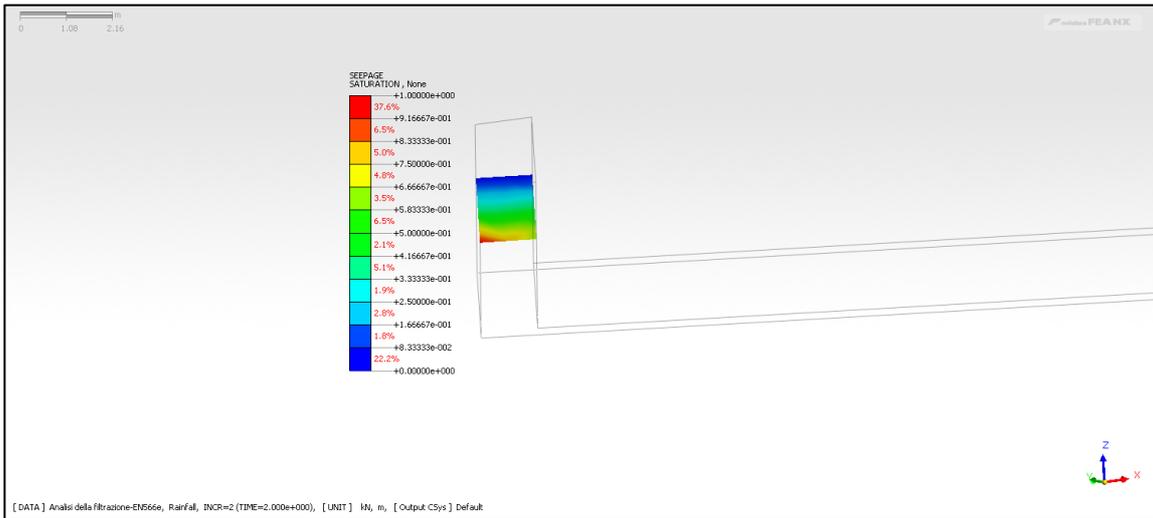


Figura 6.2.51- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 2 ore.

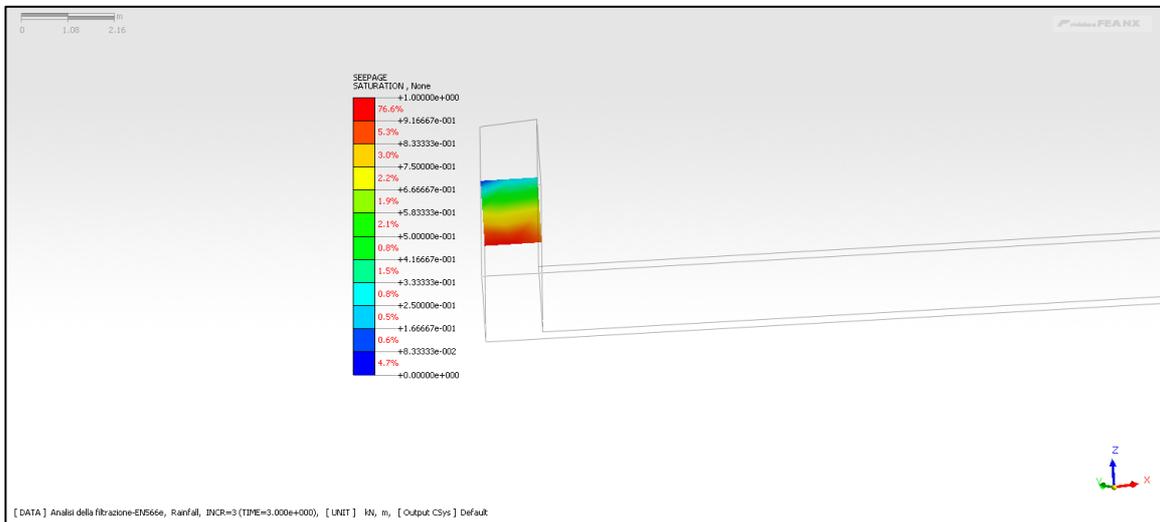


Figura 6.2.52- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 3 ore.

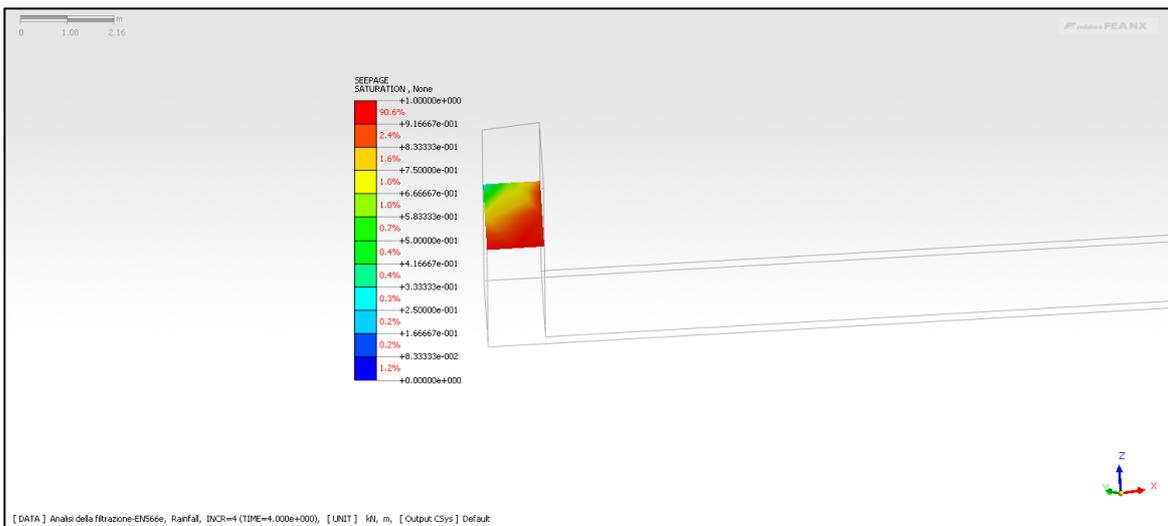


Figura 6.2.53- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 4 ore.

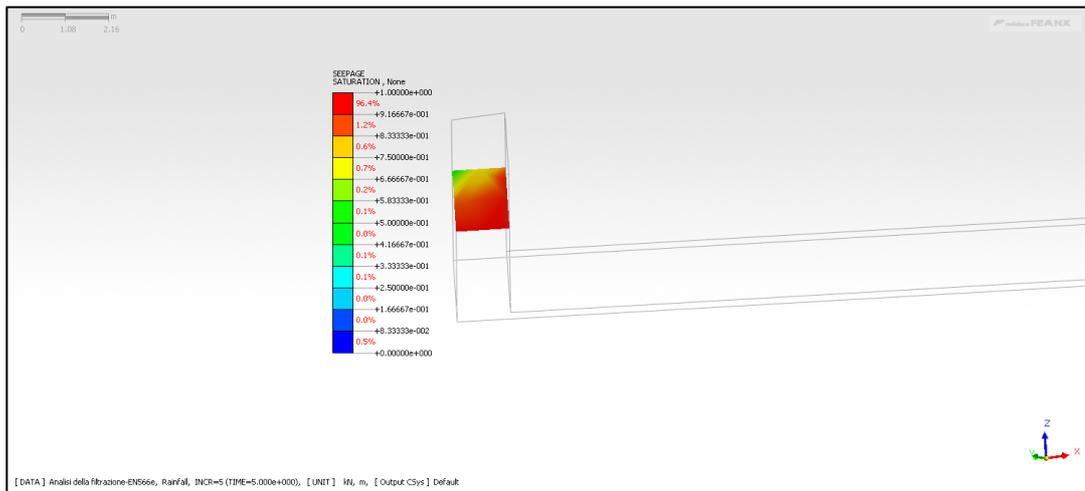


Figura 6.2.54- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 5 ore.

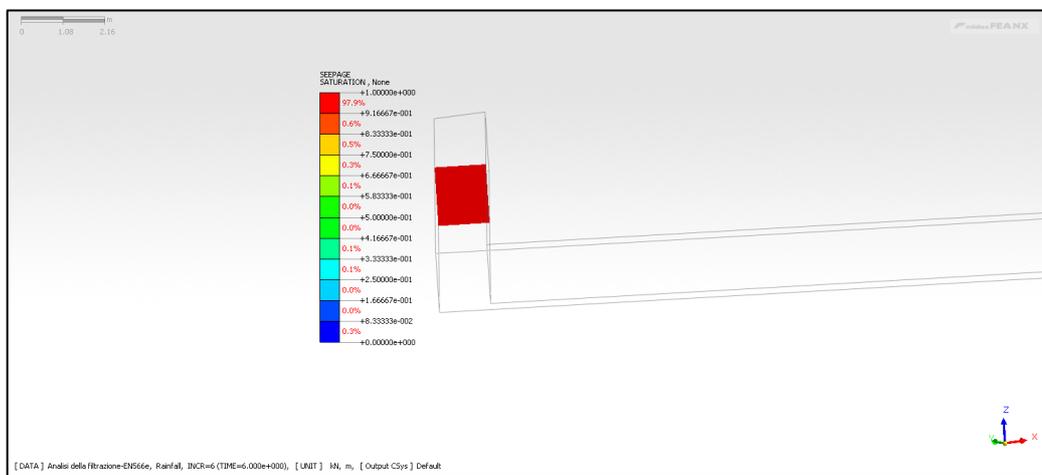


Figura 6.2.55- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 6 ore.

Infine si rappresenta il grado di saturazione del sistema complessivo e della sezione alle 48 ore.

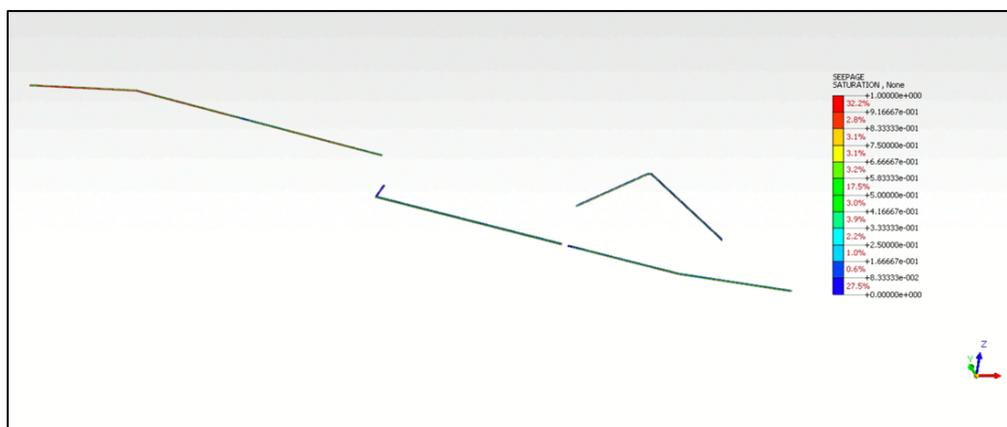


Figura 6.2.56- Grado di saturazione del sistema complessivo al time step di 48 ore.

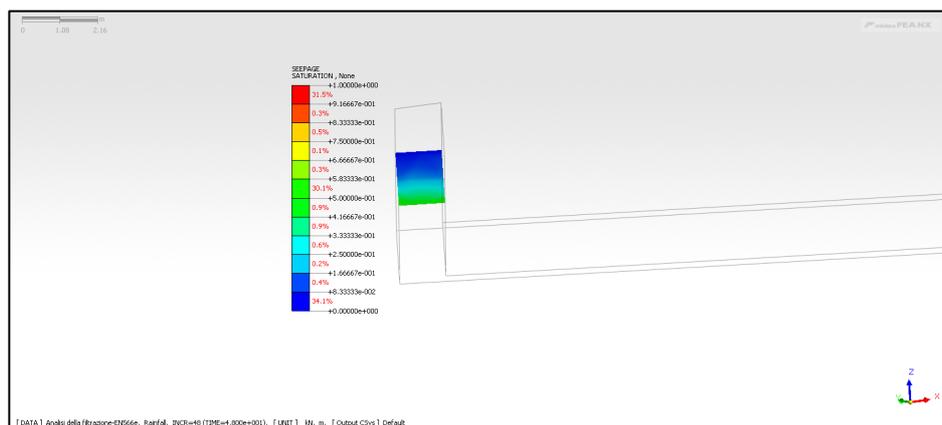


Figura 6.2.57- Andamento del grado di saturazione interno al sistema al time step di 48 ore.

È possibile notare dalle figure 6.2.44 fino alla 6.2.49 che il sistema inizialmente è in grado di laminare i volumi in ingresso. Tuttavia al raggiungimento della 6<sup>a</sup> ora di precipitazione il sistema entra in crisi, ovvero è del tutto saturo, il che si traduce in un aumento del tirante idrico. Questo meccanismo, così come visto per la precedente zona, è legato alle condizioni e alle proprietà iniziali del terreno alluvionale che inizialmente è capace di assorbire tutta la precipitazione entrante. Quando lo strato iniziale si satura, i meccanismi di infiltrazione vengono governati dalla permeabilità degli strati sottostanti, in particolare dalla funzione di permeabilità.

Al termine della precipitazione si assiste ad un processo di drenaggio interno che sempre in funzione delle proprietà del terreno della conducibilità idraulica determina il rilascio dei volumi infiltrati. In figura 6.2.56 è possibile osservare la percentuale di saturazione del sistema di laminazione alla 48<sup>a</sup> ora, ovvero alle 24 ore successive alla fine della precipitazione. Il sistema presenta ancora una percentuale rilevante di elementi saturi (32,2%), questo è legato ai processi di drenaggio interno e al volume d'acqua presente nella zona pannellabile.

## 7 CONCLUSIONI

---

Il presente elaborato di tesi riguarda la progettazione e l'analisi di un sistema di mitigazione a servizio di un campo agrovoltaiico, previsto in un'area sud-orientale della regione Sicilia. Il lavoro di tesi è stato svolto in azienda, presso la Società di Ingegneria MADA ENGINEERING di Catania, alla quale è stata affidata la progettazione dell'impianto in oggetto. Il sistema di mitigazione considerato è costituito da

In particolare, dopo aver indagato il grado di pericolosità del sito in cui tale campo deve essere installato, e seguendo le prescrizioni previste dal P.A.I., si è indagata la risposta del sistema di mitigazione. Quest'ultimo è stato progettato seguendo il D.D.G 102 del 23/06/2021, e l'analisi è stata eseguita sottoponendo tale sistema ad un'intensità di pioggia avente durata di 24 ore e tempo di ritorno pari a 50 anni. La modellazione e le analisi sono state condotte considerando la tridimensionalità e l'interazione suolo-sistema, mediante analisi numerica agli elementi finiti in campo tridimensionale, attraverso l'uso del software "FEA NX" prodotto da "Midas".

La modellazione e l'analisi riguardano due particolari aree dell'impianto, denominate EN802 e EN566e. Dall'analisi dei risultati ottenuti è possibile formulare le seguenti considerazioni:

- I sistemi di mitigazione nell'area EN802 e EN566e riescono a laminare i volumi in entrata per le prime 6 ore di precipitazione.
- Alle 6 ore successive il sistema entra in crisi e non è in grado di laminare i volumi in ingresso; questo implica un aumento del tirante idrico con conseguenze sulla funzionalità dell'impianto.
- L'area EN802 alle 24 ore successive all'evento di precipitazione presenta un sistema di mitigazione quasi completamente saturo, il 79,2% presenta una saturazione pari a 1
- L'area EN566e alle 24 ore successive all'evento di precipitazione presenta un sistema di mitigazione che in parte potrebbe laminare ulteriori volumi in ingresso in quanto solo il 32,2% ha una saturazione pari a 1.

Da tali considerazioni è possibile notare come il sistema progettato, seguendo l'approccio proposto dal D.D.G 102, è insufficiente a garantire la totale laminazione dei volumi per un evento di precipitazione con durata 24 ore e tempo di ritorno pari a 50 anni, inficiando sulla funzionalità dell'impianto. Sarà necessario progettare e proporre un potenziamento del sistema di mitigazione valutando quindi costi e benefici del nuovo sistema.

In base alle osservazioni precedenti gli sviluppi successivi al lavoro di tesi potrebbero riguardare la modellazione di un sistema ottimale di laminazione tenendo conto della variazione, durante la vita utile dell'opera, delle:

- Proprietà del terreno, quali permeabilità e contenuto d'acqua volumetrico, a seguito delle attività svolte sul terreno stesso e dei cicli di imbibizione ed essiccamento;
- Variazione della precipitazione in ingresso al sistema a seguito degli ormai comprovati cambiamenti climatici.



## RINGRAZIAMENTI

Il mio primo ringraziamento va alla Professoressa Monica Barbero che mi ha accompagnato con la sua eccezionale professionalità e umanità in questo percorso di tesi e di studio, dimostrandosi sempre disponibile a qualunque chiarimento.

Ringrazio profondamente il Dott. Ingegnere Daniele Cianciolo che mi ha concesso l'opportunità di svolgere il tirocinio e il presente lavoro di tesi in una realtà professionale come MADA ENGINEERING, sempre disponibile e pronto a fugare qualsiasi dubbio.

Grazie all' Ingegnere Adamo Calì con cui ho sviluppato il seguente lavoro di tesi costantemente presente e sempre pronto a mettere a disposizione la sua esperienza.

Ringrazio tutti i colleghi di MADA, Claudia, Giusi, Martina, Roberta, Alessandro, Antonio, Salvo e Stefano che mi hanno da subito accolto in studio, sempre pronti ad aiutarmi in qualsiasi situazione e rendendo l'ambiente di lavoro familiare.

Grazie alla mia ragazza, nonché compagna di vita, che mi ha sempre supportato e sopportato in questo percorso non esente da difficoltà. A lei devo il coraggio di intraprendere nuove avventure personali.

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori fonte di ispirazione per il mio cammino di vita e a cui devo tutto, è merito loro se ho potuto intraprendere questo percorso di studi. Grazie a mio fratello e ad Adriano sempre presenti in questi anni.

Grazie a tutti i familiari che mi hanno sempre sostenuto.

Grazie al mio amico Anthony con cui ho condiviso e condivido tutto, sempre vicino nei momenti belli e brutti.

Grazie al mio collega Daniele con cui ho legato fin da subito e che a causa del covid abbiamo condiviso più tempo in videochiamata che non in presenza.

## **BIBLIOGRAFIA**

*Barbero Monica. "Analysis and design of geotechnical structures and earthworks". Politecnico di Torino. A.A. 2020 / 2021.*

*Barla Marco. Appunti del corso: "Numerical methods in geotechnical engineering". Politecnico di Torino. A.A. 2020 / 2021.*

*Cafaro Francesco, Hoffmann Christian, Cotecchia Federica, Buscemi Alessandro, Bottiglieri Osvaldo Tarantino Alessandro, "Modellazione del comportamento idraulico di terreni parzialmente saturi a grana media e grossa", rivista italiana di geotecnica 3/2008, pagine 54, 55, 56.*

*D.D.G 102 del 23/06/2021, "Aggiornamento criteri e metodi di applicazione del principio di invarianza idraulica e idrologica."*

*Lambe T. W, Whitman R. V, "Meccanica dei terreni", Palermo, Dario Flaccovio Editore, 1997.*

*Materiale progettuale fornito da MADA ENGINEERING, confidenziale.*

*Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana, Relazione Generale, 2004.*

*Papa Raffaele, Pirone Marianna, Urciuoli Gianfranco, "Elementi di meccanica dei terreni parzialmente saturi", Hevelius editore, 2011.*