

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

Studio dell'innesco di frane rapide in un'area
campione dell'Appennino Bolognese

Candidato:
Alberto Béthaz

Relatore:
Prof. Matteo Berti

Sessione Marzo 2015
Anno Accademico 2013-2014

Sommario

Indice Figure	iii
Indice Tabelle.....	vi
<u>1. Introduzione.....</u>	<u>1</u>
1.1 Scopo del lavoro	2
1.2 Fasi del lavoro	3
1.3 Inquadramento geografico	4
<u>2. Geologia</u>	<u>6</u>
2.1 Cenni di geologia generale.....	6
2.2 Inquadramento geologico	12
2.4 Assetto strutturale/faglie	15
<u>3. Caratterizzazione geologico-tecnica.....</u>	<u>17</u>
3.1 Premessa	17
3.2 Misura dello spessore del suolo	17
3.3 Distribuzione granulometrica.....	21
3.4 Limiti Atterberg.....	25
3.4.1 Limite liquido w_l	25
3.4.2 Limite plastico w_p	26
3.4.3 Indici di consistenza.....	27
3.5 Classificazione del terreno.....	27
3.6 Parametri idrologici e caratteristiche idrologiche.....	33
<u>4. Analisi deterministica della suscettività da frana</u>	<u>39</u>
4.1 Introduzione.....	39
4.2 Metodi per la previsione dello spessore del suolo.....	40
4.2.1 GIST model.....	40
4.2.2 Modelli topografici.....	41
4.2.2.a Z Model.....	41
4.2.2.b S Model.....	42
4.2.2.c Sexp Model	43
4.2.3 Confronto con i valori misurati	44

4.3 Modelli per la previsione di frane superficiali.....	50
4.3.1 TRIGRS 2.0 (Baum et al., 2008).....	50
4.3.3 Dati di input in TRIGRS 2.0.....	54
4.3.2 Evento meteo innescante	59
4.3.4 Risultati.....	59
<u>5. Conclusioni.....</u>	<u>65</u>
<u>Ringraziamenti.....</u>	<u>67</u>
<u>Bibliografia.....</u>	<u>68</u>
<u>Allegati.....</u>	<u>72</u>
Capitolo 3 – Analisi granulometrica P20	73
Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P20.....	74
Capitolo 3 – Analisi granulometrica P25	75
Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P25.....	76
Capitolo 3 – Analisi granulometrica P30	77
Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P30.....	78
Capitolo 3 – Analisi granulometrica P35	79
Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P35.....	80
Capitolo 4 – Z Model – Calcolo di h_i	81
Capitolo 4 – S Model – Calcolo di h_i	83
Capitolo 4 – Sexp Model – Calcolo di h_i	85

Indice Figure

Figura 1 Frana di Ca' Gardella (1 ^a dicembre 2008) – Fonte STB.....	1
Figura 2 Il canale dove si verificò la prima colata detritica.....	2
Figura 3 Inquadramento geografico – Porretta Terme (Bo) – da Google Earth	4
Figura 4 Schema geologico semplificato dell'Appennino settentrionale nel quale vengono indicati i principali protagonisti della struttura geologica del territorio emiliano-romagnolo.....	6
Figura 5 Schema concettuale della progressione verso NE dell'alloctono Ligure e sub-ligure sulle successioni di avanfossa dei differenti domini dell'Appennino Settentrionale esterno.....	8
Figura 6 Schema di sovrapposizione delle unità tettoniche che costituiscono l'Appennino Settentrionale (Elter P., 2000).....	10
Figura 7 Schema evolutivo dell'Appennino Settentrionale (tesi di laurea di Caprara A. e Sciascia F., 2009).....	11
Figura 8 Classificazione litotecnica schematica della Regione Emilia Romagna	12
Figura 9 Geologia dell'area di studio vicino a Porretta Terme (Fonte Regione Emilia Romagna)	13
Figura 10 Geologia schematica dell'area di studio vicino a Porretta Terme – Rilievi sul campo	14
Figura 11 Schema di inquadramento regionale (Ingrandimento da sito internet dell'ISPRA).....	15
Figura 12 Schema tettonico (Ingrandimento da sito internet dell'ISPRA).....	16
Figura 13 Fase di campionamento sul terreno	17
Figura 14 Ubicazione dei punti di misura dello spessore della coltre.....	18
Figura 15 Kriging ordinario ottenuto dalle interpolazioni con i dati di profondità (scala valori in cm).....	19
Figura 16 Ortofoto con sovrapposizione del DEM	19
Figura 17 Sezione schematica tipo del versante	20
Figura 18 I campioni setacciati prima dell'inserimento in forno e i campioni (passante +200) all'uscita dal forno.....	21
Figura 19 Fase di setacciatura umida di un campione.....	22

Figura 20 Curve granulometriche dei materiali – Limo sabbioso.....	23
Figura 21 Curve granulometriche dei materiali – Limo sabbioso.....	24
Figura 22 Curve granulometriche dei materiali – Ghiaia con sabbia.....	24
Figura 23 Limiti di Atterberg.....	25
Figura 24 Il cucchiaino per la misurazione del limite liquido w_l	25
Figura 25 Esempio di determinazione del limite liquido w_l	26
Figura 26 Esempio di bastoncini usati per la determinazione del limite plastico w_p	26
Figura 27 Carta di plasticità di Casagrande	29
Figura 28 Sistema di classificazione HBR	31
Figura 29 Carta di plasticità di Casagrande – Campione P20 (rosso), campione P25 (azzurro), campione P30 (verde), campione P35 (giallo).....	32
Figura 30 Curva caratteristica per la sabbia limosa	34
Figura 31 Curva caratteristica per il limo sabbioso.....	34
Figura 32 Curva caratteristica per il limo argilloso e per l'argilla limosa.....	35
Figura 33 Grafico per ottenere i parametri caratterizzanti l'insaturo.....	35
Figura 34 Correlazione tra coefficiente di conducibilità idraulica e suzione per la sabbia limosa	36
Figura 35 Correlazione tra coefficiente di conducibilità idraulica e suzione per il limo sabbioso	37
Figura 36 Correlazione tra coefficiente di conducibilità idraulica e suzione per il limo argilloso e per l'argilla limosa.....	37
Figura 37 Z Model e S Model – Saulnier et al. [1997].....	42
Figura 38 Sexp Model – De Rose [1996], Salciarini et al. [2006].....	43
Figura 39 Z Model – Rapporto tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati.....	44
Figura 40 Z Model – Differenza tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati.....	44
Figura 41 S Model – Rapporto tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati.....	45
Figura 42 S Model – Differenza tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati.....	45
Figura 43 Sexp Model – Rapporto tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati	46

Figura 44 Sexp Model – Differenza tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati	46
Figura 45 Z Model – Distribuzione di frequenza dei residui, calcolati come differenze tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati	47
Figura 46 S Model – Distribuzione di frequenza dei residui, calcolati come differenze tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati	47
Figura 47 Sexp Model – Distribuzione di frequenza dei residui, calcolati come differenze tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati	48
Figura 48 Confronto tra i diversi spessori del suolo, calcolati tramite Kriging ordinario.....	49
Figura 49 Dominio di calcolo di TRIGRS 2.0.....	50
Figura 50 In verde è evidenziata la zona 1, mentre in viola la zona 2	56
Figura 51 Griglia di input per TRIGRS 2.0 - DEM	57
Figura 52 Griglia di input per TRIGRS 2.0 – Flow direction.....	57
Figura 53 Griglia di input per TRIGRS 2.0 - Slope	58
Figura 54 Griglia di input per TRIGRS 2.0 – Kriging con misure in situ (a sinistra) e Kriging con valori calcolati con Z Model (a destra) – In nero sono evidenziati gli affioramenti in roccia	58
Figura 55 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 1)...	60
Figura 56 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 176400).....	61
Figura 57 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 349200).....	62
Figura 58 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 349200) per i modelli Z Model, S Model, Sexp Model	63
Figura 59 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 1) con angolo di attrito ϕ' variante tra 30° e 28°	64

Indice Tabelle

Tabella 1 Misure dello spessore (cm) della coltre rilevata durante l'attività di campagna	18
Tabella 2 Setacci impiegati per l'analisi granulometrica	22
Tabella 3 Coefficienti di uniformità dei diversi campioni.....	22
Tabella 4 Limiti liquidi dei campioni di terreno	26
Tabella 5 Limiti plastici dei campioni di terreno	26
Tabella 6 Indice di plasticità dei campioni di terreno	27
Tabella 7 Legenda per l'indice di plasticità PI	27
Tabella 8 Alcuni sistemi di classificazione basati sulla granulometria.....	28
Tabella 9 Classificazione dei terreni	32
Tabella 10 Tabella riassuntiva dei coefficienti θ_s , θ_r , A_e e K_s	38
Tabella 11 Tabella riassuntiva dei coefficienti Φ' E c'	38
Tabella 12 TRIGRS 2.0 - Esempio di tabulato utilizzato.....	55
Tabella 13 Parametri geotecnici e idrologici per le due zone.....	56
Tabella 14 Z Model – Calcolo di h_i	82
Tabella 15 S Model – Calcolo di h_i	84
Tabella 16 Sexp Model – Calcolo di h_i	86

1. Introduzione

Dopo essermi laureato in ingegneria civile al Politecnico di Torino, specializzandomi in geotecnica e geomeccanica, ho sentito il bisogno di completare il mio percorso di studi proseguendo la mia preparazione nel campo delle scienze geologiche, curando in particolar modo gli aspetti legati alla geologia applicata e all'analisi di rischio.

A mio parere la geologia deve essere una base imprescindibile per tutte le applicazioni ingegneristiche a livello strutturale ed idraulico; una corretta interpretazione ed analisi dei dati geologici di partenza possono infatti garantire alle opere di difesa una maggiore durata oltre che contribuire in modo più efficace alla salvaguardia di vite umane.

È per queste ragioni che il mio lavoro di tesi magistrale vuole essere un'applicazione pratica di come con una corretta analisi ed interpretazione dell'assetto del territorio e delle sue caratteristiche si possano ridurre i rischi naturali identificando le aree potenzialmente pericolose ed evitandone l'urbanizzazione.



Figura 1 Frana di Ca' Gardella (1^ dicembre 2008) – Fonte STB

1.1 Scopo del lavoro

Il mio lavoro di tesi ha preso spunto da un fenomeno franoso avvenuto a Porretta Terme (provincia di Bologna), nell'autunno 2008, a causa di abbondanti precipitazioni, in tale occasione si innescò una colata rapida di detriti che invase la strada statale n. 64 e lambì la ferrovia che collega l'Emilia Romagna e la Toscana. I detriti colpirono anche un'abitazione, senza per fortuna causare perdite umane né danni ingenti, ma l'evento riscosse numerose attenzioni da parte della popolazione locale, preoccupata che fenomeni del genere potessero ripetersi anche in altre zone e senza alcun preavviso.

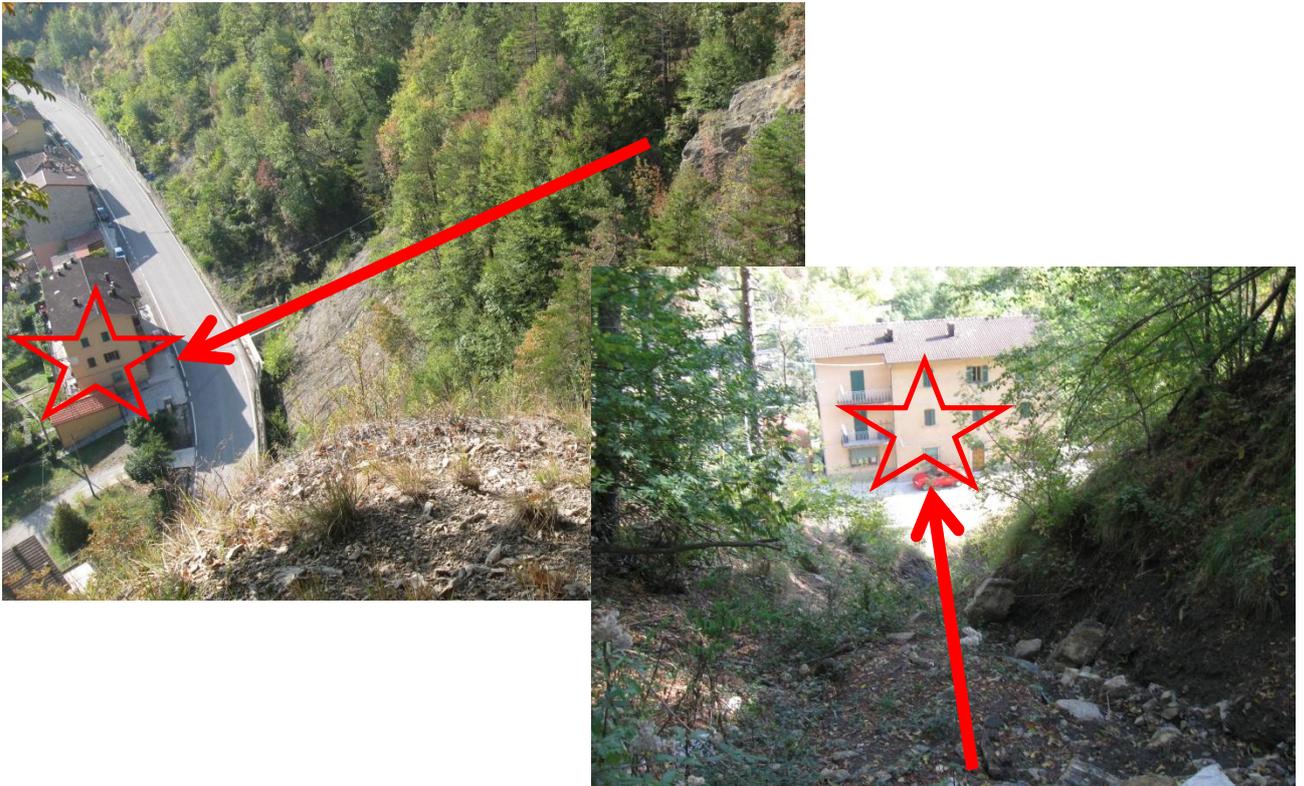


Figura 2 Il canale dove si verificò la prima colata detritica

L'evento allentò anche la Protezione Civile regionale che da subito si interessò all'applicazione di metodi in grado di prevedere la suscettività areale da frane di questo tipo. Metodi previsionali per colate rapide sono stati sviluppati negli ultimi anni in diverse università sia in Europa sia negli Stati Uniti d'America. Lo scopo è quello di prevedere le possibili zone di innesco e individuare le soglie di precipitazione critica in modo da realizzare carte di suscettività a scopo di pianificazione territoriale e mitigazione del rischio.

1.2 Fasi del lavoro

Il lavoro è durato diversi mesi, passando attraverso diverse fasi.

In primis si è proceduto a sopralluoghi di campo al fine di inquadrare l'area oggetto di studio dal punto di vista geologico e geomorfologico. L'area è facilmente raggiungibile in auto tramite la strada provinciale, mentre vi è una strada comunale che permette di risalire sulla parte sommitale.

Successivamente è stata svolta una fase di campionamento sul terreno; tramite una trivella manuale sono stati effettuati numerosi carotaggi (circa 60) sparsi sull'intero versante oggetto di studio, al fine di ricavare un dato relativo allo spessore del suolo. Attraverso un GPS, sono state registrate le coordinate geografiche di ogni punto dove sono stati effettuati i carotaggi. Inoltre sono stati raccolti dei campioni di terreno, analizzati successivamente in laboratorio al fine di ricavarne le curve granulometriche e alcuni dati caratterizzanti.

Terminata la fase sul terreno, si è provveduto ad effettuare le prove di laboratorio (curve granulometriche, limiti di Atterberg, etc). Questi dati rivestono infatti un ruolo fondamentale per le successive modellazioni.

Grazie ai dati raccolti, è stato possibile applicare un modello previsionale di stabilità superficiale, TRIGRS 2.0 (Rex L. Baum, William Z. Savage, and Jonathan W. Godt, 2008) basato sull'infiltrazione in un mezzo non saturo di una precipitazione di durata finita.

Particolare attenzione è stata rivolta ai metodi per la previsione dello spessore del suolo (Z Model, S Model, Sexp Model) e alla loro influenza nella suscettività da frana superficiale.

1.3 Inquadramento geografico

L'area oggetto di studio si trova presso il comune di Porretta Terme, nell'Appennino bolognese. È facilmente raggiungibile tramite la strada statale n. 64 e tramite la linea ferroviaria che collega l'Emilia Romagna alla Toscana.

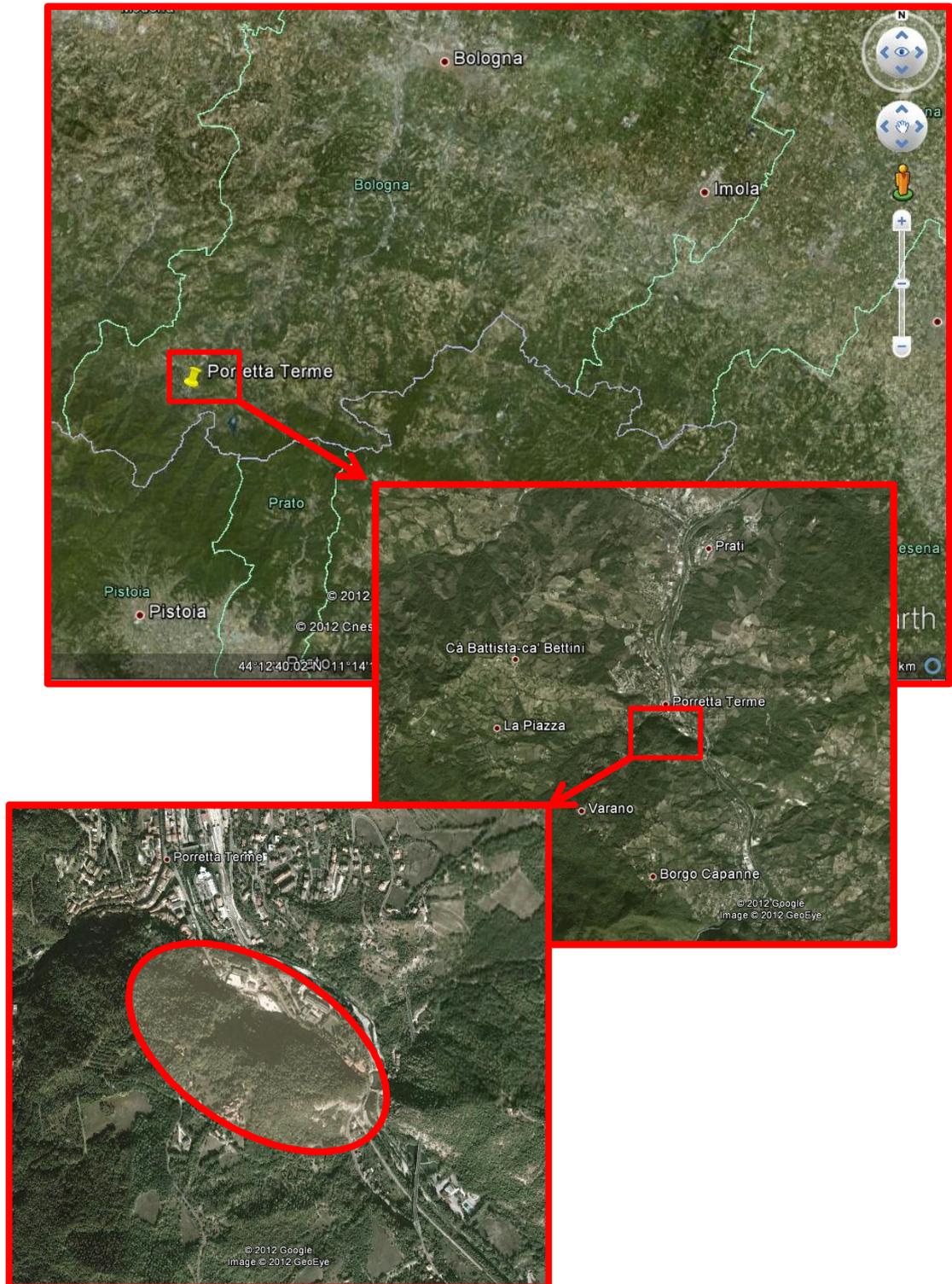


Figura 3 Inquadramento geografico – Porretta Terme (Bo) – da Google Earth

Porretta Terme è una piccola località, con circa 4800 abitanti. L'area è famosa per i suoi centri termali e le sue case di cura.

Infatti dalle fonti delle Terme di Porretta sgorgano acque sia sulfuree che salsobromojodiche, con caratteristiche che le rendono eccezionali.

Le acque salsobromojodiche affiorano dal terreno nella parte alta del paese, sotto l'albergo Terme, nella stessa zona ove sono stati effettuati i ritrovamenti archeologici delle vecchie terme romane.

L'area oggetto di studio si trova all'interno delle seguenti cartografie:

- Carta Tecnica Regionale dell'Emilia Romagna 1:10.000 – Foglio 251042 e Foglio 251081;
- Carta geologica dell'Italia 1:100.000 – Foglio 98;
- Carta geologica dell'Italia 1:50.000 – Foglio 251.

2. Geologia

2.1 Cenni di geologia generale

L'Appennino settentrionale è una catena a falde (Elter, 1960; Reutter & Groscurth, 1978) sviluppatasi principalmente nel Terziario in seguito alla collisione tra la placca continentale europea e la microplacca Adria connessa alla placca africana. La collisione è avvenuta in seguito al processo di chiusura dell'oceano Ligure-Piemontese, ramo occidentale della Tetide, interposto tra esse.

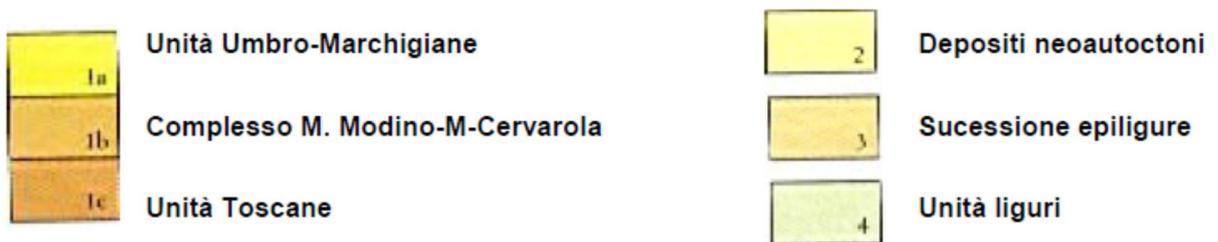
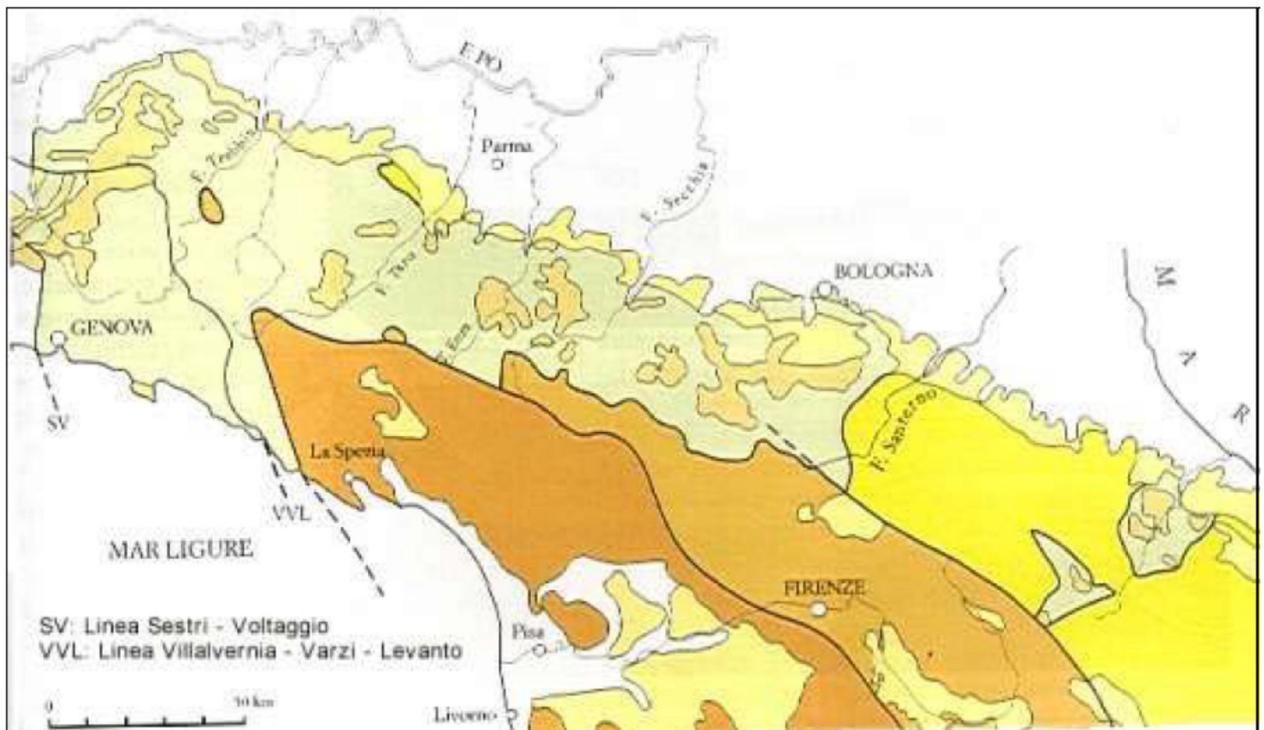


Figura 4 Schema geologico semplificato dell'Appennino settentrionale nel quale vengono indicati i principali protagonisti della struttura geologica del territorio emiliano-romagnolo.

Le linee più spesse indicano i contatti tettonici importanti (da Mutti et al. 1975, semplificata)

La catena deriva così dalla formazione di differenti domini paleogeografici distinguibili in due gruppi principali (Bortolotti, 1992):

- Dominio Interno (Ligure o alloctono), posizionato nella parte occidentale dell'Appennino settentrionale, corrispondente in larga parte all'area oceanica e di crosta assottigliata (subligure);
- Dominio esterno (Tosco-Umbro o autoctono), posizionato nella parte est orientale dell'Appennino settentrionale, costituito da unità continentali di pertinenza africana.

Il primo è composto di rocce di varia natura, prevalentemente sedimentarie di mare profondo di età tra 150 e 45 milioni di anni. Sono frequenti rocce derivate dalla solidificazione di lave basaltiche sottomarine di dorsale oceanica e scaglie di un profondo e antico substrato (mantello) che per il loro colore scuro verdastro e per la loro resistenza all'erosione, spiccano nel paesaggio appenninico.

Il secondo dominio è composto da una successione di rocce di origine sedimentaria e di natura prevalentemente carbonatica, di mare meno profondo, con precipitazione di Sali per l'intensa evaporazione del mare, seguiti da una successiva intensa deposizione di flussi torbiditici divisi nelle unità Toscane, più interne e antiche, caratterizzate dalla formazione del Macigno, e le unità Umbro-Marchigiane, localizzate nel settore orientale dell'Appennino settentrionale, di età più recente, caratterizzata dalla formazione della Marnosa Arenacea (Boccaletti et al., 1980).

Tra le due unità si osserva il complesso arenaceo del Monte Cervarola, che costituisce una situazione intermedia tra le due unità.

Al di sopra dei terrazzi Liguri intensamente tettonizzati si impostano bacini minori entro cui si depongono sequenze ricche di detriti silicoclastici chiamate Successioni Epiliguri, coeve temporalmente con i domini continentali più esterni (Vai, 1992).

Nella zona di transizione fra i due domini è localizzato un altro dominio denominato Sub-Ligure e rappresentato da unità discordanti sulle sottostanti unità di dominio continentale.

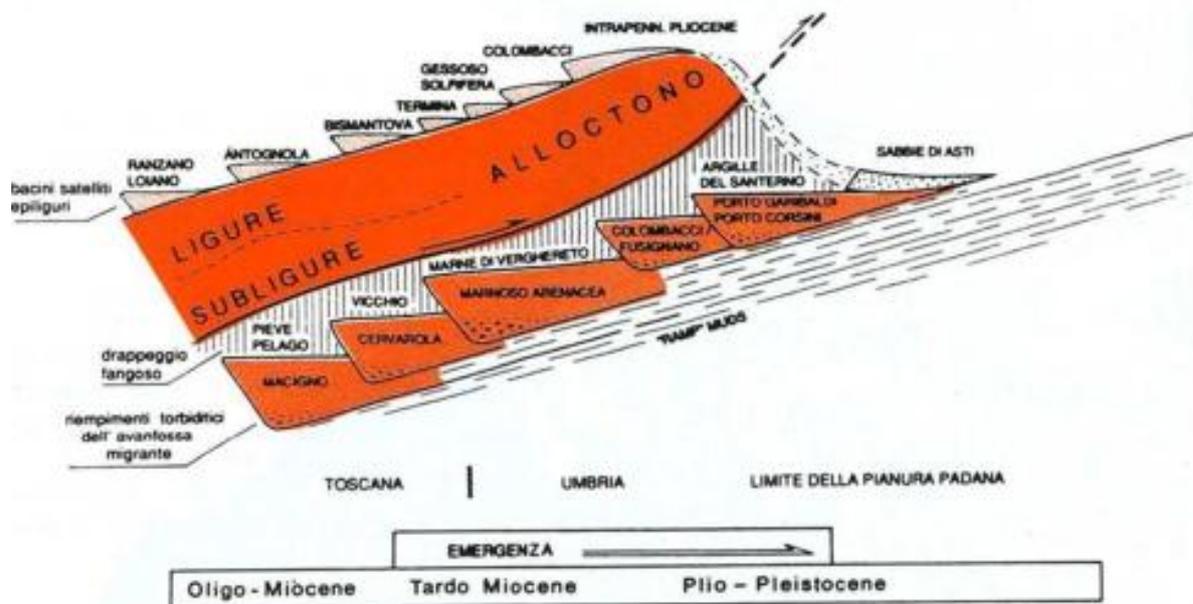


Figura 5 Schema concettuale della progressione verso NE dell'alloctono Ligure e sub-ligure sulle successioni di avansossa dei differenti domini dell'Appennino Settentrionale esterno.

I sedimenti depositi sulla coltre Ligure durante il suo avanzamento formano le successioni dei bacini satelliti epiliguri (da Ricci Lucchi 1986, modificato da Castellarin et al. 1992)

Dal punto di vista tettonico l'Appennino Settentrionale è un edificio strutturale di forma arcuata ed allungata in direzione NW-SE, convenzionalmente delimitato dalla fossa adriatica ad est e compreso tra due grandi lineamenti tettonici trasversali (Bortolotti, 1992):

- A NW la linea Sestri-Voltaggio;
- A SE la linea Ancona-Anzio.

Tali lineamenti sono interpretati come strutture a forte componente trascorrente (Bortolotti, 1992) e perciò considerati elementi, funzionanti da cerniera, che permettono il raccordo fra l'Appennino Settentrionale con il sistema Alpino a nord e il piccolo blocco dell'Appennino Centrale a sud.

La struttura generale dell'Appennino Settentrionale è data dall'impilamento di unità tettoniche appartenenti a domini paleogeografici differenti. L'intera struttura è inoltre complicata ulteriormente da thrust arcuati fuori sequenza lunghi anche decine di km, talvolta ad alto angolo rispetto al trend regionale della catena.

L'evoluzione dell'Appennino settentrionale può essere schematizzato in due momenti:

- Fine dell'Eocene medio;
- Fine del Miocene medio.

Alla chiusura della Tetide (collisione Europea-Adria) nell'Eocene medio, la gran parte delle ofioliti di bassa pressione liguri viene obdotta sul paleomargine passivo adriatico (Toscana, Liguria, Emilia), assumendo vergenze non molto sistematiche sia a W che a E.

La formazione dell'Appennino Emiliano – Romagnolo ebbe inizio a partire dal Cretaceo superiore in seguito alla chiusura dell'Oceano Ligura-Piemontese, che faceva parte della Tetide, e alla successiva collisione da parte della placca Europea (Corso-Sarda) con quella Adriatica (Adria, Insubria) inizialmente connessa alla zolla africana (Coli, 1992).

In questa storia tettonica si possono distinguere dunque una fase oceanica e una continentale (Coli, 1992).

La fase oceanica inizia al limite tra il Cretaceo inferiore e il Cretaceo superiore (c.a 100 Ma), con la subduzione della litosfera secondo un piano di immersione verso E, verso il margine appenninico (Coli, 1992). Tale piano si trova al confine tra il bacino piemontese, ad ovest, e quello ligure, ad est; questa prima fase termina quando la placca oceanica piemontese è completamente consumata (Boccaletti et al., 1980).

La seconda fase inizia nel Cretaceo superiore e termina nell'eocene medio (Boccaletti et al., 1980) e prevede la ripresa della subduzione secondo un piano immergente verso ovest di crosta oceanica Ligure sotto il Massiccio Sardo-Corso portando la completa chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese (Bortolotti, 1992).

Durante questa fase venne a generarsi un prisma d'accrezione costruito dall'impilamento, per sottoscorrimento verso ovest, delle coperture oceaniche e di parte del loro basamento (Coli, 1992).

Nell'Eocene medio ebbe inizio la fase continentale (ensialica) dove si ha la collisione fra margine Sardo-Corso europeo e margine adriatico che dà origine all'orogenesi appenninica (Boccaletti et al., 1980).

In questa fase si ha uno sviluppo di una tettonica a thrust e falde con sottoscorrimento verso Ovest delle Unità Toscane prime e di quelle Umbro-Marchigiane poi, sotto le unità precedentemente impilate (Coli, 1992). La catena deriva così dalla complessa deformazione di sedimenti depositi nei diversi contesti paleogeografici meso-cenozoici: il Dominio Ligure, corrispondente in larga misura all'area oceanica, il Dominio Epiligure, che si imposta a partire dall'Eocene medio sulle Unità Liguri già tettonizzate, il Dominio subligure, sviluppato sulla costa assottigliata africana adiacente alla zona oceanica, e il Dominio Tosco-Umbro, di pertinenza africana (Elter, 2000).

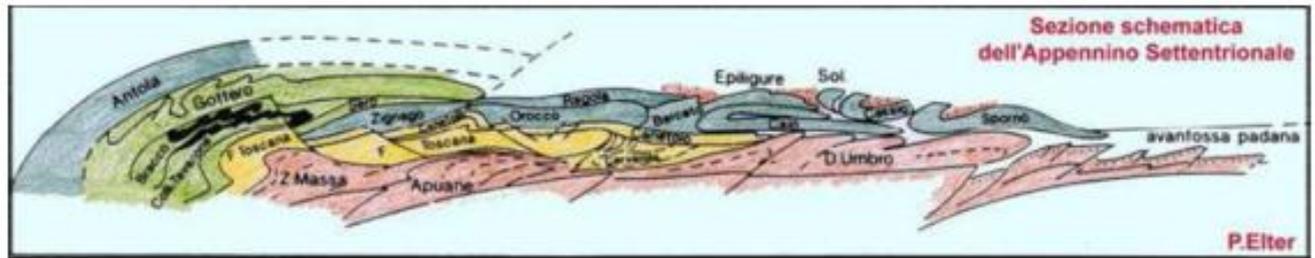


Figura 6 Schema di sovrapposizione delle unità tettoniche che costituiscono l'Appennino Settentrionale (Elter P., 2000)

La formazione della catena Appenninica Settentrionale è sostanzialmente riconducibile a cinque specifici momenti evolutivi:

1. Collisione continente-continente, fra Iberia ed Adria e formazione del sistema Alpi-Appennini, in cui la proto-catena appenninica aveva uno sviluppo in direzione NE-SW, non coincidente con l'attuale assetto (Eocene Superiore).
2. Fase distensiva del settore occidentale della placca iberica con conseguente apertura del Bacino Algero-Provenzale e distacco del Blocco Sardo-Corso (Oligocene inferiore).
3. Rotazione antioraria del Blocco Sardo-Corso, che raggiunge la sua posizione attuale dopo aver subdotto il margine continentale adriatico, alle cui spese si è definitivamente costituita la paleo-catena appenninica (fine Oligocene e il Miocene medio).
4. Nuova fase distensiva, che causa l'apertura del Bacino Tirrenico interposto fra il Blocco Sardo-Corso e la paleo-catena appenninica smembrata e traslata verso SE-E-NE (Miocene superiore).
5. Riattivazione della collisione coinvolgente i resti della placca iberica ed adriatica con migrazione del fronte compressivo verso NE nell'Appennino Settentrionale (Pliocene).

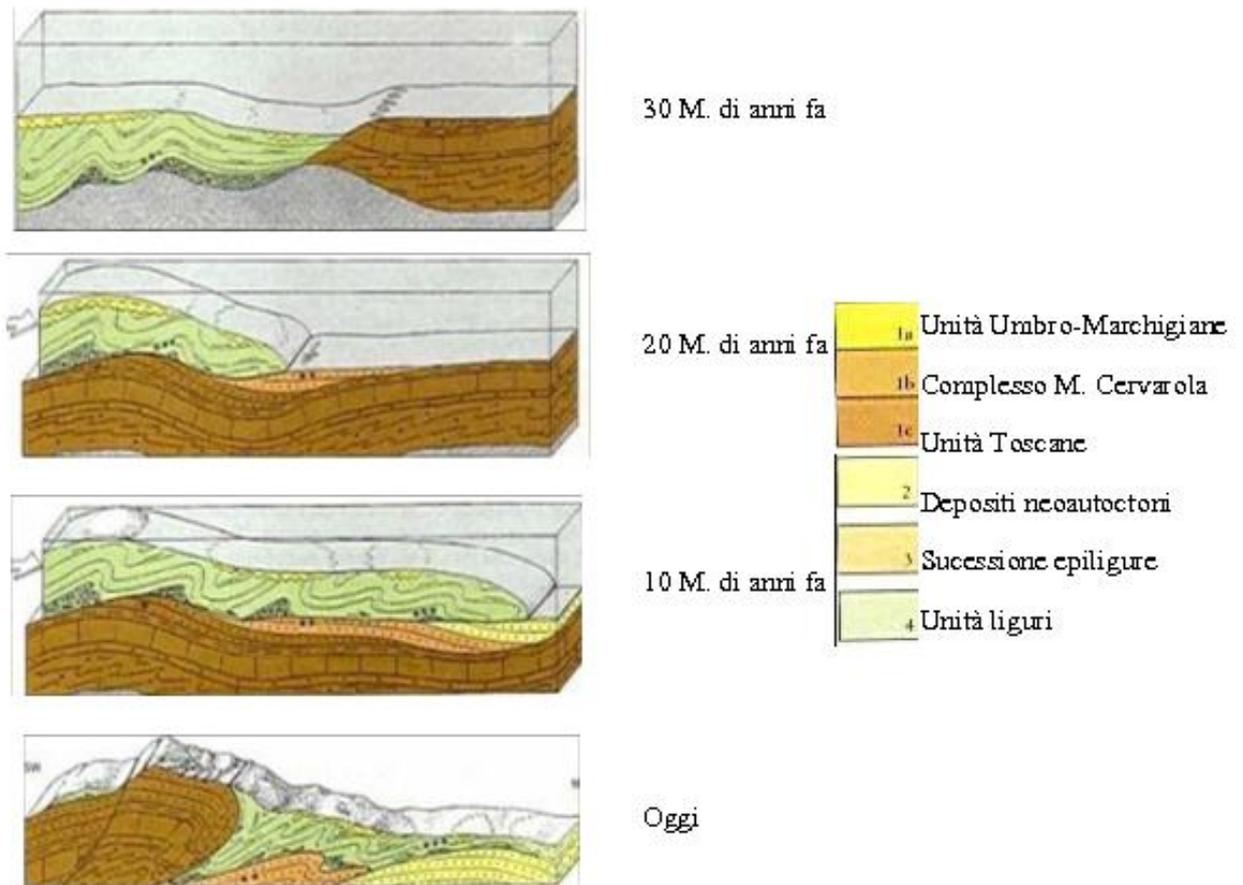


Figura 7 Schema evolutivo dell'Appennino Settentrionale (tesi di laurea di Caprara A. e Sciascia F., 2009)

Importante è sottolineare come all'interno dell'Appennino Settentrionale si possano distinguere unità flyschoidi derivanti da avanfosse geneticamente legate a due cicli orogenetici differenti.

Nelle Unità Liguri e Sub-Liguri i flysch si sono depositi tra il Cretaceo superiore e l'Oligocene, per opera dell'orogenesi Alpina, mentre nei restanti domini sono riconducibili al periodo compreso tra l'Oligocene ed il Pliocene, in relazione all'orogenesi Appenninica (Martinelli, 2003).

Relativamente a questa ultima fase deformativa il fronte compressivo è spostato progressivamente verso NE, implicando la migrazione delle avanfosse ed imprimendo alla catena il peculiare aspetto a pieghe e sovrascorrimenti (Martinelli, 2003).

Contemporaneamente sulle Unità Liguridi si sono formati bacini tettonici minori ("piggy back basin"), dove si sono depositate le Unità Epiliguri (Ricci, Lucchi & Ori, 1985), precedentemente definite come "successioni semi-alloctone" (Merla, 1951) o "successione tardo-geosinclinale" (Sestini, 1970).

2.2 Inquadramento geologico

L'area di studio si trova nel comune di Porretta Terme, nell'Appennino Bolognese. Dalle carte geologiche dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), si può notare come le due litologie prevalenti nell'area oggetto di studio siano le Argille Variegate con Calcari (AVC) e le Arenarie di Suviana (SUV).

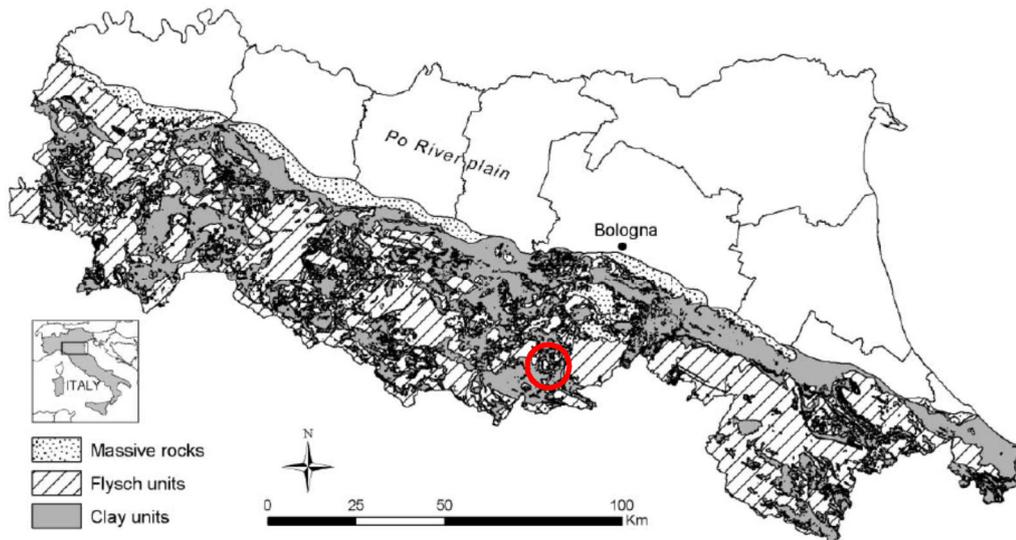


Figura 8 Classificazione litotecnica schematica della Regione Emilia Romagna

Le AVC, ad affinità ligure, sono argilliti, spesso marnose, in bande blu, verdi, grigie e nerastre in superficie fresca e nocciola in superficie alterata, in strati sottili, con intercalazioni di calcilutiti grigie (bianco-giallastre in superficie alterata), talora marnose al tetto, prevalentemente in strati medi e spessi. Sono caratterizzate da deformazione tettonica molto intensa che dà origine ad una foliazione ben marcata estremamente pervasiva nelle argilliti, mentre i livelli più competenti si presentano sottoforma di boudins e cerniere sradicate; solo molto raramente la stratificazione originale è preservata.

Sono presenti inclusi ofiolitici o di breccie poligeniche ad elementi ofiolitici, la potenza geometrica massima rilevata a scala regionale è di 700-800 metri. I contatti stratigrafici inferiore e superiore sono non preservati. Sono presenti depositi pelagici e torbiditici di piana bacinale.

Le SUV appartengono invece al Dominio Toscano, in particolare all'Unità tettonica Sestola-Vidiciatico ed alla Successione Porretta. Si tratta di alternanze arenaceo-pelitiche in

strati gradati prevalentemente spessi e molto spessi, raramente sottili e medi. Le areniti alla base degli strati sono da medie a grossolane (localmente molto grossolane) con composizione feldspatolitica. A/P variabile da $> a \gg 1$, localmente 1. La potenza massima rilevata a scala regionale è di 150 metri. Il contatto inferiore è netto su BGN e, localmente, su BAP.

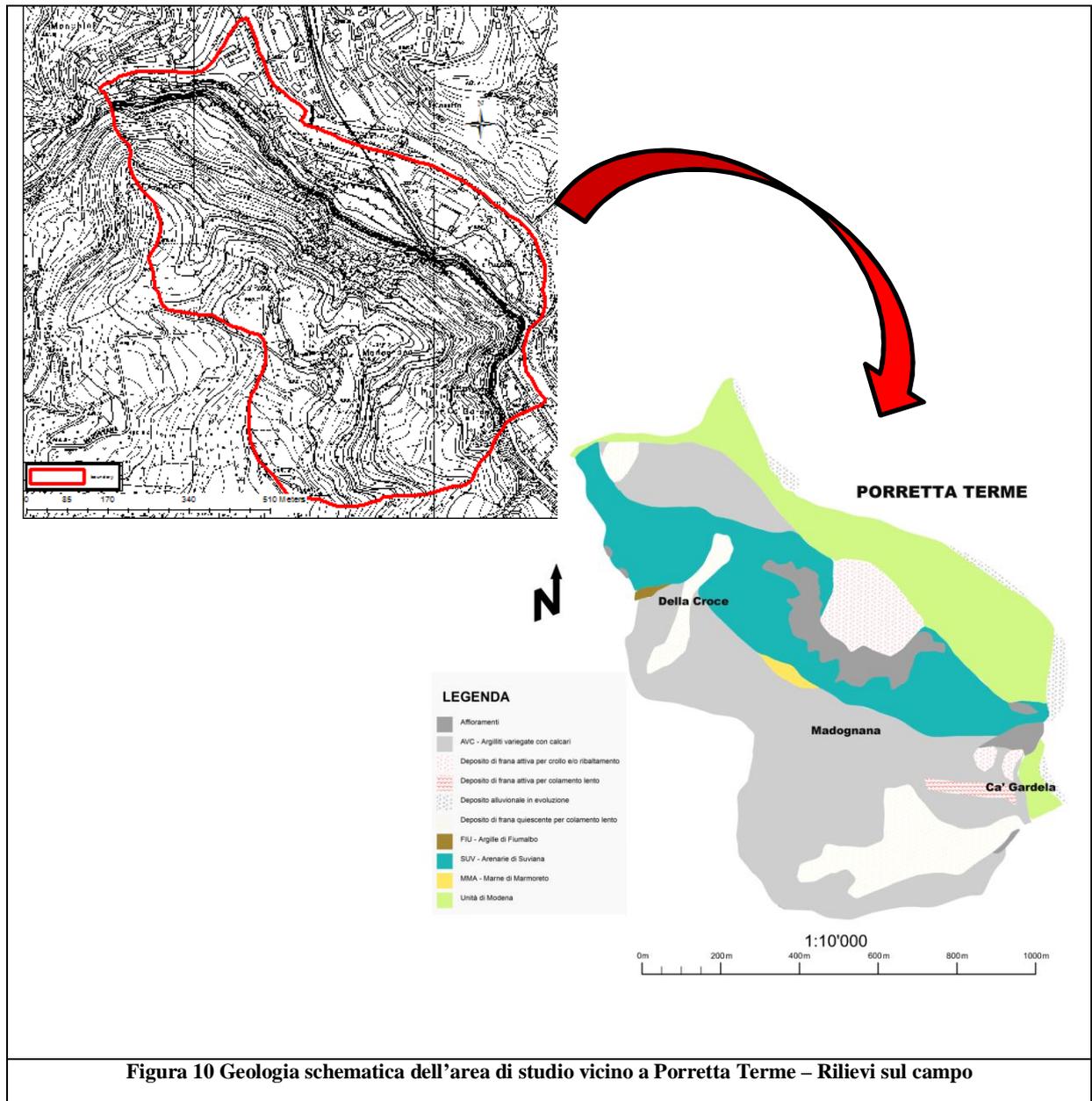
Del Dominio Toscano fanno parte anche le Argille di Fiumalbo (FIU), che sono presenti limitatamente nell'area. Si tratta di argilliti e argilliti-marnose grigio-scure, verdastre e rosse con stratificazione poco evidente, talora con intercalazioni di sottili strati gradati di areniti finissime e fini, grigio-verdastre. Presentano una deformazione tettonica intensa ed una potenza geometrica massima di alcune decine di metri.

A valle, in prossimità dell'alveo del Reno sono presenti depositi alluvionali in evoluzione oltre all'Unità di Modena, che è costituita da due ordini di depositi alluvionali terrazzati nella maggior parte dei casi composti da ghiaie affioranti o in altri casi sepolte da limi più o meno sabbiosi.



Figura 9 Geologia dell'area di studio vicino a Porretta Terme (Fonte Regione Emilia Romagna)

Nella Figura 10 è stata rappresentata schematicamente la geologia dell'area; si possono notare i depositi quaternari, tra cui anche l'Unità di Modena, ed i copri di frana esistenti. Da notare inoltre che le Argille Variegate con Calcari sono interessate da depositi di colata attivi e quiescenti, tra cui la frana in località Cà Gardella, evento del 2008. A valle dell'affioramento principale di Arenarie di Suviana è invece presente un deposito di frana attivo per crollo.



La litologia principale rimane comunque l'Arenaria di Suviana, che caratterizza la porzione più pendente del versante e potenzialmente soggetta a nuovi inneschi in futuro.

2.4 Assetto strutturale/faglie

Nella Figura 11 è riportato un quadro d'insieme regionale della geologia e dell'assetto strutturale dell'area. Come si può ben notare il comune di Porretta Terme ricade all'interno della Sottounità Sestola-Vidiciatico. L'area è racchiusa da alcuni sovrascorrimenti regionali, mentre le principali faglie si trovano più a sud-ovest, a ridosso delle Alpi Apuane.

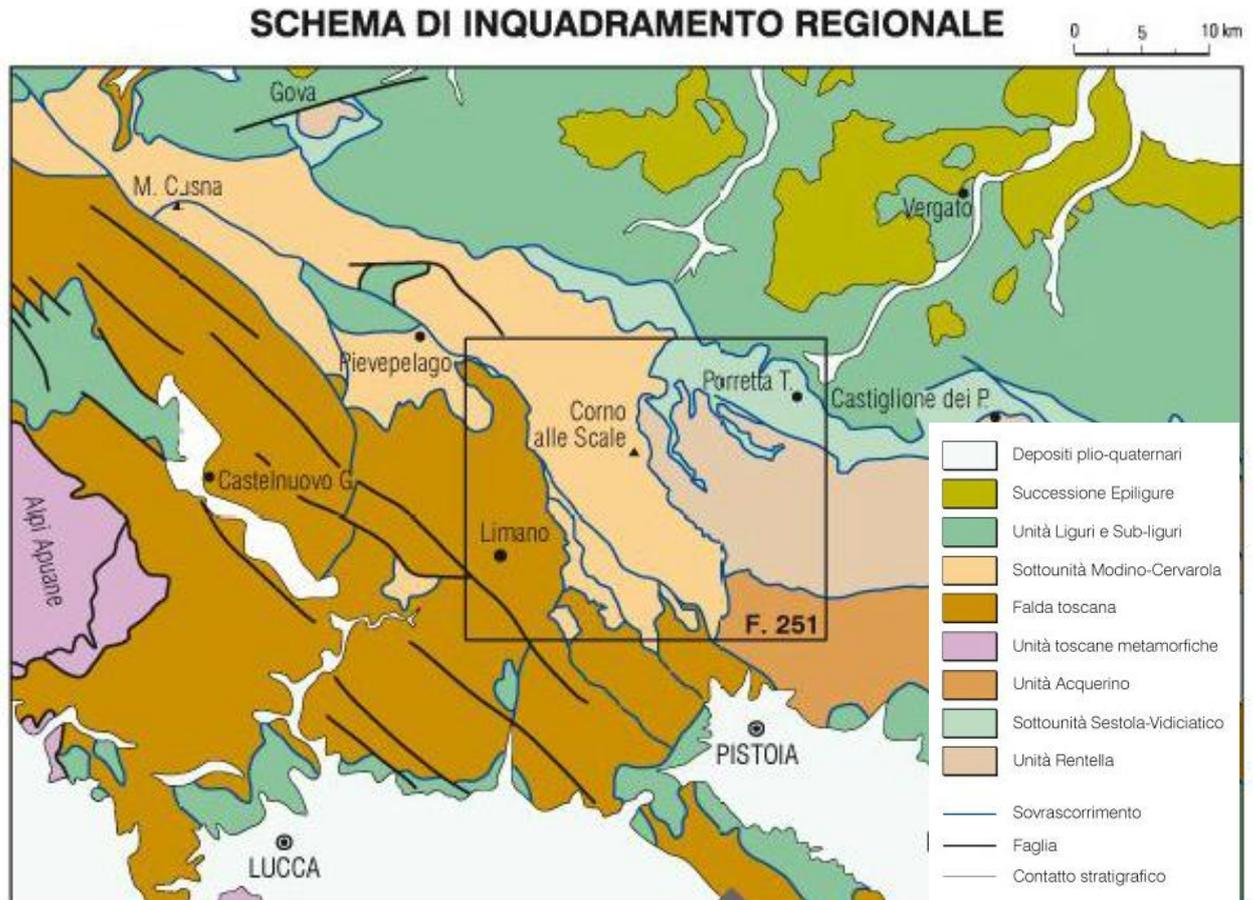


Figura 11 Schema di inquadramento regionale (Ingrandimento da sito internet dell'ISPRA)

Nella Figura 12 si possono notare i principali assetti tettonici presso Porretta Terme, grazie alla cartografia presente sul sito dell'ISPRA.

I due sovrascorrimenti a sud-ovest e nord-est dell'area oggetto di studio, hanno portato all'affioramento delle Arenarie di Suviana (SUV). Le corone di distacco di alcuni corpi di frana, con asse preferenziale sud-est / nord-ovest, paiono in asse con i principali andamenti tettonici regionali.



Figura 12 Schema tettonico (Ingrandimento da sito internet dell'ISPRA)

3. Caratterizzazione geologico-tecnica

3.1 Premessa

Per la caratterizzazione geologica-tecnica dell'area sono stati effettuati numerosi sopralluoghi di campo. Tramite trivella manuale sono stati realizzati numerosi fori al fine di misurare lo spessore del suolo al di sopra del bedrock (circa 60 punti sondaggio). Per ogni punto di sondaggio sono stati raccolti circa 500 g di campione sciolto da sottoporre ad analisi granulometriche per la caratterizzazione del suolo.



Figura 13 Fase di campionamento sul terreno

Purtroppo non è stato possibile raccogliere campioni per ogni punto sondaggio, dato che in determinate zone il suolo aveva spessori troppo limitati (anche inferiori ai 10 cm) e/o risultava ricco di sostanza organica.

3.2 Misura dello spessore del suolo

Le misure di spessore della coltre sono fondamentali per poter modellare correttamente la stabilità superficiale tramite metodi fisicamente basati. È stata pertanto condotta una campagna di misura dello spessore, durante circa 5 giorni.

Le misure di spessore del suolo sono state effettuate grazie all'utilizzo di una trivella a mano. Sono state presi circa 60 valori di spessore del suolo. Nella Tabella 1 successiva vengono elencati i diversi punti di campionamento con i relativi spessori. Nella Figura 14 è possibile avere una visione d'insieme dei punti di misura; come si può ben notare, sono stati presi numerosi campioni sulla quasi totalità dell'area. Non è stato possibile rilevare dei valori di spessore del suolo nella parte centrale dove è presente un grosso deposito di frana attiva con pareti rocciose sub-verticali.

Grazie a questi valori è stato possibile ricreare una carta con isoipse degli spessori del suolo sull'area di studio, applicando Kriging ordinario.

Campione	Spessore [cm]	Campione	Spessore [cm]	Campione	Spessore [cm]
P3	70	P21	31	P40	24
P4	36	P22	35	P41	16
P5	77	P23	26	P50	50
P6	110	P24	42	P51	58
P7	89	P25	46	P52	112
P8	35	P26	61	P53	45
P9	28	P27	56	P54	31
P10	37	P28	34	P55	52
P11	87	P29	28	P56	59
P12	93	P30	37	P57	34
P13	33	P31	21	P58	58
P14	73	P32	30	P59	60
P15	108	P33	6	P60	93
P16	92	P34	8	P61	95
P17	22	P35	10	P62	92
P18	36	P36	6	P63	79
P19	59	P37	8	P64	74
P20	41	P38	2	P65	89
		P39	26	P66	20

Tabella 1 Misure dello spessore (cm) della coltre rilevata durante l'attività di campagna

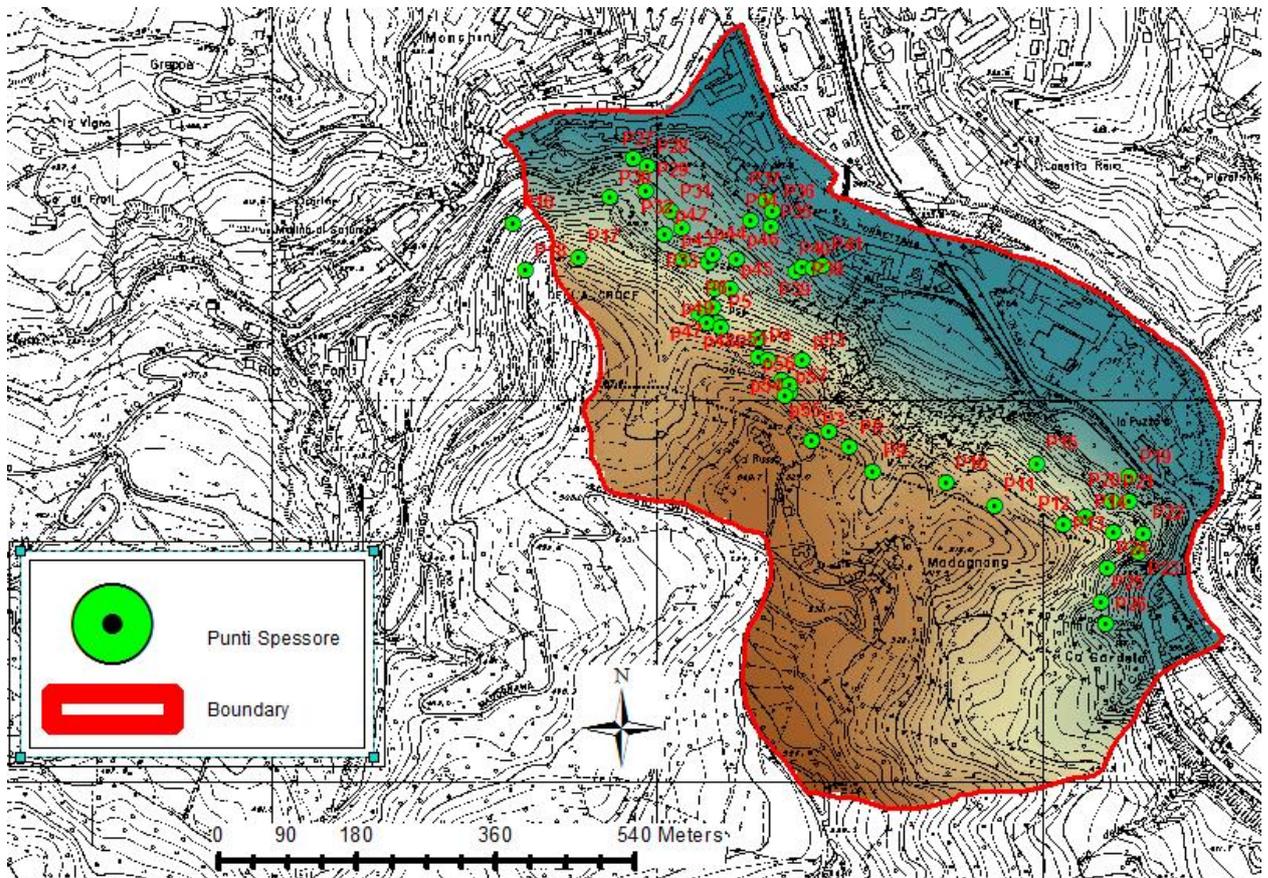


Figura 14 Ubicazione dei punti di misura dello spessore della coltre

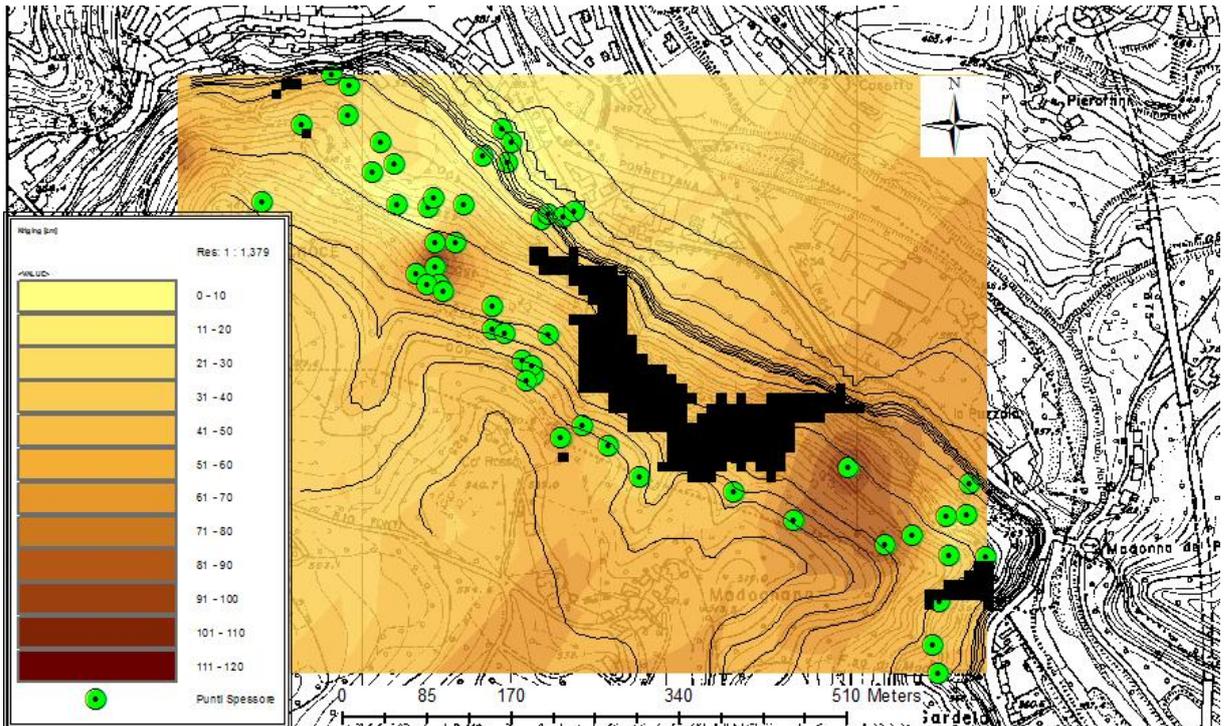


Figura 15 Kriging ordinario ottenuto dalle interpolazioni con i dati di profondità (scala valori in cm)

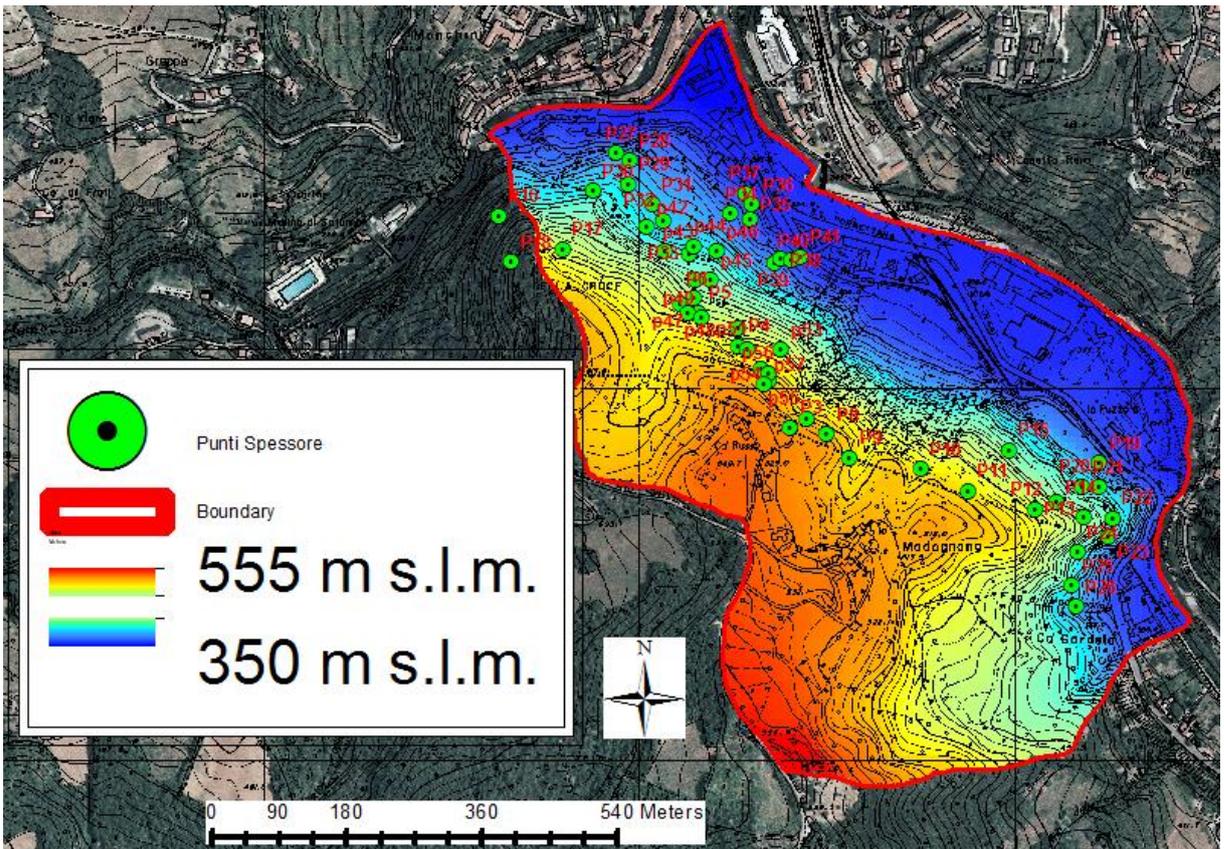


Figura 16 Ortofoto con sovrapposizione del DEM

Nella Figura 17 viene riportata una rappresentazione schematica del versante modellato. La lunghezza del versante è di circa 200 m, con un'inclinazione di circa 30° e uno spessore della coltre di circa 1 m. L'andamento del profilo è abbastanza costante, con un'accentuazione dell'inclinazione verso il piede del versante. Nell'area sono presenti alcuni terrazzamenti artificiali oltre a numerosi impluvi. L'area di studio scelta ha un'estensione di circa 0.3 km² ed è compresa tra una quota di 365 m (in corrispondenza dell'alveo del Reno) e di 550 m s.l.m. (presso i borghi di Cà Rossa, Madognana e Monte della Croce).

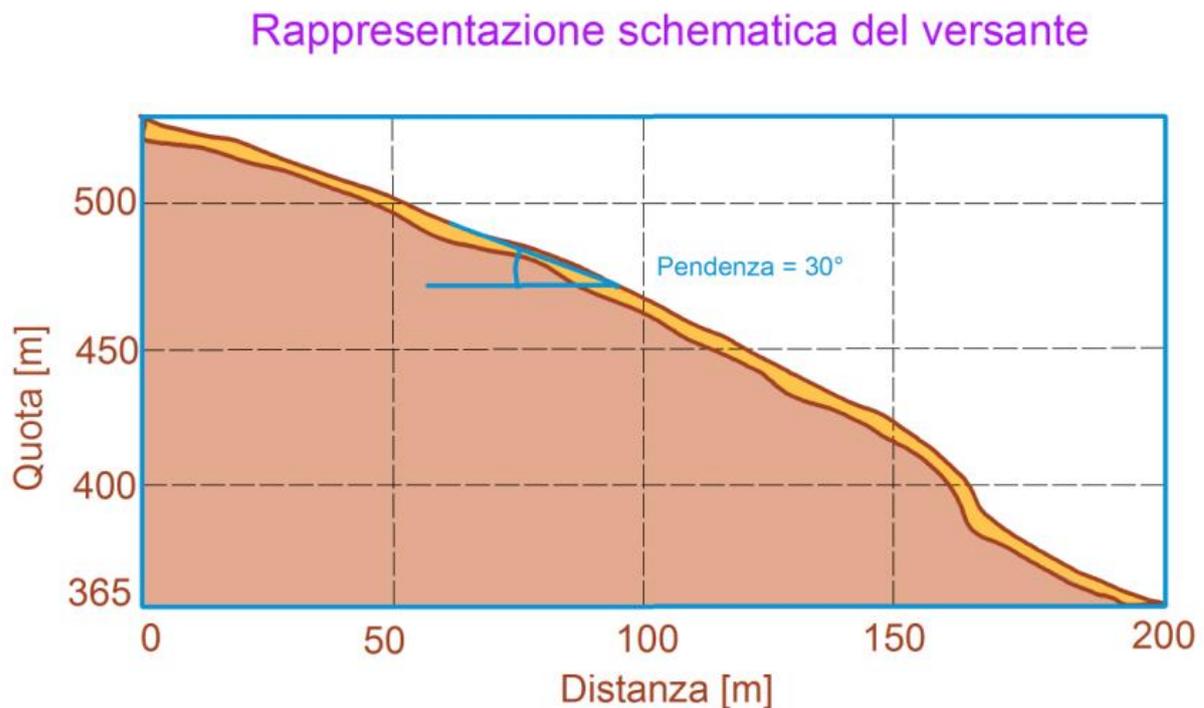


Figura 17 Sezione schematica tipo del versante

I campioni di coltre prelevati risultano disagiati, a granulometria fine e ricchi di materiale organico. L'intero versante è ricoperto da vegetazione di medio-alto fusto. Il bedrock (Arenaria di Suviana) affiora in alcune aree puntuali, risultando compatto. Sono presenti numerosi impluvi con pendenza elevate. A valle dell'affioramento principale delle Arenarie di Suviana è presente un deposito di frana attivo per crollo. In prossimità dell'alveo del Reno sono presenti depositi alluvionali in evoluzione (terrazzati nella maggior parte dei casi e composti da ghiaie affioranti o talvolta risultano sepolti da limi più o meno sabbiosi).

3.3 Distribuzione granulometrica

I numerosi campioni raccolti durante la campagna di rilevamento sono stati portati presso il laboratorio di Geologia Applicata dell'Università di Bologna. Sono state effettuate analisi granulometriche e i limiti di Atterberg.

I campioni sono stati pesati, preparati e trattati al fine di determinarne le diverse caratteristiche. L'analisi granulometrica è indispensabile per determinare le dimensioni delle particelle che compongono un campione di terreno e a stabilire le percentuali in peso delle varie frazioni che rientrano nei limiti prefissati (frazioni granulometriche).

L'importanza di conoscere le dimensioni delle particelle deriva dal fatto che nel caso di terreni a grana grossa il comportamento del materiale può essere correlato a tale informazione. Per esempio nella progettazione, le caratteristiche di permeabilità, i fenomeni di capillarità, l'angolo di resistenza al taglio, spesso sono correlati alla granulometria del terreno. Il comportamento dei terreni a grana fine dipende invece molto di più dal tipo di minerale e dalla storia geologica ed è correlato ai limiti di Atterberg.

Per ottenere le varie frazioni granulometriche si usano dei setacci con caratteristiche standardizzate. Nel nostro caso sono stati usati i setacci con passante al 5-10-20-40-80-200. È stata inoltre raccolta la parte più fine (+200). Infatti l'analisi granulometrica mediante setacci è limitata alla frazione grossolana di un terreno, cioè alle percentuali trattenute dal setaccio 200 (dimensione delle particelle >0.074 mm). Per il passante al setaccio 200 si ricorre all'analisi per sedimentazione.



Figura 18 I campioni setacciati prima dell'inserimento in forno e i campioni (passante +200) all'uscita dal forno

Per l'analisi sono stati usati circa 250 g di campione. La setacciatura è avvenuta per via umida e successivamente i campioni sono stati essiccati in forno a temperatura costante (circa 60°C) per almeno 24 ore. La frazione passante il +200 è stata recuperata dalla vasca sottostante e successivamente essiccata anch'essa.

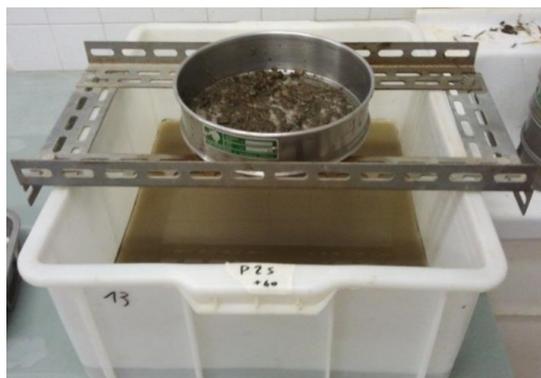


Figura 19 Fase di setacciatura umida di un campione

Setaccio Utilizzati	Apertura delle maglie (mm)
5	4.00
10	2.00
20	0.840
40	0.420
80	0.177
200	0.074

Tabella 2 Setacci impiegati per l'analisi granulometrica

I risultati sono stati diagrammati in scala semilogaritmica, con in ascisse il diametro delle particelle e in ordinate la percentuale in peso delle particelle con diametro inferiore. Le pendenze delle varie curve ottenute danno un'idea dell'uniformità dei terreni campionati; tanto più la curva è verticale, tanto più è omogeneo il campione esaminato.

Il grado di uniformità è stato caratterizzato mediante un coefficiente chiamato coefficiente di uniformità C; maggiore è il suo valore, più disomogeneo è il terreno.

Il coefficiente di uniformità C è pari a $C=D_{60}/D_{10}$, con D_{60} =diametro corrispondente al 60% di passante e D_{10} =diametro corrispondente al 10% di passante.

	P 19	P 20	P 21	P 22	P 23	P 24	P 25	P 27	P 28
C	16.00	16.00	16.00	16.00	2.00	4.00	4.00	4.00	4.00

	P 29	P 30	P 31	P 32	P 35	P 37	P 39	P 40
C	4.00	4.00	4.00	8.00	4.00	16.00	4.00	4.00

Tabella 3 Coefficienti di uniformità dei diversi campioni

Un terreno con $C < 2$ può essere considerato uniforme; nel caso dei campioni analizzati i valori indicano un terreno particolarmente disomogeneo.

Nei grafici seguenti (Figura 20, Figura 21, Figura 22) vengono riportate le curve granulometriche ricavate, suddivise in base alla classificazione sopra ottenuta.

In appendice, Allegati Capitolo 3, vengono presentate le schede di analisi per i campioni principali (P20 – P25 – P30 – P35), sia come curva granulometrica sia per la determinazione dei limiti.

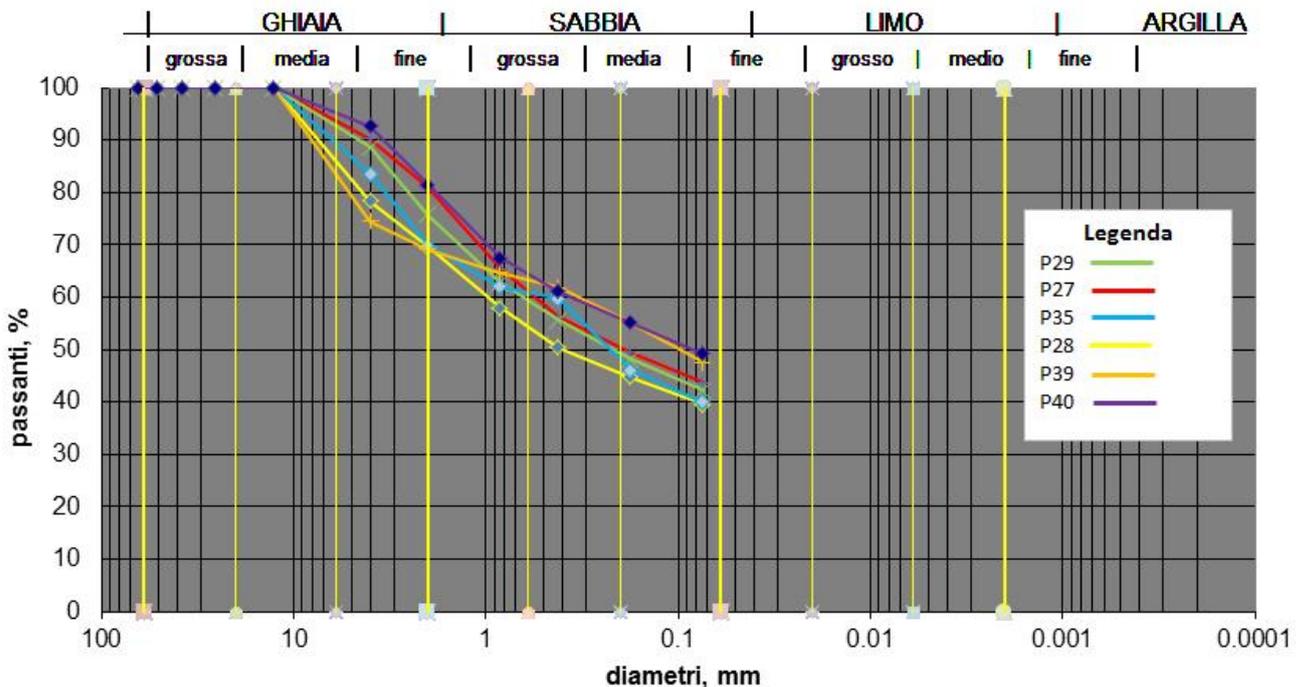


Figura 20 Curve granulometriche dei materiali – Limo sabbioso

Il fuso granulometrico in Figura 20 mostra un andamento tipico di un limo sabbioso, con una percentuale di passante con diametro inferiore a 1 mm pari a circa il 60%.

Il fuso granulometrico in Figura 21 mostra sempre un andamento tipico di un limo sabbioso, con una percentuale di passante con diametro inferiore a 1 mm pari a circa l'80%.

Infine l'ultimo fuso granulometrico in Figura 22 ci fornisce una ghiaia con sabbia, con una percentuale di passante superiore a 1 mm pari a circa il 60-80%.

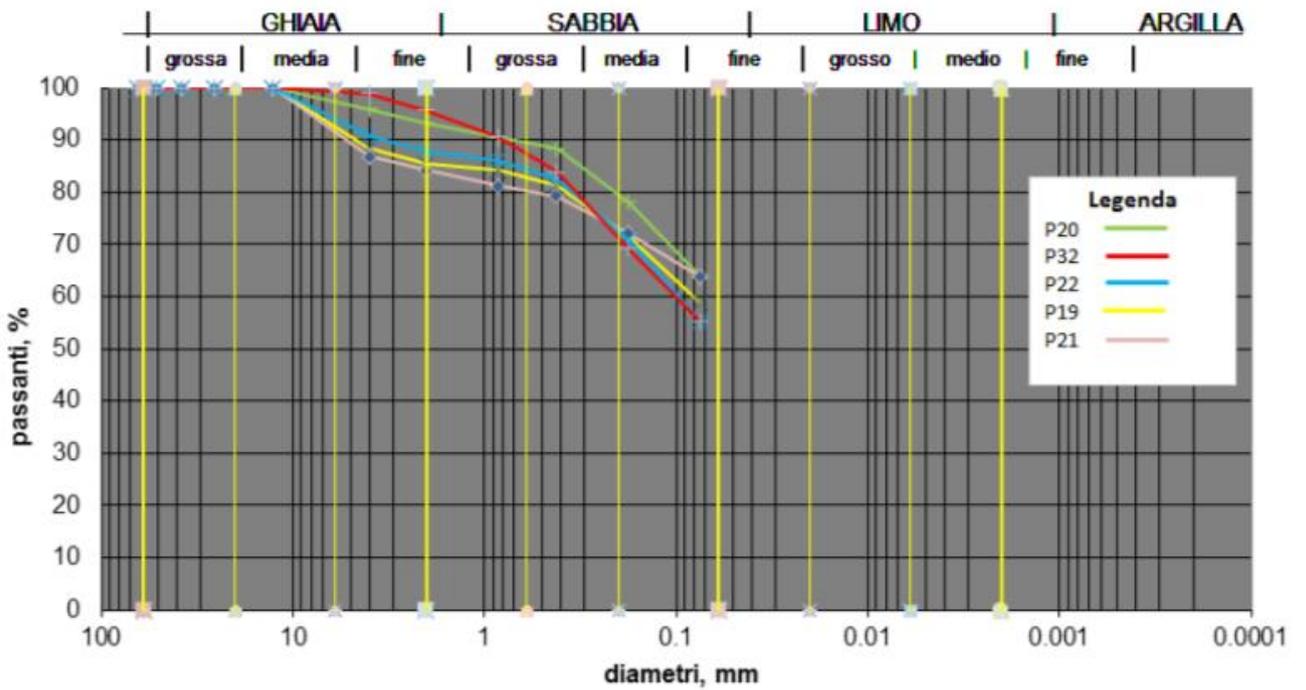


Figura 21 Curve granulometriche dei materiali – Limo sabbioso

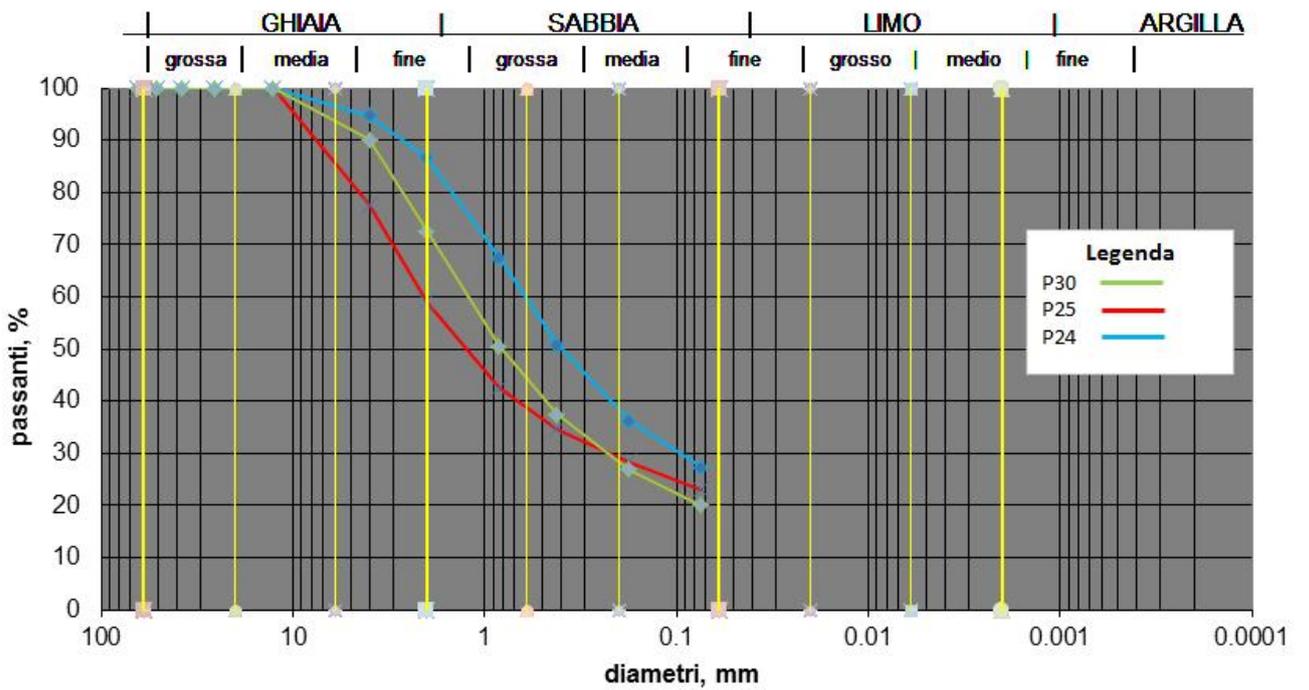


Figura 22 Curve granulometriche dei materiali – Ghiaia con sabbia

3.4 Limiti Atterberg

Il contenuto d'acqua "w" influenza pesantemente il comportamento dei terreni e nel nostro caso in esame l'acqua gioca un ruolo fondamentale per le condizioni di stabilità del pendio. Infatti un terreno a grana fine può presentarsi in quattro diversi stati fisici a seconda del contenuto d'acqua: stato solido, semisolido, plastico e liquido (aumentando il contenuto d'acqua). Tra una fase e l'altra vi sono tre limiti: di ritiro w_s , plastico w_p , liquido w_l .

Per i campioni che presentano un contenuto in fine particolarmente elevato (P 20, P 25, P30, P 35), si è provveduto ad effettuare un'ulteriore setacciatura solamente con il setaccio 40, al fine di determinarne i limiti liquido e plastico e il conseguente indice di plasticità.

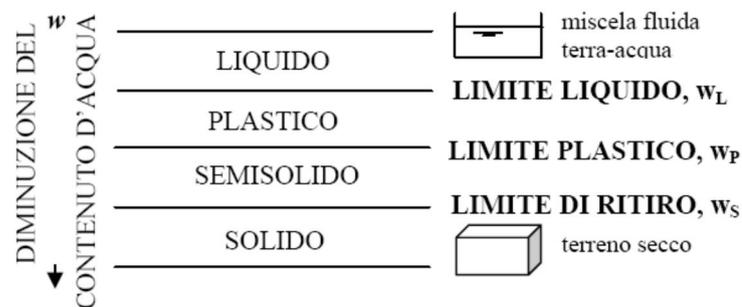


Figura 23 Limiti di Atterberg

3.4.1 Limite liquido w_l

Il limite liquido w_l è il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno possiede una resistenza al taglio così piccola che un solco, praticato in un campione rimaneggiato, si richiude quando il cucchiaio che lo contiene è sollecitato con dei colpi, secondo una procedura standardizzata. Il terreno viene prima passato al solo setaccio 40; viene rimescolato aggiungendo acqua distillata fino ad ottenere una pastella uniforme che successivamente viene posta nel cucchiaio. Il seguito viene praticato un solco tramite un utensile apposta. Il cucchiaio viene attivato e si contano i colpi necessari affinché il solco si richiuda. L'operazione viene ripetuta



Figura 24 Il cucchiaio per la misurazione del limite liquido w_l

alcune volte (minimo tre); in questo modo è possibile tracciare un diagramma, come riportato nei grafici in appendice. Viene infine ricavato il valore “ w_l ” corrispondente a $N=25$, convenzionalmente chiamato limite liquido.

Campione	20	25	30	35
W_l	48.80%	47.90%	35.10%	74.90%

Tabella 4 Limiti liquidi dei campioni di terreno

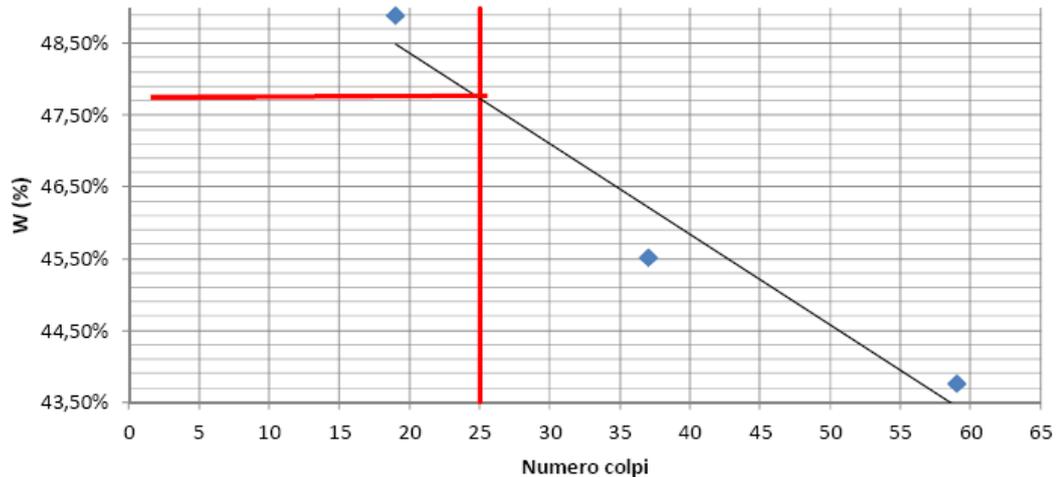


Figura 25 Esempio di determinazione del limite liquido w_l

3.4.2 Limite plastico w_p

Il limite plastico w_p è il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno inizia a perdere il suo comportamento plastico. Viene determinato formando dei bastoncini dello spessore di 3.2 mm, manualmente su una lastra di vetro, che iniziano a fessurarsi in corrispondenza del raggiungimento di w_p . normalmente si assume la media di quattro determinazioni.

Campione	20	25	30	35
W_p	34.09%	33.61%	25.82%	57.24%

Tabella 5 Limiti plastici dei campioni di terreno



Figura 26 Esempio di bastoncini usati per la determinazione del limite plastico w_p

3.4.3 Indici di consistenza

Utilizzando i limiti plastici e i limiti liquidi sopra determinati è possibile ricavare l'indice di plasticità PI, indici rappresentativi della consistenza dei terreni coesivi.

$$PI = w_L - w_p$$

L'indice di plasticità PI indica il campo di variazione del contenuto d'acqua all'interno del quale il terreno ha un comportamento plastico, può cioè deformarsi o esser rimaneggiato senza cambio di volume e senza fessurarsi. PI cresce con la percentuale di argilla.

Campione	20	25	30	35
PI	14.71%	14.29%	9.28%	17.66%

Tabella 6 Indice di plasticità dei campioni di terreno

0 – Non plastico
(1-5)- Leggermente plastico
(5-10) - Poco plastico
(10-20)- Media plasticità
(20-40)- Alta plasticità
>40 Plasticità molto alta

Tabella 7 Legenda per l'indice di plasticità PI

Come si può notare dai risultati ottenuti, i campioni indicano un terreno poco-medio plastico, quindi con un basso contenuto di argilla.

Non sono stati determinati i Limiti di Ritiro (w_s) in quanto non sono stati misurati i valori di volume iniziale e finale dei campioni al termine dell'essiccazione.

3.5 Classificazione del terreno

I sistemi di classificazione sono una sorta di linguaggio di comunicazione convenzionale per identificare attraverso un nome (o una sigla) il tipo di materiale, in modo da fornirne indirettamente, almeno a livello qualitativo, delle indicazioni sul comportamento. In pratica, individuano alcuni parametri significativi e distintivi dei vari tipi di terreno in modo da poterli raggruppare in classi e stabilire così dei criteri universali, convenzionali, di riconoscimento.

Data l'estrema variabilità dei terreni naturali e le diverse possibili finalità ingegneristiche, non è pensabile di poter creare un unico sistema di classificazione. Per questo motivo, si sono sviluppati nel tempo diversi sistemi di classificazione, che possono essere utilizzati per scopi e finalità diversi.

Tuttavia, alcuni aspetti fondamentali accomunano i diversi sistemi di classificazione nella scelta delle proprietà di riferimento. In particolare tali proprietà:

- devono essere significative e facilmente misurabili mediante procedure standardizzate;
- non devono essere riferite ad uno stato particolare, ossia devono essere indipendenti dalla storia del materiale, dalle condizioni di sollecitazione o da altre condizioni al contorno.

Per quanto visto fino ad ora, i parametri che possiedono queste caratteristiche sono quelli precedentemente definiti proprietà indici, e riguardano la composizione granulometrica e la composizione mineralogica. I sistemi di classificazione più vecchi sono basati unicamente sulla granulometria e perciò sono significativi solo per i materiali a grana grossa (ghiaie e sabbie). Tra questi, i più comunemente usati sono riportati in Tabella 8.

SISTEMA	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
MIT	2	0.06	0.002	
AASHO	2	0.075	0.002	
AGI	2	0.02	0.002	
	mm	mm	mm	

Tabella 8 Alcuni sistemi di classificazione basati sulla granulometria

Essendo i terreni una miscela di grani di diverse dimensioni, una volta determinate le frazioni in peso relative a ciascuna classe, il materiale può essere identificato utilizzando i termini delle varie classi come sostantivi o aggettivi, nel modo seguente:

- I termine: nome della frazione granulometrica prevalente
- II termine: nomi delle eventuali frazioni maggiori del 25%, precedute dal prefisso *con*
- III termine: nomi delle eventuali frazioni comprese tra il 15% e il 25%, con il suffisso *oso*
- IV termine: nomi delle eventuali frazioni minori del 15%, con il suffisso *oso*, precedute dal prefisso *debolmente*.

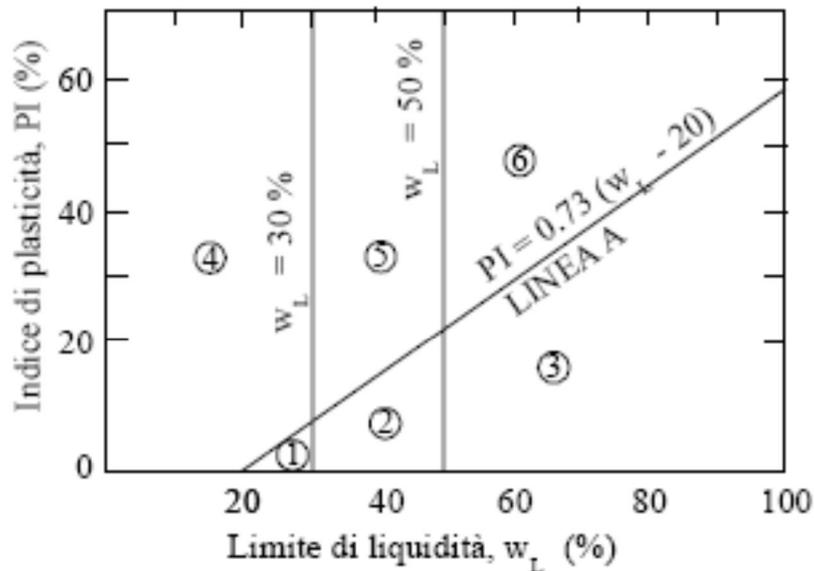
Se ad esempio da un'analisi granulometrica risulta che un terreno è costituito dal 60% di limo, dal 30% di sabbia e dal 10% di argilla, esso verrà denominato limo con sabbia debolmente argilloso.

Una classificazione che tiene conto solo della granulometria non è tuttavia sufficiente nel caso di limi e argille, il cui comportamento è legato soprattutto alla composizione mineralogica.

Per questo tipo di terreni si può ricorrere ad esempio al sistema di classificazione proposto da Casagrande (1948). Tale sistema è basato sui limiti di Atterberg ed è riassunto in un diagramma (noto come “carta di plasticità di Casagrande”) (Figura 27) nel quale si individuano sei zone, e quindi sei classi di terreno, in funzione del limite liquido (riportato in ascissa) e dell'indice di plasticità (riportato in ordinata). La suddivisione è rappresentata dalla retta A di equazione:

$$IP = 0.73 (w_L - 20) \quad (\text{Eq. 1.19})$$

e da due linee verticali in corrispondenza di $w_L = 30$ e $w_L = 50$.



- ① Limi inorganici di bassa compressibilità
- ② Limi inorganici di media compressibilità e limi organici
- ③ Limi inorganici di alta compressibilità e argille organiche
- ④ Argille inorganiche di bassa plasticità
- ⑤ Argille inorganiche di media plasticità
- ⑥ Argille inorganiche di alta plasticità

Figura 27 Carta di plasticità di Casagrande

Le classi che si trovano sopra la retta A includono le argille inorganiche, quelle sotto la retta A i limi e i terreni organici (a titolo informativo va detto che la presenza di materiale organico in un terreno può essere rilevata attraverso la determinazione del limite liquido prima e dopo l'essiccamento. L'essiccamento provoca infatti nei materiali organici dei processi irreversibili con riduzione di wL; se tale riduzione è maggiore del 75%, il materiale viene ritenuto organico).

Esistono poi sistemi che, facendo riferimento sia alle caratteristiche granulometriche sia a quelle mineralogiche, possono essere utilizzati per la classificazione di qualunque tipo di terreno.

In particolare, i due sistemi più comunemente utilizzati sono il sistema USCS e il sistema HRB (AASHTO, CNR_UNI 10006).

Il sistema HRB è stato proposto dalla Highway Research Board (1942) e successivamente revisionato dalla American Association of State Highway and Transportation Office (e riportato con qualche modifica anche nelle norme CNR-UNI). È un sistema di classificazione che viene utilizzato principalmente nel campo delle costruzioni stradali, o comunque per terreni utilizzati come materiali da costruzione.

In base alla granulometria e alle caratteristiche di plasticità, i terreni vengono suddivisi in otto gruppi, indicati con le sigle da A-1 ad A-8, alcuni dei quali (A-1, A-2 e A-7) suddivisi a loro volta in sottogruppi secondo lo schema riportato in Figura 1.19. I materiali granulari sono inclusi nelle classi da A-1 ad A-3 (con percentuale passante al setaccio 200 minore o uguale al 35%), i limi e le argille nelle classi da A-4 ad A-7 (con percentuale passante al setaccio 200 maggiore del 35%), mentre la classe A-8 comprende i terreni altamente organici.

Per i terreni granulari si considera nell'ordine:

- la percentuale passante al setaccio N.10
- la percentuale passante al setaccio N.40
- la percentuale passante al setaccio N.200

e quando disponibili si considerano anche i valori del limite liquido e dell'indice di plasticità determinati sul passante al setaccio N.40. Per i limi e le argille la classificazione viene fatta solo sulla base dei valori misurati del limite liquido e dell'indice di plasticità. Il sistema prevede che, per i terreni che contengono un'alta percentuale di materiale fine, venga anche valutato un indice sintetico, detto indice di gruppo, definito come:

$$I = 0.2 a + 0.005 ac + 0.01 bd, \text{ dove:}$$

- a = percentuale passante al setaccio 200 maggiore del 35% e minore del 75%, espressa come numero intero compreso tra 0 e 40
- b = percentuale passante al setaccio 200 maggiore del 15% e minore del 55%, espressa come numero intero compreso tra 0 e 40
- c = valore del limite liquido maggiore di 40 e minore di 60, espresso come numero intero compreso tra 0 e 20
- d = valore dell'indice di plasticità maggiore di 10 e minore di 30, espresso come numero intero compreso tra 0 e 20

Valori minori dei limiti inferiori significano a, b, c, o d uguali a zero; valori maggiori dei limiti superiori significano a o b uguali a 40, c o d uguali a 20. Quando un terreno rientra in più categorie viene attribuito a quella corrispondente ai limiti più restrittivi.

Classificazione generale:	Materiali granulari (passante al setaccio N.200 \leq 35%)				Limi-Argille (passante al setaccio N.200 \geq 35%)							
Classificazione di gruppo:	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7		
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			A-7-5*	A-7-6	
Analisi granulometrica:												
% passante al setaccio:												
- N.10 (2mm)	≤ 50											
- N.40 (0.12 mm)	≤ 30	≤ 50	≥ 51	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36	
- N.200 (0.074 mm)	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36	
Limiti di Atterberg determinati sul passante al setaccio N.40 (0.42 mm):												
- w_L (%)			Non plastico	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	
- I_p (%)	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	
Indice di gruppo (I):	0	0	0	≤ 4			≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20		
Materiale costituente:	Ghiaia (pietrame) con sabbia		Sabbia	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa			Limi	Argille				
Materiale come sottofondo:	Da eccellente a buono							Da buono a scarso				

*Note: Se $I_p \leq w_L - 30 \rightarrow$ A-7-5; Se $I_p \geq w_L - 30 \rightarrow$ A-7-6

Figura 28 Sistema di classificazione HBR

Pertanto, analizzando i campioni P20, P25, P30 e P35 sono state ricavate le seguenti classificazioni:

	P20	P25	P30	P35
w_l	48,80	47,50	35,10	74,50
w_p	34,09	33,61	25,82	57,24
PI	14,71	14,29	9,28	17,66
HBR	A-7-5	A-2-7	A-1-b	A-7-5
Denominazione	Limo sabbioso	Ghiaia e sabbia limosa	Ghiaia con sabbia	Limo sabbioso

Tabella 9 Classificazione dei terreni

Come si può evincere dalla tabella sopra riportata, i quattro campioni analizzati presentano caratteristiche generali diverse; in generale si tratta comunque di una coltre prevalentemente sabbiosa, a tratti ghiaiosa e a tratti limosa. Le differenti granulometrie sono dovute al punto di campionamento lungo il pendio; infatti P20 si trova al piede del pendio, P25 su una cresta a fianco di un rio, P30 su una cresta a nord e P35 lungo il pendio nella zona centrale. Si nota perciò che gli elementi più fini tendono a depositarsi al piede o in conche mentre le ghiaie e le sabbie più grossolane si trovano sui crinali.

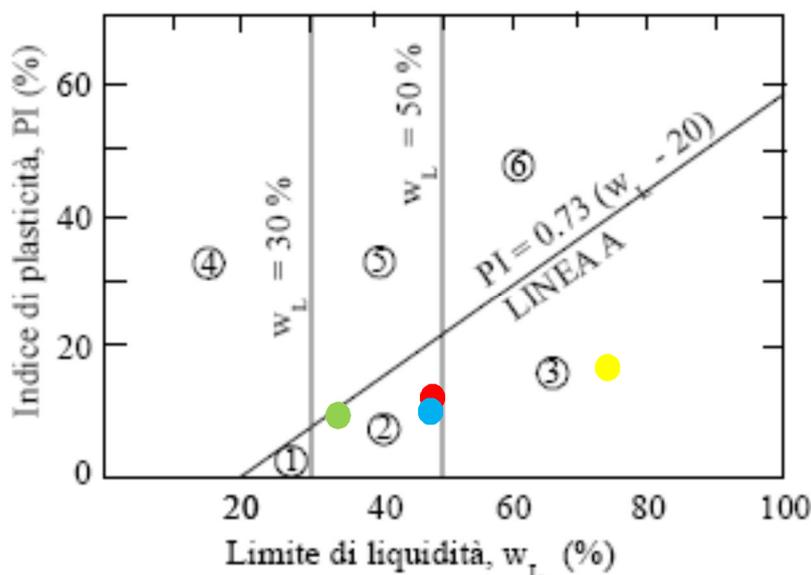


Figura 29 Carta di plasticità di Casagrande – Campione P20 (rosso), campione P25 (azzurro), campione P30 (verde), campione P35 (giallo)

3.6 Parametri idrologici e caratteristiche idrologiche

La curva granulometrica della coltre è stata utilizzata per caratterizzare il terreno dal punto di vista idrologico. Nella meccanica dei terreni la relazione costitutiva tra il contenuto d'acqua (gravimetrico o volumetrico, od il grado di saturazione) e la suzione, a pressione netta nulla, è nota come curva caratteristica (SWCC – Scott Sillers & All., 2001). Nella letteratura scientifica sono disponibili numerose espressioni matematiche, di natura empirica e/o puramente teorica, per la definizione della SWCC. Molte di queste equazioni risultano definite da tre parametri, generalmente funzioni della posizione del punto di flesso e della pendenza della curva stessa.

Inoltre esiste una correlazione intrinseca tra la curva caratteristica e la curva di distribuzione porosimetrica, in considerazione del fatto che il diametro equivalente dei pori è funzione della suzione, attraverso l'equazione di capillarità. La curva di distribuzione porosimetrica è a sua volta funzione dalla distribuzione granulometrica.

Nel 1981 Arya e Paris proposero un modello empirico per la determinazione della curva caratteristica. I parametri richiesti sono:

- la curva di distribuzione granulometrica;
- la porosità;
- la densità per unità di massa (ρ_s, ρ).

Nel modello si assume che il volume dei pori sia equivalente a quello di tubi capillari cilindrici e che i grani abbiano forma sferica. Per ciascuna frazione granulometrica (i), il raggio dei pori (r_i) è funzione del raggio medio dei grani (R_i), secondo l'espressione:

$$r_i^2/R_i^3 = 4 n_i e / 3h_i$$

dove n_i e h_i rappresentano rispettivamente il numero di granelli e la lunghezza totale dei pori cilindrici, nell'unità di massa. Per una disposizione cubica:

$$h_i = 2 n_i R_i \qquad r_i = R_i [2e/3]^{1/2}$$

D'altra parte, per un tubo capillare di raggio r_i , l'equazione di capillarità può scriversi:

$$(u_a - u_w)_i = s_i = 2T \cos\delta/r_i$$

dove T è la tensione superficiale dell'acqua ($T = 7.6 \cdot 10^{-2}$ N/m a 20°C) e δ è l'angolo di contatto all'interfaccia aria-acqua. Le precedenti equazioni per il calcolo di r_i e s_i permettono di calcolare, per ciascuna frazione granulometrica, il valore della suzione

necessario per desaturare il corrispondente volume dei pori di raggio r_i ; è poi immediato il calcolo del contenuto d'acqua volumetrico o del grado di saturazione.

È stato pertanto applicato il metodo di Arya & Paris (1981) ad alcune curve granulometriche per ottenerne le curve caratteristiche dei materiali (chiamate anche curve di ritenzione idrica). Questa tipologia di curva mette in relazione il contenuto volumetrico d'acqua con la variazione della suzione (come riportato nelle seguenti figure).

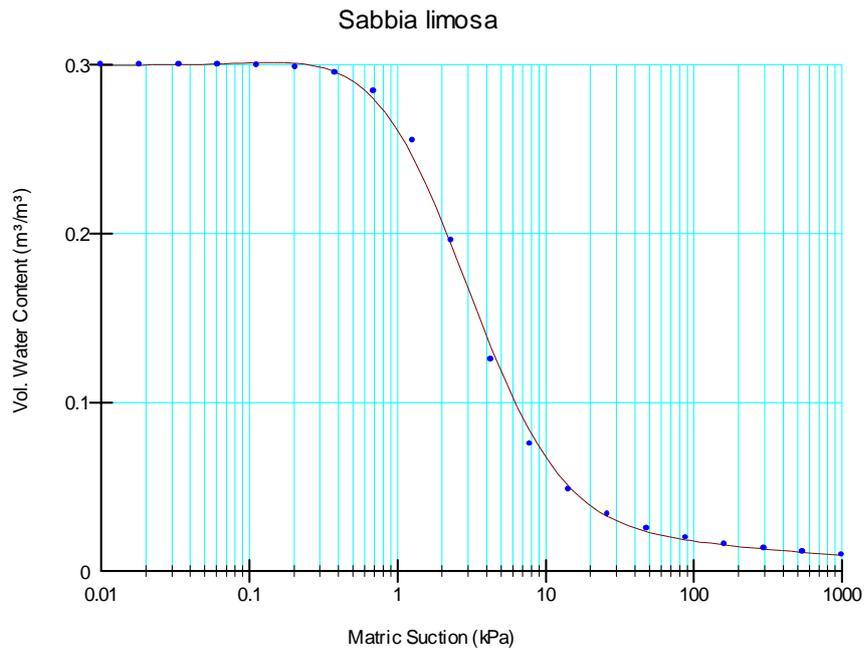


Figura 30 Curva caratteristica per la sabbia limosa

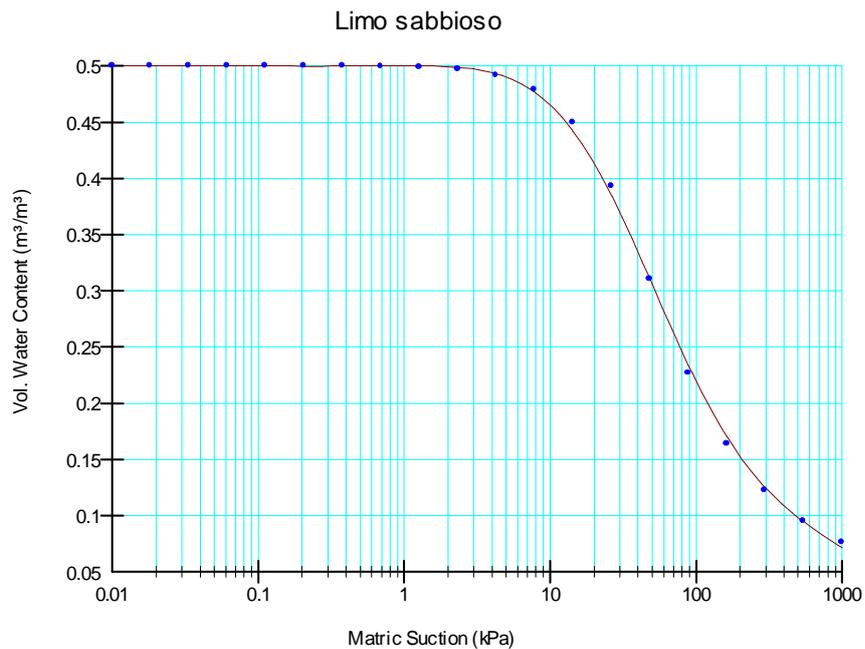


Figura 31 Curva caratteristica per il limo sabbioso

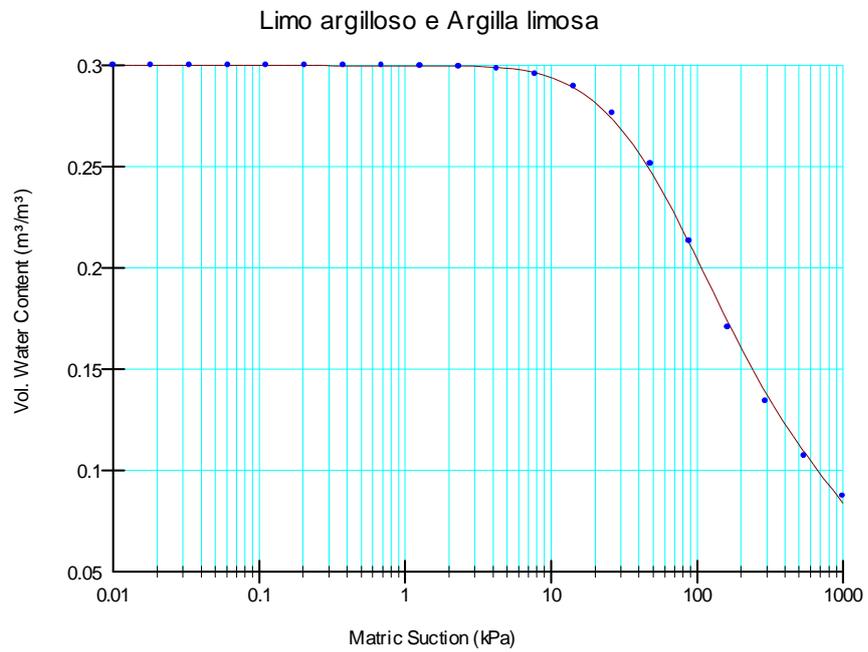


Figura 32 Curva caratteristica per il limo argilloso e per l'argilla limosa

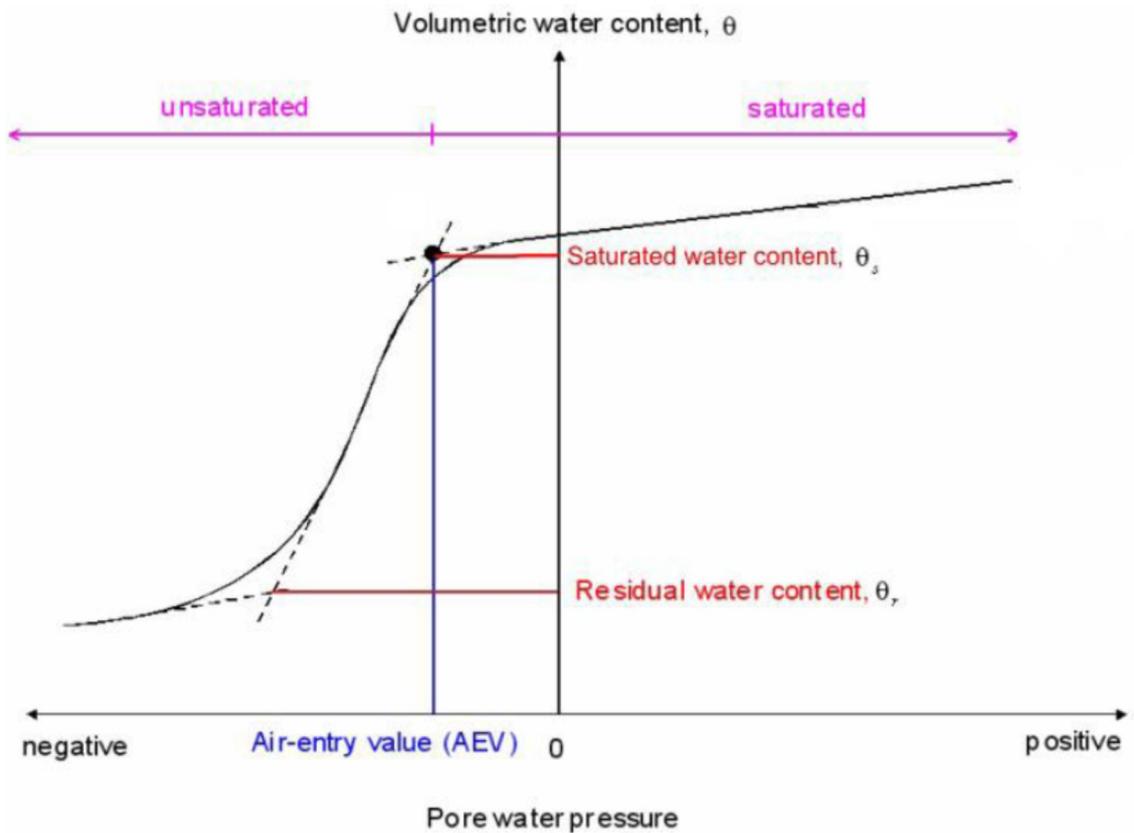


Figura 33 Grafico per ottenere i parametri caratterizzanti l'insaturo

Dall'analisi del grafico si ottengono i parametri fondamentali per la caratterizzazione del mezzo insaturo:

- Θ_{sat} : contenuto volumetrico a saturazione;
- Θ_r : contenuto volumetrico residuo;
- A_e : entry value – valore di suzione per cui l'aria inizia a filtrare nei pori.

È stato utilizzato il software SEEP-W della GeoStudio, versione 2012. Si tratta di un software per l'analisi della filtrazione in un mezzo poroso bidimensionale anche in condizioni di non completa saturazione; è pertanto possibile risolvere l'equazione di Richards in modo completo agli elementi finiti. Come valori di input occorre inserire il tipo di materiale esaminato, ottenendo la curva che lega la variazione di suzione al coefficiente di conducibilità idraulica, come evidenziato in Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

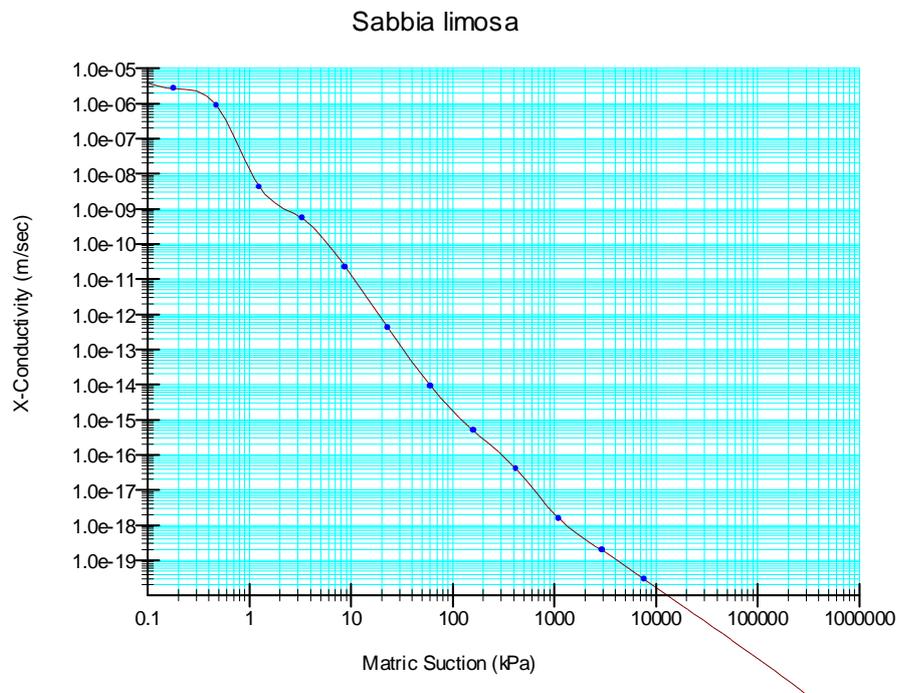


Figura 34 Correlazione tra coefficiente di conducibilità idraulica e suzione per la sabbia limosa

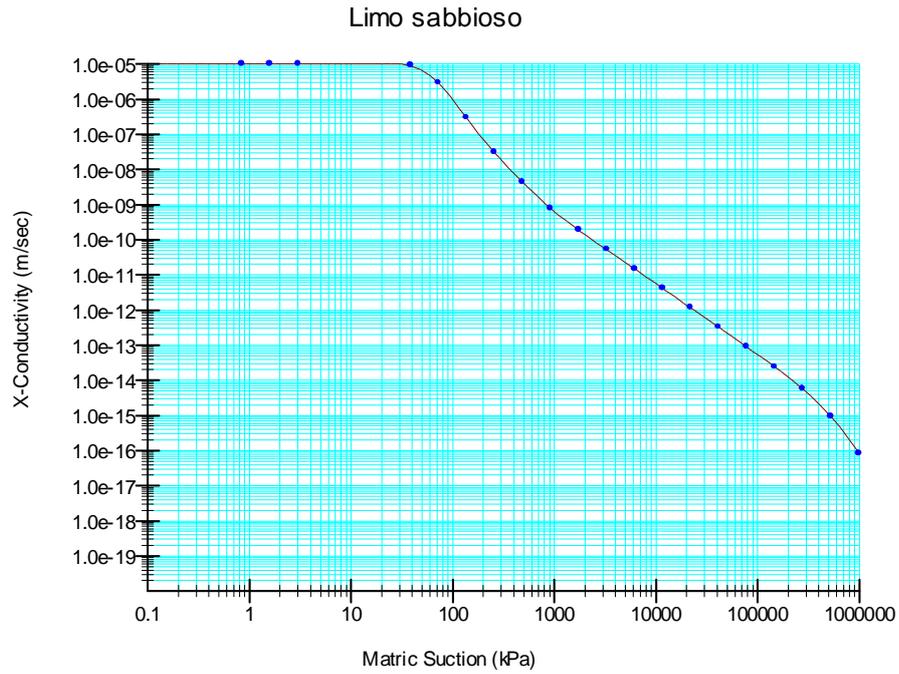


Figura 35 Correlazione tra coefficiente di conducibilità idraulica e suzione per il limo sabbioso

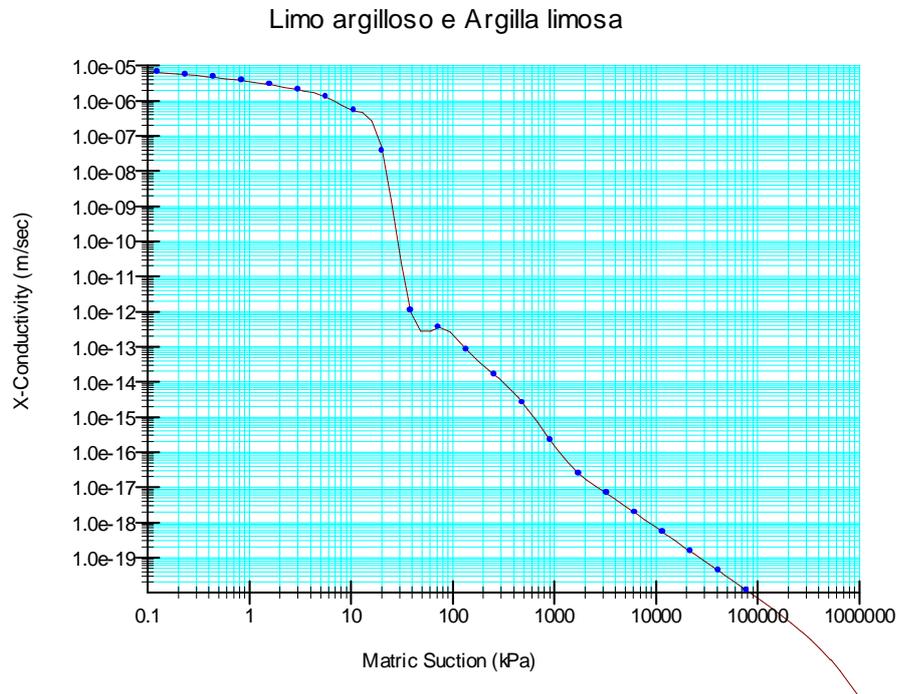


Figura 36 Correlazione tra coefficiente di conducibilità idraulica e suzione per il limo argilloso e per l'argilla limosa

Dalle analisi dei grafici sopra riportati, vengono ricavati il coefficiente di conducibilità idraulica a saturazione (K_s), il valore di air entry (A_e), il contenuto volumetrico d'acqua a saturazione (θ_s) e residuo (θ_r).

	Contenuto volumetrico a saturazione (θ_s)	Contenuto volumetrico residuo (θ_r)	Air entry value (A_e) [l/m]	Conducibilità idraulica a saturazione (K_s) [m/s]
Sabbia limosa	0.3	0.1	5	$5 * 10^{-5}$
Limo sabbioso	0.5	0.07	5	$1 * 10^{-5}$
Limo argilloso e argilla limosa	0.3	0.06	5	$2 * 10^{-5}$

Tabella 10 Tabella riassuntiva dei coefficienti θ_s , θ_r , A_e e K_s

I valori di coesione (c') e di angolo di attrito interno (Φ') sono stati ricavati da alcune prove triassiali e di taglio eseguite dalla Dott.sa Silvia Franceschini durante la sua tesi di dottorato, presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Bologna.

I valori ricavati sono i seguenti:

Φ'	30°
c'	2 kPa

Tabella 11 Tabella riassuntiva dei coefficienti Φ' e c'

4. Analisi deterministica della suscettività da frana

4.1 Introduzione

Nel presente capitolo vengono applicati alcuni modelli di previsione di spessore dei suoli e successivamente confrontati con i dati misurati in situ.

In letteratura esistono infatti numerosi modelli previsionali (per es. GIST, Z Model, S Model, Sexp Model); si tratta di formulazioni matematiche che, in funzione di alcuni parametri di input quali ad esempio la quota, la pendenza, la curvatura del pendio, calcolano lo spessore del suolo in un determinato punto.

In seguito è stata effettuata un'analisi di suscettività areale; è stato applicato il modello TRIGRS 2.0 (Baum et al. 2008). Tale modello rappresenta un'implementazione del modello di Iverson (2000) con un boundary impermeabile a profondità finita e permette di calcolare sia la filtrazione nell'insaturo che la propagazione diffusiva nel saturo.

Sono state pertanto effettuate diverse simulazioni con profondità del bedrock costante e con profondità interpolata tramite Kriging ordinario (con valori rilevati in situ e con valori calcolati tramite modelli previsionali).

Inoltre proprio lo spessore del suolo al di sopra del bedrock influenza fortemente la tipologia di frana e il suo innesco. La zona appenninica in oggetto è caratterizzata da un bedrock ricoperto da terreno sciolto con profondità che variano dai pochi centimetri fino oltre i 150 cm nelle zone maggiormente di deposito. La granulometria varia a seconda della litologia presente nell'area.

Particolare fondamentale è inoltre la topografia dell'area; lo spessore della coltre dovrebbe esser minore a monte e maggiore a valle, ipotizzando una disgregazione temporale del bedrock con la parte granulare che si deposita verso il piede del versante. Ciò non sempre avviene o, se avviene, spesso viene mascherata da altri fattori. Infatti in alcuni casi a valle gli spessori di coltre sono spesso limitati. Questo può esser dovuto a diversi fattori:

- Dilavamento da parte di esondazioni dei corsi d'acqua;
- Pendenze del terreno troppo scoscese per permetterne un accumulo;
- Influenza dell'uomo con alterazione dello strato naturale.

Gli spessori maggiori si ritrovano pertanto in zone topograficamente omogenee o all'interno di alcune vallette.

4.2 Metodi per la previsione dello spessore del suolo

In letteratura sono riportati diversi modelli previsionali dello spessore del suolo. Tali modelli prendono in considerazione gli aspetti idrologici, idrogeologici, morfologici e geotecnici del versante, tentando di riprodurre i fenomeni fisici che avvengono nel pendio e che determinano la formazione di una coltre eluvio-colluviale.

Nell'ambito del lavoro di tesi sono stati considerati i seguenti modelli:

- GIST model (Segoni [2008], Segoni and Catani [2008], Catani et al. [2010]);
- Modelli topografici (Salunier et al. [1997], Salciarini et al. [2006], Bleius et al. [2009], De Rose [1996], Godt et al. [2008]).

4.2.1 GIST model

Uno dei metodi applicabili per il calcolo dello spessore del suolo è il GIST (Geomorphologically Indexed Soil Thickness). Si tratta di un modello empirico che combina parametri geomorfologici con fattori geologici. È stato sviluppato da Segoni e Rossi tra gli anni 2008-2010.

Il modello GIST ha un'applicabilità a livello di scala di bacino, con un'analisi approfondita pixel per pixel, e può essere implementato su software GIS commerciali.

Il modello si basa su tre fattori principali:

- C: curvatura del pendio;
- P: posizione lungo il profilo;
- S: inclinazione del pendio.

Questi parametri hanno un intervallo di variabilità tra 0 e 1 dove un valore maggiore indica la probabilità di avere un basso spessore di suolo. I tre fattori possono essere attribuiti pixel per pixel e pertanto possono variare a seconda della zona indagata. Il fattore C è normalmente inversamente proporzionale alla curvatura, tranne nei casi in cui vi sono abbondanti accumuli di materiale alla base del pendio, in quel caso vi è una proporzionalità diretta. Il fattore P è invece legato alle caratteristiche geometriche del pendio. Il prodotto di questi tre fattori, C, P e S, è pertanto trasformato in un valore di spessore del suolo, calibrando il risultato alla tipologia litologica presente nell'area e ad alcune misurazioni in situ dello spessore.

4.2.2 Modelli topografici

Altri metodi speditivi utilizzabili sono quelli topografici che correlano lo spessore del suolo a singoli valori topografici. Il metodo base fu ideato da Saulnier (1997) e sviluppato negli anni successivi da altri autori (Salunier et al. [1997], Salciarini et al. [2006], Bleius et al. [2009], De Rose [1996], Godt et al. [2008]). Si tratta di metodi approssimativi, ma applicabili facilmente su grande scala, che consentono di ottenere risultati abbastanza attendibili senza la necessità di estese campagne sul campo.

4.2.2.a Z Model

Il modello Z lega lo spessore del suolo, ritenendolo inversamente proporzionale alla quota, secondo una legge lineare, derivata da alcune misure fatte sul campo per calibrare il modello. Il metodo si basa sull'idea che a quote maggiori prevalga l'erosione, mentre a quote inferiori sia maggiore la fase di deposito, con conseguente legge lineare di correlazione.

La formula applicata è la seguente:

$$h_i = h_{max} - \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} (h_{max} - h_{min})$$

dove

- z_{max} è la quota massima;
- z_{min} è la quota minima;
- h_{max} è l'altezza massima di suolo sopra il bedrock;
- h_{min} è l'altezza minima di suolo sopra il bedrock;
- z_i è la quota nel punto preso in esame;
- h_i è l'altezza di suolo sopra il bedrock nel punto preso in esame.

Nell'area di tesi sono stati calcolati, per tutti i punti oggetto di campionatura, la quota altimetrica e, tramite la formula sopra riportata, è stata calcolata l'altezza del suolo sopra il bedrock. Come h_{max} è stato utilizzato 112 cm mentre come h_{min} 2 cm.

4.2.2.b S Model

Il modello S lega lo spessore del suolo, ritenendolo inversamente proporzionale all'inclinazione del pendio, secondo una legge lineare, derivata da alcune misure fatte sul campo per calibrare il calcolo. Il metodo si basa sul concetto che nelle zone più scoscese i processi erosivi siano maggiori, mentre nelle zone più pianeggianti la fase di deposito sia facilitata, garantendo pertanto un maggiore spessore dei suoli.

La formula applicata è la seguente:

$$h_i = h_{max} \left[1 - \frac{\tan\theta_i - \tan\theta_{min}}{\tan\theta_{max} - \tan\theta_{min}} \left(1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right]$$

dove

- Θ_{max} è l'angolo massimo di pendenza del pendio;
- Θ_{min} è l'angolo minimo di pendenza del pendio;
- h_{max} è l'altezza massima di suolo sopra il bedrock;
- h_{min} è l'altezza minima di suolo sopra il bedrock;
- Θ_i è l'angolo di pendenza del pendio nel punto preso in esame;
- h_i è l'altezza di suolo sopra il bedrock nel punto preso in esame.

Nell'area di tesi sono stati calcolati, per tutti i punti oggetto di campionatura, l'angolo di pendenza e, tramite la formula sopra riportata, è stato calcolata l'altezza del suolo sopra il bedrock. Come Θ_{max} è stato utilizzato 54° mentre come Θ_{min} 19° .

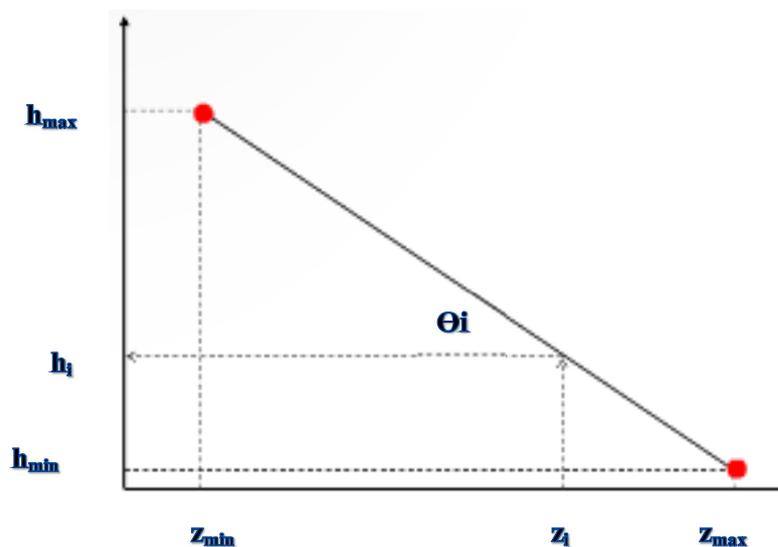


Figura 37 Z Model e S Model – Saulnier et al. [1997]

4.2.2.c Sexp Model

Il modello Sexp è molto simile al modello S. Lega l'inclinazione del pendio allo spessore dei suoli, ma con una legge esponenziale. Infatti si ipotizza che lo spessore del suolo diminuisca più rapidamente con l'incremento dell'inclinazione del pendio.

La formula applicata è la seguente:

$$h_i = 14 * e^{-0.0693 * \alpha_i}$$

Dove α_i è l'angolo di pendenza del pendio nel punto analizzato.

Sono stati pertanto calcolati per tutti i punti oggetto di campionatura l'angolo di pendenza e, tramite la formula sopra riportata, è stato calcolata l'altezza del suolo sopra il bedrock.

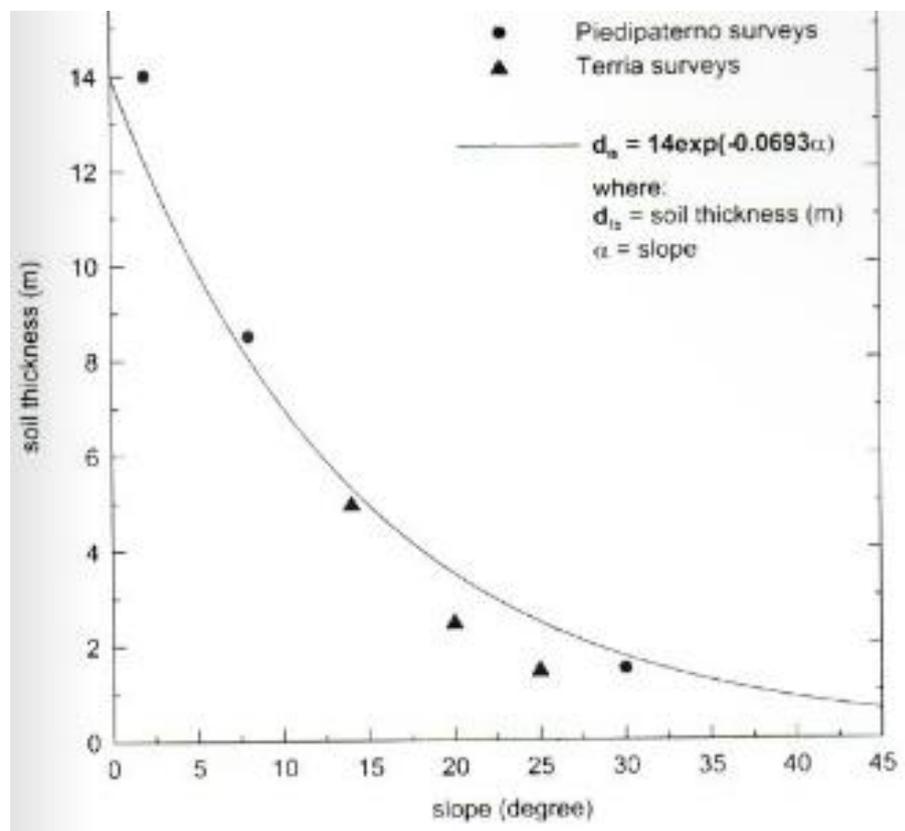


Figura 38 Sexp Model – De Rose [1996], Salciarini et al. [2006]

Il modello Sexp, applicando una formulazione esponenziale correlata alla pendenza del pendio, ipotizza uno spessore di coltre maggiore con un angolo di pendenza basso, mentre uno spessore di coltre inferiore con un angolo di pendenza alto.

I valori di α dell'area di studio variano tra un minimo di 19° e un massimo di 54°.

4.2.3 Confronto con i valori misurati

Di seguito sono riportati i risultati del confronto tra spessori del suolo misurati e quelli calcolati con i tre modelli.

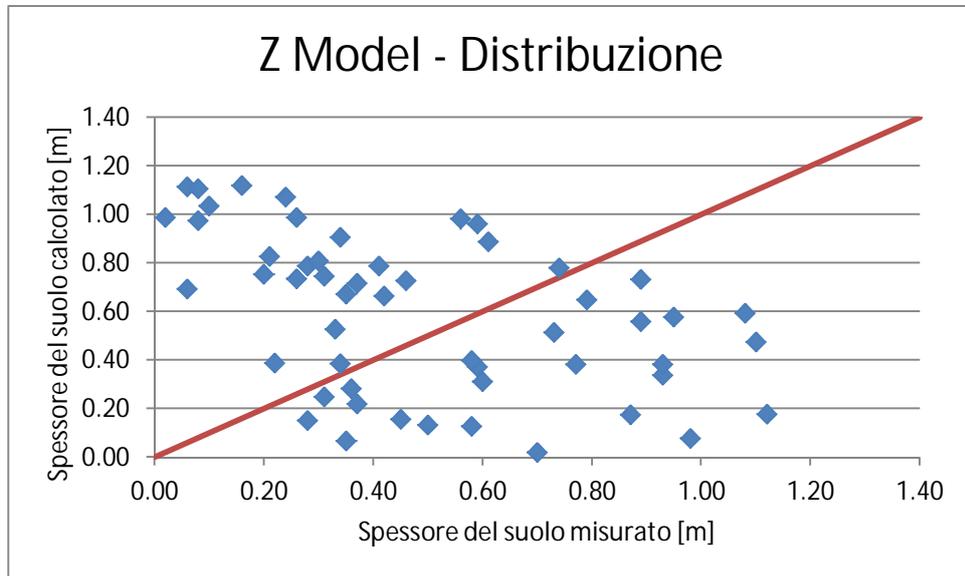


Figura 39 Z Model – Rapporto tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

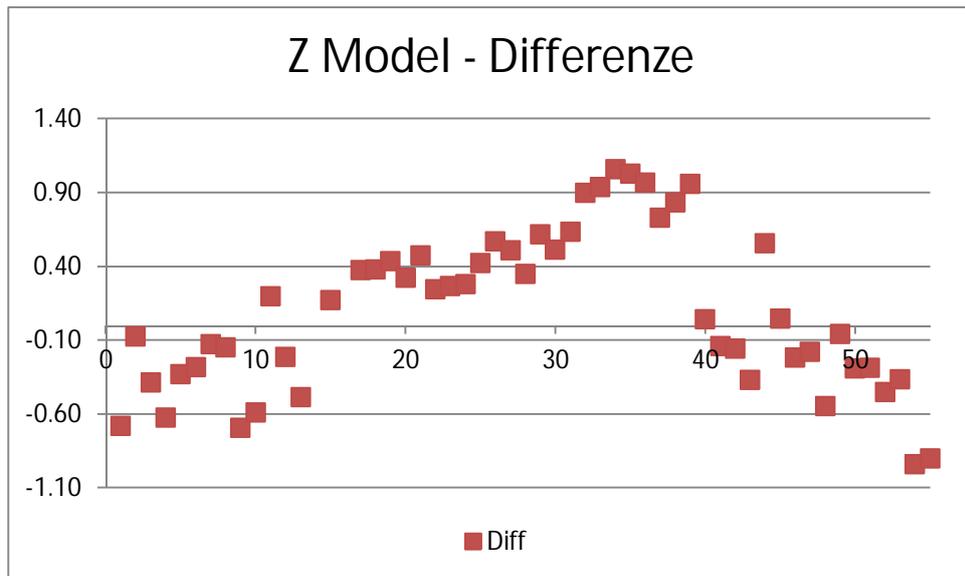


Figura 40 Z Model – Differenza tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

Con l'applicazione dello Z Model, si può notare come le differenze tra i valori misurati e quelli calcolati varino tra un minimo di -95 cm e un massimo di +105 cm. Si tratta pertanto di differenze abbastanza elevate, tali da far presupporre che il metodo di calcolo non sia adeguato all'area in esame. La distribuzione mostrata in Figura 39 evidenzia come non sia presente alcuna correlazione tra i valori misurati e i valori calcolati con Z Model; infatti i valori non si comportano come una distribuzione lineare, ma si distribuiscono casualmente.

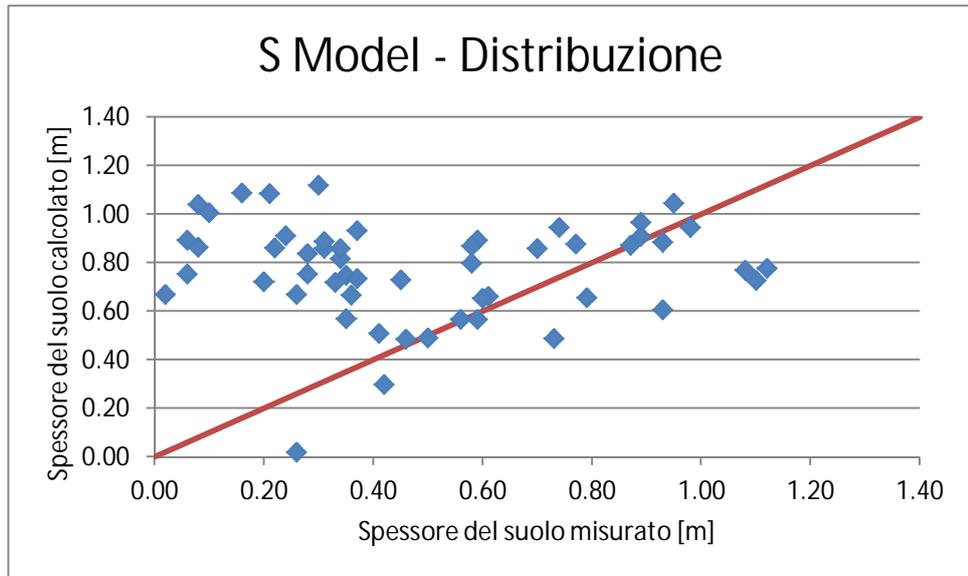


Figura 41 S Model – Rapporto tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

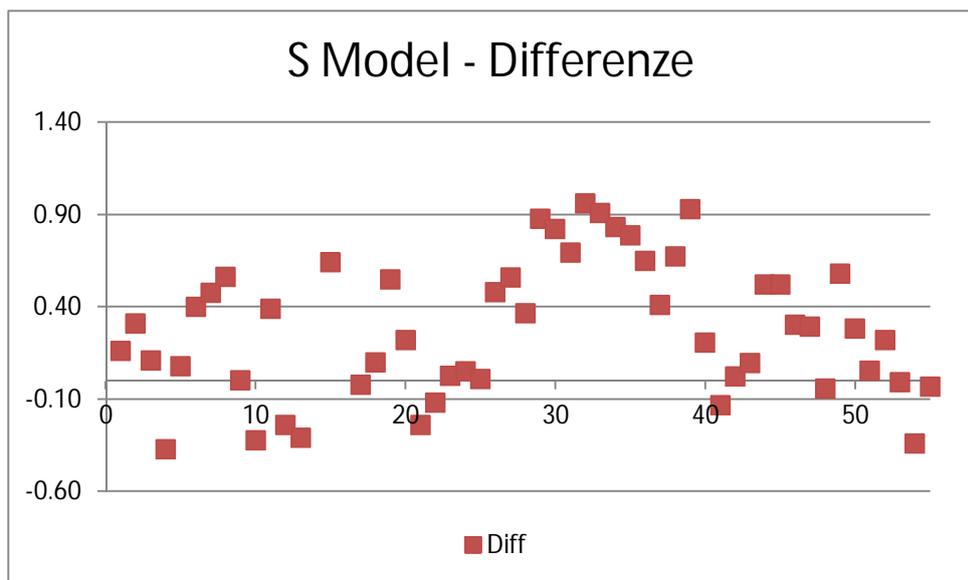


Figura 42 S Model – Differenza tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

Con l'applicazione del S Model si ritrovano risultati simili a Z Model, con differenze che variano da -38 cm a +96 cm. Tali differenze sono inferiori all'applicazione del metodo precedente e la loro distribuzione è leggermente migliore, anche se il modello sovrastima gli spessori di suolo presenti.

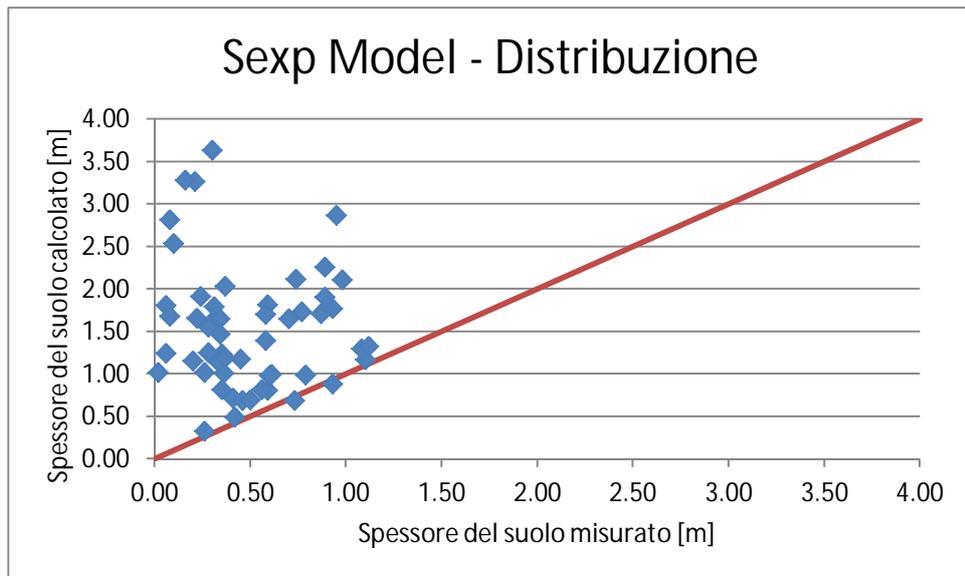


Figura 43 Sexp Model – Rapporto tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

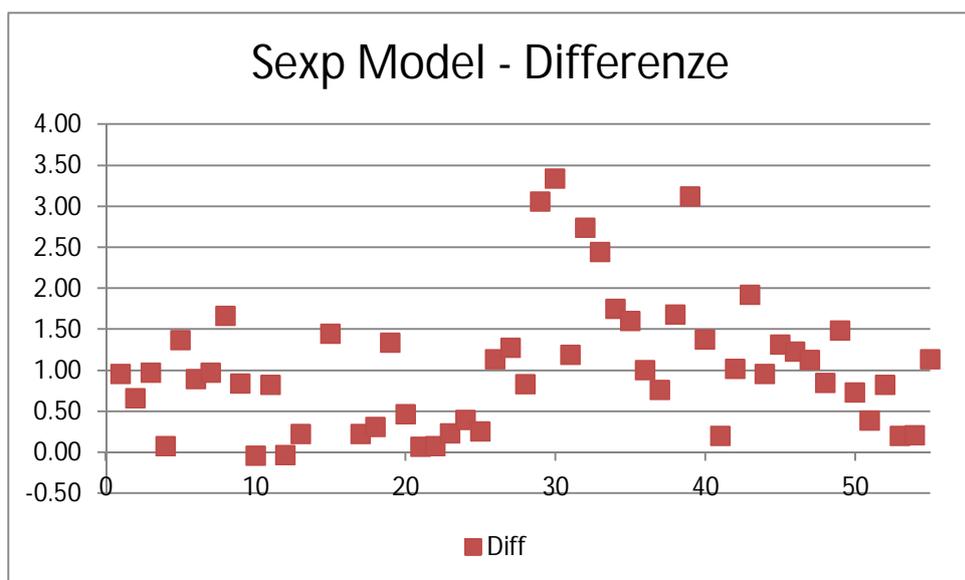


Figura 44 Sexp Model – Differenza tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

In ultima è stato applicato il Sexp Model. Tale modello di calcolo è totalmente distante dalla realtà. Il modello correla, in maniera esponenziale, la pendenza del pendio con lo spessore della coltre, ipotizzando maggiori accumuli dove l'angolo di pendenza è basso. La curva prevede infatti spessori di circa 3 m con angoli di 20°. Tale modello non è applicabile all'area di studio, dato che, in seguito alle misure in situ, il massimo spessore di suolo misurato è pari a 112 cm con un angolo del pendio di 33°, mentre lo spessore minimo è pari a 2 cm con un angolo di 37°.

Al di là di questi due valori estremi di spessore del suolo, analizzando gli angoli di pendenza del pendio, nel caso di un angolo di 19° (campione P32) sono stati misurati 30 cm di spessore del suolo, mentre il modello fornisce 363 cm e nel caso di un angolo di 54° (campione P23) sono stati misurati 26 cm, mentre il modello fornisce 32 cm, valore in questo caso attendibile.

Nelle figura seguenti (Figura 45, Figura 46 e Figura 47) sono state rappresentate le distribuzioni di frequenza dei residui, dove si evidenziano le discrepanze tra i valori di spessore del suolo misurati e quelli calcolati dai modelli.

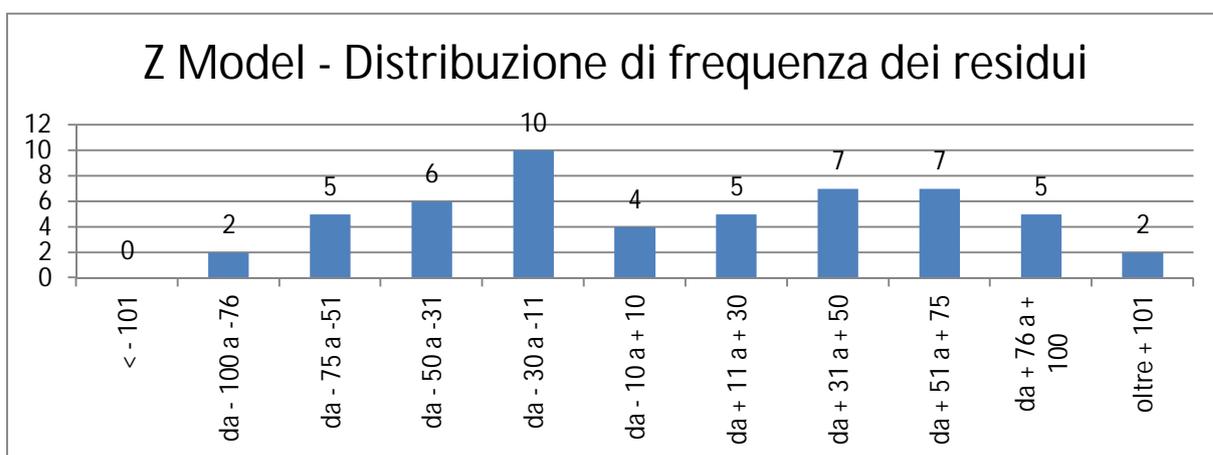


Figura 45 Z Model – Distribuzione di frequenza dei residui, calcolati come differenze tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

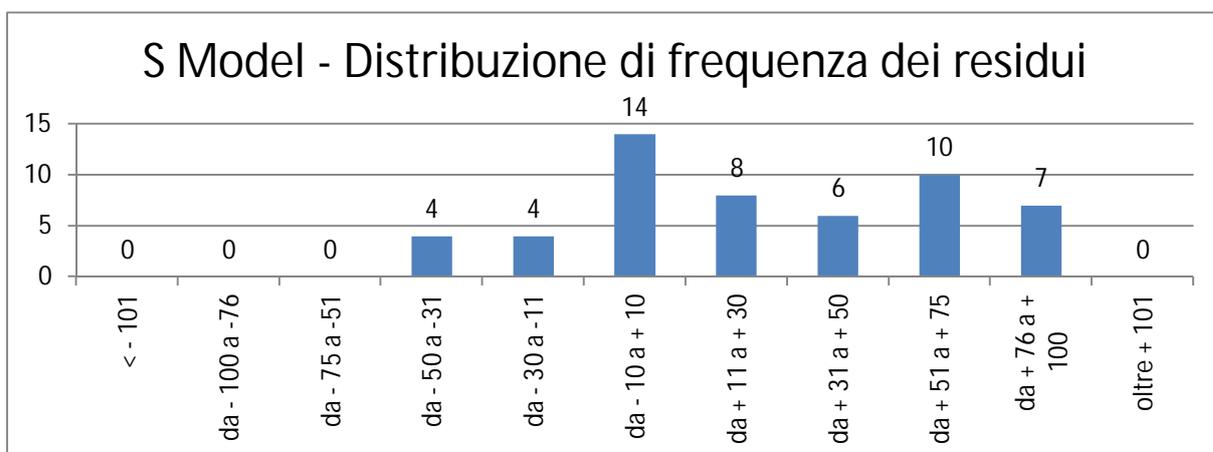


Figura 46 S Model – Distribuzione di frequenza dei residui, calcolati come differenze tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

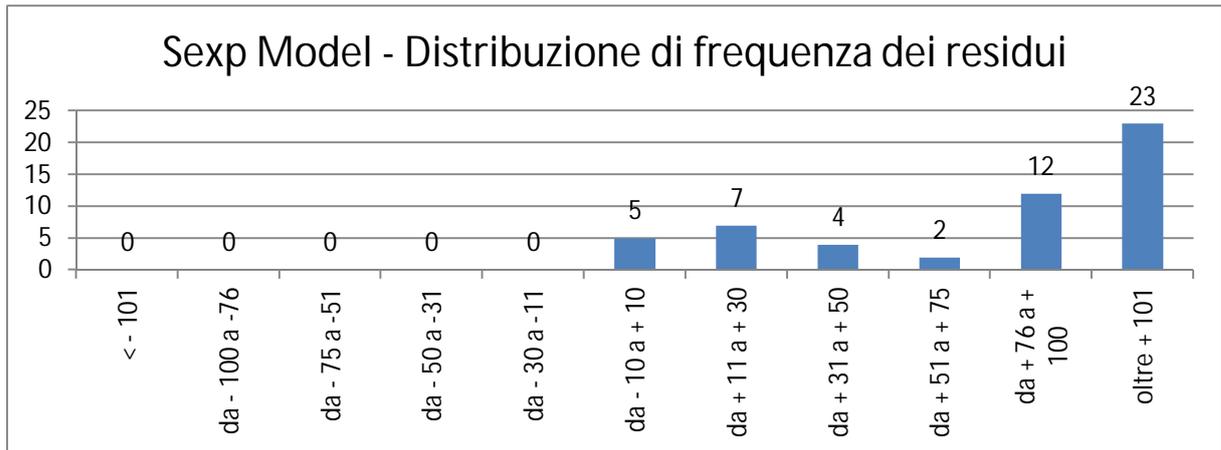


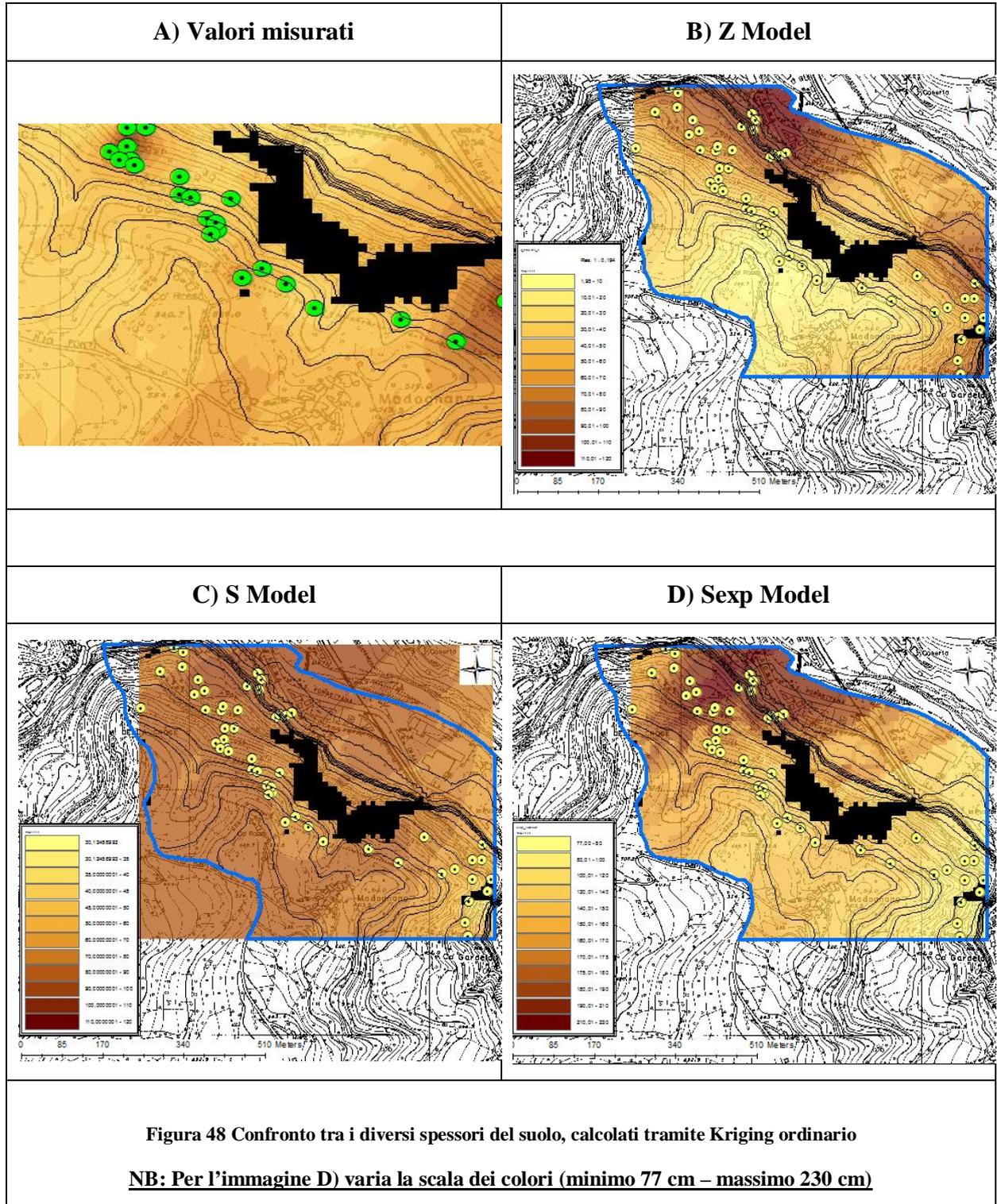
Figura 47 Sexp Model – Distribuzione di frequenza dei residui, calcolati come differenze tra i valori di spessore misurati e quelli calcolati

I residui della differenza di Z Model risultano abbastanza distribuiti; si hanno 23 valori negativi (valori di spessore del suolo sottodimensionati), 26 valori positivi (valori di spessore del suolo sovradimensionati) e 4 valori compresi in un intervallo ± 10 cm. Tale risultato, confermato anche dal grafico di distribuzione precedentemente illustrato, evidenzia come non ci siano apparenti correlazioni tra i valori misurati in situ e quelli calcolati con Z Model (funzione matematica correlata alla quota altimetrica).

Al contrario i residui della differenza di S Model risultano meglio distribuiti; si hanno 8 valori negativi (valori di spessore del suolo sottodimensionati), 31 valori positivi (valori di spessore del suolo sovradimensionati) e 14 valori in un intervallo ± 10 cm. S Model (funzione matematica correlata alla pendenza del pendio) correla meglio i valori misurati in situ e quelli calcolati.

I residui della differenza di Sexp Model risultano invece sovrastimati; si hanno 48 valori positivi (valori di spessore del suolo sovradimensionati) e 5 valori in un intervallo ± 10 cm. La modellazione esponenziale del pendio non tiene conto delle particolarità del pendio (per es. terrazzamenti agricoli, affioramenti, vegetazione, etc), amplificando i risultati di S Model.

Nelle immagini sottoriportate è possibile notare come lo spessore del suolo sia maggiore nei modelli S Model e Sexp model (in Sexp Model è diversa la scala di rappresentazione dei colori, essendo gli spessori decisamente maggiori agli altri tre casi proposti).



4.3 Modelli per la previsione di frane superficiali

La previsione areale delle frane superficiali è diventato in questi ultimi anni un importante argomento di ricerca, legato alla tutela e alla salvaguardia di persone e strutture. Lo sviluppo di modelli di previsione valuta il fattore di sicurezza di pendii potenzialmente instabili, accoppiando due modalità/modelli di calcolo, uno idrologico e uno di analisi di stabilità. Si tratta di due modelli differenti dato che il calcolo del fattore di sicurezza è spesso calcolato con il metodo dell'equilibrio limite tramite l'equilibrio delle forze, mentre i modelli idrologici l'equazione di flusso in stato stazionario o transitorio.

Nel presente lavoro di tesi è stato applicato il modello TRIGRS 2.0 (Baum et al. 2008). Tale modello rappresenta un'implementazione del modello di Iverson (2000) con un boundary impermeabile a profondità finita e permette di calcolare sia la filtrazione nell'insaturo che la propagazione diffusiva nel saturo.

4.3.1 TRIGRS 2.0 (Baum et al., 2008)

Il modello di calcolo TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-stability Model) è un codice di calcolo sviluppato in Fortran creato dall'USGS (United States Geological Survey) per individuare il momento e la localizzazione dell'innescò di frane superficiali calcolando la variazione dell'altezza di pressione e del Fattore di Sicurezza (FS) per ogni singola cella del dominio di calcolo.

Si tratta di un'evoluzione del modello idrologico di Iverson (2000), implementato da dalla prima versione di TRIGRS 1.0; le ipotesi di partenza sono pertanto la presenza di un bedrock a profondità finita, mentre la coltre soprastante è ipotizzata come la composizione di due strati, uno inferiore saturo e uno superiore insaturo.

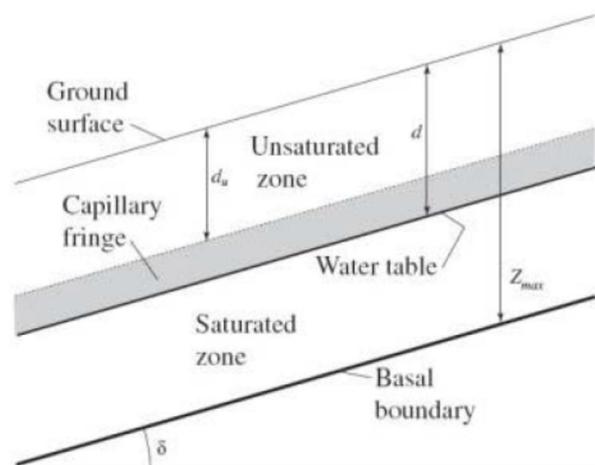


Figura 49 Dominio di calcolo di TRIGRS 2.0

Il modello di calcolo analizza la soluzione per l'infiltrazione verticale transitoria nell'insaturo con una soluzione per la propagazione delle onde di pressione diffusive in profondità nella zona satura. La zona satura assorbe parte dell'acqua che si infila attraverso la superficie del suolo a seguito di un evento di precipitazione; la restante parte attraversa e si accumula alla sua base al di sopra della tavola d'acqua iniziale; la zona insatura esercita un'azione di filtro sulla propagazione del segnale di infiltrazione, smussando, attenuando e ritardando il fronte di infiltrazione stesso.

L'acqua che si infila attraverso la zona insatura crea una risalita della tavola d'acqua rispetto al suo livello iniziale; l'aumento di pressione dovuto all'incremento della tavola d'acqua crea un'onda di pressione diffusiva che si propaga verso il basso. Per coltri poco spesse, come nella maggior parte dei casi, le onde di pressione si propagano in profondità, al limite impermeabile, molto velocemente.

Una forma dell'equazione monodimensionale di Richards per spiegare la filtrazione verticale nell'insaturo è quella espressa da Freeze and Cherry (1979) che considerando le coordinate proposte da Iverson (2000) diventa:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} \frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1 \right) \right]$$

Con Z profondità del bedrock, K coefficiente di conducibilità idraulica, α air entry value di Gardner.

Per linearizzare tale equazione, TRIGRS 2.0 usa il modello proposto da Gardner (1958) che descrive la dipendenza del coefficiente di conducibilità idraulica a saturazione e del contenuto volumetrico d'acqua della pressione dei pori.

La variazione della pressione dei pori nel tempo e con la profondità nella zona insatura è calcolata attraverso la:

$$\Psi(Z, t) = \frac{\cos \delta}{\alpha_1} \ln \left[\frac{K(Z, t)}{K_s} \right] + \Psi_0$$

Dove

$$\alpha_1 = \alpha \cos^2 \delta$$

e δ è la pendenza del versante e K_s = coefficiente di conducibilità idraulica a saturazione, ottenuto dall'espressione proposta da Gardner (1958):

$$K(\Psi) = K_s \exp((\alpha \Psi_0))$$

con $\Psi^* = \Psi - \Psi_0$

Gardner (1958) propone di utilizzare $\psi_0 = -1/\alpha$ al margine superiore della frangia capillare, in quanto $1/\alpha$ è l'altezza della frangia capillare rispetto alla tavola d'acqua iniziale. Se invece si vuole ottenere la soluzione in corrispondenza della tavola d'acqua iniziale, si usa $\psi_0 = 0$ come nel nostro caso.

Il parametro α introdotto da Gardner rappresenta un parametro di fitting tra i dati sperimentali e la curva teorica proposta. Corrisponde grossomodo al valore di air entry.

Per ottenere la variazione di pressione dei pori con la profondità e nel tempo, nell'equazione bisogna sostituire $k(Z,t)$ la cui espressione è fornita nell'equazione:

$$K(Z, t) = \sum_{n=1}^N H(t - t_n) \left\{ \begin{array}{l} I_{nz} - [I_{nz} - K_s \exp(\alpha_1 \psi_0) \exp[-\alpha_1 (d_u - Z)]] \\ -4(I_{nz} - I_{zLT}) \exp\left(\frac{\alpha_1 Z}{2}\right) \exp\left[-D_\psi \frac{(t - t_n)}{4}\right] \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin[\Lambda_m \alpha_1 (d_u - Z)] \sin(\Lambda_m \alpha_1 d_u)}{1 + \frac{\alpha_1 d_u}{2} + 2\Lambda_m^2 \alpha_1 d_u} \exp[-\Lambda_m^2 D_\psi (t - t_n)] \end{array} \right.$$

$$- \sum_{n=1}^N H(t - t_{n+1}) \left\{ \begin{array}{l} I_{nz} - [I_{nz} - K_s \exp(\alpha_1 \psi_0) \exp[-\alpha_1 (d_u - Z)]] \\ -4(I_{nz} - I_{zLT}) \exp\left(\frac{\alpha_1 Z}{2}\right) \exp\left[-D_\psi \frac{(t - t_{n+1})}{4}\right] \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin[\Lambda_m \alpha_1 (d_u - Z)] \sin(\Lambda_m \alpha_1 d_u)}{1 + \frac{\alpha_1 d_u}{2} + 2\Lambda_m^2 \alpha_1 d_u} \exp[-\Lambda_m^2 D_\psi (t - t_{n+1})] \end{array} \right.$$

Come detto in precedenza:

- T è il tempo;
- H (t - t_n) è l'Heaviside Step Function;
- I_{nz} è la superficie di flusso in un certo intervallo di tempo;
- I_{zLT} è la superficie di flusso stazionaria;
- Z = z/cosδ;
- d_u è la profondità verticale del margine superiore della frangia capillare;
- D_ψ = (α₁ * K_s) / (θ_s - θ_r) è la diffusività idraulica del suolo proposta da Freeze & Cherry (1979);

- I valori di Λ_m sono le radici positive dell'equazione pseudoperiodica caratteristica $\tan(\Lambda\alpha_1 d_u) + 2\Lambda$ ottenuti attraverso i metodi proposti da Press et al. (1986).

La risalita della tavola d'acqua può avvenire quando l'acqua che si infiltra e raggiunge la tavola d'acqua eccede la quantità massima che può essere drenata per gravità al margine superiore della zona satura.

Le equazioni che governano la risalita della tavola d'acqua sono molto complesse, non-lineari e spesso non risolvibili analiticamente; tale problema è stato risolto usando metodi numerici (Freeze & Cherry, 1979; Huyakorn & Pinder, 1983).

In sostanza per determinare la risalita della tavola d'acqua si confronta il flusso in eccesso (cioè quello non drenato per gravità) che si accumula in corrispondenza della tavola d'acqua iniziale (dove $\psi=0$) o al margine superiore della frangia capillare (dove $\psi=-1/\alpha$) con il volume dei pori liberi direttamente sopra la tavola d'acqua o la base superiore della frangia capillare.

Quindi si procede integrando il flusso in eccesso tra il tempo $t=0$ e qualsiasi tempo t di osservazione per ottenere il volume totale di acqua accumulatosi alla base della zona insatura.

Il modello prevede anche una valutazione semplificata del flusso superficiale di runoff, qui non descritto perché di scarso interesse nel caso in esame.

4.3.3 Dati di input in TRIGRS 2.0

Il modello TRIGRS 2.0 prevede l'utilizzo di altri applicativi interni (GridMatch, TopoIndex, UniConvert) al fine di creare i layers di input. In primis è necessario lanciare TopoIndex che, partendo dal Digital Elevation Model (DEM) permette di ottenere una serie di files per calcolare la direzione di flusso e il runoff (non rilevante nel caso in analisi).

I files così generati sono i files di input per il codice TRIGRS 2.0.

Si riporta un esempio del txt utilizzato per il calcolo.

```
Name of project (up to 255 characters)
TRIGRS, Test n 09
imax, row, col, nwf, tx, nmax
5354, 102, 93, 9281, 5, 50
nzs, mmax, nper, zmin, uww, t, zones
1000, 20, 10, 0.001, 9.8e3, 1, 2
zmax, depth, rizer0, Min_Slope_Angle (degrees)
1.12, 1.12, 5.89e-8, 0.
zone, 1
cohesion,phi, uws, diffus, K-sat, Theta-sat,Theta-res,Alpha
5e+03, 30., 1.8e+04, 5.0e-05, 1.0e-05, 0.3, 0.07, 5
zone, 2
cohesion,phi, uws, diffus, K-sat, Theta-sat,Theta-res,Alpha
2e+04, 40., 2.1e+04, 5.0e-09, 1.0e-12, 0.3, 0.07, 10
cri(1), cri(2), ..., cri(nper)
1.68e-7, 1.1e-6, 2.5e-6, 2.63e-7, 2.22e-6, 5.83e-7, 2.0e-6, 8.15e-7, 4.11e-6, 5.58e-7
capt(1), capt(2), ..., capt(n), capt(n+1)
0, 122400, 154800, 176400, 230400, 241200, 248400, 252000, 262800, 266400, 349200
File name of slope angle grid (slofil)
Data\Dati\slope.asc
File name of property zone grid (zonfil)
Data\Dati\zones3.asc
File name of depth grid (zfil)
none
File name of initial depth of water table grid (depfil)
none
File name of initial infiltration rate grid (rizerofil)
none
List of file name(s) of rainfall intensity for each period, (rifil())
none
File name of grid of D8 runoff receptor cell numbers (nxtfil)
Data\Export\TIdscelGrid_1zona.asc
File name of list of defining runoff computation order (ndxfil)
Data\Export\TlcelindxList_1zona.txt
File name of list of all runoff receptor cells (dscfil)
Data\Export\TIdscelList_1zona.txt
File name of list of runoff weighting factors (wffil)
Data\Export\TIwfactorList_1zona.txt
Folder where output grid files will be stored (folder)
Data\Export\
Identification code to be added to names of output files (suffix)
Test09_t=1
Save grid files of runoff? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
```

```
Save grid of minimum factor of safety? Enter Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of depth of minimum factor of safety? Enter Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of pore pressure at depth of minimum factor of safety? Enter Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid files of actual infiltration rate? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid files of unsaturated zone basal flux? Enter T (.true.) or F (.false.)
F
Save listing of pressure head and factor of safety ("flag")? (Enter -2 detailed, -1 normal, 0 none)
0
Number of times to save output grids
1
Times of output grids
349200.
Skip other timesteps? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Use analytic solution for fillable porosity? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Estimate positive pressure head in rising water table zone (i.e. in lower part of unsat zone)? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Use psi0=-1/alpha? Enter T (.true.) or F (.false.) (False selects the default value, psi0=0)
F
Log mass balance results? Enter T (.true.) or F (.false.)
F
Flow direction (enter "gener", "slope", or "hydro")
gener
Add steady background flux to transient infiltration rate to prevent drying beyond the initial conditions during periods of zero infiltration?
T
```

Tabella 12 TRIGRS 2.0 - Esempio di tabulato utilizzato

La caratterizzazione geometrica del versante in studio è avvenuta nel modo seguente:

- Calcolo dello slope (griglia delle pendenze) utilizzando il DEM della Regione Emilia-Romagna (griglia 10 x 10 m);
- Introduzione dello spessore di coltre:
 - Valore costante;
 - Valore spazialmente distribuito come griglia (file di Kriging dei valori misurati).
- Inserimento dei parametri geomeccanici (angolo di attrito interno ϕ , coesione c' , peso di volume del materiale γ_s);
- Inserimento delle variabili idrogeologiche (peso di volume dell'acqua γ_w , conducibilità idraulica K, diffusività D);

- Inserimento dati di infiltrazione nell'insaturo (air entry value α – Gardner [1958], contenuto volumetrico a saturazione θ_{sat} , contenuto volumetrico residuo θ_r).

L'area di calcolo è stata divisa in due zone, una relative al bedrock (Arenarie di Suviana), mentre l'altra è relativa alla coltre sabbiosa.

I dati utilizzati sono i seguenti:

Zona 1: Coltre sabbiosa							
c' (Pa)	Φ (°)	γ (N/m ³)	D (m ² /s)	K_{sat} (m/s)	α (1/m)	θ_{sat}	θ_r
5e+03	3e+01	1.8e+04	5e-05	1e-05	5	0,3	0,07
Zona 2: Affioramento di Arenaria di Suviana							
c' (Pa)	Φ (°)	γ (N/m ³)	D (m ² /s)	K_{sat} (m/s)	α (1/m)	θ_{sat}	θ_r
2e+04	4e+01	2.1+04	5e-09	1e-12	10	0,3	0,07

Tabella 13 Parametri geotecnici e idrologici per le due zone

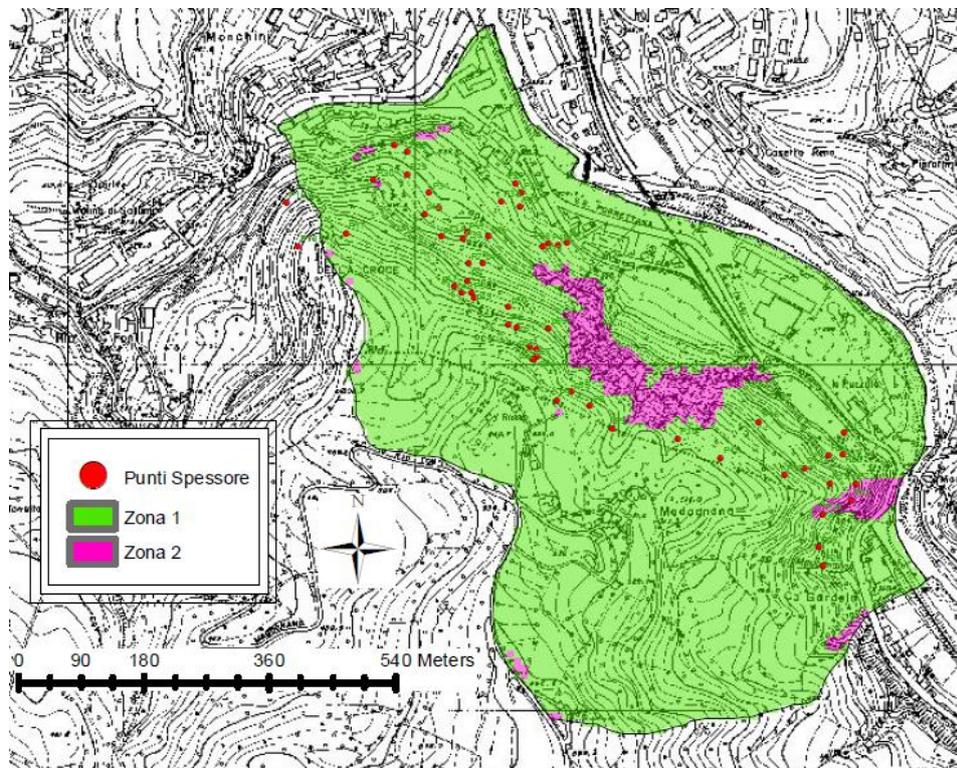


Figura 50 In verde è evidenziata la zona 1, mentre in viola la zona 2

Nelle immagini seguenti vengono riportate le principali griglie dell'area oggetto di studio, utilizzate da TRIGRS 2.0: DEM, Flow direction e Slope.

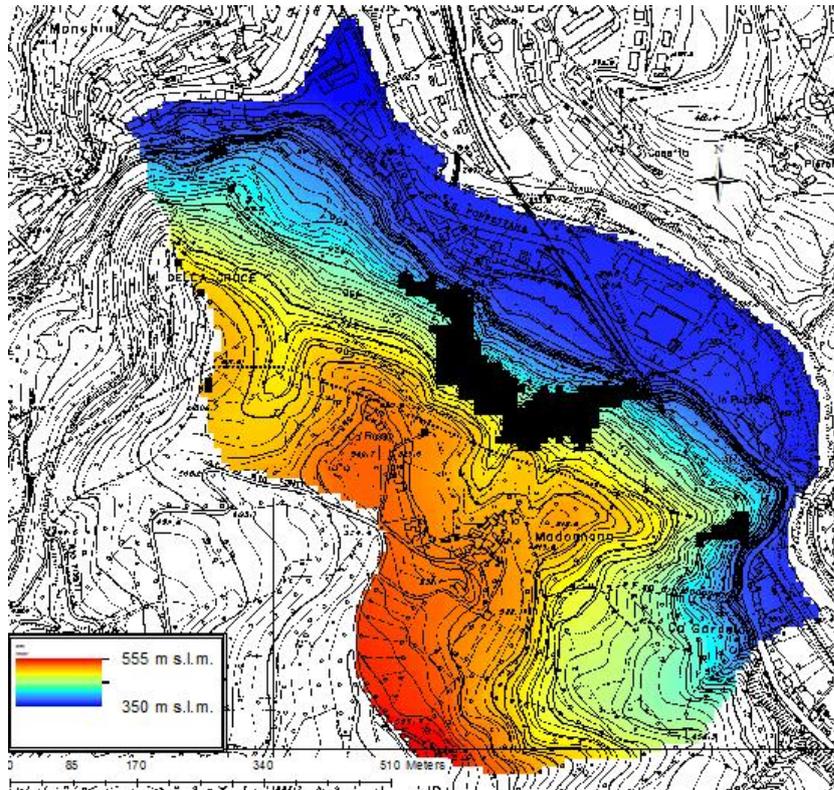


Figura 51 Griglia di input per TRIGRS 2.0 - DEM

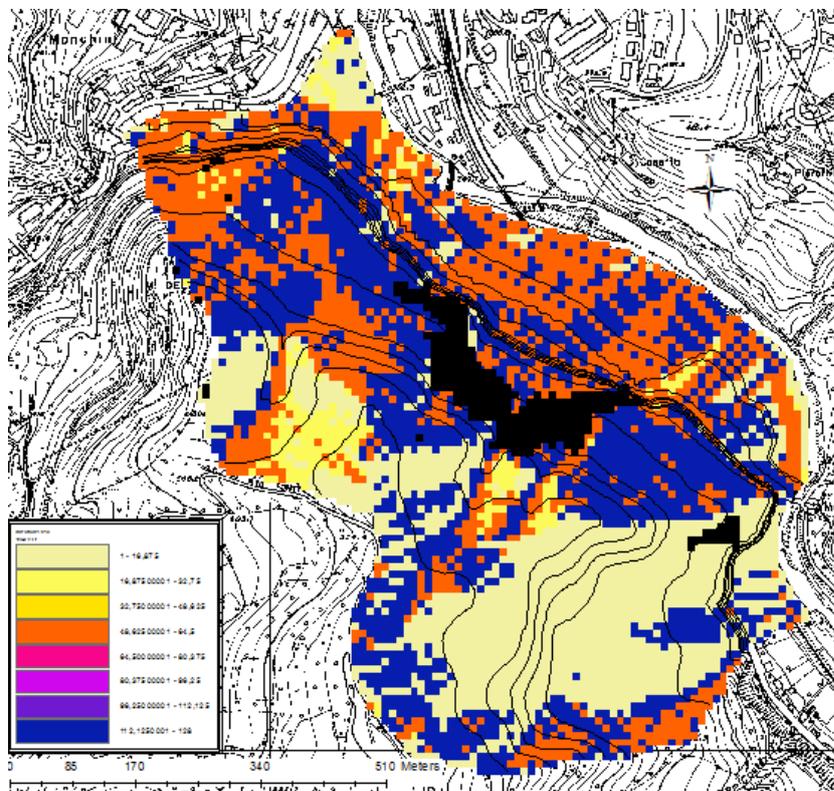


Figura 52 Griglia di input per TRIGRS 2.0 - Flow direction

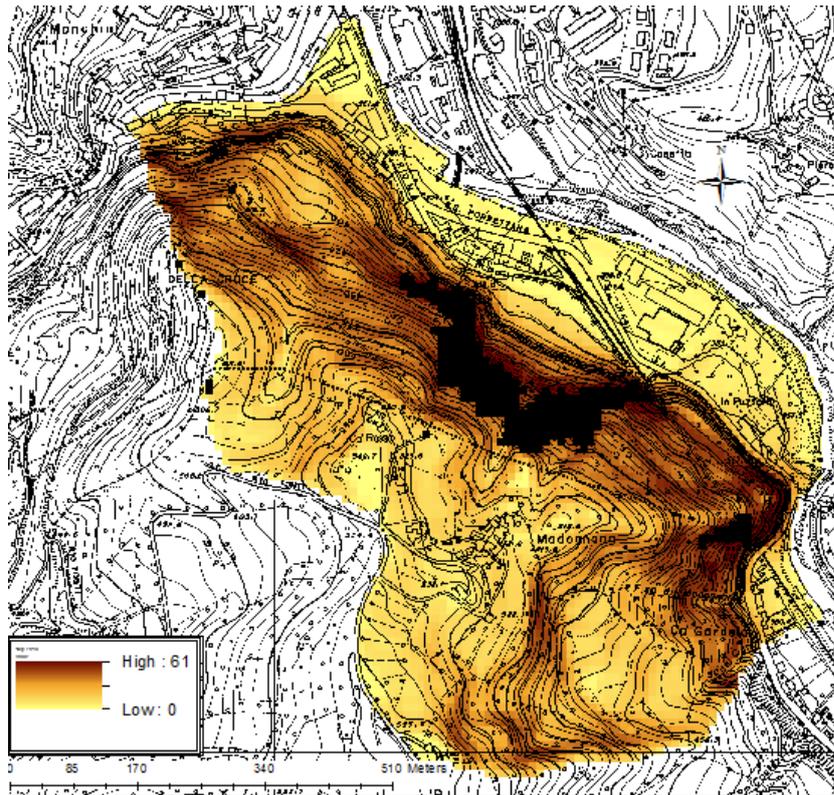


Figura 53 Griglia di input per TRIGRS 2.0 - Slope

Applicando la funzione interna del software ArcGis “Kriging”, con modalità ordinario, si è potuto interpolare i valori di spessore della coltre in modo da individuare la profondità del bedrock.

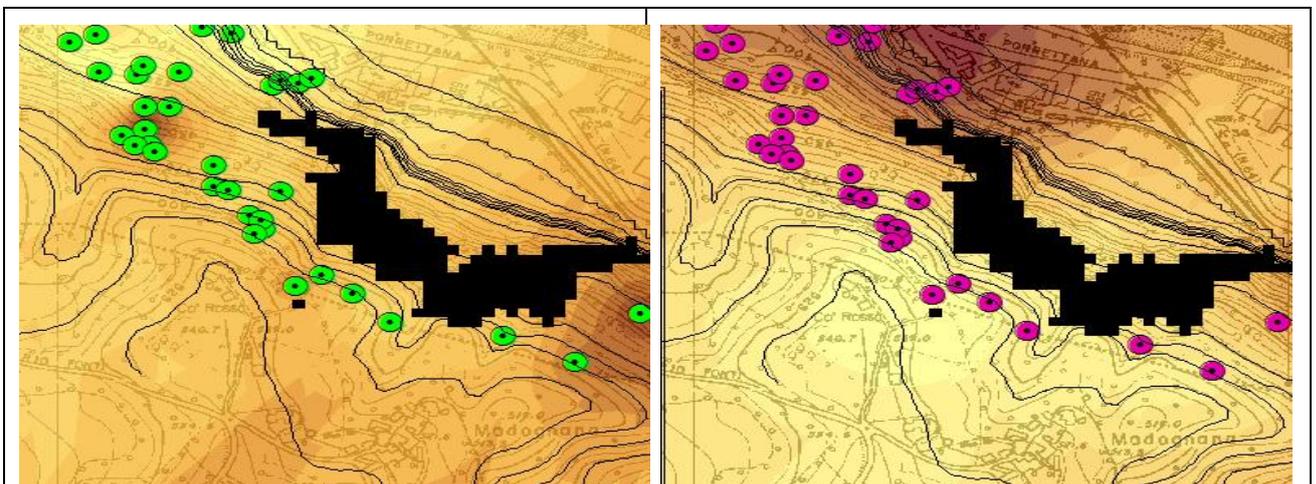


Figura 54 Griglia di input per TRIGRS 2.0 – Kriging con misure in situ (a sinistra) e Kriging con valori calcolati con Z Model (a destra) – In nero sono evidenziati gli affioramenti in roccia

Dal confronto dei due Kriging ottenuti, si notano alcune differenze; nel Kriging con i valori misurati vi sono alcune aree lungo il pendio dove lo spessore del suolo è maggiore, mentre nel Kriging con i valori di Z Model i valori sono molto più uniformi e graduati dall'alto in basso.

4.3.2 Evento meteo innescante

L'evento meteo innescante è riferito ai giorni 28-29-30 novembre 2008. Le precipitazioni iniziarono in maniera molto debole alle ore 1:00 del 28 novembre e fino alle ore 10:00 del 29 novembre si accumularono solamente 20 mm di pioggia. Dalle ore 10:00 si intensificò la precipitazione (massimo di 13,2 mm/ora). Durante la giornata del 30 novembre la precipitazione si attenuò per poi aumentare nuovamente alle ore 17:00.

La frana avvenne nella notte del 1° dicembre tra le ore 1:00 e le ore 2:00, con un picco di intensità di 14,2 mm/ora. Le precipitazioni continuarono fino alle ore 0:00 del 2 dicembre.

Pertanto, escludendo i primi 20 mm di pioggia, si ebbe una cumulata di 207 mm in 63 ore.

Per l'analisi con TRIGRS 2.0 sono stati valutati tre momenti temporali particolari:

- $T = 1$ s cioè in condizioni stazionarie;
- $T = 176.400$ s cioè in corrispondenza dell'inizio della precipitazione più intensa;
- $T = 349.200$ s cioè al termine dell'evento di precipitazione.

4.3.4 Risultati

I risultati delle analisi effettuate sono illustrati nelle immagini riportate nelle pagine seguenti (Figura 55, Figura 56 e Figura 57).

Come si può notare dal confronto delle immagini, le analisi con Kriging ordinario (partendo cioè da misure reali dello spessore della coltre) e le analisi con tavola d'acqua a profondità costante sono simili.

Inoltre l'analisi mette conferma come con l'aumentare della durata della precipitazione aumenti decisamente il numero di pixel "rossi" ($FS < 1$), localizzati principalmente lungo le aree a maggior pendenza.

Le due analisi risultano pertanto simili, evidenziando come, una volta individuato lo spessore massimo della coltre, sia indifferente applicare un Kriging ordinario degli spessori o tenere costante la profondità della tavola d'acqua.

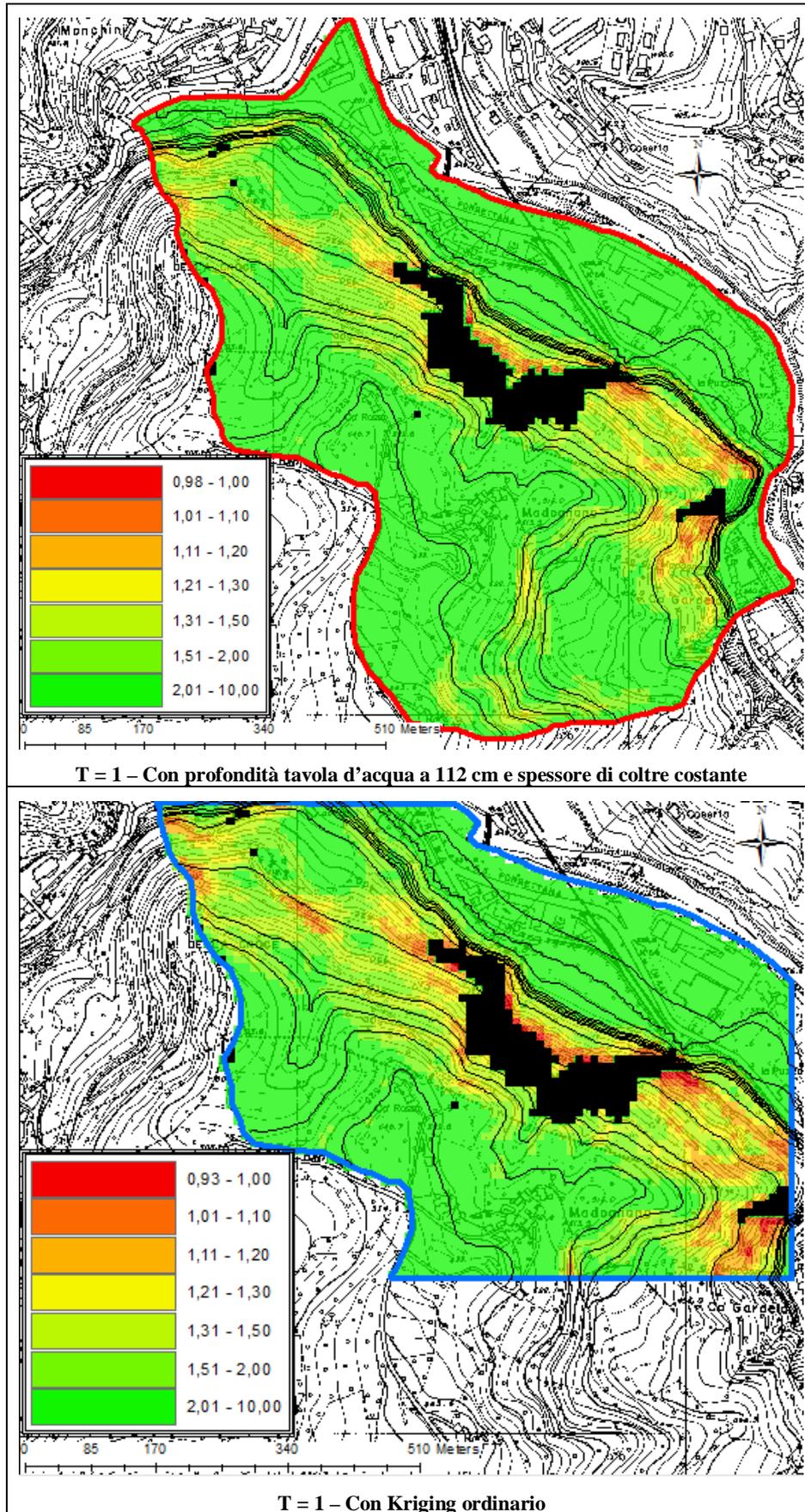


Figura 55 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 1)

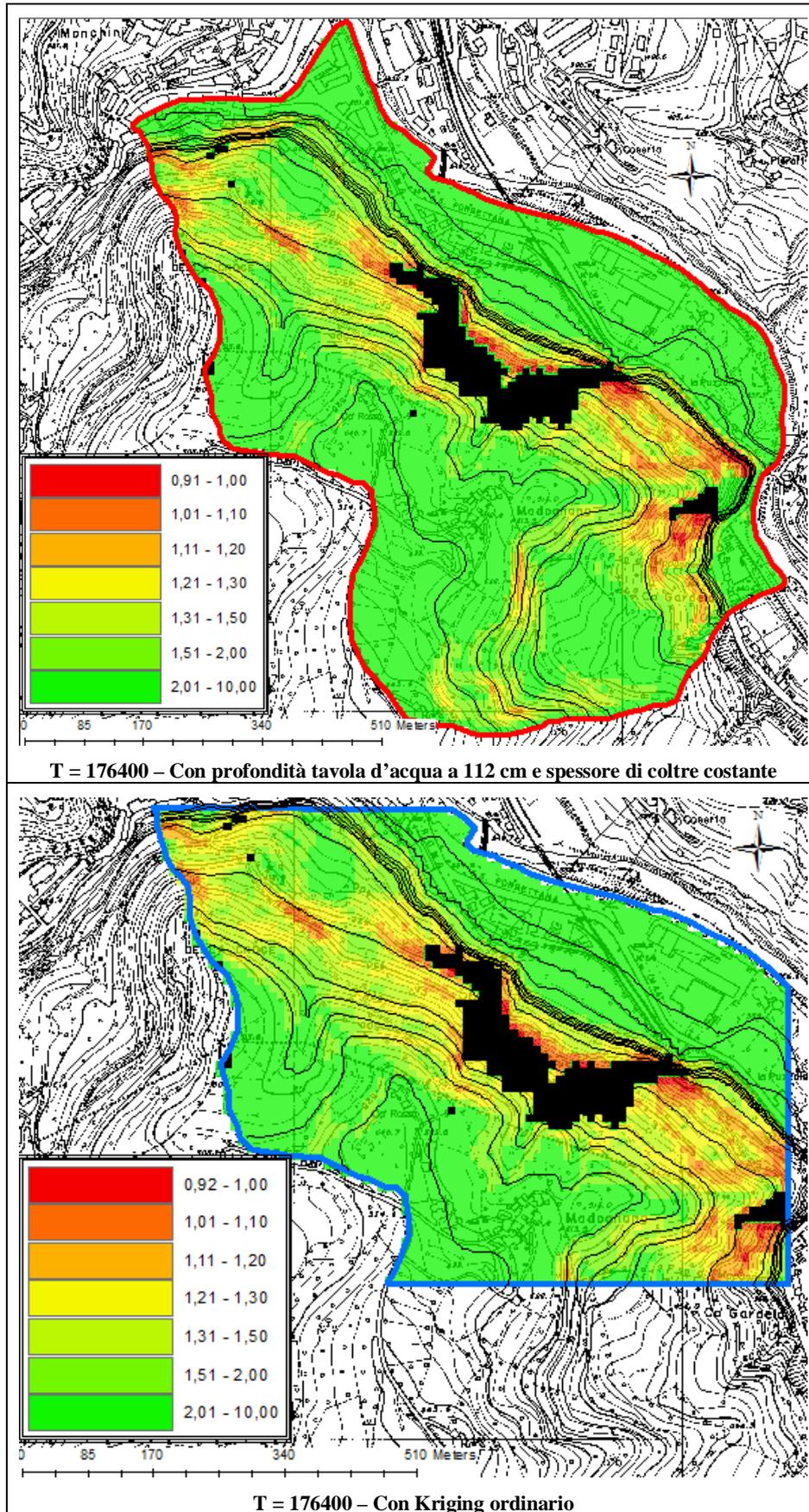


Figura 56 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 176400)

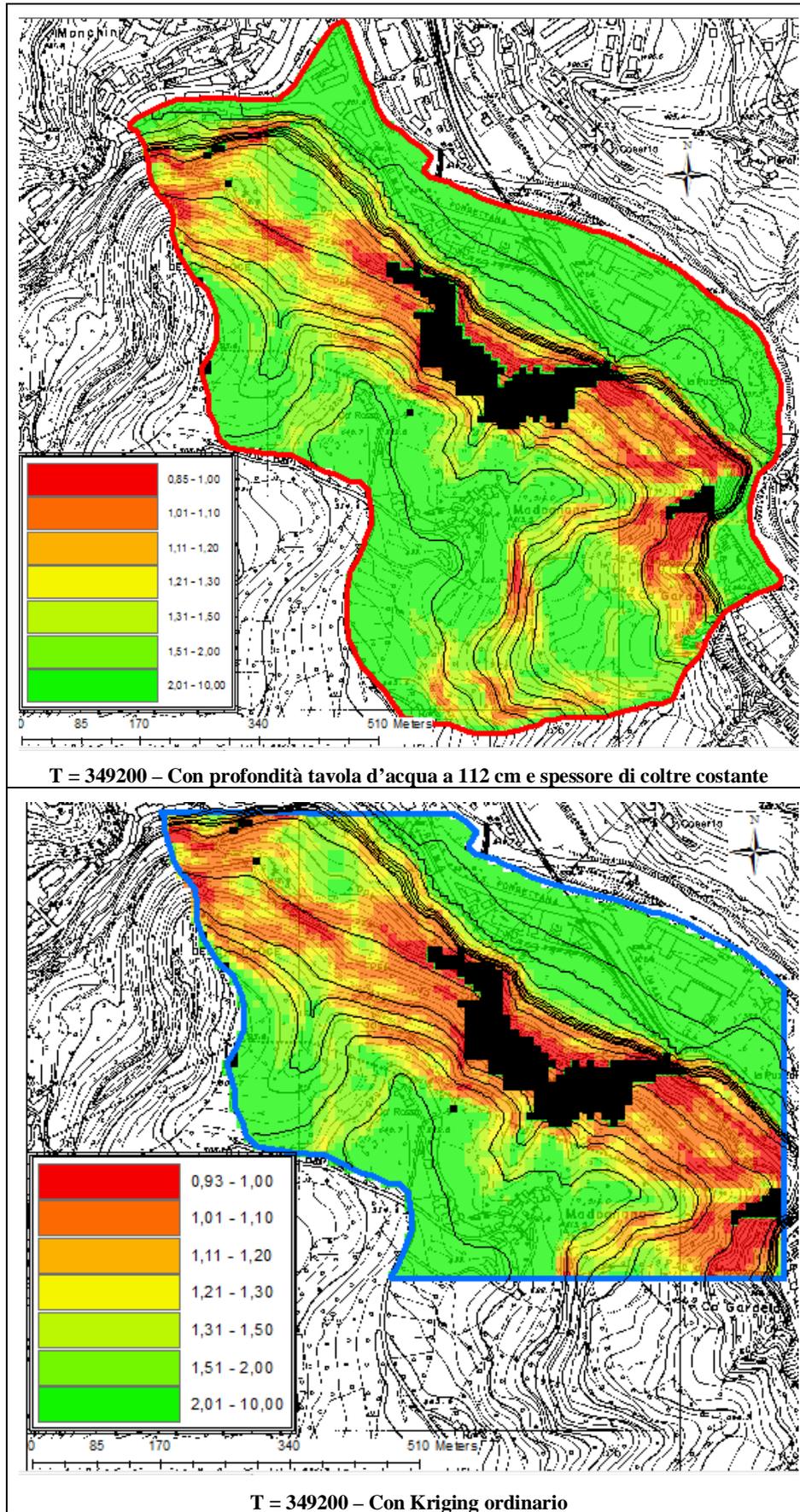
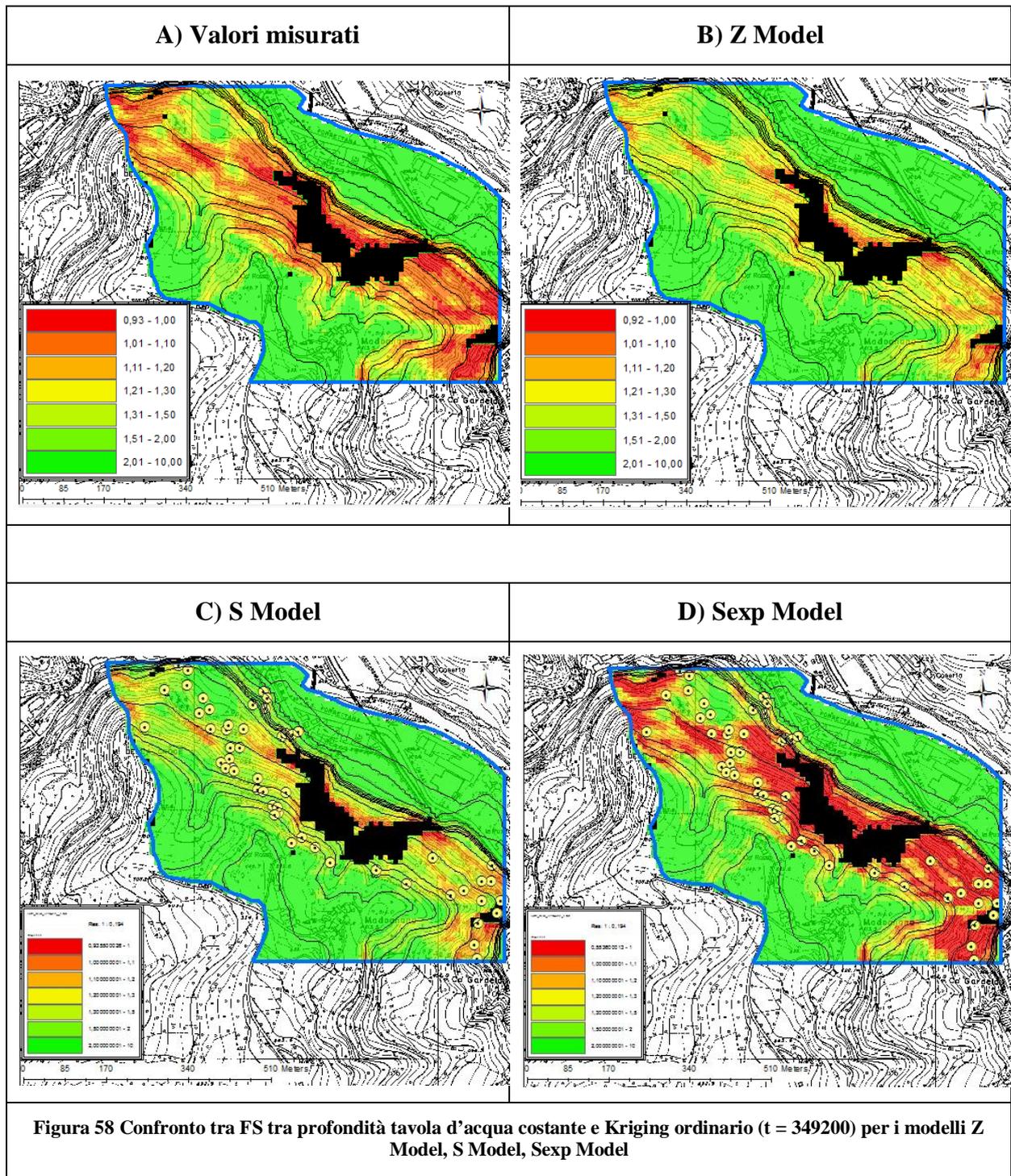


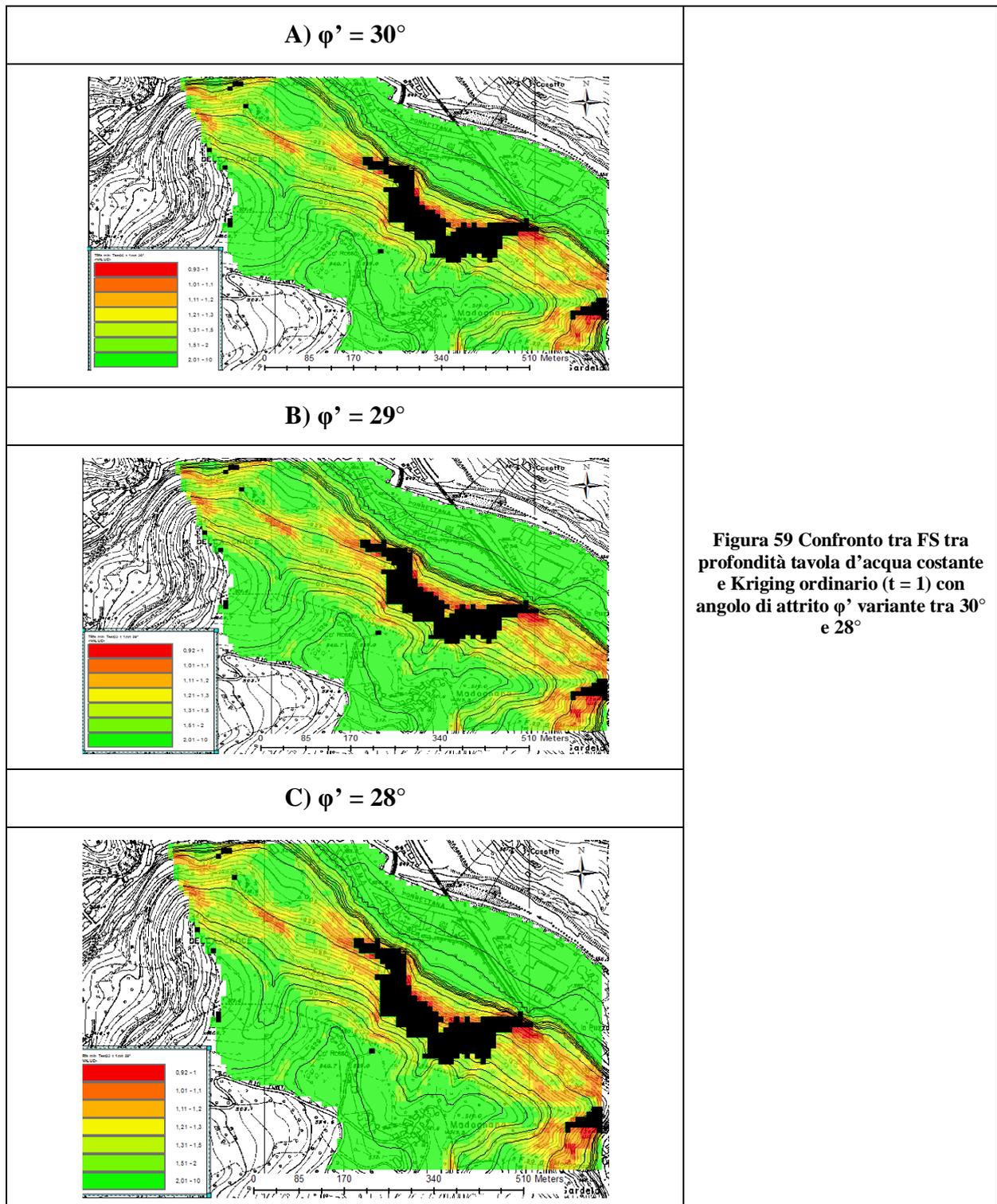
Figura 57 Confronto tra FS tra profondità tavola d'acqua costante e Kriging ordinario (t = 349200)

In Figura 58 viene riportato un confronto di come varia il fattore di sicurezza FS, applicando TRIGRS per un evento di durata $t = 349200$ s, in funzione dello spessore del suolo.

Mentre per i modelli ottenuti dalle misure in situ, Z Model e S Model si ottengono valori di FS abbastanza simili, con Sexp Model, essendo lo spessore del suolo decisamente sovrastimato, risulta che un'intera fascia di versante ha un FS < 1.



In Figura 59 si riportano i risultati ottenuti modificando un parametro geomeccanico, quale ad esempio l'angolo di attrito interno ϕ' . È stato fatto variare l'angolo tra i 30° (valore utilizzato per le analisi precedenti con TRIGRS) e 28° . La variazione dell'angolo di attrito influenza sicuramente il fattore di sicurezza FS (il suo valore diminuisce), ma la variazione è sicuramente meno rilevante rispetto alla variazione dello spessore del suolo (con Sexp Model, essendo sovrastimato lo spessore del suolo, si ottengono FS decisamente inferiori).



5. Conclusioni

Il lavoro di tesi ha preso spunto da un fenomeno franoso avvenuto a Porretta Terme (provincia di Bologna). Nell'autunno 2008, a causa di abbondanti precipitazioni, in tale occasione si innescò una colata rapida di detriti che invase la strada statale n. 64 e lambì la ferrovia che collega l'Emilia Romagna e la Toscana. I detriti colpirono anche un'abitazione, senza per fortuna causare perdite umane né danni ingenti, ma l'evento riscosse numerose attenzioni da parte della popolazione locale, preoccupata che fenomeni del genere potessero ripetersi anche in altre zone e senza alcun preavviso.

Il lavoro, durato alcuni mesi, è passato attraverso diverse fasi.

In primis si è proceduto a sopralluoghi di campo al fine di inquadrare l'area oggetto di studio dal punto di vista geologico e geomorfologico.

Successivamente è stata svolta una fase di campionamento sul terreno; tramite una trivella manuale sono stati effettuati numerosi carotaggi (circa 60) sparsi sull'intero versante oggetto di studio, al fine di ricavare un dato relativo allo spessore del suolo. Attraverso un GPS, sono state registrate le coordinate geografiche di ogni punto dove sono stati effettuati i carotaggi. Inoltre sono stati raccolti dei campioni di terreno, analizzati successivamente in laboratorio al fine di ricavarne le curve granulometriche e alcuni dati caratterizzanti.

Terminata la fase sul terreno, si è provveduto ad effettuare le prove di laboratorio (curve granulometriche, limiti di Atterberg, etc).

Grazie ai dati raccolti, è stato possibile applicare un modello previsionale di stabilità superficiale, TRIGRS 2.0 (Rex L. Baum, William Z. Savage, and Jonathan W. Godt, 2008) basato sull'infiltrazione in un mezzo non saturo di una precipitazione di durata finita.

Particolare attenzione è stata rivolta ai metodi topografici per la previsione dello spessore del suolo (Z Model, S Model, Sexp Model) e alla loro influenza nella suscettività da frana superficiale.

Proprio il confronto dello spessore in situ del suolo con i modelli topografici (Z Model, S Model, Sexp Model) fa emergere alcune discrepanze. Le differenze tra i valori di spessore di suolo misurati e quelli calcolati sono spesso elevate.

Z Model, ipotizzando un maggior accumulo di suolo a valle rispetto a monte, non tiene conto di eventuali terrazzamenti o differenze di pendenza del pendio, geometrie che creano delle zone di accumulo di materiale e di conseguenza potrebbero essere potenziali zone di

distacco di frane. Le differenze tra i valori misurati e quelli calcolati variano tra un minimo di -95 cm e un massimo di +105 cm. Si tratta pertanto di differenze abbastanza elevate, tali da far presupporre che il metodo di calcolo non sia adeguato all'area in esame. Non è pertanto presente alcuna correlazione tra i valori misurati e i valori calcolati con Z Model; infatti i valori non si comportano come una distribuzione lineare, ma si distribuiscono casualmente.

S Model, correlando lo spessore del suolo alla pendenza del pendio, non tiene conto delle particolarità del pendio (conche, quota, etc), ipotizzando i maggiori accumuli di suolo dove il terreno è meno pendente. Con l'applicazione del S Model si ritrovano risultati simili a Z Model, con differenze che variano da -38 cm a +96 cm. Tali differenze sono inferiori all'applicazione del metodo precedente e la loro distribuzione è leggermente migliore, anche se il modello sovrastima gli spessori di suolo presenti.

Sexp Model è un'evoluzione di S Model, applicando un'equazione esponenziale correlata all'angolo di pendenza del terreno. Il modello di calcolo è totalmente distante dalla realtà. Il modello correla, in maniera esponenziale, la pendenza del pendio con lo spessore della coltre, ipotizzando maggiori accumuli dove l'angolo di pendenza è basso. La curva prevede infatti spessori di circa 3 m con angoli di 20°. Tale modello non è applicabile all'area di studio, dato che, in seguito alle misure in situ, il massimo spessore di suolo misurato è pari a 112 cm con un angolo del pendio di 33°, mentre lo spessore minimo è pari a 2 cm con un angolo di 37°.

Infine l'analisi tramite TRIGRS 2.0 ha fornito risultati interessanti. Infatti le simulazioni con profondità costante della tavola d'acqua rispetto a quelle ottenute applicando un Kriging ordinario con i valori di profondità misurati in situ presentano fattori di sicurezza per le singole celle simili tra loro. Le due analisi risultano pertanto simili, evidenziando come, una volta individuato lo spessore massimo della coltre, sia indifferente applicare un Kriging ordinario degli spessori o tenere costante la profondità della tavola d'acqua.

Si è inoltre verificato come modificando un parametro geotecnico (ϕ'), i risultati ottenuti varino, ma in maniera comunque meno significativa rispetto alla variazione dello spessore del suolo.

Ringraziamenti

Con questo lavoro di tesi si chiude un mio percorso personale e professionale, iniziato idealmente nel marzo del 2007. Proprio quel giorno, appena conseguita la laurea triennale in ingegneria, ebbi la fortuna di poter effettuare un sopralluogo all'interno della miniera di magnetite di Cogne (Ao). Durante quella visita la mia curiosità verso il mondo della geologia crebbe, portandomi sin da subito ad indirizzare i miei studi di laurea magistrale verso la geoingegneria e le sue applicazioni.

Un pensiero particolare va pertanto a mio papà, Piero, che purtroppo non ha potuto vedermi concludere questa mia avventura.

Un ringraziamento particolare va inoltre alla mia famiglia per avermi supportato e a Melania per avermi supportato durante questi anni.

Un ricordo particolare va a Valeria che ha condiviso con me prima l'avventura al Politecnico e poi la sfida all'Università di Bologna.

Un abbraccio particolare va a Masa, sempre disponibile ad ascoltarmi e a consigliarmi.

Un saluto particolare va al Prof. Matteo Berti, sempre disponibile e paziente.

Grazie a tutti i miei colleghi e amici che in questi anni si sono incuriositi ascoltandomi parlare di questa mia seconda avventura universitaria; spero, attraverso i miei racconti, di esser riuscito a far conoscere meglio cos'è il mondo della geologia.



Bibliografia

- ANSELMETTI F.S., ISERN A.R., BLUM P., BETZLER C. (Eds.) - Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 194;
- BAUM R.L., SAVAGE W.Z. & GODT J.W. (2008) – TRIGRS – A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0 – Open-File Report 2008-1159, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey;
- BISANTINO T., GENTILE F., PUGLISI S. (2004) - Analisi integrata dei fenomeni di colata detritica nei bacini torrentizi sud-Garganici (Italia meridionale) / Integrated debris flow analysis in south-Gargano watersheds (southern-Italy), Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004– RIVA / TRIENT;
- BOLLEY S. & OLIARO P. (1999) – Analisi dei debris flows in alcuni bacini campione dell'Alta Val Susa. *Geingegneria Ambientale e Mineraria*, Marzo, pp 69–74;
- CANCELLI A. & NOVA R. (1985) – Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (Central Alps - Italy). Proceedings of 4th Int. Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, 267-272;
- CASADEI M., DIETRICH W. E., MILLER N. L. (2003) – Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surf Proc Land* 28 (9): 925-950;
- CATANI F., SEGONI S., FALORNI G. (2010) – An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, vol. 46, W05508, doi: 10.1029/2008WR007450, 2010;
- D'AGOSTINO V. (2005) - Le opere di idraulica torrentizia per il controllo dei sedimenti / Sediments control works in mountain streams;

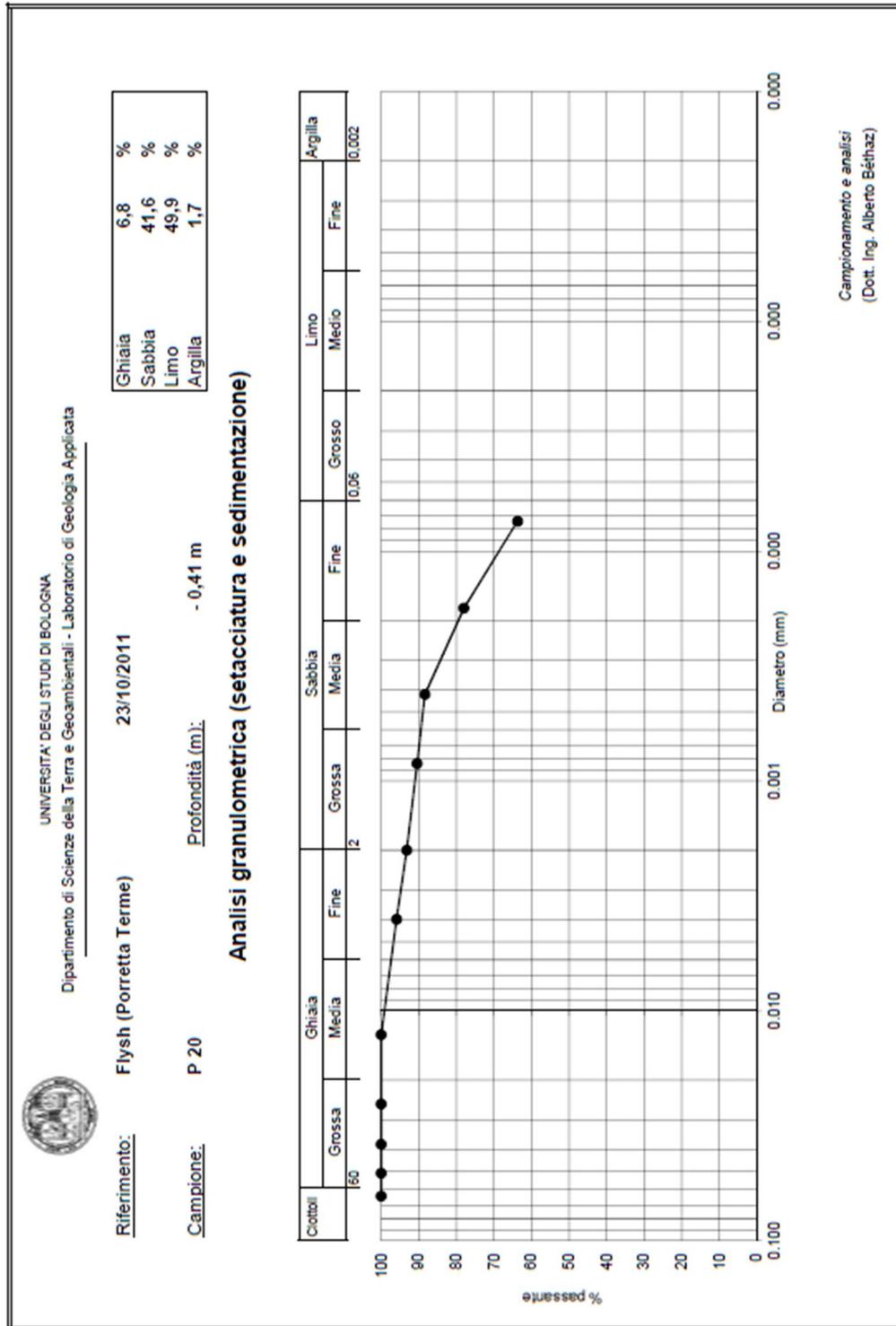
- DE VITA P., CELICO P., SINISCALCHI M. & PANZA R. (2006) - Distribuzione, caratteri idrogeologici e suscettibilità a franare delle coltri piroclastiche sui versanti carbonatici peri-vesuviani (Italia) / Distribution, hydrogeological features and landslide hazard of pyroclastic soils on carbonate slopes in the area surrounding mount somma-vesuvius (Italy);
- DUGAN B., MARONE C., HONG T. & MIGYANKA M. (2004)- Data report: compressibility, permeability, and grain size of shallow sediments, sites 1194 and 11981;
- EMILIA ROMAGNA SGSS (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli) (2006) – Geological and Soil Maps of the Emilia-Romagna Region;
- FLORIS M., MARI M., ROMEO RW & GORI U. (2004) – Modeling of landslide-triggering factors – a case study in the Northern Apennines, Italy. In: Lecture Notes in Earth Sciences 104: Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe (Hack R, Azzam R, Charlier R, eds). Berlin Heidelberg: Springer, pp 745–753;
- GIANNECCHINI R. (2005) – Rainfall triggering soil slips in the southern Apuan Alps (Tuscany, Italy) – Advances in Geosciences, 2, 21-24;
- GIANNECCHINI R., POCHINI A. (2006) - Influenza di alcuni parametri geotecnici nell'innesco di frane superficiali: risultati preliminari nella zona di Cardoso (Alpi Apuane), Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006 Pisa, 26 – 28 giugno 2006;
- IVERSON R. M. (2000) – Landslide triggering by rain filtration. Water Resources Research, 36 (7), 1897-1910;
- MOISELLO U. (1998) – Idrologia Tecnica (La Goliardica Pavese s.r.l.);
- MONTRASIO L. & VALENTINO R – Validazione di un modello per il meccanismo d'innesco di movimenti franosi superficiali. Convivere con le frane: effetti su infrastrutture e insediamenti urbani. Strategie di intervento per la mitigazione del rischio. Anacapri, 27-28 ottobre 2003;

- MOSER M. & HOENSINN F. (1983) – Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Eng Geol* 19: 185–211;
- NEWHALL F. & BERDANIER C. R. (1996) – Calculation of soil moisture regimes from the climatic record – Soil Survey Investigations Report No. 46. National Resources Conservation Service – U.S. Department of Agriculture;
- PELLETIER J. D. & RASMUSSEN C. (2009) – Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds. *Water Resources Research*, vol. 45, W09417, doi: 10.1029/2008WR007319, 20090;
- Rickenmann D. (2011) – Debris flows in torrent catchments (Corso di eccellenza, 9-11 Novembre 2011 – Politecnico di Torino), Slides.
- SALCIARINI D., GODT J. W., SAVAGE W. Z., CONVERSINI P., BAUM R.L., MICHAEL J.A. (2006) – Modeling regionale initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. *Landslides* (2006) 3:181-194;
- SAULNIER G.-M., BEVEN K., OBLED C. (1997) – Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology* 202 (1997) 158-172;
- SEGONI S., ROSSI G., CATANI F. (2011) – Improving basin scale shallow landslide modelling using reliable soil thickness maps. *Nat Hazards*, DOI 10.1007/s11069-011-9770-3;
- TACON F. (2014) - Rilievo e interpretazione di alcuni parametri geomorfologici dell'area da colate detritiche del rio Acquabona (Alpi Orientali, Bl, Italia), Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica Anno Accademico 2013/2014;
- TOFANI V, CATANI F. & CASAGLI N. (2010) – Weather Forecasting and Radar Technologies for Landslide Prediction and Mapping: Some Examples in Italy. Earth Sciences Department, University of Firenze, UNIFI, *Ber. Geol. B-A.*, 82, ISSN 1017-8880;

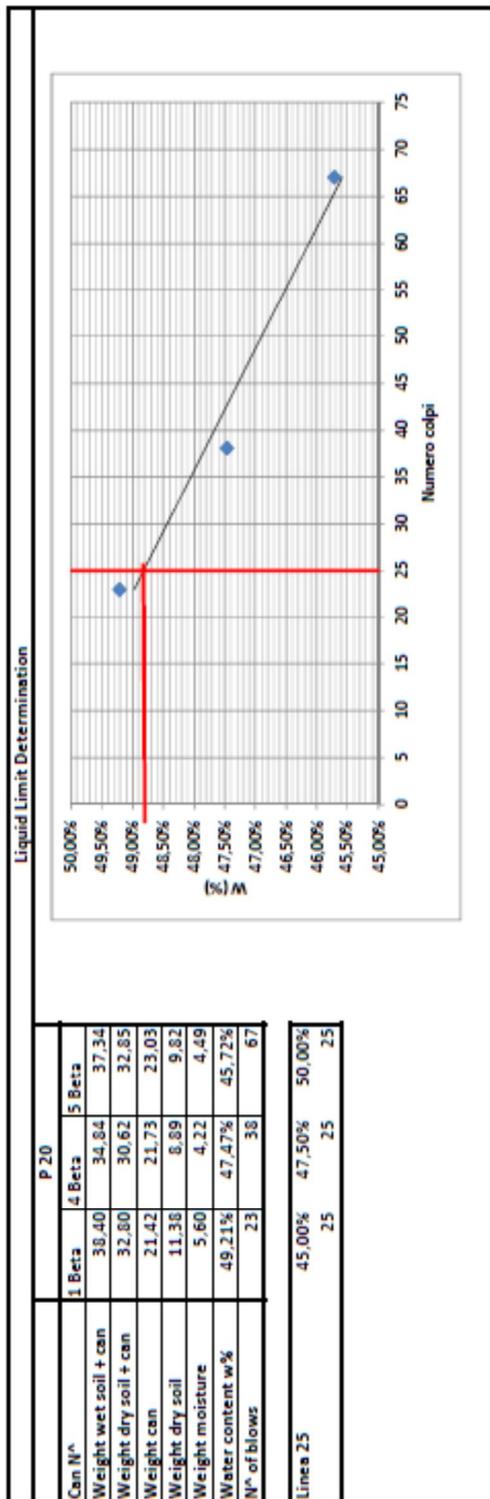
- Tutorial di SEEP/W 2012 (Groundwater seepage analysis) di GEOSLOPE;
- VAZ C. M. P., IOSSI M. de F., DE MENDONC J., NAIME A., MACEDO A., REICHERT J. M., REINERT D. J. & COOPER M. (2005) - Validation of the Arya and Paris Water Retention Model for Brazilian Soils, Published online April 11, 2005, Soil Science Society of America Journal.

Allegati

Capitolo 3 – Analisi granulometrica P20



Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P20



Plastic Limit Determination

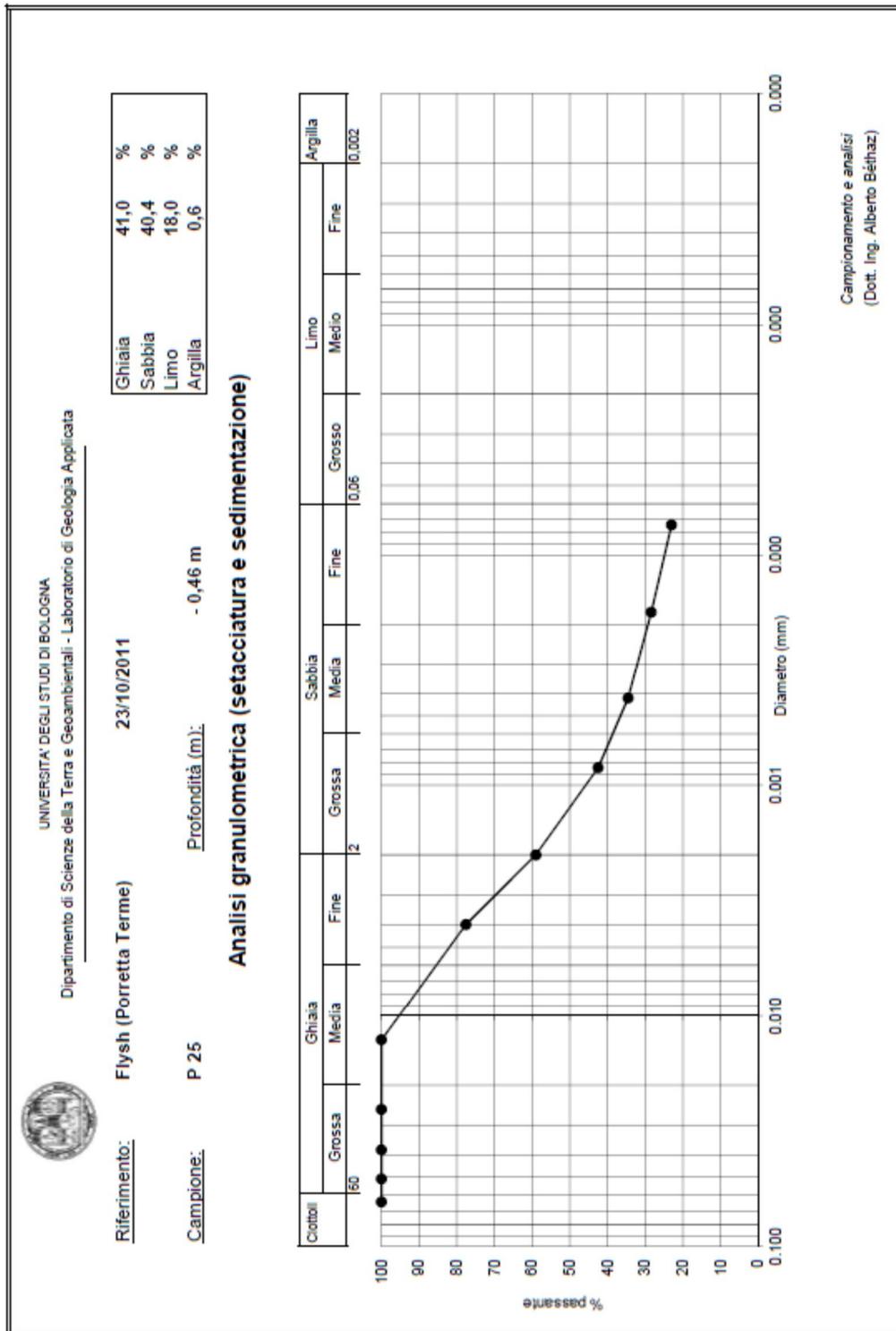
P 20				
	1 Alfa	2 Alfa	4 Alfa	5 Alfa
Can N°	27.65	21.68	27.18	25.1
Weight wet soil + can	25.99	19.35	25.64	21.49
Weight dry soil + can	21.26	11.98	20.99	11.57
Weight can	4.71	7.37	4.65	9.92
Weight moisture	1.66	2.33	1.54	3.61
Water content w%	35.24%	31.61%	33.12%	36.39%

Media w	2.29
Media %	34.09%

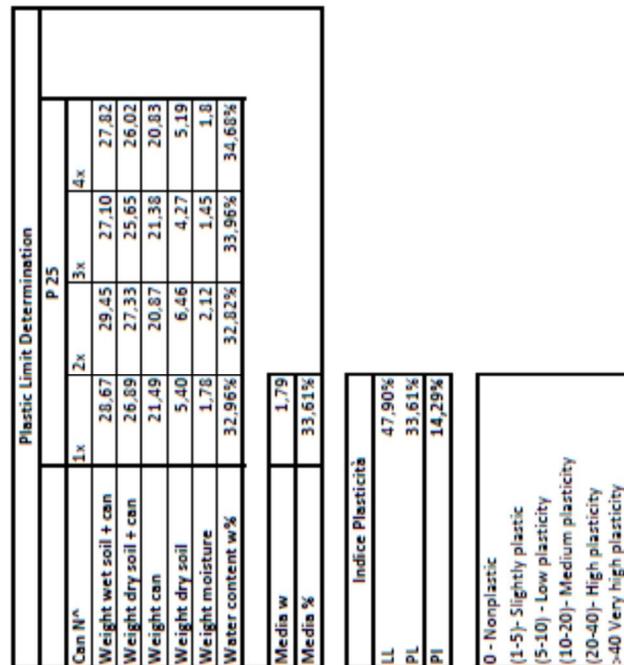
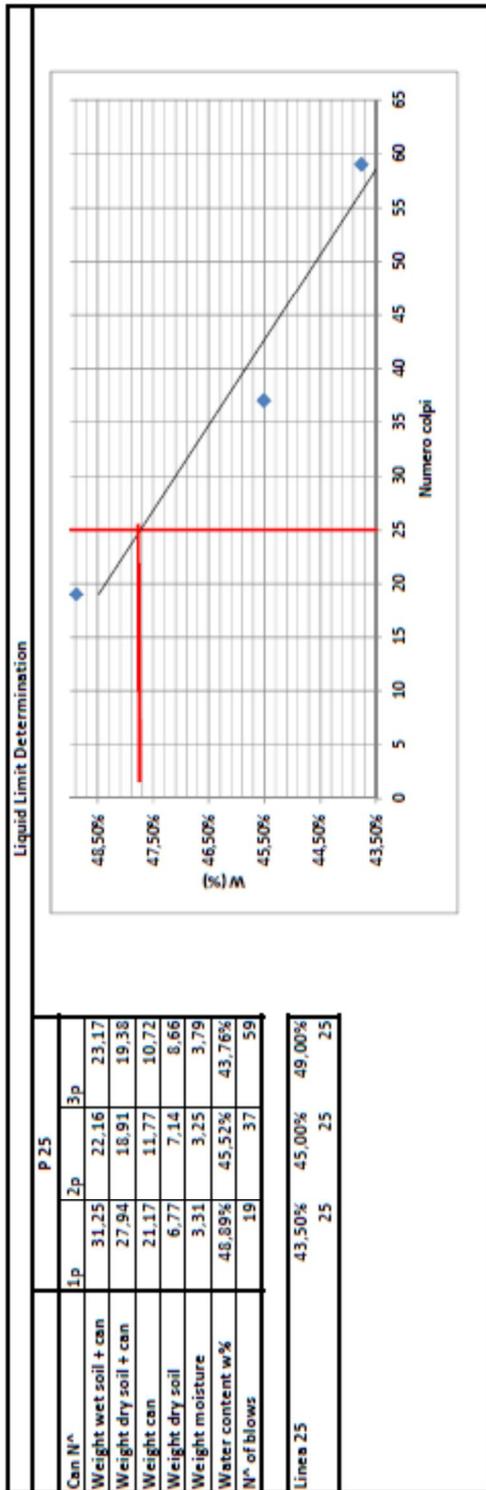
Indice Plasticità	
LL	48.80%
PL	34.09%
PI	14.71%

0 - Nonplastic
 (1-5) - Slightly plastic
 (5-10) - Low plasticity
 (10-20) - Medium plasticity
 (20-40) - High plasticity
 >40 Very high plasticity

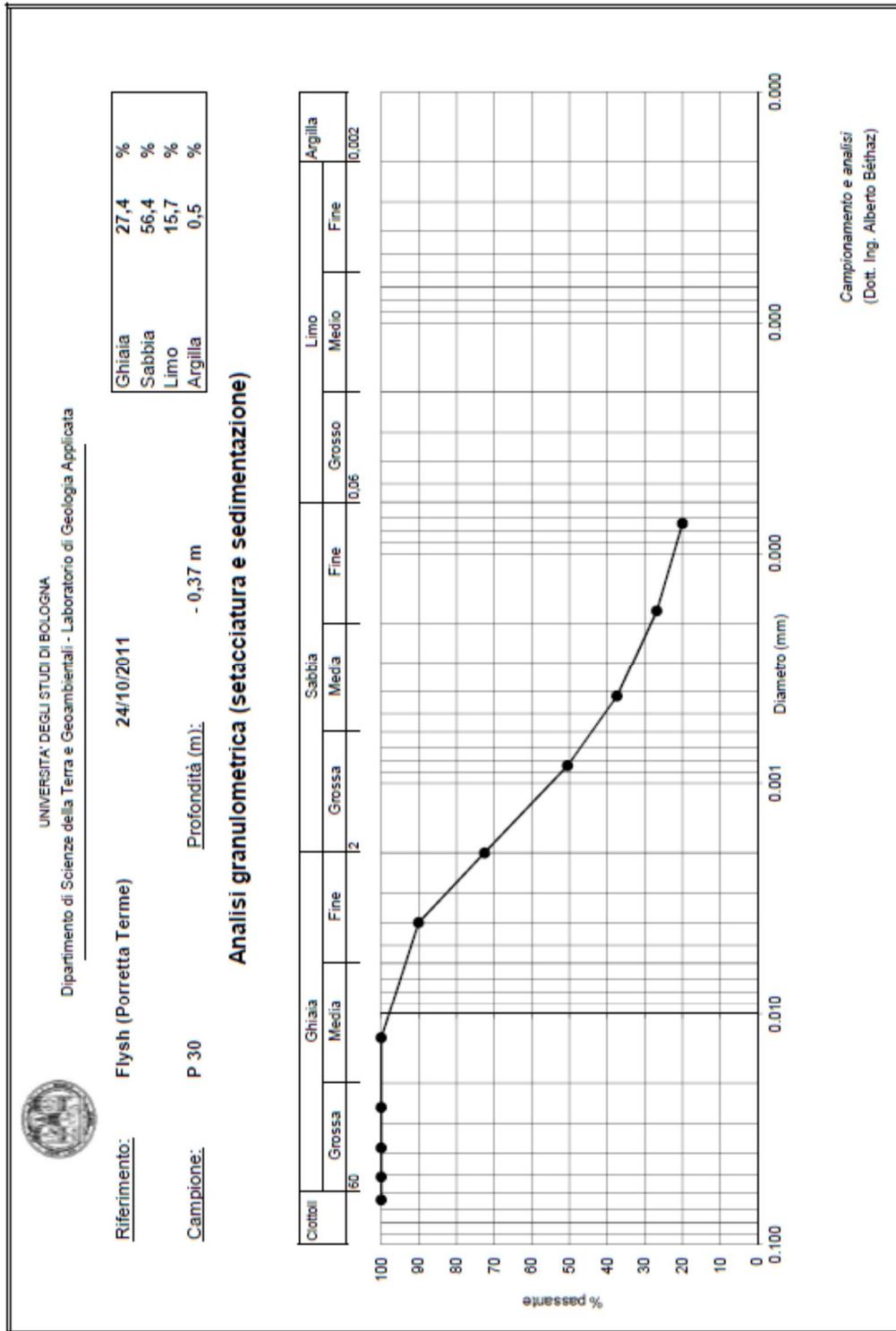
Capitolo 3 – Analisi granulometrica P25



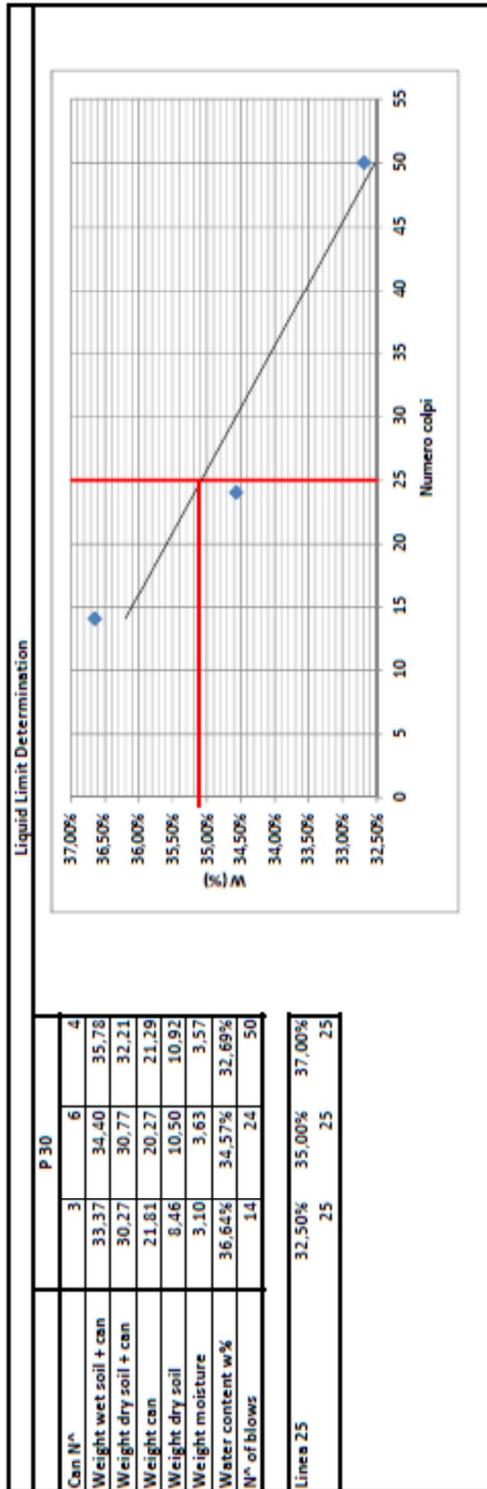
Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P25



Capitolo 3 – Analisi granulometrica P30



Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P30



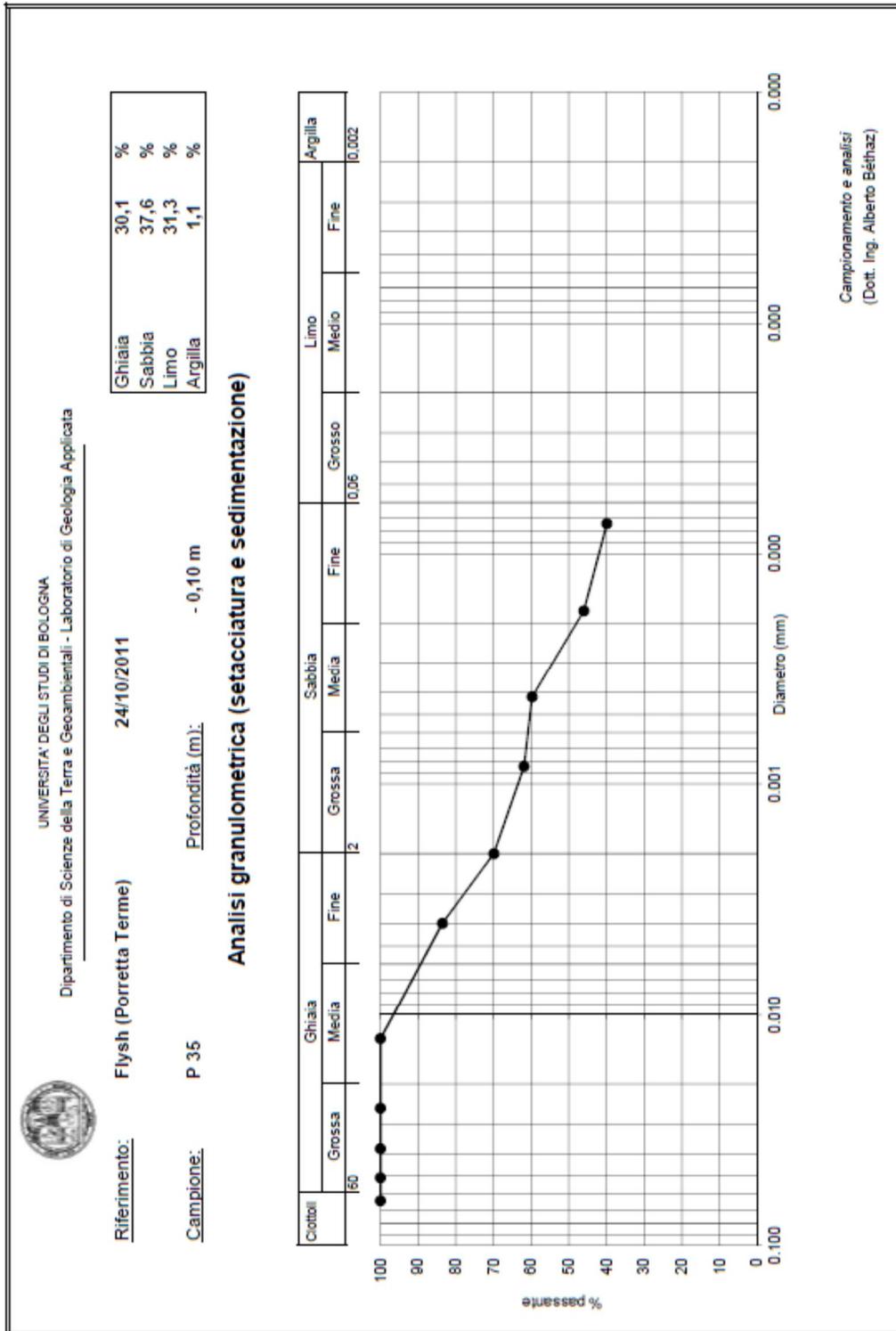
Plastic Limit Determination

P 25	
Can N°	1 Betaz 3 Stella 4
Weight wet soil + can	19.55 27.60 18.15 30.2
Weight dry soil + can	17.96 26.34 17.05 28.42
Weight can	11.73 21.69 12.79 21.25
Weight dry soil	6.23 4.65 4.26 7.17
Weight moisture	1.59 1.26 1.10 1.78
Water content w%	25.52% 27.10% 25.82% 24.83%
Media w	1.43
Media %	25.82%

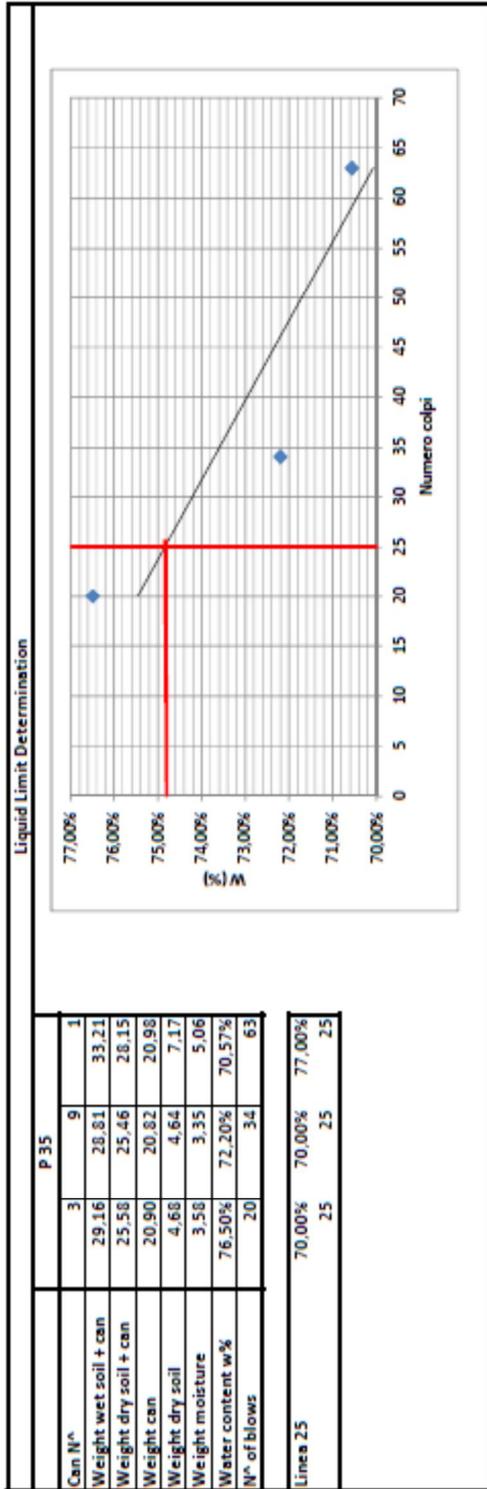
Indice Plasticità	
LL	35.10%
PL	25.82%
PI	9.28%

0 - Nonplastic
 (1-5) - Slightly plastic
 (5-10) - Low plasticity
 (10-20) - Medium plasticity
 (20-40) - High plasticity
 >40 Very high plasticity

Capitolo 3 – Analisi granulometrica P35



Capitolo 3 – Limiti di Atterberg P35



Plastic Limit Determination

P 35			
Can N°	8	2	3
Weight wet soil + can	25.10	25.27	30.50
Weight dry soil + can	23.68	23.60	26.86
Weight can	21.04	20.64	20.79
Weight dry soil	2.64	2.96	6.17
Weight moisture	1.42	1.67	3.64
Water content w%	53.79%	56.42%	59.77%

Media w	2.59
Media %	57.24%

Indice Plasticità	
LL	74.90%
PL	57.24%
PI	17.66%

0 - Nonplastic
 (1-5) - Slightly plastic
 (5-10) - Low plasticity
 (10-20) - Medium plasticity
 (20-40) - High plasticity
 >40 Very high plasticity

Capitolo 4 – Z Model – Calcolo di h_i

	Campione	altezza [cm]	quota [m]	hmax	hmin	zi	zmax	zmin	hi	Diff
1	P3	70	520	112	2	516,30	516,30	362,53	2,00	-68,00
2	P4	36	500	112	2	479,48	516,30	362,53	28,34	-7,66
3	P5	77	485	112	2	465,32	516,30	362,53	38,47	-38,53
4	P6	110	475	112	2	452,43	516,30	362,53	47,69	-62,31
5	P7	89	460	112	2	440,85	516,30	362,53	55,97	-33,03
6	P8	35	515	112	2	509,79	516,30	362,53	6,65	-28,35
7	P9	28	500	112	2	497,99	516,30	362,53	15,09	-12,91
8	P10	37	500	112	2	488,41	516,30	362,53	21,95	-15,05
9	P11	87	500	112	2	494,61	516,30	362,53	17,52	-69,48
10	P12	93	470	112	2	471,66	516,30	362,53	33,93	-59,07
11	P13	33	450	112	2	445,29	516,30	362,53	52,80	19,80
12	P14	73	450	112	2	447,06	516,30	362,53	51,53	-21,47
13	P15	108	440	112	2	435,97	516,30	362,53	59,46	-48,54
14	P16									
15	P17	22	470	112	2	464,71	516,30	362,53	38,91	16,91
16	P18									
17	P19	59	385	112	2	384,50	516,30	362,53	96,28	37,28
18	P20	41	402	112	2	408,80	516,30	362,53	78,90	37,90
19	P21	31	421	112	2	414,68	516,30	362,53	74,70	43,70
20	P22	35	425	112	2	424,96	516,30	362,53	67,34	32,34
21	P23	26	429	112	2	416,32	516,30	362,53	73,52	47,52
22	P24	42	431	112	2	426,19	516,30	362,53	66,46	24,46
23	P25	46	421	112	2	417,39	516,30	362,53	72,75	26,75
24	P26	61	392	112	2	394,71	516,30	362,53	88,98	27,98
25	P27	56	388	112	2	381,71	516,30	362,53	98,28	42,28
26	P28	34	395	112	2	392,25	516,30	362,53	90,74	56,74
27	P29	28	403	112	2	408,99	516,30	362,53	78,76	50,76
28	P30	37	421	112	2	418,57	516,30	362,53	71,91	34,91
29	P31	21	407	112	2	403,34	516,30	362,53	82,81	61,81
30	P32	30	410	112	2	405,75	516,30	362,53	81,09	51,09
31	P33	6	405	112	2	422,06	516,30	362,53	69,42	63,42
32	P34	8	390	112	2	382,57	516,30	362,53	97,66	89,66
33	P35	10	382	112	2	374,23	516,30	362,53	103,64	93,64
34	P36	6	373	112	2	363,06	516,30	362,53	111,62	105,62
35	P37	8	364	112	2	364,13	516,30	362,53	110,86	102,86
36	P38	2	376	112	2	380,93	516,30	362,53	98,84	96,84
37	P39	26	379	112	2	380,93	516,30	362,53	98,84	72,84
38	P40	24	365	112	2	369,05	516,30	362,53	107,34	83,34
39	P41	16	383	112	2	362,53	516,30	362,53	112,00	96,00
40	p42	74		112	2	409,81	516,30	362,53	78,18	4,18
41	p43	79		112	2	428,22	516,30	362,53	65,01	-13,99
42	p44	89		112	2	416,61	516,30	362,53	73,32	-15,68
43	p45	95		112	2	438,08	516,30	362,53	57,95	-37,05

44	p46	20		112	2	413,52	516,30	362,53	75,52	55,52
45	p47	34		112	2	464,98	516,30	362,53	38,71	4,71
46	p48	59		112	2	466,93	516,30	362,53	37,32	-21,68
47	p49	58		112	2	463,08	516,30	362,53	40,07	-17,93
48	p50	93		112	2	465,57	516,30	362,53	38,29	-54,71
49	p51	31		112	2	484,16	516,30	362,53	24,99	-6,01
50	p52	45		112	2	497,07	516,30	362,53	15,75	-29,25
51	p53	60		112	2	475,41	516,30	362,53	31,25	-28,75
52	p54	58		112	2	501,02	516,30	362,53	12,93	-45,07
53	p55	50		112	2	500,52	516,30	362,53	13,29	-36,71
54	p56	112		112	2	494,13	516,30	362,53	17,86	-94,14
55	p57	98		112	2	508,04	516,30	362,53	7,91	-90,09

Tabella 14 Z Model – Calcolo di hi

Capitolo 4 – S Model – Calcolo di h_i

	Campione	altezza [cm]	quota [m]	teta i	tan teta i	teta max	tan teta max	teta min	tan teta min	h_i	Diff
1	P3	70	520	30,83	0,60	54	1,39	19	0,35	86,01	16,01
2	P4	36	500	37,86	0,78	54	1,39	19	0,35	66,78	30,78
3	P5	77	485	30,11	0,58	54	1,39	19	0,35	87,81	10,81
4	P6	110	475	35,80	0,72	54	1,39	19	0,35	72,76	-37,24
5	P7	89	460	26,33	0,49	54	1,39	19	0,35	96,89	7,89
6	P8	35	515	34,99	0,70	54	1,39	19	0,35	75,02	40,02
7	P9	28	500	34,84	0,70	54	1,39	19	0,35	75,45	47,45
8	P10	37	500	27,83	0,53	54	1,39	19	0,35	93,37	56,37
9	P11	87	500	30,34	0,59	54	1,39	19	0,35	87,25	0,25
10	P12	93	470	39,85	0,83	54	1,39	19	0,35	60,68	-32,32
11	P13	33	450	36,06	0,73	54	1,39	19	0,35	72,02	39,02
12	P14	73	450	43,36	0,94	54	1,39	19	0,35	48,97	-24,03
13	P15	108	440	34,29	0,68	54	1,39	19	0,35	76,94	-31,06
14	P16	92	435								
15	P17	22	470	30,74	0,59	54	1,39	19	0,35	86,25	64,25
16	P18	36	475								
17	P19	59	385	41,08	0,87	54	1,39	19	0,35	56,71	-2,29
18	P20	41	402	42,82	0,93	54	1,39	19	0,35	50,87	9,87
19	P21	31	421	30,88	0,60	54	1,39	19	0,35	85,88	54,88
20	P22	35	425	41,02	0,87	54	1,39	19	0,35	56,92	21,92
21	P23	26	429	54,17	1,39	54	1,39	19	0,35	2,00	-24,00
22	P24	42	431	48,32	1,12	54	1,39	19	0,35	29,93	-12,07
23	P25	46	421	43,44	0,95	54	1,39	19	0,35	48,68	2,68
24	P26	61	392	38,07	0,78	54	1,39	19	0,35	66,16	5,16
25	P27	56	388	41,02	0,87	54	1,39	19	0,35	56,90	0,90
26	P28	34	395	32,47	0,64	54	1,39	19	0,35	81,80	47,80
27	P29	28	403	31,69	0,62	54	1,39	19	0,35	83,83	55,83
28	P30	37	421	35,49	0,71	54	1,39	19	0,35	73,63	36,63
29	P31	21	407	21,00	0,38	54	1,39	19	0,35	108,72	87,72
30	P32	30	410	19,45	0,35	54	1,39	19	0,35	112,00	82,00
31	P33	6	405	34,86	0,70	54	1,39	19	0,35	75,38	69,38
32	P34	8	390	23,14	0,43	54	1,39	19	0,35	104,08	96,08
33	P35	10	382	24,63	0,46	54	1,39	19	0,35	100,76	90,76
34	P36	6	373	29,51	0,57	54	1,39	19	0,35	89,29	83,29
35	P37	8	364	30,58	0,59	54	1,39	19	0,35	86,64	78,64
36	P38	2	376	37,79	0,78	54	1,39	19	0,35	67,00	65,00
37	P39	26	379	37,79	0,78	54	1,39	19	0,35	67,00	41,00
38	P40	24	365	28,69	0,55	54	1,39	19	0,35	91,30	67,30
39	P41	16	383	20,93	0,38	54	1,39	19	0,35	108,87	92,87
40	p42	74		27,25	0,52	54	1,39	19	0,35	94,74	20,74
41	p43	79		38,19	0,79	54	1,39	19	0,35	65,80	-13,20
42	p44	89		28,77	0,55	54	1,39	19	0,35	91,11	2,11
43	p45	95		22,87	0,42	54	1,39	19	0,35	104,68	9,68

44	p46	20		36,00	0,73	54	1,39	19	0,35	72,20	52,20
45	p47	34		30,83	0,60	54	1,39	19	0,35	86,01	52,01
46	p48	59		29,49	0,57	54	1,39	19	0,35	89,36	30,36
47	p49	58		30,39	0,59	54	1,39	19	0,35	87,11	29,11
48	p50	93		29,79	0,57	54	1,39	19	0,35	88,62	-4,38
49	p51	31		29,66	0,57	54	1,39	19	0,35	88,93	57,93
50	p52	45		35,71	0,72	54	1,39	19	0,35	73,02	28,02
51	p53	60		38,33	0,79	54	1,39	19	0,35	65,36	5,36
52	p54	58		33,23	0,66	54	1,39	19	0,35	79,82	21,82
53	p55	50		43,31	0,94	54	1,39	19	0,35	49,16	-0,84
54	p56	112		33,98	0,67	54	1,39	19	0,35	77,79	-34,21
55	p57	98		27,29	0,52	54	1,39	19	0,35	94,64	-3,36

Tabella 15 S Model – Calcolo di hi

Capitolo 4 – Sexp Model – Calcolo di h_i

	Campione	altezza [cm]	quota [m]	alfa	h_i	Diff
1	P3	70	520	30,83	165,27	95,27
2	P4	36	500	37,86	101,57	65,57
3	P5	77	485	30,11	173,69	96,69
4	P6	110	475	35,80	117,14	7,14
5	P7	89	460	26,33	225,81	136,81
6	P8	35	515	34,99	123,87	88,87
7	P9	28	500	34,84	125,20	97,20
8	P10	37	500	27,83	203,51	166,51
9	P11	87	500	30,34	171,00	84,00
10	P12	93	470	39,85	88,49	-4,51
11	P13	33	450	36,06	115,03	82,03
12	P14	73	450	43,36	69,36	-3,64
13	P15	108	440	34,29	130,02	22,02
14	P16					
15	P17	22	470	30,74	166,34	144,34
16	P18					
17	P19	59	385	41,08	81,24	22,24
18	P20	41	402	42,82	72,03	31,03
19	P21	31	421	30,88	164,66	133,66
20	P22	35	425	41,02	81,60	46,60
21	P23	26	429	54,17	32,79	6,79
22	P24	42	431	48,32	49,20	7,20
23	P25	46	421	43,44	68,97	22,97
24	P26	61	392	38,07	100,11	39,11
25	P27	56	388	41,02	81,56	25,56
26	P28	34	395	32,47	147,51	113,51
27	P29	28	403	31,69	155,75	127,75
28	P30	37	421	35,49	119,68	82,68
29	P31	21	407	21,00	326,71	305,71
30	P32	30	410	19,45	363,76	333,76
31	P33	6	405	34,86	124,98	118,98
32	P34	8	390	23,14	281,60	273,60
33	P35	10	382	24,63	253,97	243,97
34	P36	6	373	29,51	181,07	175,07
35	P37	8	364	30,58	168,15	160,15
36	P38	2	376	37,79	102,07	100,07
37	P39	26	379	37,79	102,07	76,07
38	P40	24	365	28,69	191,70	167,70
39	P41	16	383	20,93	328,25	312,25
40	p42	74		27,25	211,84	137,84
41	p43	79		38,19	99,28	20,28
42	p44	89		28,77	190,68	101,68
43	p45	95		22,87	286,97	191,97

44	p46	20		36,00	115,54	95,54
45	p47	34		30,83	165,24	131,24
46	p48	59		29,49	181,42	122,42
47	p49	58		30,39	170,35	112,35
48	p50	93		29,79	177,66	84,66
49	p51	31		29,66	179,21	148,21
50	p52	45		35,71	117,88	72,88
51	p53	60		38,33	98,29	38,29
52	p54	58		33,23	140,01	82,01
53	p55	50		43,31	69,62	19,62
54	p56	112		33,98	132,86	20,86
55	p57	98		27,29	211,20	113,20

Tabella 16 Sexp Model – Calcolo di hi