

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**MODELLAZIONE NUMERICA DELLA DINAMICA DI
COLATE DETRITICHE POST INCENDIO: ANALISI
DELL'EVENTO DEL 7 GIUGNO 2018 NEL COMUNE
DI BUSSOLENO (TO)**



Relatore

Prof.ssa ing. MARINA PIRULLI

Candidato

FABIO PITTARELLO

Sessione Luglio 2019

Ad Aldo e Luisella

Devo tutto questo a voi due

Grazie

INDICE

INDICE.....	1
1. INTRODUZIONE.....	1
2. FENOMENI FRANOSI: CORRELAZIONE TRA DEBRIS-FLOW E INCENDIO.....	3
2.1 CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI FRANOSI.....	3
2.2 FENOMENO DI COLATA DETRITICA (DEBRIS-FLOW).....	7
2.3 CORRELAZIONE TRA COLATA DETRITICA E INCENDIO.....	12
3. DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO.....	19
3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	19
3.2 EVENTO DI DEBRIS-FLOW DEL 07 GIUGNO 2018.....	21
3.3 INCENDIO DELL'OTTOBRE 2017 NEL RIO DELLE FOGLIE.....	34
3.4 ELABORAZIONI CARTOGRAFICHE – QGIS.....	44
3.5 ASPETTI MORFOMETRICI E MORFOLOGICI DEL BACINO IDROGRAFICO RIO DELLE FOGLIE	46
3.6 PIANO REGOLATORE GENERALE DEL COMUNE DI BUSSOLENO.....	57
3.7 RILIEVO IN CAMPO DEL DEPOSITO DEL DEBRIS-FLOW E DEI DANNI ALLE COSTRUZIONI.....	67
4. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'EVENTO DEL 07 GIUGNO 2018 CON RASH ^{3D}	75
4.1 CODICE DI CALCOLO RASH ^{3D}	75
4.2 CREAZIONE FILE DI INPUT PER RASH ^{3D}	79
4.2.1 Innesco concentrato.....	81
4.2.2 Innesco distribuito.....	81

4.2.3 Inserimento degli edifici nel modello.....	86
4.3 SIMULAZIONE DELL'EVENTO CON RASH ^{3D}	88
4.4 COMPARAZIONE TRA LE SIMULAZIONI E I RILIEVI IN CAMPO – CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO.....	100
4.5 COMPARAZIONE TRA SIMULAZIONE NUMERICA E PERIMETRAZIONE DELL'EVENTO...	118
4.6 COMPARAZIONE TRA INNESCO CONCENTRATO E DISTRIBUITO.....	123
4.7 COMPARAZIONE TRA SCENARI CON DIFFERENTI VOLUMI DI MASSA MOBILITATA ALL'INNESCO	130
4.8 COMPARAZIONE TRA LA MODELLAZIONE NUMERICA E I DANNI ALLE COSTRUZIONI..	135
4.8.1 Catastale 1139	136
5. INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO NEL COMUNE DI BUSSOLENO	147
6. CONCLUSIONI.....	157
7. RIFERIMENTI	163
8. INDICI DELLE TABELLE E DELLE FIGURE	169
8.1 INDICE DELLE FIGURE.....	169
8.2 INDICE DELLE TABELLE	180
9. ALLEGATI.....	I
9.1 ALLEGATO 1 – SCHEDE METADATI SERVIZI WEB	I
9.1.1 Catasto – Fabbricati - Servizio WMS Agenzia delle Entrate	I
9.1.2 Carta forestale e altre coperture del territorio (2000).....	III
9.1.3 Arpa Piemonte – Conoidi alluvionali in Piemonte.....	IV
9.1.4 AGEA 2015 – Ortofoto RGB - Geoservizi WMS E WMTS	VI
9.1.5 Arpa Piemonte - Atlante Piogge Intense	VII

9.1.6 Arpa Piemonte - Ortofoto Ambito progetto Europeo RISK NAT	IX
9.1.7 Regione Piemonte - Base Cartogr. di Rifer. Annuale 2015 raster b/n 1:10.000	X
9.2 ALLEGATO 2 – PARTICELLE CATASTALI RICAVATE DAL SITO DELL’AGENZIA DELLE ENTRATE	XII
9.3 ALLEGATO 3 – MATERIALE FOTOGRAFICO PROPEDEUTICO AL SOPRALLUOGO IN SITO DEL 28/02/19.....	XIV
9.4 ALLEGATO 4 – MATERIALE FOTOGRAFICO DEL SOPRALLUOGO IN SITO DEL 28/02/19 – RILIEVO DANNI E SPESSORI DEL DEPOSITO.....	XXXII
9.5 ALLEGATO 5 – INQUADRAMENTO DEL SITO.....	XXXVIII
9.6 ALLEGATO 6 – RISULTATI DELLA SIMULAZIONE DI PRIMO TENTATIVO.....	XLIV
9.7 ALLEGATO 7 – MODELLAZIONE FINALE DELLA COLATA DETRITICA - MODELLO C_B_S - INNESCO CONCENTRATO	LIV
9.8 ALLEGATO 8 – MODELLAZIONE DELLA COLATA DETRITICA - MODELLO C_B_S - INNESCO DISTRIBUITO	LIX
9.9 ALLEGATO 9 – ALTEZZE MASSIME DEL DEPOSITO IN FUNZIONE DEL VOLUME DI INNESCO–MODELLO C_B_C - INNESCO CONCENTRATO	LXVII
RINGRAZIAMENTI	I

SOMMARIO

Il 07 giugno 2018 una colata detritica, che ha avuto origine nel bacino idrografico Comba delle Foglie, ha investito l'abitato della frazione San Lorenzo del comune di Bussoleno (TO). Non ci sono state vittime. Diversi edifici sono stati danneggiati o distrutti. Si stima un volume di fango depositato in conoide compreso tra i 15000 m³ ed i 2000 m³. L'intera area in conoide era sprovvista di una qualunque forma strutturata di rete idrica di collettamento delle acque meteoriche.

La principale causa predisponente è l'incendio avvenuto nell'autunno 2017 che ha colpito un vasta area della Val di Susa e che ha modificato la geomorfologia dei versanti montani, rendendo disponibili elevate quantità di detriti mobilizzabili. La principale causa scatenante è stata la serie di eventi piovosi che ha interessato l'area nella primavera 2018, con intensità di pioggia fino a 100 mm/h.

Le colate detritiche sono fenomeni franosi particolarmente pericolosi vista la loro rapidità e l'elevato contenuto energetico.

Nel presente elaborato, dopo una prima parte di inquadramento del territorio, di descrizione dell'evento incendiario e dell'evento di colata detritica, viene effettuata una modellazione numerica dell'evento franoso utilizzando il software RASH^{3D} (Pirulli, 2005). La reologia applicata è di tipo Voellmy a due parametri: angolo di attrito e turbolenza. Il modello digitale del terreno utilizzato nella simulazione possiede una risoluzione spaziale di 5 metri. La ricerca dei valori più adatti a rappresentare il fenomeno è stata condotta dopo una attenta analisi del territorio e dell'evento; sono state introdotte delle modifiche al modello digitale del terreno per rappresentare la presenza degli edifici non distrutti dalla colata e la "bialéra" riaffiorata in superficie a seguito dell'erosione. L'analisi è stata svolta con due tipologie di innesco: innesco concentrato a metà dell'asta fluviale principale, ed innesco distribuito sulla parte alta del bacino (innesco di tipo areale).

Il modello è stato calibrato con i rilievi in campo eseguiti nel febbraio 2019 nei quali sono state misurate le tracce lasciate dal fango sugli edifici. I risultati finali sono stati confrontati con la perimetrazione del deposito effettuata dai tecnici di Arpa Piemonte e della Regione Piemonte nei giorni successivi all'evento, e con le fotografie aeree.

ABSTRACT

On 7 June 2018 a debris-flow, which originated in the Comba delle Foglie basin, ran over the town of San Lorenzo in the municipality of Bussoleno (TO). There were no victims. Several buildings were damaged or destroyed. It is estimated a volume of mud, deposited in the fan, between 15000 and 2000 cubic meters.

The main predisposing cause is the forest fire that occurred in the autumn of 2017 in a large area of the Val Susa, and that changed the geomorphology of the mountain slopes, making high quantities of debris available. The main triggering cause was the series of rainy events that affected the area in the spring 2018, with rainfall intensity up to 100 mm/h.

In the present paper a numerical modeling of the landslide event is performed using the RASH^{3D} software (Pirulli, 2005). Voellmy rheology, characterized by two parameters (friction angle and turbulence), has been applied. The digital terrain model used in the simulation has a spatial resolution of 5 meters. The search of the best fit values to represent the phenomenon was conducted after a careful analysis of the territory and the event; changes to the digital terrain model have been introduced to represent the presence of buildings not destroyed by the mud and to represent the “bialéra” reappeared after the surface erosion (entrainment). The analysis was carried out with two types of trigger: concentrated trigger in the middle of the basin and distributed trigger on the upper part of the slopes (areal).

The model was calibrated by using the traces left by the mud on the buildings that were measured during site inspection in February 2019. The final results were compared with the perimeter of the deposit observed by the technicians of Arpa Piemonte and Piedmont Region in the days following the event, and also with aerial pictures.

1. INTRODUZIONE

Il giorno 07 giugno 2018 verso le 14:30 una colata di detriti e fango, formatasi nel bacino della Comba delle Foglie, ha investito la zona nord del comune di Bussoleno (TO) in corrispondenza della frazione di San Lorenzo. La colata ha avuto origine a seguito di un evento meteorico a carattere temporalesco della durata di circa mezz'ora.

Il bacino è stato investito da una serie di eventi meteorici nelle settimane precedenti la colata (quattro eventi dal 29 aprile al 7 maggio) che hanno causato degli allagamenti in area di conoide. Inoltre questi eventi hanno favorito le condizioni predisponenti per la mobilitazione di significativi volumi di terreno che si sono poi riversati in frazione San Lorenzo nell'episodio di colata detritica del 07 giugno.

La colata di fango e detriti, costituita prevalentemente da materiale fine (sabbioso limoso), ciottoli e alcuni massi, ha coinvolto la zona compresa tra Regione Nebioléra e strada Camposciutto. Nel primo tratto di conoide il deflusso ha percorso un tratto pressoché lineare - da nord a sud - fino a quando, perdendo energia e materiale, si è incanalato lungo via San Lorenzo in direzione sud-sudest raggiungendo poi la zona più depressa del paese ovvero il sottopasso ferroviario.

A seguito dell'evento non vi sono stati morti o feriti. Diverse abitazioni sono state pesantemente danneggiate o alluvionate ed è stato necessario evacuare alcuni edifici per mettere al sicuro i rispettivi inquilini. Nello specifico sono state fatte evacuare 150 persone di cui una ricoverata in ospedale in via cautelativa. Sono stati inoltre interrotti i servizi essenziali come energia elettrica, acqua potabile e gas per uso domestico.

La "macchina dei soccorsi" è entrata in funzione in modo completo alle 18:30 dello stesso giorno presso il COC (centro operativo comunale) con il coinvolgimento di Comune, Vigili del Fuoco, Carabinieri, Guardia di Finanza, Regione e associazioni di Volontari (Regione P. – Fenomeni dissestivi in Valle di Susa).

Le piogge del 2018 sono caratterizzate da periodo di ritorno di soli 5 anni, ciononostante non si ha memoria storica di tale tipologia di fenomeno in quell'area,. Quindi il fenomeno franoso non può essere stato innescato esclusivamente dal temporale.

In effetti, oltre agli eventi meteorici antecedenti il 07 giugno, un'altra causa predisponente particolarmente rilevante è da ricercarsi nell'incendio che ha colpito la Val Susa nell'autunno del 2017. In quell'occasione la maggior parte della Comba delle Foglie è stata interessata da fiamme che hanno distrutto parte della vegetazione che ricopriva i versanti, ed hanno modificato radicalmente le caratteristiche geomorfologiche dello strato superficiale del terreno nonché quelle idrologiche dell'intera area.

In sintesi, le caratteristiche del bacino non erano più le medesime del recente passato e il fenomeno temporalesco, seppur non particolarmente intenso, ha incontrato gli stessi versanti alpini ma completamente trasformati dall'incendio.

Nel presente elaborato viene presentata, nel capitolo 2, una descrizione generale del fenomeno di debris-flow e della correlazione esistente tra colata detritica e incendio.

Successivamente viene dato ampio spazio all'esposizione dell'evento di colata detritica del 07 giugno 2018 a Bussoleno e dell'incendio avvenuto nel 2017 in Val di Susa, al capitolo 3. Sempre nel medesimo capitolo viene presentata una descrizione delle caratteristiche morfologiche del bacino Comba delle Foglie e la gestione del relativo conoide attraverso il Piano Regolatore Comunale.

Nel corso del 2019 è stato effettuato un sopralluogo nell'area di interesse per misurare le altezze del deposito di fango: i dati raccolti sono illustrati al fondo del capitolo 3.

Nella parte centrale della tesi - al capitolo 4 - viene sviluppata la modellazione numerica dell'evento condotta con l'ausilio del codice di calcolo numerico RASH^{3D} (Pirulli, 2005). L'obiettivo è la riproduzione (simulazione) della dinamica del fenomeno (back-analysis). Attraverso la modellazione sono stati ricostruiti diversi scenari dell'evento che vengono messi a confronto con i dati raccolti in sito e con la perimetrazione dell'evento. Nello stesso capitolo viene presentata la verifica di uno degli edifici distrutti dalla colata mettendo a confronto l'energia di impatto di quest'ultima con la resistenza della muratura portante.

Infine al capitolo 5 vengono illustrati gli interventi di mitigazione del rischio messi in atto nell'ultimo anno dalle Amministrazioni Comunale e Regionale.

2. FENOMENI FRANOSI: CORRELAZIONE TRA DEBRIS-FLOW E INCENDIO

2.1 CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI FRANOSI

Il movimento ed il collasso dei pendii naturali costituisce un importante problema geotecnico che coinvolge una varietà di materiali naturali in una moltitudine di contesti geologici e climatici, e che ha un considerevole impatto socio-economico (Leroueil, 2001).

Il movimento di versante può essere definito - in modo molto stringato - come movimento franoso nel quale il materiale coinvolto può essere roccia, detrito o terra. Una classificazione di questi fenomeni, razionale e sistematica, risulta alquanto complessa, considerata la variabilità dei parametri coinvolti. Pertanto nel tempo sono state proposte differenti classificazioni che mirano tutte a caratterizzare le frane per renderle trattabili da un punto di vista geologico-ingegneristico.

Una prima classificazione è fornita da Varnes (1978) nella quale il fenomeno è categorizzato sulla base del tipo di movimento della massa e sulla tipologia di materiale coinvolto.

Tabella 1: classificazione basata sul tipo di movimento e sul materiale coinvolto (Varnes, 1978)

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	ROCCIA (ROCK)	DETRITO (DEBRIS)	TERRENO (EARTH)
CROLLI (FALLS)	Crollo in roccia (<i>Rock fall</i>)	Crollo di detrito (<i>Debris fall</i>)	Crollo di terra (<i>Earth fall</i>)
RIBALTAMENTI (TOPPLES)	Ribaltamento in roccia (<i>Rock topple</i>)	Ribaltamento di detrito (<i>Debris topple</i>)	Ribaltamento di terra (<i>Earth topple</i>)
SCORRIMENTI o SCIVOLAMENTI	Scorrimento di roccia (<i>Rock slide</i>)	Scorrimento di detrito (<i>Debris slide</i>)	Scorrimento di terra (<i>Earth slide- slump</i>)
ESPANDIMENTO (SPREADING)	Espandimento in roccia (<i>Rock spread</i>)	Espandimento di detrito (<i>Debris spread</i>)	Espandimento di terra (<i>Earth spread</i>)
COLATE o FLUSSI (FLOWS)	Colata in roccia (<i>Rock flow</i>)	Colata di detrito (<i>Debris flow</i>)	Colata di terra (<i>Earth flow</i>)
COMPLESSE (COMPLEX)	Combinazione di due o più tipi principali di movimento		

Con tale differenziazione si intende mettere in luce il fatto che sotto il generico sostantivo “frana” ricadono una serie di fenomeni caratterizzati da comportamenti fisico-meccanici, cause e reologie completamente differenti tra loro.

Fell (1994) classifica il movimento franoso sulla base del volume mobilitato (Tabella 2), mentre Hungr et al. (2001) basano la classificazione sulla tipologia di materiale coinvolto e sugli aspetti fisico-meccanici dell’evento (Tabella 3).

Tabella 2: classificazione della magnitudo della frana basata sul volume (Fell, 1994)

Descrizione	Volume (m ³)
Estremamente Grande	$> 5 \cdot 10^6$
Molto grande	$1 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$
Da media a grande	$2.5 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^6$
Media	$5 \cdot 10^4 \div 2.5 \cdot 10^5$
Piccola	$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$
Molto piccola	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$
Estrem. Piccola	$< 5 \cdot 10^2$

Tabella 3: classificazione dei fenomeni franosi secondo Hungr et al. (2001)

Material	Water Content	Special Condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris	Dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure - limited volume	Various	<i>Non-liquified sand (silt, gravel, debris) flow</i>
Silt, Sand, Debris, Weak rock	Saturated at rupture surface content	- liquifiable material - constant water	Extremely Rapid (typical 5 m/s)	<i>Sand (silt, debris, rock) flow slide</i>
Sensitive clay	At or above liquid limit	- liquefaction <i>in situ</i> - constant water content	Extremely Rapid (typical 5 m/s)	<i>Clay flow slide</i>
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to Very Rapid (1.6 m/year to 3 m/min)	<i>Peat flow</i>
Clay or Earth	Near plastic limit	- slow movements - plug flow (sliding)	< Rapid (< 1.8 m/hr)	<i>Earth flow</i>
Debris	saturated	- established channel - increased water content	Extremely Rapid (typical 5 m/s)	<i>Debris flow</i>
Mud	At or above liquid limit	- fine-grained debris flow	> Very Rapid (> 0.05 m/s)	<i>Mud flow</i>
Debris	free water present	- flood	Extremely Rapid (typical 5 m/s)	<i>Debris flood</i>
Debris	partly or fully saturated	- no established channel - relatively shallow - steep source	Extremely Rapid (typical 5 m/s)	<i>Debris avalanche</i>
Fragmented rock	various, mainly dry	- intact rock at source - large volume	Extremely Rapid (typical 5 m/s)	<i>Rock avalanche</i>

Nella classificazione di Cruden e Varnes del 1996, il fenomeno franoso viene suddiviso in sette classi basate sulla velocità della massa in movimento. Ogni classe si differenzia da quella successiva per un fattore 100 (Tabella 4).

Tabella 4: classificazione basata sulle velocità (Cruden & Varnes, 1996)

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity	Probable Destructive Significance
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec	Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/hr	Escape evacuation possible; structures, possessions, and equipment destroyed
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Some temporary and insensitive structures can be temporarily maintained
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year	Remedial construction can be undertaken during movement; insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large during a particular acceleration phase
2	Very Slow	5×10^{-7}	15 mm/year	Some permanent structures undamaged by movement
	Extremely SLOW			Imperceptible without instruments; construction POSSIBLE WITH PRECAUTIONS

La colata detritica, o debris-flow, è contraddistinta da velocità estremamente rapide, secondo Hungr (2001), e rientra nella classe sette secondo Cruden & Varnes (1996). In particolare, a tale classe, corrisponde un effetto catastrofico, con distruzione di edifici e, aspetto più drammatico, l'improbabilità da parte delle persone di riuscire a sfuggire all'evento: in altre parole si prevedono molte vittime.

Analizzando i fenomeni franosi in generale, dal *Rapporto Periodico sul Rischio posto alla Popolazione italiana da Frane e Inondazioni Anno 2018*, pubblicato dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) e dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), emerge che nel solo 2018 vi sono stati 12 morti per fenomeni franosi, 26 feriti e 1464 evacuati e senza tetto (Figura 1), considerando invece il periodo 1968-2017 (50 anni) si registrano 1206 morti, 12 dispersi e 1505 feriti (Figura 2).

	Morti	Dispersi	Feriti	Evacuati e senzatecto
per Frana	12	-	26	1.464
per Inondazione	26	2	12	3.095
per Frana e/o Inondazione	38	2	38	4.559

	Regioni colpite	Province colpite	Comuni colpiti	Località colpite
per Frana	18	49	101	108
per Inondazione	11	20	35	37
per Frana e/o Inondazione	19	57	134	145

Figura 1: statistiche degli eventi di frana e di inondazione con vittime nel periodo 1 gennaio – 31 dicembre 2018 (CNR IRPI, 2019)

	Morti	Dispersi	Feriti	Evacuati e Senzatecto
per Frana	1.206	12	1.505	147.554
per Inondazione	592	49	459	169.173
per Frana e/o Inondazione	1.798	61	1.964	316.727

	Regioni colpite	Province colpite	Comuni colpiti	Località colpite
per Frana	20	101	1.427	2.356
per Inondazione	20	109	921	1.238
per Frana e/o Inondazione	20	110	2.054	3.565

Figura 2: Statistiche degli eventi di frana e di inondazione con vittime nel periodo 1968-2017 (CNR IRPI, 2019)

2.2 FENOMENO DI COLATA DETRITICA (DEBRIS-FLOW)

La colata detritica può essere definita come un miscuglio d'acqua e sedimenti miscelati insieme in modo da formare un'unica massa fluida, la quale si muove verso valle sospinta dalla gravità; è caratterizzata da un'elevata mobilità grazie all'assenza di spazi vuoti che vengono occupati da acqua e fango (Takahashi 2007).

La formazione di un debris-flow si paventa in presenza di specifiche condizioni (Ferro, 2006) riassumibili in:

- disponibilità di materiale detritico instabile
- disponibilità d'acqua sufficiente a saturare il terreno e a mobilitare i sedimenti (esempio acqua meteorica)
- sufficiente pendenza del versante o del canale affinché la gravità possa innescare il fenomeno.

I flussi di detriti sono costituiti da masse di sedimenti scarsamente ordinati, agitati e saturi di acqua; se nelle valanghe di roccia la fisica dell'evoluzione temporale del fenomeno è governata dai grani solidi, e nelle piene d'acqua (anche cariche di sedimenti) dalla fase liquida, nelle colate detritiche l'evento è governato da entrambe le componenti, ovvero dalle forze solide e fluide che agiscono di concerto per produrre un flusso di detriti (Iverson, 1997).

Secondo la classificazione proposta da Hungr et al. (2001) le colate detritiche sono costituite da materiale saturo che si muove con velocità estremamente rapida all'interno di aree canalizzate; si differenzia dal debris-flood, tra le altre cose, per la presenza di acqua libera in quest'ultimo. Le aree canalizzate fungono da raccoglitori dell'acqua che proviene dal deflusso superficiale: l'acqua forma con la parte solida una miscela satura sufficientemente fluida e capace di trasportare con sé anche masse di grandi dimensioni che vengono trascinati fino a valle.

La colata detritica presenta concentrazioni solide che generalmente superano il 50% (mentre un flusso iperconcentrato mostra concentrazioni comprese tra l'1 e il 25%, Coussot e Meunier, 1996). La differenza fra le velocità delle componenti liquida e solida è modesta e questo permette di considerarla come un fluido viscoso monofasico.

I principali fattori climatici che innescano il fenomeno (cause scatenanti) sono le piogge intense ed il rapido scioglimento della neve, ai quali si aggiungono i fenomeni meteorici antecedenti l'evento (cause predisponenti) (Wieczorek and Glade, 2005).

L'analisi dei 769 processi torrentizi avvenuti nei 78 bacini della Val Susa (Piemonte), mostra che, oltre alla meteorologia, anche la litologia condiziona fortemente la predisposizione ai fenomeni di debris-flow. Nello specifico, poichè il substrato roccioso affiorante rappresenta la maggior fonte di materiale detritico, questo deve essere considerato tra le cause predisponenti. Viceversa, dall'analisi si è visto che le frane da scivolamento attive, pur agendo da sorgenti di detriti, non contribuiscono ai fenomeni torrentizi (Tiranti et al., 2016).

La modellazione dei processi di innesco e propagazione del debris-flow, complessa e alquanto difficile da realizzare, può essere eseguita impiegando modelli meccanici (Kean et al., 2013), analisi empiriche basate su dati di inventario (Blahut et al., 2010) o ancora modelli statistici (investigati nell'ambito del calcolo del rischio di colata post-incendio – Cannon et al., 2010). Lo scopo di questi modelli è quello di stabilire la probabilità e l'intensità della colata detritica soprattutto allo sbocco del bacino idrografico (apice di conoide) con l'obiettivo di valutare il potenziale rischio a cui sono sottoposte le persone, i centri abitati e le infrastrutture, che si trovano a ridosso del conoide.

Dallo studio del fenomeno (Kean et al., 2013) si osserva che l'innesco, la frequenza e l'intensità della colata sono influenzate fortemente dalle zone con riduzione di pendenza, le quali agiscono da *condensatore di sedimenti temporaneo* fino a quando, superate le forze resistenti, la massa collassa repentinamente verso valle. La difficoltà incontrata da Kean et al. (2013) nello sviluppare il modello meccanico, è rappresentata dalla modellazione dell'interazione tra diversi sorgenti di colata; le sorgenti infatti si innescano simultaneamente e richiedono quindi una rappresentazione tridimensionale dell'area investigata. In altre parole i modelli bidimensionali non permettono una rappresentazione adeguata del fenomeno.

Al di là degli aspetti tecnici del singolo modello di rappresentazione, la presenza di aree di sedimentazione naturali complica la previsione di un fenomeno di colata detritica: infatti i ripetuti eventi meteorici, anche di piccola intensità, possono favorire l'erosione superficiale del terreno e la crescita di volumi di sedimento - nei *condensatori di sedimenti* - senza mostrare alcun effetto più a valle in area di conoide. I sedimenti concentrati possono poi mobilitarsi in un'unica soluzione in una sorta di innesco concentrato. Si ritiene che nel Rio delle Foglie sia capitato proprio questo fenomeno come meglio descritto più avanti.

Un ulteriore aspetto importante, nell'analisi del fenomeno, è dato dall'erosione. In effetti, raramente la colata detritica si origina da un'unica area circoscritta del bacino idrografico con un volume di materiale ben definito che frana verso valle. Più frequentemente si osserva un

piccolo volume di innesco che aumenta man mano che propaga lungo il versante. Un esempio lampante di questo effetto è offerto dall'episodio di Tsing Shan del 1990 dove dai 400 m³ circa di materiale iniziale si è giunti ad un volume finale di detrito di 20.000 m³. In sintesi è proprio il meccanismo dell'erosione che determina il volume finale di massa mobilitata (Jakob & Hungr, 2005).

A tutto ciò si aggiunge anche la meteorologia locale che influisce sull'area contribuente al debris-flow; infatti, dal momento che le piogge che innescano il movimento franoso sono contraddistinte da elevata intensità (mm/h) e brevi durate (minuti), è altamente probabile che non tutto il bacino idrografico sia investito simultaneamente dal medesimo evento meteorico, soprattutto se di grandi dimensioni. Quindi, poiché i singoli episodi pluviometrici potrebbero non interessare tutto il bacino contemporaneamente, anche il debris-flow potrebbe non essere prodotto su tutta l'area durante l'evento (Verdin et al, 2012).

Il cambiamenti climatici possono influenzare i fenomeni di debris-flow. Il progressivo incremento di temperatura dell'aria condiziona sia gli eventi meteorici che la riduzione del permafrost. Si rileva che all'innalzamento della temperatura corrisponde un aumento della frequenza e della magnitudo degli eventi meteorici ed una riduzione dei periodi di ritorno degli eventi estremi. Il restringimento del permafrost comporta una liberazione di materiale non consolidato che può accrescere i volumi di materiale mobilitato (Stoffel et al., 2014).

Per quanto concerne i sistemi di allerta per la protezione delle persone e delle strutture dagli eventi franosi, si evidenzia che nel caso delle colate detritiche non si possono impiegare i sistemi tradizionali basati su stazioni di monitoraggio che avvisano l'Amministrazione o la popolazione qualora vi siano movimenti in atto. Infatti la colata detritica è una tipologia di fenomeno dissestivo caratterizzato da grandi velocità di innesco e propagazione. Inoltre, la rapidità della risposta dissestiva del bacino ad eventi di pioggia intensa, è maggiore soprattutto nei bacini di piccole dimensioni (Kean and Staley, 2011).

Viceversa un valido apparato di *warning*, che metta in salvo la popolazione dal rischio di colata detritica, potrebbe essere costituito da un sistema composito costituito da misuratori di pioggia attrezzati per la gestione del dato in tempo reale (pluviometri), previsioni meteo (*weather forecast*), analisi del territorio e definizione di livelli soglia per l'innesco della colata. Ad esempio è possibile sfruttare la correlazione tra fattori climatici ed innesco di colate detritiche per stimare delle soglie minime di intensità di pioggia che possono dar origine al fenomeno alluvionale (approccio statistico). Va precisato che non è possibile

definire delle soglie di innesco globali, viceversa esse sono sito-specifiche (Guzzetti et al., 2008; Tiranti et al., 2008), e di conseguenza il numero di dati disponibili per l'inferenza statistica decresce notevolmente con diminuzione dell'affidabilità delle soglie stesse.

In Piemonte è attivo un sistema di warning gestito dal Centro Funzionale Regionale di Arpa Piemonte denominato DEFENSE - DEbris Flows triggEred by storms - Nowcasting SystEm (Tiranti et. al, 2014). Il sistema ingloba il servizio di monitoraggio e di nowcasting dei fenomeni torrentizi. Il sistema sfrutta i dati da satellite e del radar meteo per localizzare le celle temporalesche e seguirle nel tempo. Gli effetti al suolo attesi sono valutati sulla base di una classificazione del territorio che identifica i bacini sensibili all'innesco di colate detritiche. In questo modo è possibile valutare la probabilità di innesco di processi torrentizi nei bacini stessi.

Si riporta un esempio di allerta in Figura 3. Le ellissi rappresentano le celle temporalesche identificate dal radar (indice di severità crescente da 1 a 5). I tracciati in rosso rappresentano i percorsi osservati e previsti delle celle e l'intensità di precipitazione in mm/h.

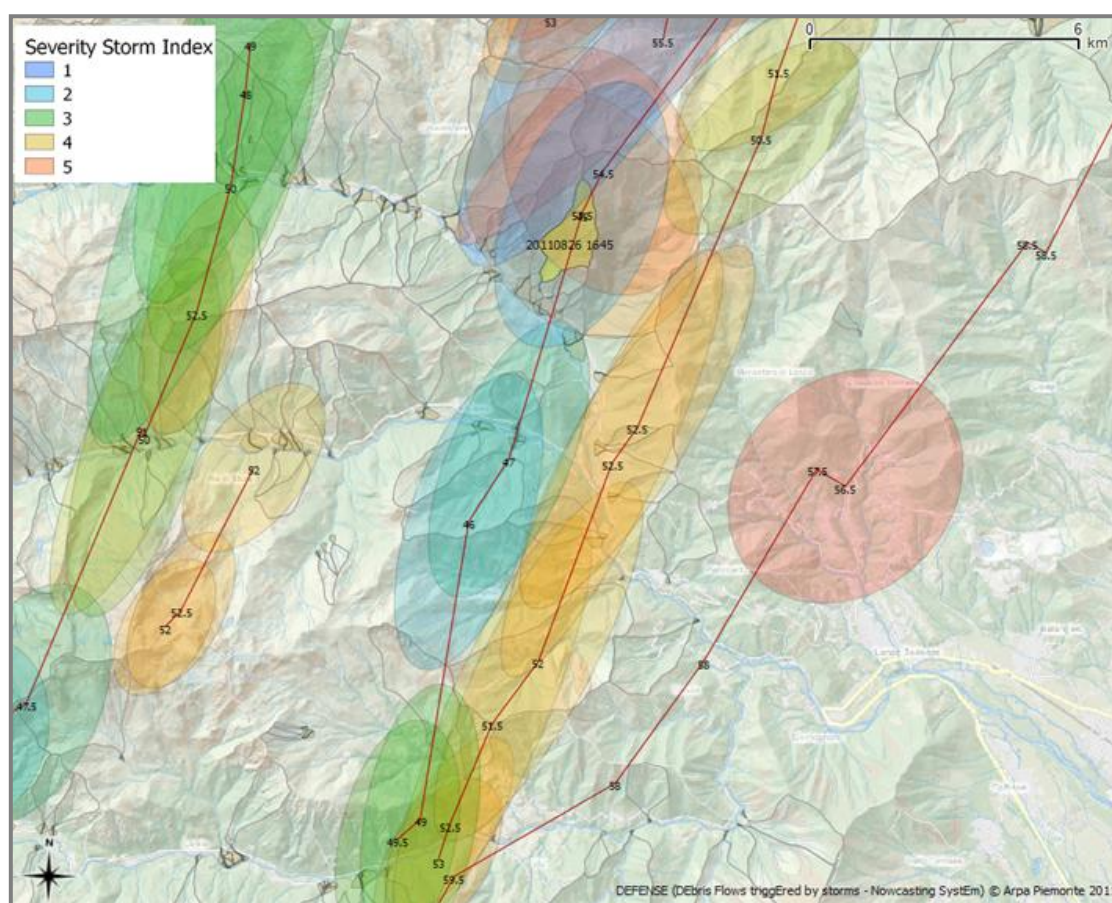


Figura 3: sistema DEFENSE – Arpa Piemonte (Tiranti et al., 2014)

Le valutazioni riguardanti la probabilità di innesco di processi torrentizi per i piccoli bacini montani, ottenute con il modello DEFENSE, sono ad aggiornamento sub-orario. I risultati del modello sono integrati nel "Bollettino di allerta meteoidrologica" che viene pubblicato sul sito di Arpa Piemonte.

2.3 CORRELAZIONE TRA COLATA DETRITICA E INCENDIO

L'evento di debris-flow di Bussoleno del giugno 2018, come già anticipato nell'introduzione, è contrassegnato da una peculiarità che rende ancora più interessante lo studio del fenomeno, ovvero tra le cause predisponenti vi è l'incendio boschivo dell'autunno 2017.

La relazione tra colate detritiche e incendi è sotto esame della comunità scientifica già da alcuni decenni. In effetti in alcuni Paesi, come la California, il problema degli incendi è molto sentito e tali eventi hanno avuto ripercussioni non solo sugli aspetti naturalistici ma, appunto, anche sulla frequenza dei fenomeni franosi.

Le amministrazioni, che devono fronteggiare frequentemente tali situazioni, cercano di sensibilizzare le persone ai rischi a cui sono esposte attraverso degli opuscoli informativi; ad esempio lo stato della British Columbia ha realizzato un pamphlet nel quale vengono riassunti brevemente gli effetti dell'incendio sul territorio (Figura 4) e come prepararsi e gestire i rischi che ne conseguono.



Figura 4: mutamento del terreno e della vegetazione a seguito di un incendio (British Col. pamphlet)

La correlazione tra incendio e colate detritiche è da ricercarsi nella modificazione della morfologia e dell'idrologia dei versanti.

L'incendio denuda i versanti dalla vegetazione esistente e cambia le proprietà del suolo influenzando l'idrologia del bacino e il trasporto di sedimenti; nello specifico, modifica le

caratteristiche meccaniche del terreno e favorisce la formazione di uno strato idrorepellente nel sottosuolo (Figura 5).

Anche piccoli eventi meteorici post-incendio possono incrementare il ruscellamento superficiale (*run-off*), con conseguente erosione del suolo e delle rocce, e trasporto di ceneri e vegetazione lungo i versanti (Cannon et al., 2008). Molte colate detritiche sono state innescate da piogge con intensità poco superiori a 4 mm/h. Si osserva che il fenomeno franoso, con pioggia appena sotto i 100 mm/h, si sviluppa generalmente nel giro di pochi minuti, mentre con intensità di pioggia di 6 mm/h la propagazione lungo il bacino dura fino a 5 ore (Jakob et Hungr, 2005 – Kean et al., 2011).

I fenomeni di debris-flow si manifestano entro pochi anni dall'incendio (entro due anni) e i bacini più a rischio sono proprio quelli più piccoli (Gartner et al., 2004). Il debris-flow generalmente non si manifesta in bacini con area maggiore di 25 km², e quand'anche ci fossero eventi franosi nei sottobacini di questi ultimi, il materiale in frana non avrebbe energia sufficiente per percorrere l'intera lunghezza del bacino (Jakob et Hungr, 2005).

Cannon et al. (2003) hanno proposto una formulazione empirica per valutare l'intensità di pioggia critica che innesci il fenomeno di debris-flow post-incendio: $I=0,25D^{-0,5}$ nella quale D rappresenta la durata in ore dell'evento meteorico ed I la corrispondente intensità in in/h (pollici/ora). Fermo restando la validità della formulazione in contesti diversi da quello esaminato (le formule empiriche sovente sono sito-specifiche), va sottolineato che la metodologia proposta potrebbe essere integrata nei sistemi di *warning* e nella pianificazione delle emergenze. Inoltre va osservato che i valori soglia di pioggia critica post-incendio sono inferiori rispetto a quelli che si avrebbero per un bacino non devastato dal fuoco (Jakob et Hungr, 2005); una formulazione empirica calcolata per la regione alpina italiana e valutata in contesti non sottoposti a incendio prevede la seguente formula $I=25D^{-0,45}$ nella quale D è in ore e I in mm/h (Tiranti et al., 2016).

Per quanto riguarda la litologia, si osserva che le aree costituite da rocce metamorfiche e sedimentarie hanno una maggiore probabilità di contribuire al debris-flow (Friedel, 2011). Anche laddove il terreno ha un elevato contenuto di argilla e dove il versante è maggiormente ripido si registra una maggiore probabilità di colata detritica post-incendio (Verdin et al, 2012). La quantità di sedimenti disponibili al debris-flow post-incendio può incrementare fino a tre volte rispetto al normale tasso di erosione nella foresta indisturbata (Nyman et al, 2015).

Durante l'incendio, il calore del fuoco si propaga sia verso l'alto per moti convettivi, che verso il basso attraverso conduzione del calore in profondità lasciando, al termine dell'evento, un grande quantità di ceneri e materiale parzialmente incombusto che vanno ad aggiungersi al materiale instabile nel processo di dilavamento ed erosione (Figura 5).

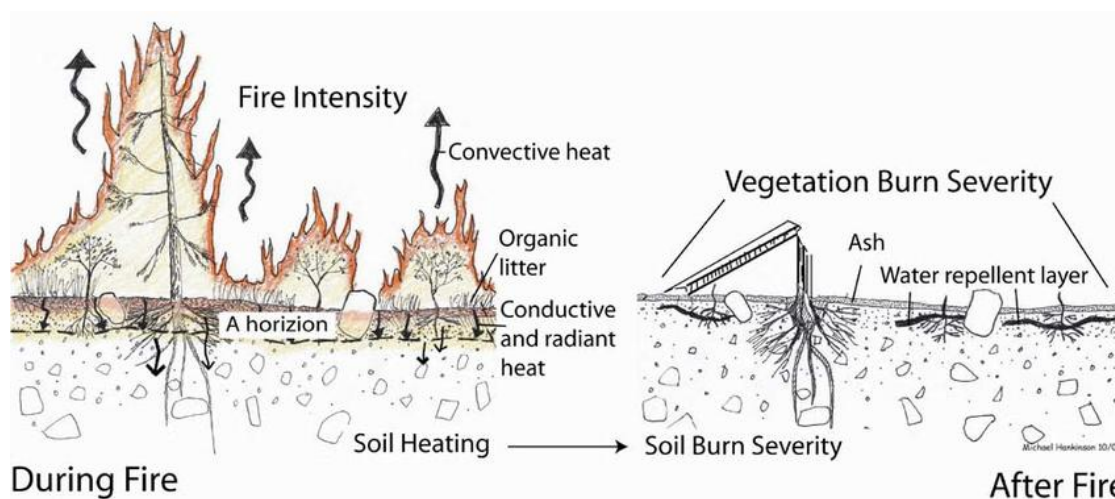


Figura 5: illustrazione degli effetti del fuoco sulla vegetazione, in superficie e sulle proprietà del terreno in profondità (Parsons A. et al, 2010)

L'esperimento condotto da Stoof et al. (2014), nel quale è stato provocato un incendio controllato in un'area boschiva naturale, mostra come la temperatura del terreno, durante l'incendio, rimanga sostanzialmente invariata a pochi centimetri dalla superficie, e solo la parte esposta all'aria raggiunge temperature che possono arrivare fino a 100°C. Le caratteristiche del terreno – densità, contenuto organico, porosità e permeabilità – misurate dopo la prova sono rimaste pressoché invariate mentre la resistenza al taglio è cambiata radicalmente nel tempo: subito dopo l'incendio e nei mesi successivi si è osservato un incremento della resistenza, mentre dopo un anno dall'incendio controllato questa decresce a valori inferiori rispetto a quelli originali pre-combustione.

Tali risultati sembrano in contrasto con quanto osservato in altri contesti: in realtà Stoof et al. evidenziano che i risultati ottenuti sono stati condizionati da alcuni fattori chiave quali l'umidità presente nel terreno (variabile nel tempo) e la scarsa correlazione tra severità dell'incendio e le temperature raggiunte nel terreno. Tale assenza di correlazione è legata alla presenza massiva di fumi della combustione (che ha inficiato le misure di temperatura), oltretutto dalla stagionalità nella quale avviene l'incendio (l'esperimento è stato condotto a febbraio dopo 10 giorni dall'ultimo evento pluviometrico). In altre parole, dall'esperimento si può desumere che non è sufficiente definire la severità di un incendio basandosi sull'altezza

delle fiamme o sulle temperature raggiunte per determinare quelle che saranno le successive variazioni delle caratteristiche meccaniche del terreno; viceversa è necessario definire in modo più dettagliato come l'incendio interagisce con il suolo e le condizioni ambientali al contorno (*"what you see is not always what you get"*).

In sintesi, anche in un incendio particolarmente severo - come quello della Val Susa - non è sufficiente osservare in modo approssimativo le fiamme che bruciano la foresta per stabilire l'intensità dei danni sui versanti, ovvero non vi è proporzionalità diretta tra la magnitudo di un incendio e gli effetti al suolo. D'altro canto, un incendio apparentemente di modeste dimensioni può creare condizioni particolarmente favorevoli allo sviluppo di colate detritiche.

Negli esperimenti condotti in laboratorio su campioni di terreno si è constatato che sono necessarie temperature comprese tra i 200°C ed i 300°C e mantenute per una durata di 10-15 minuti circa, affinché il materiale diventi idrofobico (DeBano e Krammes, 1966; DeBano et al., 1967).

Da un punto di vista meccanico, Stoof et al. (2014) osservano, sulla base dei dati raccolti nel loro esperimento, che la scabrezza del terreno continua a decrescere nel tempo con progressivo aumento del ruscellamento. Tale condizione è ascrivibile soprattutto alla riduzione della vegetazione e alla conseguente erosione superficiale nel breve periodo, mentre gli effetti del calore si fanno sentire più avanti nel tempo (a sette mesi dall'esperimento). Quindi qualora un incendio di elevata intensità modifichi anche solo parzialmente le caratteristiche meccaniche del terreno, non possono essere trascurati gli effetti a lungo termine dovuti all'erosione e al dilavamento.

Lo strato impermeabile, che si forma nel terreno a seguito del calore, modifica anche il modo in cui la goccia di pioggia interagisce con il suolo. Il terreno naturale ha una buona affinità con l'acqua e via via che si bagna di pioggia diviene sempre più compatto e resistente agli spruzzi delle gocce successive. Le particelle idrofobiche invece, non interagendo con l'acqua, sono maggiormente sensibili allo spruzzo e, con le gocce di pioggia successive, continuano a distaccarsi dal suolo senza compattarsi. La conseguenza è che le particelle idrofobiche, distaccandosi continuamente dal suolo, spostano più sedimenti nelle aree limitrofe rispetto al suolo naturale (DeBano, 2000).

Le ricerche condotte da Venäläinen et al. (2013) mostrano che, parallelamente al surriscaldamento globale, c'è un incremento del rischio incendi soprattutto nell'Europa del sud e dell'est. Tuttavia nella regione mediterranea all'aumento dell'Indice di Rischio Incendio

corrisponde una diminuzione delle aree bruciate: tale situazione è legata al fatto che il clima e la meteorologia sono i principali fattori che condizionano gli incendi ma non gli unici. Anche gli aspetti socioeconomici dei Paesi sono importanti, ad esempio il modo in cui viene gestita la fase emergenziale durante l'evento incendiario. Inoltre non vanno trascurati gli aspetti ecologici inerenti il cambiamento nella struttura delle foreste e delle specie arboree dominanti.

Nell'area alpina della Lombardia, nel periodo che va dal 1997 al 2008, gli incendi hanno bruciato circa 33000 ettari di suolo di cui la metà erano composti da foreste (la restante parte da praterie), e nel 90% dei casi la causa dell'innescò è stata di origine antropica (dolosa o accidentale). Nel corso del tempo, in Lombardia, vi è stato un sensibile decremento della superficie totale colpita da incendi, ma i piccoli incendi sono più frequenti rispetto a quelli più estesi: la ridotta dimensione dell'incendio è ascrivibile sia alla presenza di elementi sul territorio che frammentano la superficie percorribile dalle fiamme (come ad esempio le strade) e sia alla rapidità di intervento da parte dei pompieri (Di Mauro et al., 2014).

Da un punto di vista della gestione delle emergenze incendi, in concomitanza con gli eventi calamitosi dell'ottobre 2017, la Regione Piemonte settore Protezione Civile si è dotata un sistema prototipale - realizzato da Arpa Piemonte - per la raccolta, il trattamento e la messa a disposizione dell'utenza interna ed esterna dei dati satellitari disponibili per le aree interessate dagli incendi. Nello specifico sono state considerate le immagini satellitari e le anomalie termiche messe a disposizione su sistemi GIS.

I temi disponibili nell'applicazione GIS sono:

- Ubicazione incendi delle ultime 24 e 48 ore (fonte MODIS FIRMS)
- Ubicazione Incendi degli ultimi 7 giorni (fonte VIIRS)
- Aree coperte da incendi negli ultimi 30 giorni (fonte Copernicus EFFIS, VIIRS)
- Immagini satellitari MODIS Terra e Aqua con aggiornamento giornaliero (fonte NASA/ESRI)
- Temperature e direzione del Vento in tempo reale, aggiornamento ogni 10 min (fonte Arpa Piemonte - Rete Meteoidrografica Regionale)
- Ubicazione Stazioni qualità dell'aria (fonte Arpa Piemonte)
- Altre immagini satellitari Copernicus Sentinel e Landsat 8 con aggiornamento dipendente dalle date di acquisizione

- perimetrazioni dell'emergenza incendi dell'ottobre 2017 a cura del Copernicus Emergency Management Service (EMS)
- Aree percorse da incendi da Archivio stoico Regione Piemonte (fonte WMS Geoportale Regione Piemonte).

Oltre al rischio di colata detritica a seguito di incendio, non può essere trascurato il problema della rivegetazione dell'area colpita. Dal lavoro di Di Mauro et al. (2014), che introduce il concetto di resilienza, definita come il tempo medio necessario perché un sistema dinamico disturbato recuperi le proprie caratteristiche originali, emerge che i tempi di recupero di un'area devastata dall'incendio possono variare da 2 a 6 anni a seconda che la superficie bruciata sia costituita da praterie piuttosto che da foresta. Questo aspetto assume grande rilevanza se si considera che i fenomeni di debris-flow post-incendio avvengono entro due anni, ma il rischio alluvionale (*flash flooding*) permane per molti anni dopo l'incendio (Cannon et al., 2010).

3. DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO

3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto di studio si situa in bassa Valle di Susa nel bacino idrografico Rio delle Foglie (o Comba delle Foglie) del comune di Bussoleno (Torino - Piemonte); tale bacino ha una estensione di circa 1,37 km² e si sviluppa tra la quota minima di 490 mslm in apice di conoide e la quota massima di circa 1700 metri in prossimità della vetta Truc del Vento (Figura 6 e Figura 7).

Come si evince dalla mappa di Figura 7, nel comune di Bussoleno sono presenti, oltre alla Comba delle Foglie, diversi bacini idrografici di piccole e medie dimensioni, distribuiti su entrambi i versanti della Val di Susa (a nord e a sud della Dora Riparia).

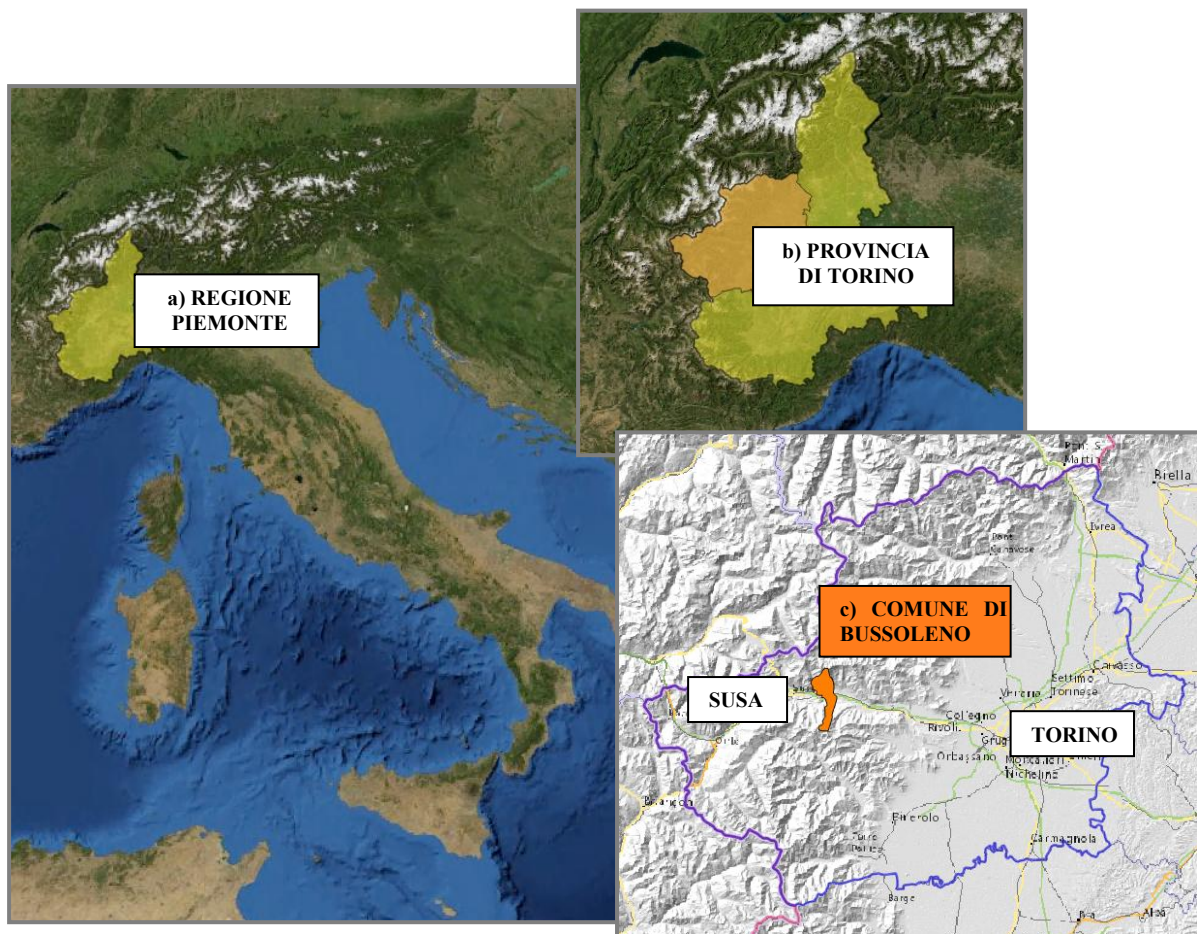


Figura 6: localizzazione del comune di Bussoleno:
a) regione Piemonte, b) provincia di Torino, c) comune di Bussoleno.

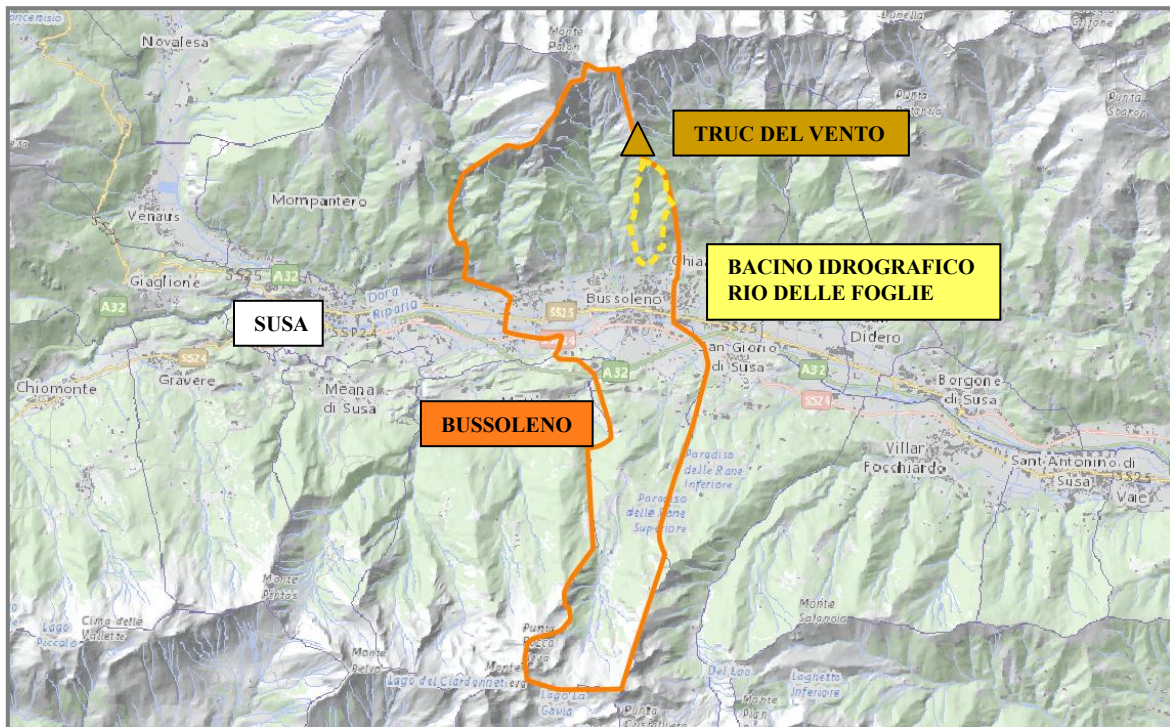


Figura 7: localizzazione del bacino Rio delle Foglie (linea gialla tratteggiata) all'interno del comune di Bussoleno (linea arancione).

Il bacino investigato si trova a nord della Dora, e una parte del dislivello (nella parte nord-est) coincide con i limiti comunali. E' caratterizzato dalla presenza di una ricca vegetazione e da una forte acclività (come meglio specificato al paragrafo 3.5 a pagina 46). L'area di conoide colpita dall'evento di colata detritica, frazione San Lorenzo (Figura 8), è interamente antropizzata con la presenza sia di abitazioni che di terreni coltivati.

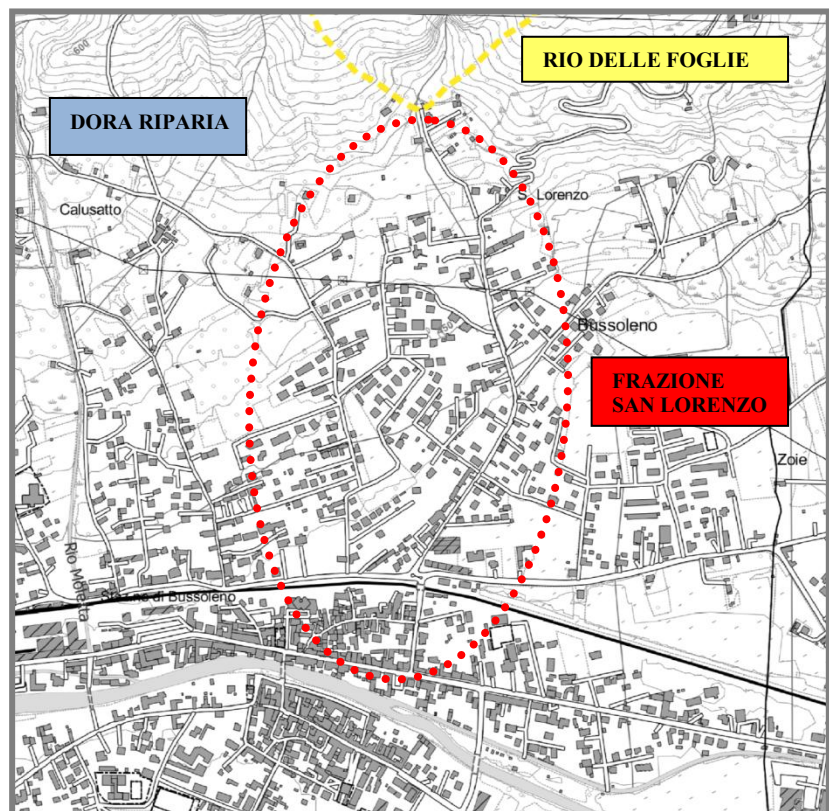


Figura 8: frazione San Lorenzo nel comune di Bussoleno (linea tratteggiata rossa).

3.2 EVENTO DI DEBRIS-FLOW DEL 07 GIUGNO 2018

Il giorno 07 giugno 2018 verso le ore 14:30 una colata di fango e detriti, scesa dalla Comba delle Foglie, ha investito la frazione di San Lorenzo del Comune di Bussoleno (Figura 9).

Il Fatto Quotidiano scriveva: *“Una bomba d’acqua, poi la colata di fango e detriti – improvvisa – che ha travolto il paese. Sono oltre duecento le persone di Bussoleno, in Val Susa, costrette ad allontanarsi dalle proprie case a causa di una frana. Sei sono state portate in salvo solo grazie all’intervento di un elicottero dei vigili del fuoco”*¹.

Su Valsusa Oggi si leggeva: *“Una grossa frana è caduta oggi, giovedì 7 giugno, nella parte alta in via San Lorenzo sopra Bussoleno. Sul posto stanno intervenendo due squadre di vigili del fuoco (Borgone/Sant’Antonino e Susa) con il supporto dell’elicottero Drago. Dalla montagna stanno scendendo fiumi tanta acqua lungo la via, con pietre e fango”*².



Figura 9: deposito della colata detritica avvenuta il 07 giugno 2018 nel comune di Bussoleno

La relazione redatta dalla Regione Piemonte - a supporto della dichiarazione di stato di emergenza - riporta: *“A seguito del fenomeno di dissesto occorso si è resa necessaria l’evacuazione di circa 150 persone, delle quali 132 hanno trovato autonoma sistemazione*

¹ Da Il Fatto Quotidiano online del 07 giugno 2018 - Sito consultato in data 16 giugno 2019 <https://www.ilfattoquotidiano.it/2018/06/07/val-susa-frana-a-bussoleno-duecento-sfollati-siamo-riusciti-a-scappare-in-tempo-sembra-lingferno-fotogallery/4411968/>

² Da Valsusa Oggi online del 07 giugno 2018 – Sito consultato in data 16 giugno 2019 <http://www.valsusaoggi.it/video-e-foto-valsusa-grossa-frana-a-bussoleno-intervento-in-corso/>

presso parenti e amici, mentre 17 sono state ospitate presso strutture rese disponibili dalle Amministrazioni comunali di Bussoleno e San Didero. Una persona anziana è stata ricoverata cautelativamente presso l'ospedale di Susa”.



Figura 10: sorvolo con elicottero dell'area colpita dall'evento del 07 giugno 2018; in evidenza il flusso di fango e detriti che avanza in area di conoide (foto Santo La Ferlita studio Rosso – TO)

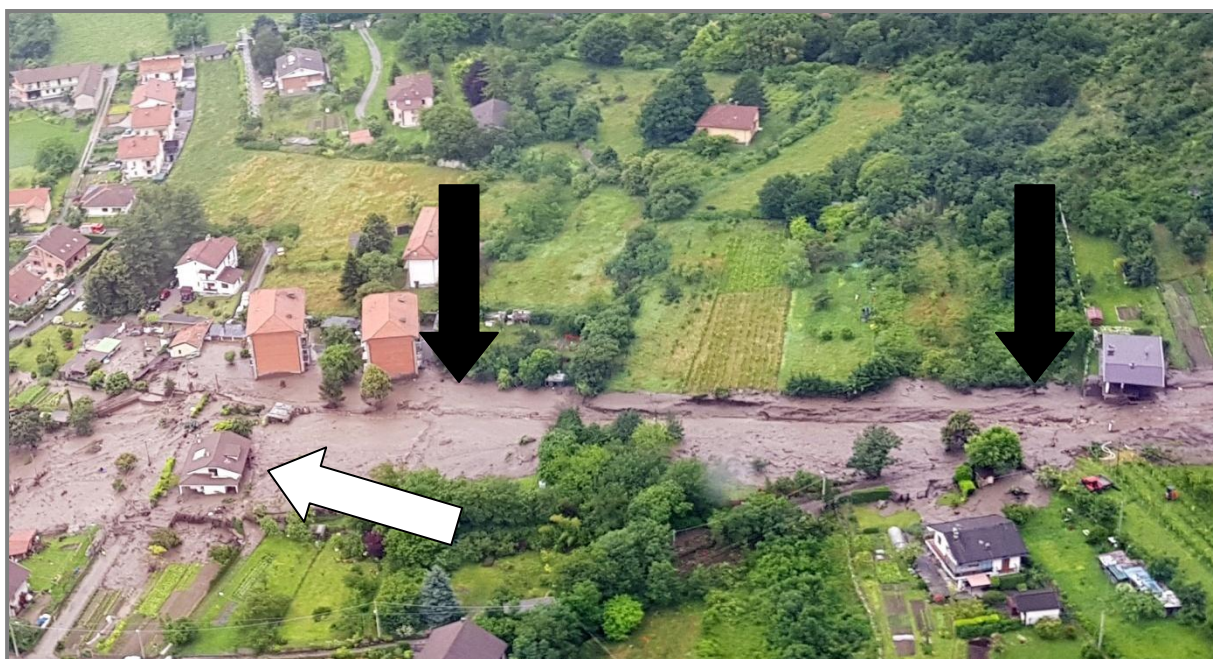


Figura 11: sorvolo con elicottero dell'area dall'evento del 07 giugno 2018; in evidenza la costruzione gravemente danneggiata (freccia bianca) e le due costruzioni completamente distrutte (frecce nere) - (foto Santo La Ferlita studio Rosso – TO)



Figura 12: sorvolo con elicottero dell'area colpita dalla colata il 07 giugno 2018; in evidenza la direzione del flusso (freccia bianca) e il deposito di fango in conoide (linea tratteggiata) - (foto Santo La Ferlita studio Rosso – TO)

La massa fluida si è riversata nel conoide mantenendo - trasversalmente - una forma piuttosto compatta (Figura 10, Figura 11 e Figura 12) e, a seguito dell'intensa attività erosiva, ha fatto riemergere completamente il vecchio corso d'acqua superficiale (bialéra) portando alla luce l'antico ciottolato che ne costituiva l'alveo (Figura 13).

Dopo aver coinvolto parte dell'abitato della frazione San Lorenzo, la frazione liquida della massa ha raggiunto il sottopasso della ferrovia a poche centinaia di metri della Dora Riparia. Alcune delle abitazioni più prossime alla zona di apice sono state gravemente danneggiate,

mentre diverse altre abitazioni hanno subito diffusi fenomeni di alluvionamento; inoltre il materiale fangoso-detritico ha interferito pesantemente con la viabilità e le infrastrutture. Non ci sono state vittime non per la scarsa dirompenza della massa in transito, bensì perché le abitazioni danneggiate o distrutte non erano in quel momento occupate da persone. I garage interrati sono stati completamente riempiti di fango e - nell'ipotesi più drammatica - quest'ultimo avrebbe impedito qualunque via di scampo da parte di eventuali occupanti.



Figura 13: veduta aerea del deposito della colata due giorni dopo l'evento; in evidenza la vecchia bialera riemersa dopo il passaggio della massa fluida (foto scattata il 09 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Direzione Opere Pubbliche)

Il fenomeno franoso è classificabile come *debris-flow*, ovvero una miscela costituita in prevalenza da particelle fini con all'interno ciottoli e massi fino al metro cubo. Si aggiunge alla lista una rilevante quantità di materiale vegetale flottante, compresi rami e tronchi di ragguardevoli dimensioni come ben visibile in Figura 14. La parte fine del detrito è costituita da una matrice sabbiosa-limosa e ghiaia - tipica composizione di questo tipo di fenomeno - alla quale si aggiungono i residui della combustione dovuti all'incendio dell'ottobre 2017, che si presentano sotto forma di ceneri e pezzi di arbusti ed alberi carbonizzati.

Arpa Piemonte nel *Rapporto Evento del 07/06/2018* ha stimato, sulla base dei rilievi speditivi effettuati immediatamente dopo l'evento, un volume di materiale depositato in conoide di circa 15000 m³ - 20000 m³.

Le altezze massime del deposito, costituite anche da blocchi di dimensioni fino a 1 m³, non raggiungono i due metri. Oltre ai rilievi effettuati immediatamente dopo l'evento, nel corso del 2019 sono state effettuate delle misurazioni dei livelli raggiunti dal deposito in prossimità delle costruzioni (meglio descritte in paragrafo 3.7).



Figura 14: limiti laterali del deposito in prossimità del Catastale 1008: in evidenza tronchi e rami immersi nella matrice fangosa (foto scattata il 09 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Direzione Opere Pubbliche)

La colata è stata innescata da un evento pluviometrico intenso a carattere temporalesco preceduto da analoghi fenomeni meteorologici avvenuti nel corso del mese precedente. I fenomeni precedenti hanno causato esondazioni in conoide di minore entità - dopo aver saturato il terreno dei versanti della Comba delle Foglie - e verosimilmente hanno contribuito a mobilitare parte dei detriti dai pendii verso alcuni punti dell'asta principale, i quali si sono accumulati in condizioni di forte instabilità statica in attesa di essere successivamente spazzati via dalla pioggia caduta il 07 giugno.

Nello specifico, per quanto concerne le precipitazioni, va rilevato che il “Piemonte è stato interessato da un prolungato periodo umido che ha portato a registrare precipitazioni ben al di sopra della norma climatica. Il mese di maggio 2018, infatti, è stato il 7° maggio più piovoso degli ultimi 60 anni con un surplus pluviometrico di oltre il 60% rispetto al periodo di riferimento 1971-2000” (Arpa P., Rapporto Evento del 07/06/2018). E ancora, “nella media Val di Susa, da inizio anno si è osservato un cumulo di precipitazioni superiore del 68% rispetto alla norma climatica 1971-2000 (Figura 15) e, alla data del 7 giugno 2018, delle ultime 40 giornate, se ne erano osservate in zona ben 30 con pioggia a partire dal 29 aprile”. In sintesi le condizioni meteorologiche straordinarie, agendo da cause predisponenti, hanno contribuito giorno dopo giorno a favorire i presupposti per l’innescò dei movimenti detritici, saturando il terreno – indebolito in superficie nella sua tessitura e reso impermeabile in profondità dagli incendi dell’autunno precedente – e dilavandolo superficialmente senza più il contributo benefico della vegetazione.

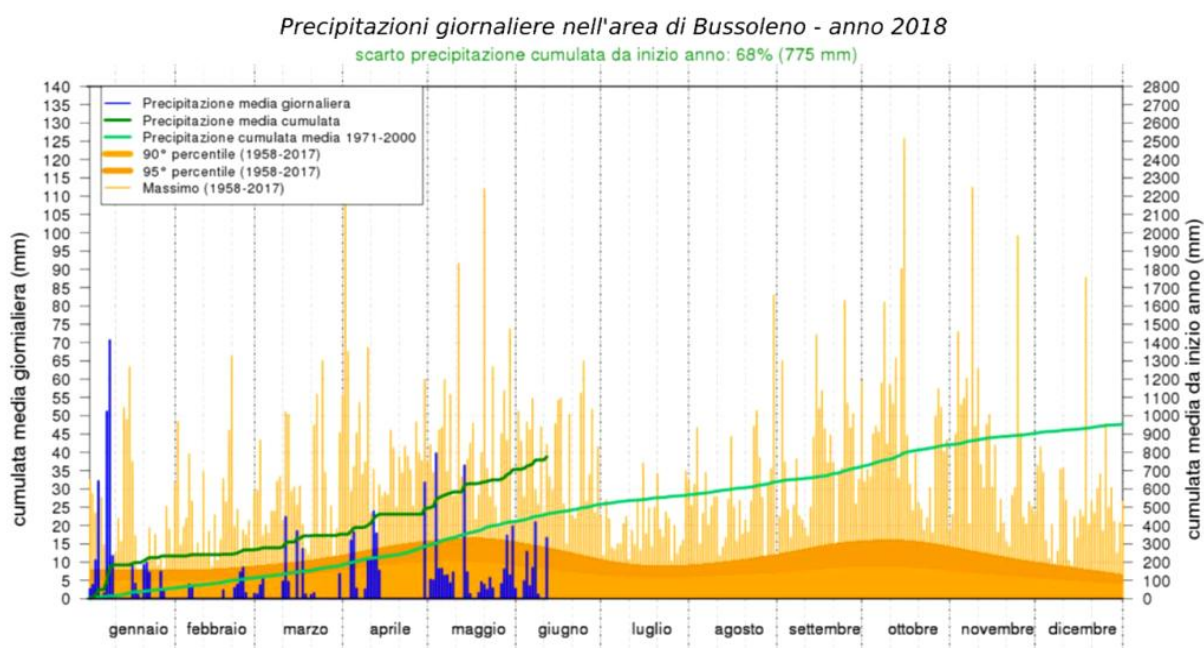


Figura 15: Andamento giornaliero delle precipitazioni in media Valle di Susa nel 2018 rispetto alla norma climatica 1971-2000 (Dati ed elaborazione Arpa Piemonte - Rapporto evento del 07/06/2018)

Nelle aree limitrofe alla Comba delle Foglie sono presenti alcuni pluviometri inseriti all’interno della rete di rilevamento gestita da Arpa Piemonte; tuttavia nelle zone montane l’impiego dei pluviometri è fortemente limitato poiché le celle temporalesche, oltre a spostarsi velocemente, possono investire una superficie che è nettamente inferiore rispetto all’area dei bacini stessi e pertanto la misura puntuale dell’intensità di pioggia, per quanto precisa e

trasmessa in tempo reale, non è in grado di rappresentare ciò che sta accadendo nelle aree montane/collinari limitrofe.

Il sistema più idoneo per monitorare gli eventi temporaleschi è rappresentato dal sistema radar che, scansionando ripetutamente vaste porzioni di territorio, è in grado di descrivere l'andamento in tempo reale degli eventi con risoluzione di circa mezzo chilometro quadrato. Poiché la visibilità del bussolenese rispetto al sistema radar è ridotta a causa dell'orografia del territorio, la lettura dei dati pluviometrici viene eseguita in quota; nello specifico, considerando l'elevazione di 2.0deg, la quota delle osservazioni del radar di Bric della Croce verso Bussoleno è di circa 2500m s.l.m., mentre l'elevazione successiva di 3.0deg corrisponde ad una quota di circa 3500 m.s.l.m.. Il sistema radar necessita quindi di una adeguata calibrazione ed i dati ottenuti devono essere opportunamente corretti. La calibrazione del radar, per ottenere una stima corretta della pioggia, viene fatta sfruttando positivamente i pluviometri presenti in Val Susa (Arpa P. - Rapporto evento 07/06/18; Nyman et al., 2015). Le durate di pioggia più critiche sono state quelle dei dieci minuti (10 mm) e della mezz'ora (15 mm) che corrispondono ad un tempo di ritorno di 5 anni (valutato sulla base delle linee segnalatrici dell'Atlante delle Piogge Intense³).

Tra le cause predisponenti, oltre alle piogge nei giorni antecedenti l'evento, vi è sicuramente il vasto incendio che ha colpito la Val Susa nell'ottobre 2017. La correlazione tra incendio e debris-flow (illustrata al paragrafo 2.3 a pagina 12) è chiara: il fuoco, oltre a bruciare la vegetazione, modifica le caratteristiche meccaniche ed idrologiche del terreno amplificando il ruscellamento (*run-off*) dai versanti. I dettagli dell'incendio che ha colpito il bussolenese sono illustrati al paragrafo 3.3.

In generale si osserva che l'evento meteorico capace di innescare una colata detritica in un area già investita da incendi è fortemente correlato con le caratteristiche specifiche del bacino sia in termini di vegetazione che geomorfologiche: ogni bacino, quindi, deve essere investigato singolarmente. Tuttavia vi sono alcune peculiarità che caratterizzano trasversalmente tutti i bacini; ad esempio, contrariamente a quanto ci si aspetterebbe, sono sufficienti eventi meteorici con tempi di ritorno compresi entro i 10 anni, ovvero con durate di pioggia che non superano la mezz'ora, per innescare il fenomeno di debris-flow in qualunque tipo di bacino (Cannon et al., 2008; Kean et al., 2011; Staley et al., 2012; Nyman et al., 2015).

³ Geoportale Arpa Piemonte – Atlante Piogge Intense. Sito consultato in data 17/06/2019 http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalservice_arpa/catalog/search/resource/details.page?uuid=ARLPA_TO%3A04.03.01-D_2013-04-12-15%3A22

L'evento di Bussoleno rientra perfettamente in questo tipo di casistica confermando quindi una caratteristica comune a tutti i versanti che può essere sfruttata in fase previsionale.

L'azione erosiva dell'acqua sui versanti è evidente in Figura 16 dove sono chiaramente visibili i *rills* provocati dal ruscellamento dell'acqua. L'alveo dell'incisione principale appare ripulito dai detriti, con il substrato sottostante che affiora in diversi punti del suo sviluppo (Figura 17). I tecnici della Arpa Piemonte osservano che *“nei punti con riduzione di pendenza si ha deposito di materiale sui bordi (effetto soglia naturale con deposizione di materiale), mentre in corrispondenza dei tratti a forte pendenza si è riscontrata la notevole azione erosiva della colata con escavazione laterale e presa in carico di materiale grossolano. Tuttavia, buona parte dei volumi di materiale rimobilizzato a granulometria medio-fine è stato trasportato a valle giungendo nell'area di conoide antropizzata”* (Rapporto evento 07 giugno 2018).



Figura 16: scarpate del bacino Comba delle Foglie; in evidenza l'erosione superficiale con formazione di *rills* (foto scattata il 09 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Dir. Opere Pubbliche)



Figura 17: erosione di materiale lungo l'asta principale e denudazione del materiale grossolano sottostante (foto scattata il 08 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Dir. Opere Pubbliche)

I tecnici di Arpa Piemonte e della Regione Piemonte hanno provveduto, nei giorni successivi all'evento, ad effettuare una perimetrazione del deposito che si riporta nelle Figure Figura 18 e Figura 19. La delimitazione dell'area inizia in apice di conoide ed arriva fino al sottopasso ferroviario a pochi metri dalla Dora: in questo zona il fluido in movimento ha perso la maggior parte della frazione solida ed è costituito prevalentemente da frazione liquida.

La classificazione del materiale depositato è stata effettuata sulla base della granulometria secondo la seguente suddivisione:

- materiale grossolano (ghiaia ciottoli e massi in matrice fine)
- materiale fine (sabbioso-limoso con ghiaia e ciottoli).

Inoltre, i tecnici hanno provveduto a compiere della misurazioni puntuali dello spessore del deposito; purtroppo la maggior parte dei punti di misura sono ubicati nella parte distale del conoide dove la massa in transito aveva già dissipato buona parte dell'energia e dove gli spessori sono minori rispetto alle aree più a nord. Tuttavia è stato comunque possibile ricavare informazioni, circa l'evoluzione del fenomeno nella parte alta del conoide,

osservando le tracce di fango lasciate dalla colata sulle pareti esterne delle costruzioni (si veda il sopralluogo del febbraio 2019 al paragrafo 3.7).

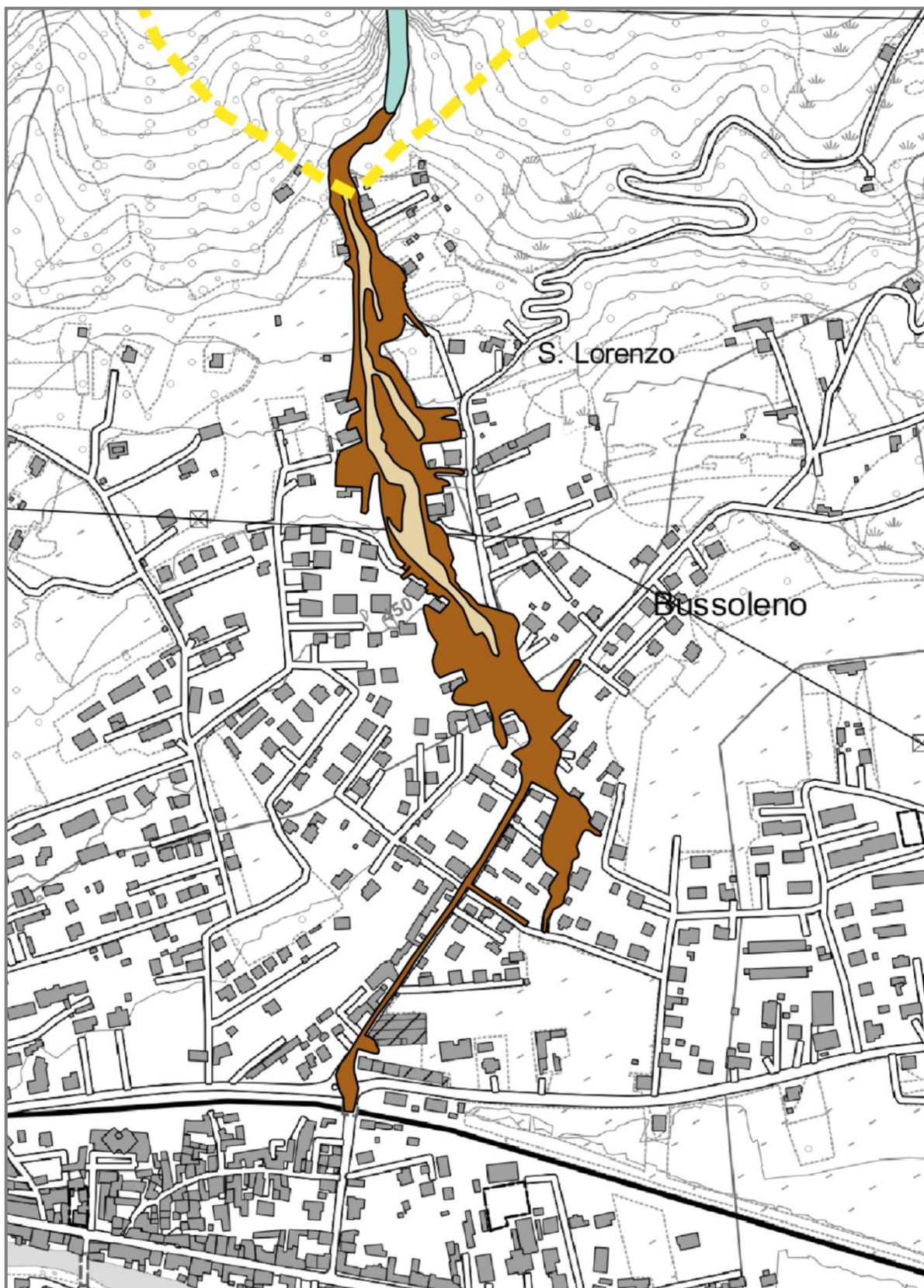


Figura 18: perimetrazione del deposito. In beige chiaro il materiale grossolano (ghiaia ciottoli e massi in matrice fine), in marrone scuro materiale fine (sabbioso-limoso con ghiaia e ciottoli).

Perimetrazione a cura di Arpa Piemonte. Sfondo cartografico: Base Cartografica di Riferimento Annuale 2015 raster b/n 1:10.000.

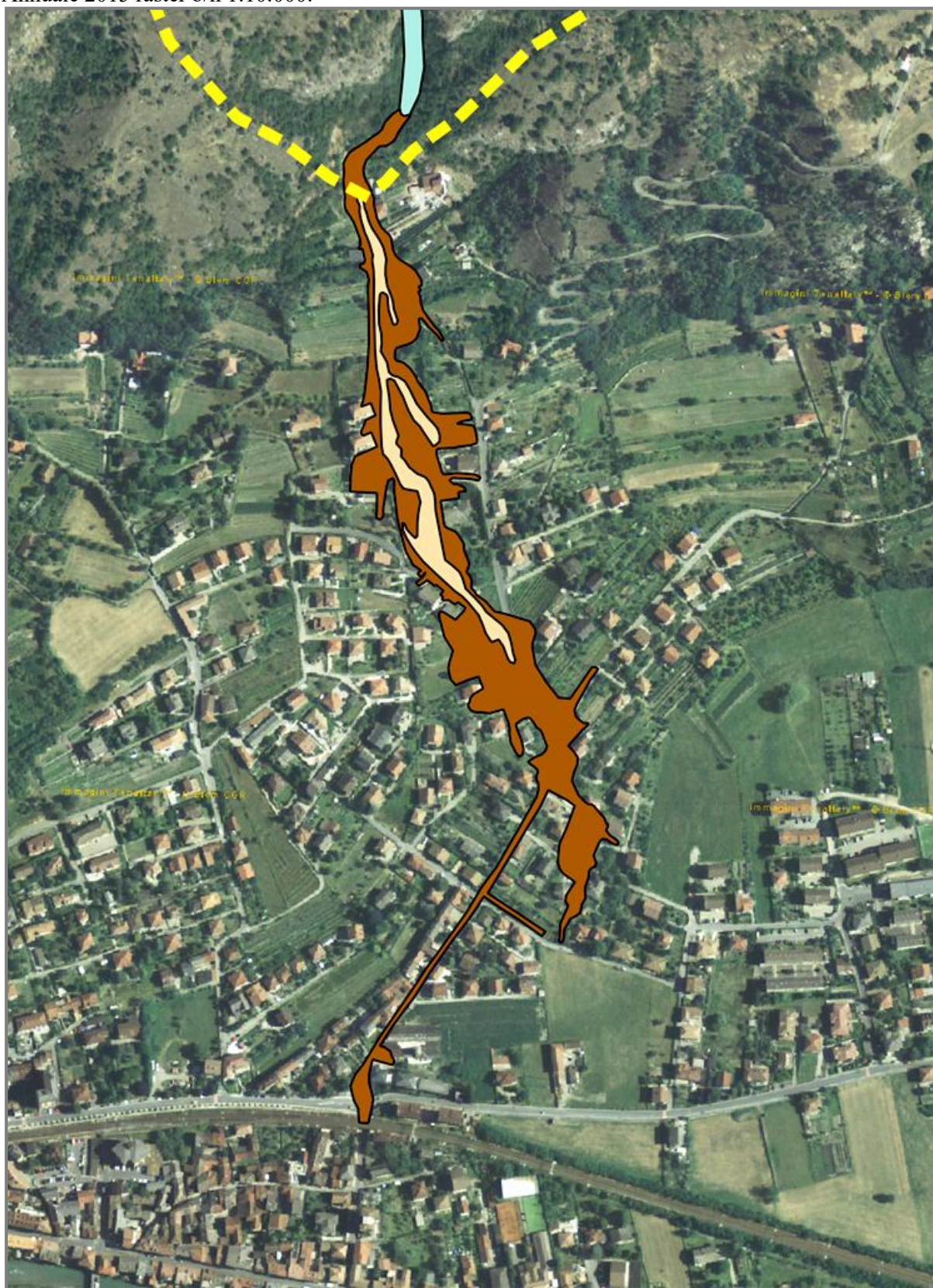


Figura 19: perimetrazione del deposito. In beige chiaro il materiale grossolano (ghiaia ciottoli e massi in matrice fine), in marrone scuro materiale fine (sabbioso-limoso con ghiaia e ciottoli).

Perimetrazione a cura di Arpa Piemonte. Sfondo cartografico: Ortofoto Ambito progetto Europeo RISK-NAT.

Stima della distanza raggiunta dal deposito e del volume di innesco

Una stima approssimativa dell'area potenzialmente interessata dal fenomeno, basata su aspetti energetici, può essere fornita dalle formule empiriche ricavate dall'analisi statistica di eventi di debris-flow. Vengono qui proposte due formulazioni che tengono conto rispettivamente di 71 casi (r^2 pari a 0.76) e 160 casi di debris-flow (r^2 pari a 0.75). I dati in ingresso sono la differenza di quota tra il punto di innesco e l'area di deposito, che nel caso in esame sono pari a 1600mslm e 450 mslm, ed il volume di massa mobilitato pari a 17.000 m³.

Equazione 1: calcolo della distanza massima del deposito detritico (Corominas, 1996)

$$L = 1.03 \cdot V^{0.105} \cdot H = 1.03 \cdot 17000^{0.105} \cdot 1150 = 3294 \text{ m}$$

Equazione 2: calcolo della distanza massima del deposito detritico (Rickenmann, 1999)

$$L = 1.9 \cdot V^{0.16} \cdot H^{0.83} = 1.9 \cdot 17000^{0.16} \cdot 1150^{0.83} = 3133 \text{ m}$$

Le due equazioni empiriche forniscono una distanza di deposito della massa pari a circa 3,2 km; la distanza tra la parte più a nord del bacino idrografico della Comba delle Foglie e la parte distale del deposito dell'evento del 08 giugno è pari a circa 2,7 km.

Per quanto riguarda i volumi di detrito mobilitati, esistono anche in questo caso delle formulazioni empiriche. Si riporta ad esempio il modello proposto da Cannon et al. (2010): l'equazione empirica (Equazione 3 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) è frutto di una analisi statistica di colate detritiche post-incendio avvenute negli Stati dell'ovest degli USA, nella quale sono stati considerati i seguenti aspetti:

- pendenza e asprezza del bacino
- direzione media (azimut)
- severità dell'incendio
- granulometria del terreno
- pioggia caduta (mm)

Equazione 3: stima del volume di colata detritica post-incendio (Cannon et al., 2010)

$$\ln V = 7.2 + 0.6 \ln A + 0.7\sqrt{B} + 0.2\sqrt{T} + 0.3$$

in cui:

V volume di innesco [m³]

<i>A</i>	superficie del bacino con pendenza superiore al 30% [km ²]
<i>B</i>	superficie del bacino con bruciata con modesta o elevata intensità [km ²]
<i>T</i>	pioggia totale [mm]

Per il bacino in esame, tenuto conto che il parametro *A* è di 1,32 km², che la totalità del bacino è stata interessata dall'incendio (*B* pari a 1,37 km²) e che sono complessivamente caduti 15 mm di pioggia (Arpa P., Rapporto Evento del 07/06/2018), il volume di innesco stimato è pari a 10500 m³.

Questi metodi empirici sono utili all'individuazione, in fase previsionale, dell'intensità del fenomeno e delle aree maggiormente coinvolte, ma evidentemente non sono sufficienti per comprendere la dinamica del fenomeno né per stabilirne la reale magnitudo nei confronti delle zone colpite.

3.3 INCENDIO DELL'OTTOBRE 2017 NEL RIO DELLE FOGLIE

Come già premesso nei paragrafi precedenti, tra le cause predisponenti più importanti vi è sicuramente l'incendio avvenuto nel 2017 in Val Susa.

La definizione di incendio boschivo è data dall'articolo 2 della Legge n. 353 del 21 novembre 2000 Legge quadro sugli incendi boschivi che recita: *“per incendio boschivo si intende un fuoco con suscettività a espandersi su aree boscate, cespugliate o arborate, comprese eventuali strutture e infrastrutture antropizzate poste all'interno delle predette aree, oppure su terreni coltivati o incolti e pascoli limitrofi a dette aree”*.

Gli incendi boschivi possono quindi assumere forme e caratteristiche molto diverse fra loro sulla base dei fattori ambientali che contraddistinguono la zona dove essi si sviluppano

I fattori che regolano la tipologia di incendio boschivo e la dinamica evolutiva, sono raggruppabili in tre categorie:

- *fattori meteorologici*
- *fattori orografici*
- *combustibili vegetali*

Nel primo fattore sono ricomprese l'umidità relativa dell'aria, il vento, le precipitazioni e la temperatura dell'aria. I fattori orografici, rispetto a quelli meteorologici, hanno la caratteristica di essere pressoché costanti nel tempo e sono: pendenza, esposizione e rilievo. Infine, con “combustibile vegetale” si intende *“tutta la vegetazione erbacea, arbustiva e arborea, sia essa viva o morta. La quantità di combustibile vegetale presente, misurata in tonnellate per ettaro, prende il nome di carico di incendio. Le caratteristiche del combustibile vegetale, inteso sia come singola parte di una pianta sia come formazione vegetale, che influiscono sulla propagazione del fuoco sono: l'inflammabilità, il potere calorifico, l'umidità, la disposizione spaziale e la densità”* (Reg. Veneto, Tipologie di incendio, 2009).

La correlazione tra incendio e colate detritiche è stata discussa al paragrafo 2.3.

Nello specifico, nell'ottobre del 2017 in Val Susa si è sviluppato un incendio di vaste dimensioni che ha coinvolto un'area molto estesa del versante orografico sinistro della Dora Riparia (Figura 20). L'area complessiva interessata dagli incendi è pari a circa 4000 ettari ed ha coinvolto soprattutto le zone di Susa, Mompantero, Bussoleno e Chianocco; il bacino Comba delle Foglie è stato percorso dalle fiamme per il 97% della sua superficie.

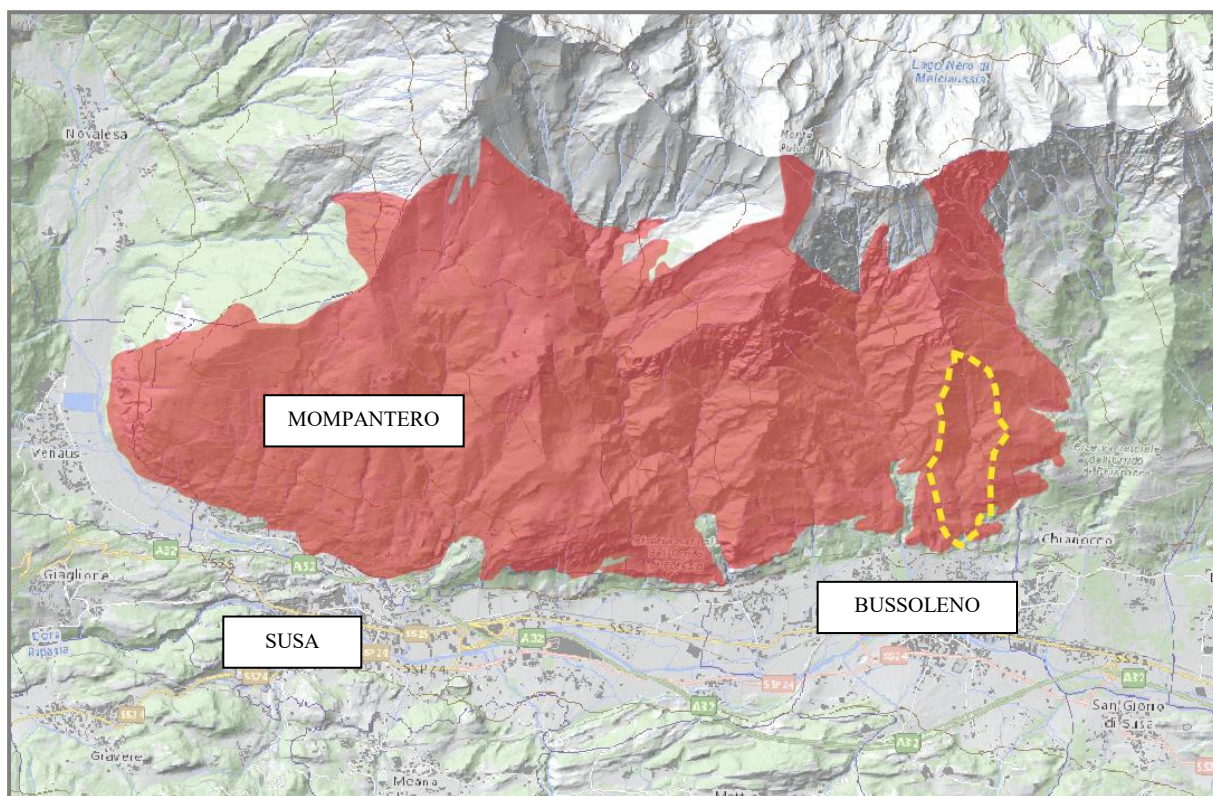


Figura 20: area della Val Susa investita dall'incendio dell'ottobre 2017 (area rossa) e bacino Rio delle Foglie (linea tratteggiata gialla). Perimetrazione dell'incendio a cura del Nucleo tutela forestale, ambientale e agroalimentare dei Carabinieri (Arpa Piemonte – Rapporto evento del 07/06/2018)

Dal sito dell'AIB – Squadra Antincendi Boschivi Bussoleno si legge che *“l'incendio è stato alimentato per diversi giorni dal forte vento, la situazione sul nostro territorio era molto critica dato che l'incendio era di proporzioni enormi ed è stato molto difficile contenerlo. Il fronte dell'incendio continuava ad allargarsi: le fiamme, da Bussoleno, sono arrivate fino al Rocciamelone e hanno raggiunto anche diverse borgate di Bussoleno che sono state evacuate e hanno minacciato anche altri comuni dell'area. Anche lo scenario in quota era drammatico: le fiamme hanno divorato tutta la montagna sul territorio di Bussoleno: dall'Orrido di Foresto ai confini con Chianocco. La vasta estensione dell'incendio è stata dovuta a tre fattori: siccità straordinaria, vento forte che alimentava le fiamme, e abbondanza di combustibile secco e pronto a bruciare”*⁴.

Dal sito dell'Ansa si legge che *“le fiamme hanno raggiunto i 1.900 metri di quota, bruciando un centinaio di ettari di vegetazione. I vigili del fuoco, impegnati a domare il rogo,*

⁴ Sito consultato in data 09/06/2019 (<http://www.aibbussoleno.it/2018/03/22/incendio-bussoleno-2017/> sito consultato in data 09 giugno 2019).

anche con l'ausilio di due canadair, hanno evacuato alcune borgate e tratto in salvo un'anziana da un casolare di Chianocco”⁵



Figura 21: veduta di fiamme alte una cinquantina di metri nelle pinete di Mompantero, alla base del Rocciamelone, sotto raffiche di foehn a 90 km/h, il 29 ottobre (f. Luca Giunti – tratta dal sito <http://www.nimbus.it/clima/2017/171101SiccitaIncendiNordOvest.htm>)

Nelle immagini di Figura 21 e Figura 22 è chiaramente visibile l'intensità dell'incendio che è divampato lungo la valle, con fiamme alte anche alcune decine di metri. L'incendio ha distrutto buona parte della vegetazione ed ha creato una notevole quantità di fumo da combustione che disperdendosi nell'aria ha peggiorato la qualità dell'aria non solo localmente, ma anche nell'area torinese, distante circa 40 km. A Torino si sono registrati valori molto elevati di componente primaria del PM10 (da combustione) identificata grazie alla determinazione analitica del levoglucosano (composto organico che si produce dalla pirolisi della cellulosa - Arpa P. Rapporto tecnico su incendi boschivi 2017)

⁵ Sito consultato in data 11/06/2019 http://www.ansa.it/sito/notizie/cronaca/2017/10/22/fiamme-in-val-susa-evacuate-borgate_e283efd3-fe6c-4734-84f1-958af71d2a1c.html



Figura 22: le fiamme sull'alta montagna di Bussoleno (Davide Petrizzelli – tratta dal sito <http://www.torinotoday.it/cronaca/incendi-boschivi-24-ottobre-2017.html>)

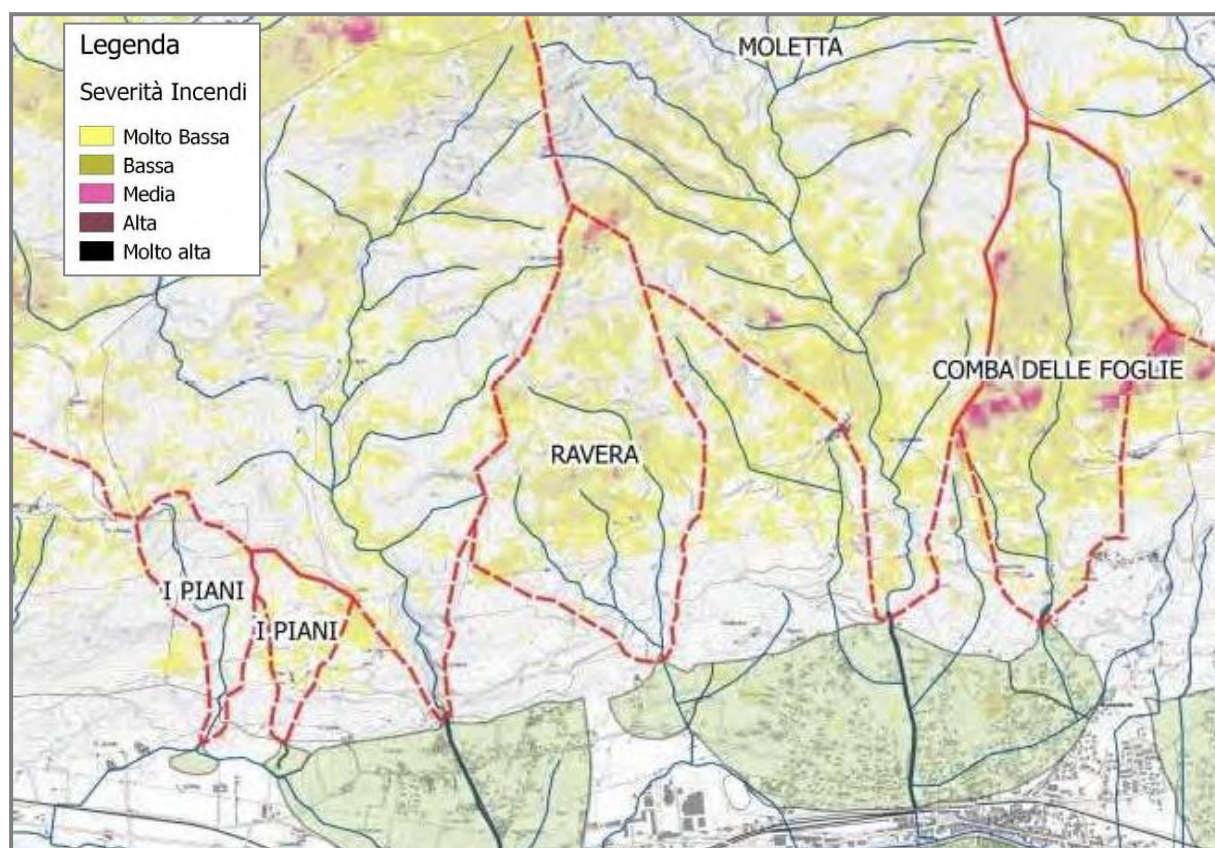


Figura 23: Carta della severità degli incendi e delimitazione dei bacini interessati (Regione Piemonte – Rapporto sull'evento Giugno 2018)

La carta della severità degli incendi redatta dalla Regione Piemonte (Figura 20) mostra come la Comba delle Foglie sia stato il bacino maggiormente colpito dall'evento dell'ottobre 2017 e ciò ha influito drasticamente sulle caratteristiche pedologiche e dell'ecosistema forestale.

In particolare la testata del bacino è stata quasi completamente bruciata, con conseguente distruzione di una estesa copertura boscata. Il risultato di tale evento è stata la perdita della capacità coesiva e di resistenza nei confronti dell'erosione da ruscellamento che venivano garantite dalle radici della vegetazione, inoltre si è generato uno strato superficiale di ceneri e residui incombusti mobilizzabili, oltretutto la formazione di un *layer* impermeabile - a pochi centimetri dalla superficie - che ha reso maggiormente instabile lo strato immediatamente superiore rendendolo disponibile alla mobilitazione in caso di pioggia intensa.

E' interessante osservare le condizioni meteo-climatiche che hanno caratterizzato il mese di ottobre 2017 durante lo svolgersi dell'evento incendiario. Dal Rapporto tecnico di Arpa sugli incendi boschivi si legge che in *“Piemonte il mese di ottobre 2017 è risultato il più secco degli ultimi 60 anni e il secondo mese di ottobre più caldo dal 1958”*. L'anomalia della situazione meteorologica del mese di ottobre, che ha visto la presenza di numerosi episodi di foehn, *“ha contribuito a creare condizioni favorevoli per lo sviluppo e la successiva rapida propagazione degli incendi boschivi che hanno colpito il Piemonte”*.

Le raffiche di vento caldo e secco hanno superato, in alcune località, i 90 km/h favorendo così la propagazione delle fiamme tra la vegetazione in tempi estremamente rapidi. I dati delle stazioni di misura meteorologiche più vicine al comune di Bussoleno sono illustrati in Figura 24; si osserva che tutto il mese di ottobre è stato caratterizzato da vento sostenuto con tre episodi di raffiche intense (il comune di Bussoleno è collocato a metà strada tra la stazione di Pietrastretta e quella di Borgone).

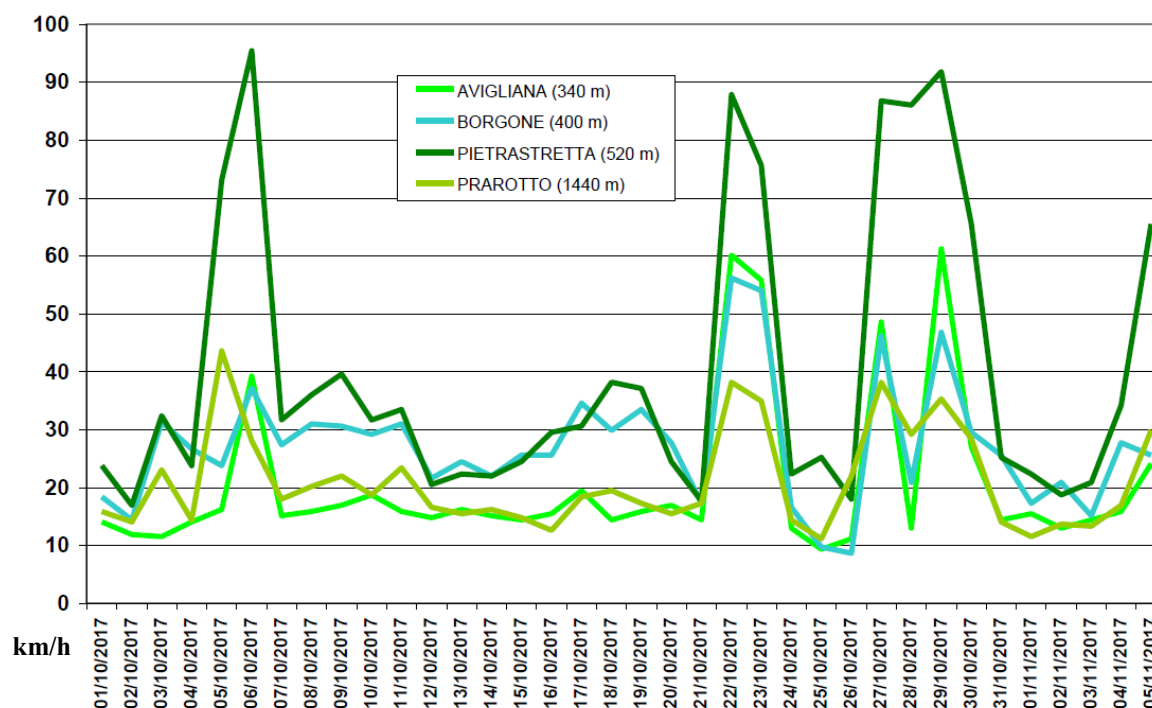


Figura 24: massima raffica giornaliera nel periodo 1 ott - 5 nov del 2017 – nelle stazioni di rilevamento ubicate in Val di Susa (Arpa P. Rapporto tecnico su incendi boschivi 2017).

Oltre al vento, anche le temperature e la pioggia hanno giocato un ruolo fondamentale nell'evoluzione degli eventi dal momento che hanno reso lo strato superficiale del terreno e la vegetazione particolarmente secchi. Quello del 2017 è risultato essere il mese di ottobre più caldo degli ultimi 60 anni distanziando di 1,2°C quello del 2001 che ora è il secondo. L'anomalia termica dei valori massimi è stata di ben 4,5°C e la temperatura massima in pianura è pari a 20,8°C (valore medio dei massimi).

Per quanto riguarda la pioggia Arpa Piemonte evidenzia inoltre che il mese investigato è risultato il più secco degli ultimi 60 anni, con una precipitazione media di circa 3 mm, inferiore del 98% rispetto alla media climatologica di 133.2 mm degli anni 1971-2000. Le precipitazioni sono state praticamente assenti sulla quasi totalità della pianura piemontese, su Alpi Cozie, Marittime e Liguri ma anche sul resto dell'arco alpino e sul settore appenninico il deficit è stato marcato: un evento da considerarsi raro in un mese che in Piemonte è statisticamente il più piovoso in tutto l'anno.

In sintesi si evidenzia come le condizioni meteo-climatiche del periodo abbiano pienamente favorito lo sviluppo dell'incendio che ha potuto quindi spandersi lungo la sponda orografica sinistra della Dora Riparia e investire alcune migliaia di ettari di terreni modificandone pesantemente le caratteristiche chimico-fisiche e naturalistiche.

A distanza di circa sette mesi dall'incendio gli effetti sono ancora presenti nei versanti della Comba delle Foglie; nelle figure seguenti (dalla Figura 25 alla Figura 31) si notano le aree che sono state maggiormente colpite dalle fiamme e che si presentano ancora brulle e secche. Tronchi, fusti e radici carbonizzati mostrano la violenza del calore che ha trasformato radicalmente la componente arborea ed ha segnato profondamente il terreno come ben visibile in Figura 27 e Figura 28. Il manto erboso è cresciuto velocemente in buona parte dei versanti ma la resistenza offerta al ruscellamento e alla mobilitazione della strato superficiale del terreno non è stata sufficiente a contenere il deflusso superficiale delle piogge che hanno scatenato l'evento alluvionale del 07 giugno 2018.

Le immagini dalla Figura 25 alla Figura 30 sono state scattate in data 05 giugno 2018 (due giorni prima dell'evento franoso) dal tecnico della Regione Piemonte dr. Daniele Drago della Direzione Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Montagna,Foreste, Protezione Civile, Trasporti e Logistica della Regione Piemonte (i tecnici regionali si erano recati in zona per effettuare attività di monitoraggio e per valutare gli effetti degli incendi dopo lo scioglimento della neve e la ripresa della rigenerazione vegetativa ⁶).



Figura 25: versanti colpiti dall'incendio sette mesi dopo l'evento

⁶ Torino Today online del 07 giugno 2018 – Sito consultato in data <http://www.torinotoday.it/cronaca/Frana-Bussoleno-Lorenzo.html>



Figura 26: tronchi carbonizzati lungo il pendio (foto scattata il 05 giugno 2018).



Figura 27: radici carbonizzate sette mesi dopo l'evento incendiario; in evidenza il terreno modificato e indebolito dall'incendio, ed eroso dalle piogge con roccia sottostante denudata (foto scattata il 05 giugno 2018).



Figura 28: base dei tronchi bruciata e terreno coperto di ceneri (foto del 05 giugno 2018).



Figura 29: fusti carbonizzati e terreno eroso; in questa zona anche il manto erboso fatica a ricrescere (foto scattata il 05 giugno 2018).



Figura 30: un leggero strato d'erba ricopre il terreno ma i segni dell'erosione sono evidenti



Figura 31: ripresa dall'elicottero in data 07/05/18: in evidenza i boschi colpiti dall'incendio (foto Santo LaFerlita studio Rosso – Torino)

3.4 ELABORAZIONI CARTOGRAFICHE – QGIS

La elaborazioni dei dati cartografici sono state eseguite con il software free QGIS versione 3.4.5-Madeira, scaricato dal sito <https://qgis.org/it/site/forusers/download.html> . Questi studi sono stati necessari per ottenere il modello digitale del terreno da implementare nel software di simulazione RUSH^{3D}, per l'analisi dei risultati delle simulazioni e per realizzare la cartografia propedeutica alla fase di sopralluogo presso il sito dell'evento e nelle fasi di analisi del fenomeno.

Si elencano di seguito i dati vettoriali e le immagini raster utilizzati nelle elaborazioni fornite direttamente da Arpa Piemonte – Dipartimento Sistemi Previsionali - Dipartimento Tematico Geologia e Dissesto, mentre le informazioni cartografiche reperite tramite servizi on-line WMS (Web Map Service) sono richiamate nelle schede metadati all' *Allegato 1 – Schede Metadati servizi Web*.

- Modello digitale di elevazione DEM dell'area di interesse con risoluzione spaziale di 5 metri
- Shapefile poligonale - bacino idrografico Rio delle Foglie
- Shapefile poligonale – perimetrazione incendio Val Susa del 2017
- Shapefile poligonale – perimetrazione evento di debris-flow di giugno 2018
- Shapefile puntuale – spessori deposito debris-flow misurati a Bussoleno post-evento
- Modello digitale di elevazione DEM con tecnica LIDAR della valle – risoluzione 1 metro

Il dato di partenza più importante per le elaborazioni è il file raster DEM dell'area di interesse che contiene l'informazione della quota topografica (Figura 32). Da tale file è stato possibile ricavare, attraverso gli strumenti forniti da QGIS (implementati nel software o disponibili sotto forma di plug-in) la carta delle pendenze e la maglia di punti xyz da implementare in RASH^{3D}.

Il sistema di riferimento utilizzato nelle elaborazioni con QGIS è il WGS 84 / UTM zona 32N EPSG:32632 con unità di misura in metri.

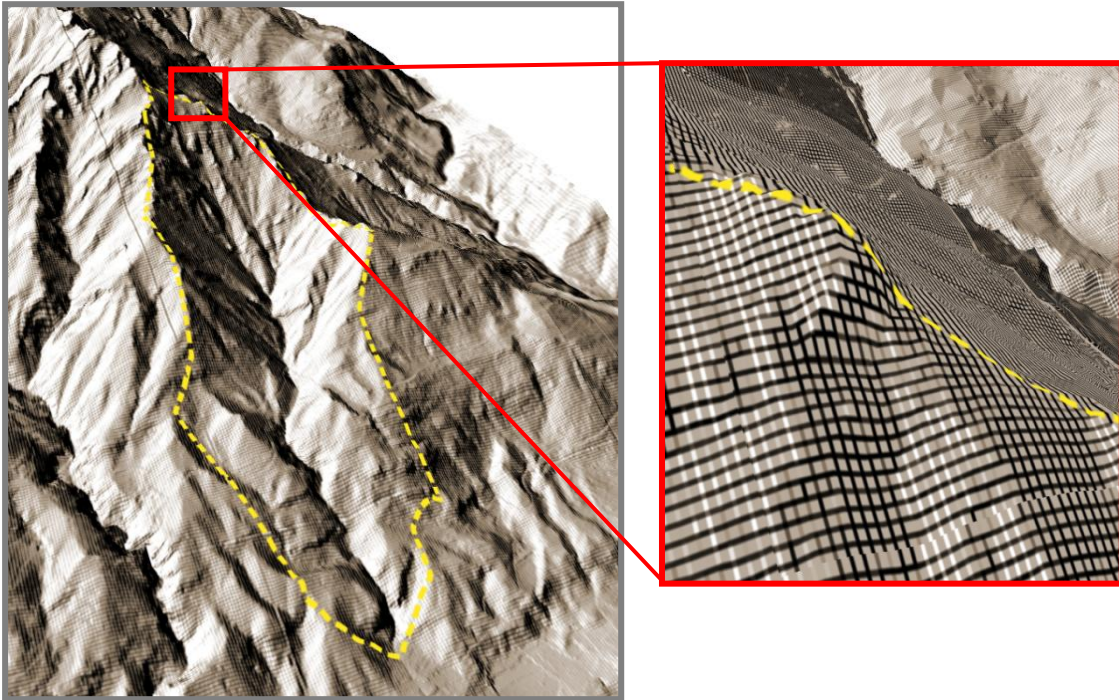


Figura 32: dettaglio del DEM – ad ogni cella di 5x5 metri è associato un valore di quota topografica

3.5 ASPETTI MORFOMETRICI E MORFOLOGICI DEL BACINO IDROGRAFICO RIO DELLE FOGLIE

Il bacino oggetto di studio è caratterizzato da una forte acclività come si evince da Figura 33, con pendenze che arrivano oltre il 300% (71°).

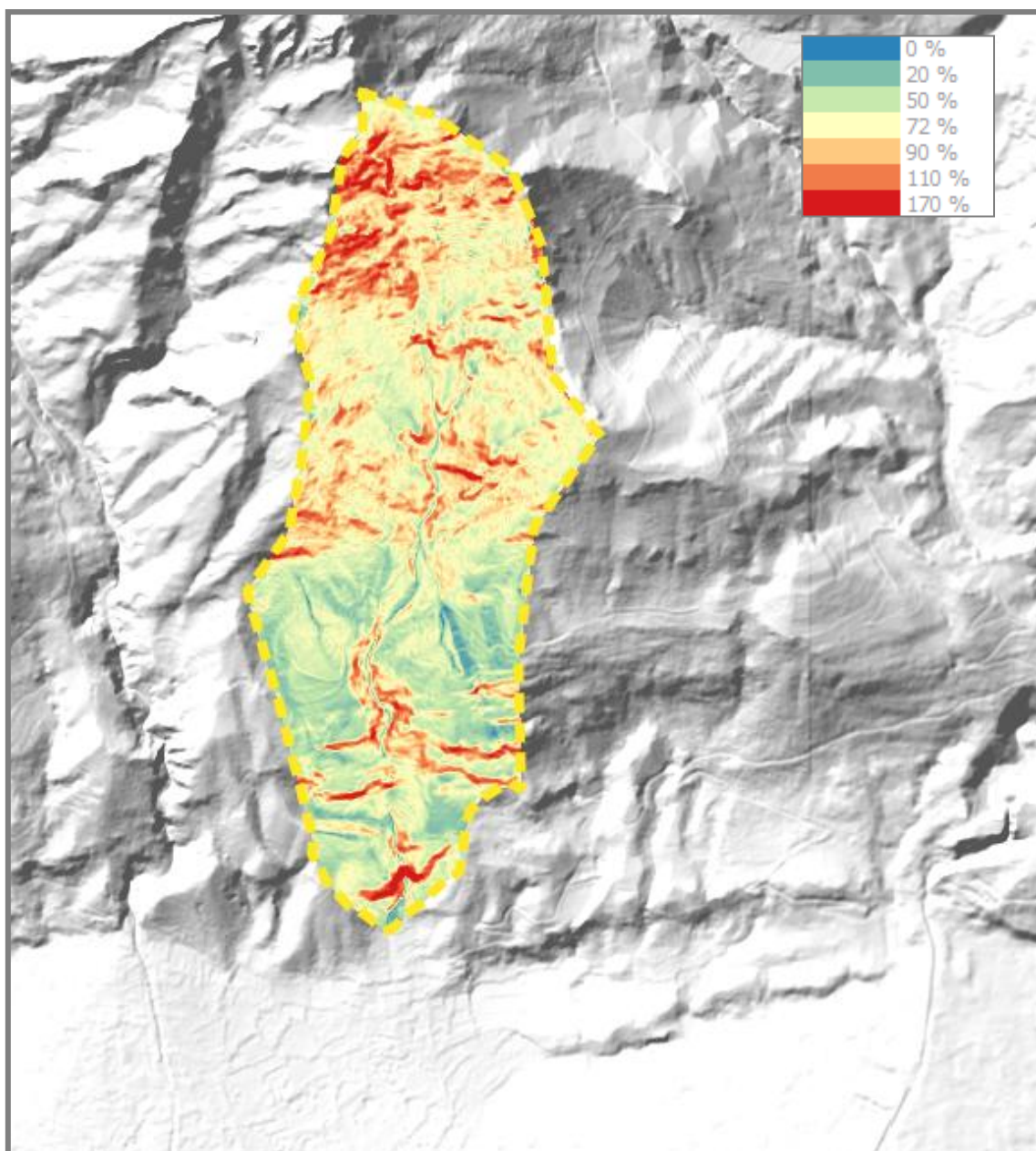


Figura 33: carta dell'acclività del bacino Rio delle Foglie, espressa in percentuale (elaborata con QGis dal DEM 5m)

Dal diagramma della distribuzione della frequenza (Figura 34) risulta una distribuzione pseudo-gaussiana con valore medio di pendenza pari a circa 70% (i valori sono stati diagrammati fino ad un valore massimo di 170% mentre i valori di pendenza massima

assoluta arrivano fino al valore di circa 378%. Oltre il 170% di pendenza si è per lo più in presenza di roccia affiorante). Un calcolo più preciso, eseguito valutando la media delle pendenze delle singole celle del DTM (5x5 metri), fornisce un valore del 72.2% (35.8°).

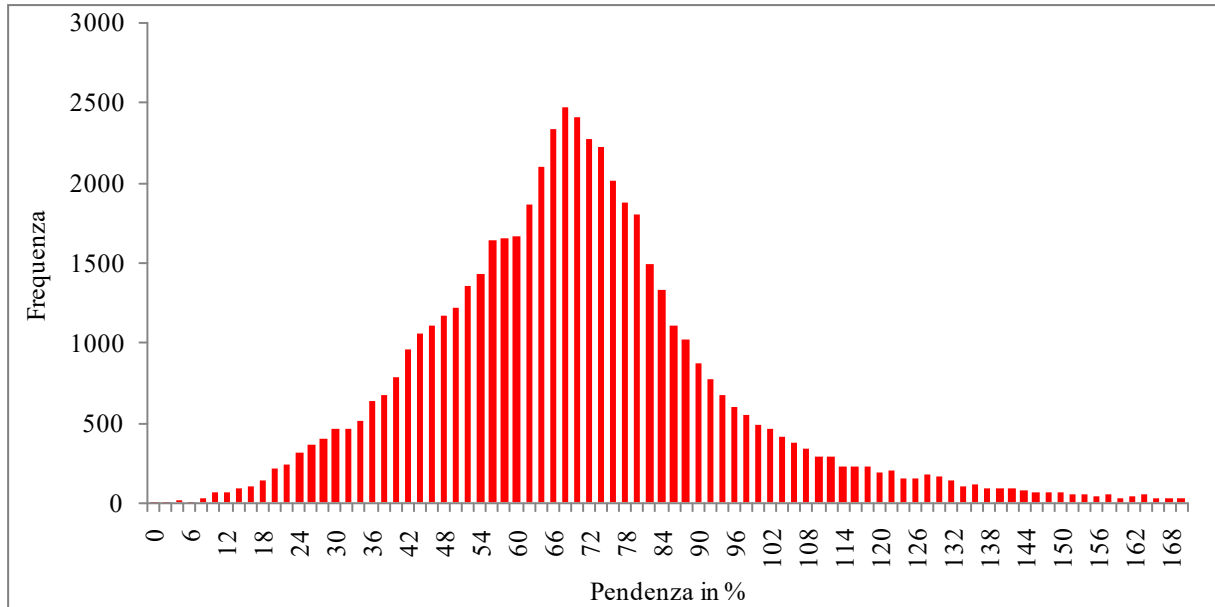


Figura 34: Distribuzione di frequenza delle pendenze - classi del 2%

La curva ipsografica, che fornisce la distribuzione delle superfici nelle diverse fasce altimetriche, e l'altezza media del bacino sono definite in Equazione 4.

Equazione 4: definizione matematica della curva ipsografica e della altitudine media del bacino

$$Z(a) = Z : \left(\int_A a(z \geq Z) = a \right) \text{ curva ipsografica}$$

$$Z_m = \sum_i \frac{Z_i \cdot A_i}{A} \quad \text{altitudine media}$$

in cui:

$a(z)$	area elementare avente quota z [m^2]
a	area cumulata progressiva [m^2]
A	superficie del bacino [m^2]
z_i	quota della i -esima fascia altimetrica [m]
A_i	area della i -esima fascia altimetrica [m^2]

Tuttavia, nel caso in oggetto, avendo a disposizione il modello digitale di elevazione del terreno, la curva ipsografica è stata ottenuta valutando la frequenza cumulata delle quote del bacino delle singole celle (5x5 metri), ed è illustrata in Figura 35.

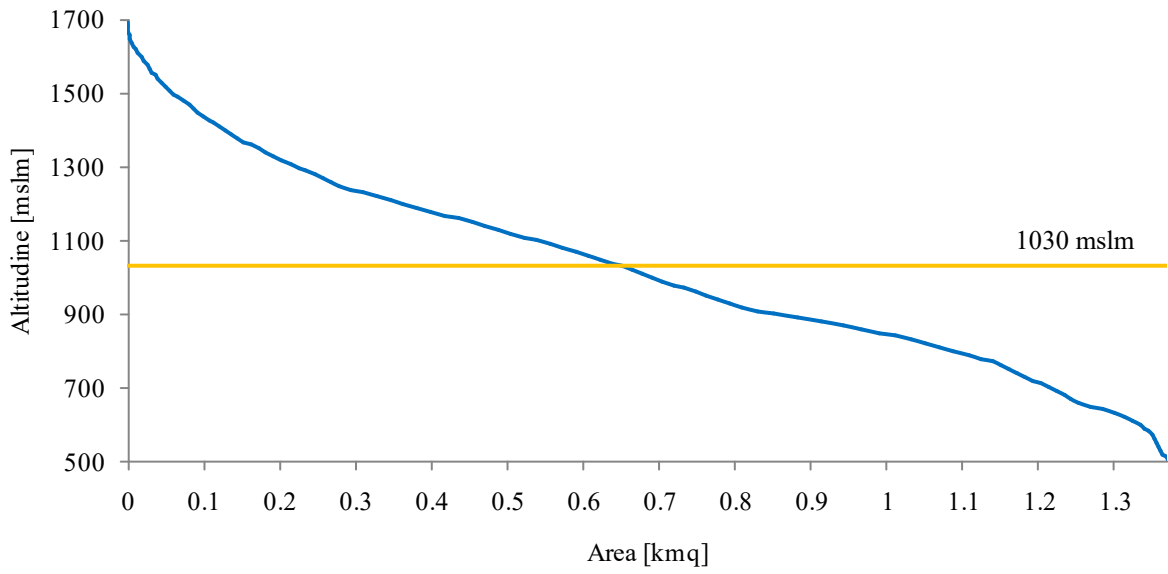


Figura 35: curva ipsografica e altitudine media del bacino – calcolata dal DEM 5m

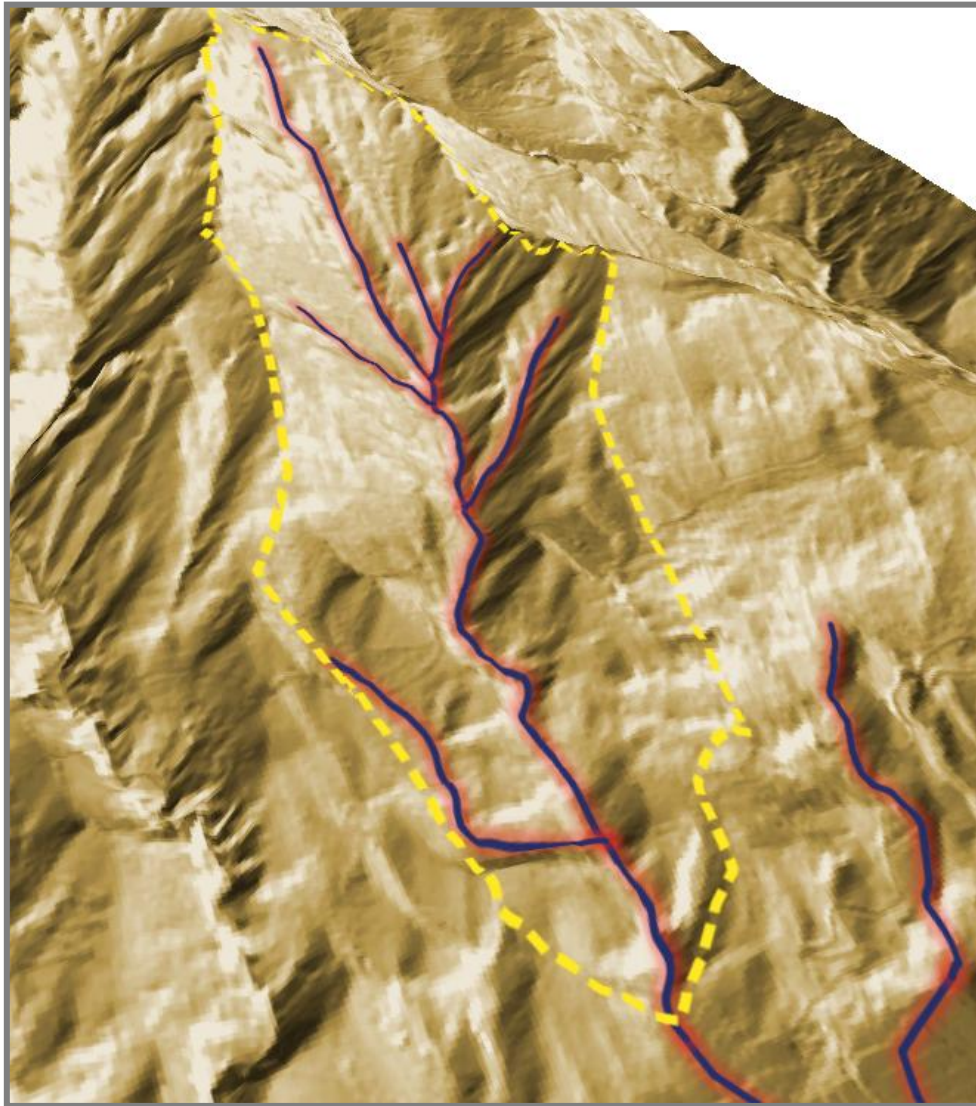


Figura 36: reticolo idrografico (blu) del bacino Rio delle Foglie (linea tratteggiata gialla)

La rete idrografica del bacino è costituita, oltre all'asta principale, da quattro canali di ordine inferiore, di cui tre collocati nella parte alta del bacino (Figura 36). L'asta principale ha una lunghezza idraulica pari a 2,91 km (calcolata con Equazione 5) mentre la pendenza media dell'asta è pari al 74%. Il profilo altimetrico dell'asta principale è riportato in Figura 37.

Equazione 5: pendenza media dell'asta idraulica principale

$$i_m = \frac{1}{L} \sum_k i_k l_k$$

in cui:

L	lunghezza totale dell'asta [m]
i_k	pendenza del tratto i -esimo tratto dell'asta[-]
l_k	lunghezza dell' i -esimo tratto dell'asta [m]

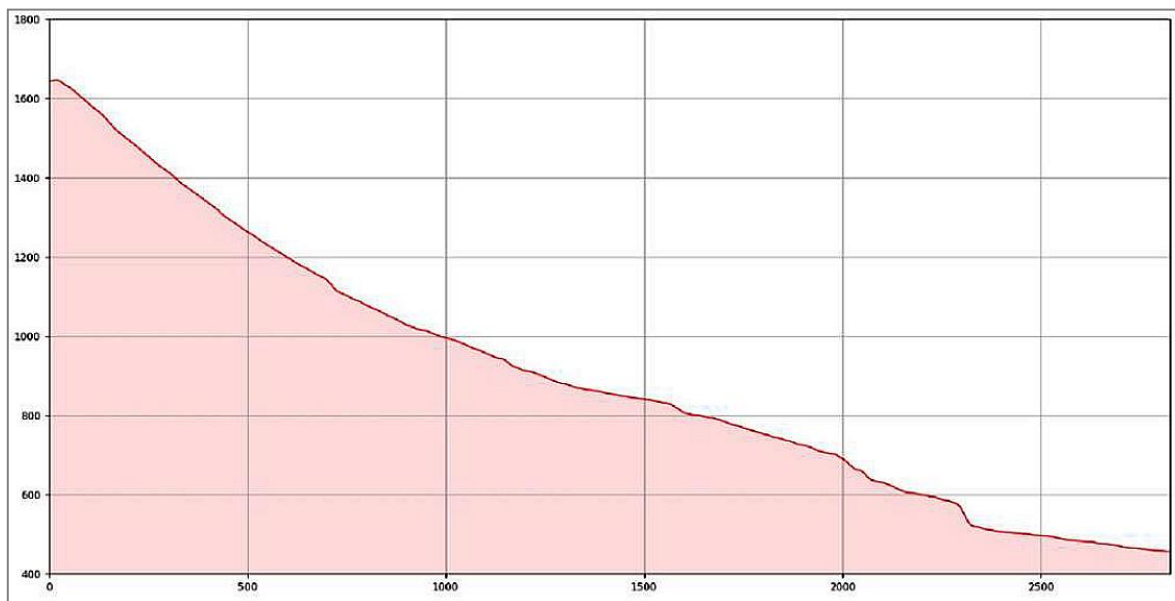


Figura 37 : profilo altimetrico dell'incisione principale del bacino (Arpa Piemonte - RAPPORTO EVENTO DEL 07/06/2018)

Il bacino in esame, prima dell'incendio del 2017, era interamente ricoperto da una vegetazione fitta ovvero si presentava molto boscato con presenza di poche aree incolte e in piccole parti alcuni affioramenti rocciosi del substrato.

Il suolo presentava una buona permeabilità, un elevato indice di ritenzione potenziale, e la copertura del bacino era molto efficace nel trattenere gli apporti pluviometrici. *“Il bacino, prima dell'ottobre del 2017, era in grado di trattenere la quasi totalità gli afflussi*

pluviometrici generando deflussi estremamente contenuti e molto ritardati nel tempo. Non era presente infatti, prima del recente evento di colata detritica, un alveo inciso ben definito a valle dell'apice di conoide che avesse la funzione di collettare gli efflussi del bacino, proprio per le ridotte portate liquide restituite a valle in occasione di eventi pluviometrici anche intensi” (Comune di Bussoleno - Progetto definitivo-esecutivo, Giugno 2018).

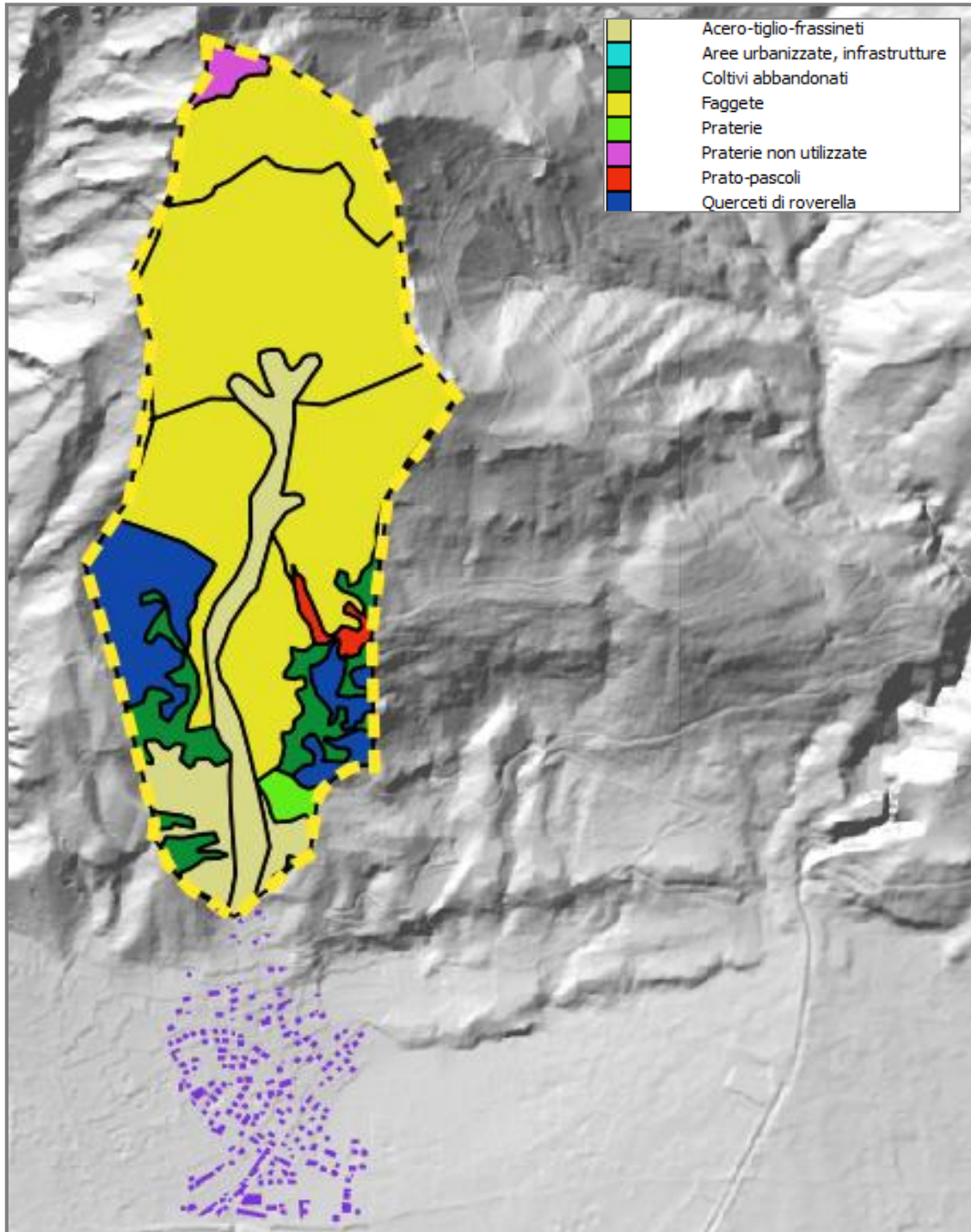


Figura 38: carta forestale da PFT 2000 ritagliata sulla Comba delle Foglie (Reg. Piemonte)

In Figura 38 è illustrata la carta forestale estratta dal Piano Forestale Territoriale, aggiornata all'anno 2000. Si osserva che l'89% dei versanti è ricoperto da *Superfici forestali* costituite da *Acero-tiglio-frassineti*, *Faggete* e *Querceti di roverella* e nello specifico oltre il 65% della superficie del bacino è composta da *Faggete* (si vedano la Tabella 5 e la Tabella 6). Si evidenzia quindi come la copertura del territorio, unitamente alle caratteristiche del suolo, abbia agito in questi anni da “catino” riuscendo a trattenere la quasi totalità degli afflussi pluviometrici ed impendendo quindi il riversamento violento delle acque più a valle.

Tabella 5: carta forestale del bacino Comba delle Foglie – tipologia di copertura *Gruppo*

<i>Tipologia di copertura - Gruppo</i>	<i>m²</i>	<i>%</i>
Superfici forestali	1224000	89.2
Aree agricole	101889	7.4
Aree a prevalente valenza pastorale	46229	3.4
Altre coperture del territorio	3	0.0002
Totale superficie	1372121	100.0

Tabella 6: carta forestale del bacino Comba delle Foglie – tipologia di copertura *Categoria*

<i>Tipologia di copertura - Categoria</i>	<i>m²</i>	<i>%</i>
Faggete	893531	65.1
Acero-tiglio-frassineti	193801	14.1
Querceti di roverella	136668	10.0
Coltivi abbandonati	101889	7.4
Praterie non utilizzate	17029	1.2
Praterie	14836	1.1
Prato-pascoli	14365	1.0
Aree urbanizzate, infrastrutture	3	0.0002
Totale superficie	1372121	100.0

Da un punto di vista litologico il bacino del Rio delle Foglie “è modellato su un basamento roccioso appartenente alle unità del Dora-Maira, in particolare sulle unità della copertura metasedimentaria carbonatica costituita da marmi e subordinati calcescisti carbonatici” (Rapporto evento 07 giugno 2018).

L'aspetto più interessante è la classificazione del bacino dal punto di vista della propensione a produrre detriti che possono essere mobilitati; nello specifico in base alla litologia prevalente che lo costituisce (rocce carbonatiche), “il bacino è classificato come *Good Clay Maker (GCM)* in accordo con la classificazione adottata in Piemonte basata sul *Clay Weathering Index (CWI)*, proposto da Tiranti et al. (2014)” (Figura 39).

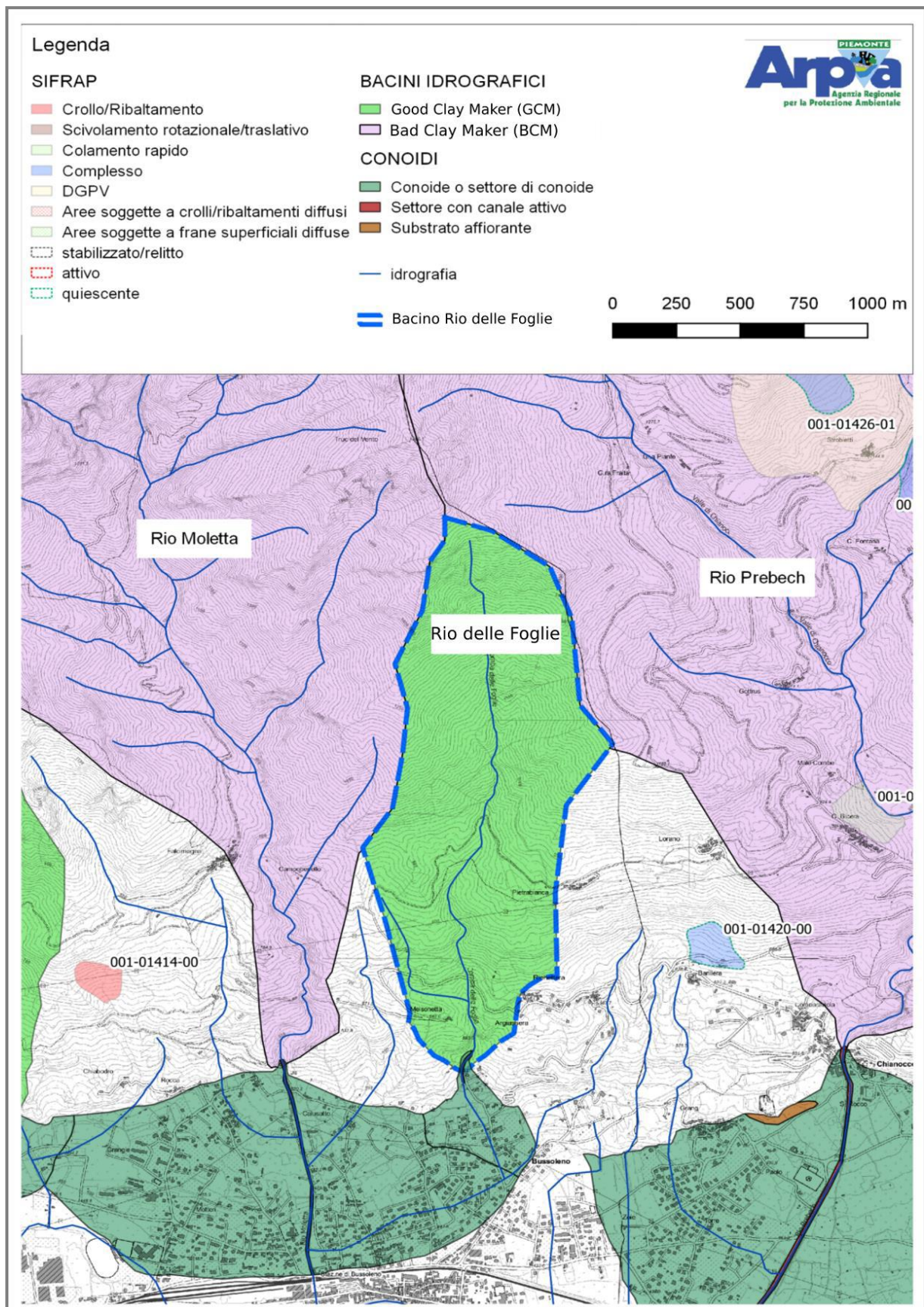


Figura 39: Quadro generale dei dissesti e classificazione del bacino (Arpa Piemonte - RAPPORTO EVENTO DEL 07/06/2018)

La classificazione proposta da Tiranti et al. (2014) nasce con lo scopo di classificare i processi torrentizi attraverso un approccio statistico, studiando la relazione tra colate detritiche, le caratteristiche del bacino (come la litologia, i depositi superficiali e la forma del conoide) e gli eventi meteorici che innescano il fenomeno. L'applicazione del metodo in Piemonte ha permesso di identificare tre tipologie di bacino definite appunto Excellent-Good-Bad Clay Maker (ECM, GCM, BCM). In particolare per le tre categorie sono stati definiti il periodo di ritorno dell'evento meteorico che può innescare i fenomeni torrentizi (Tabella 7) e le caratteristiche principali del bacino rispetto alla reologia prevalente e alle cause di innesco (Tabella 8). Ad esempio un pioggia di intensità superiore a 30 mm/ora in un sotto-bacino di tipo GCM afferente al macrobacino della Dora Riparia, ha un periodo di ritorno (calcolato utilizzando l'Atlante delle Piogge Intense sulle Alpi Occidentali) pari a 20 anni.

Tabella 7: tempo di ritorno associato alla soglia di precipitazione di innesco, per le classi di bacino in ciascun sistema vallivo del Piemonte (Tiranti et al., 2014)

Macro-basin (main river basins)	Basin class	Return-period [years]
Toce river, Maggiore Lake (Lepontine Alps)	ECM	2
	GCM	5
	BCM	20
Sesia, Cervo and Dora Baltea (Pennine and Graian Alps)	ECM	2
	GCM	5
	BCM	20
Orco and Stura di Lanzo (Graian Alps)	ECM	2
	GCM	5
	BCM	50
Dora Riparia and Chisone (Cotian Alps)	ECM	5
	GCM	20
	BCM	100
Po, Varaita, Maira and Stura di Demonte (south-Cotian and Maritime Alps)	ECM	2
	GCM	10
	BCM	100
Alto Tanaro (Ligurian Alps)	ECM	2
	GCM	5
	BCM	50

Tabella 8: Caratteristiche delle tre classi di bacino nelle Alpi occidentali (Tiranti et al., 2014)

CWI basin class	Dominant rheology	Minimum triggering recurrence [years]	Minimum triggering rainfall type	Main occurrence season
ECM	CDF (viscoplastic)	2	Storm of moderate intensity (≥ 20 mm/h)	Summer
GCM	CDF (viscoplastic)	5	Storm of high intensity (≥ 30 mm/h)	Late spring
BCM	N-CDF (frictional/collisional)	20	Storm of very high intensity (≥ 50 mm/h)	Autumn and spring (rarely in summer)

Classe	Processo principale	Intensità di pioggia minime per l'innescò
ECM	Flussi detritici coesivi (comportamento visco-platico)	<i>Temporalì di moderata intensità</i> >20 mm/h
GCM		<i>Temporalì di forte intensità</i> >30 mm/h
BCM	Flussi detritici non coesivi (comportamento collisionale frizionale)	<i>Eventi pluviometrici severi</i> >150 mm/giorno con picchi superiori a 30 mm/h o <i>supercelle temporalesche</i> >50 mm/h

La Comba delle Foglie, inserita nel bacino della Dora Riparia, è soggetta ad eventi meteorici - che possono causare innescò - con periodo di ritorno di 20 anni; per quanto riguarda le colate detritiche, la reologia dominante che meglio descrive il comportamento della massa in movimento è di tipo viscoplastico, e il debris-flow è innescato da piogge di elevata intensità (≥ 30 mm/h) con occorrenza maggiore nella tarda primavera. L'evento di Bussoleno in effetti è accaduto nei primi giorni di giugno e l'intensità della pioggia caduta è coerente con quanto previsto dallo studio di Tabella 8.

La ricorrenza di innescò minima, che per il GCM è pari a 5 anni, è stata calcolata come descritto più avanti ed è specificata in Figura 40.

E' interessante notare come i due bacini idrografici attigui al Rio delle Foglie, sebbene facenti parte dello stesso bacino della Dora Riparia, presentano una classificazione differente rispetto al bacino investigato, ovvero sono definiti come Bad Clay Maker BCM e quindi la loro pericolosità in termini di probabilità di accadimento di fenomeni di debris-flow cambia radicalmente: in altre parole non è possibile estendere analisi, studi o considerazioni ad aree limitrofe nel tentativo di concretizzare delle previsioni su possibili fenomeni alluvionali.

In Figura 40 è dipinta la *Severità del Fenomeno atteso (Fa)* ottenuta incrociando l'Indice morfometrico con le tre Classi Litologiche del substrato prevalente di cui è costituito il bacino. L'indice morfometrico a sua volta è ottenuto mettendo in relazione il *Rapporto tra le aree planimetriche del conoide e del bacino - Ar* e l'*Indice di Melton* come di seguito illustrato (Arpa Piemonte, Progetto Alcotra Risknat).

Rapporto tra le aree planimetriche del conoide e del bacino - Ar

La prima matrice consente di ottenere il parametro *Rapporto tra Aree* (Ar), indicatore della quantità di materiale detritico trasportabile dal corso d'acqua nel tempo, in base al valore del rapporto tra *superficie planimetrica del conoide* e *superficie planimetrica del bacino* (Ac/Ab, espressa in %)

Rapporto tra Aree

Ac/Ab (%)	Ar
< 1	Ar1
1 ÷ 10	Ar2
> 10	Ar3

Indice morfometrico - Im

Con la seconda matrice, incrociando il *Rapporto tra Aree* (Ar) con l'*Indice di Melton* (Me), che è un indicatore importante della tipologia di fenomeno di trasporto torrentizio atteso in conoide, si ricava l'*Indice morfometrico* (Im). L'Indice di Melton è dato da:

$$Me = (H_{max} - H_{min}) * Ab^{-0,5}$$

dove

H_{max} : quota massima del bacino (m s.l.m.)

H_{min} : quota minima del bacino (m s.l.m.)

Ab: area planimetrica del bacino (km²)

Ai fini della presente analisi, dal momento che come descritto i bacini considerati presentano area modesta, per la valutazione dell'Indice Morfometrico si è posto un valore di soglia dell'indice di Melton pari a 0.50:

Me < 0.50 fenomeni attesi: *flash flood, debris flood*

Me ≥ 0.50 fenomeni attesi: *debris flow*

Per Me < 0.50 si è dato più "peso" a tale indice, cioè alle caratteristiche intrinseche del bacino, rispetto al Rapporto tra Aree (Ar).

Indice morfometrico

	Melton	Me < 0,50 (flash flood, debris flood)	Me ≥ 0,50 (debris flow)
Ar			
Ar1		Im1	Im2
Ar2		Im1	Im3
Ar3		Im2	Im3

Severità del fenomeno atteso - Fa

La terza matrice permette di ottenere il parametro *Severità del Fenomeno atteso (Fa)* incrociando l'*Indice morfometrico* con le tre *Classi Litologiche* del substrato prevalente di cui è costituito il bacino (Tiranti, 2008):

Excellent Clay Maker (ECM): rocce metamorfiche fittamente foliate e rocce sedimentarie ricche in silt e argilla;

Good Clay Maker (GCM): rocce carbonatiche massicce;

Bad Clay Maker (BCM): rocce metamorfiche o ignee massicce.

Il dato litologico si considera determinante per la tipologia di detrito potenzialmente mobilizzabile - in termini di dimensione medio-massima attesa dei blocchi e di proporzione della frazione argillosa attesa nella matrice (processo coesivo/non coesivo) - e quindi, indirettamente, per l'energia del processo.

Severità Fenomeno atteso

	CL	ECM	GCM	BCM
Im				
Im1		Fa1	Fa2	Fa1
Im2		Fa2	Fa2	Fa3
Im3		Fa2	Fa3	Fa3

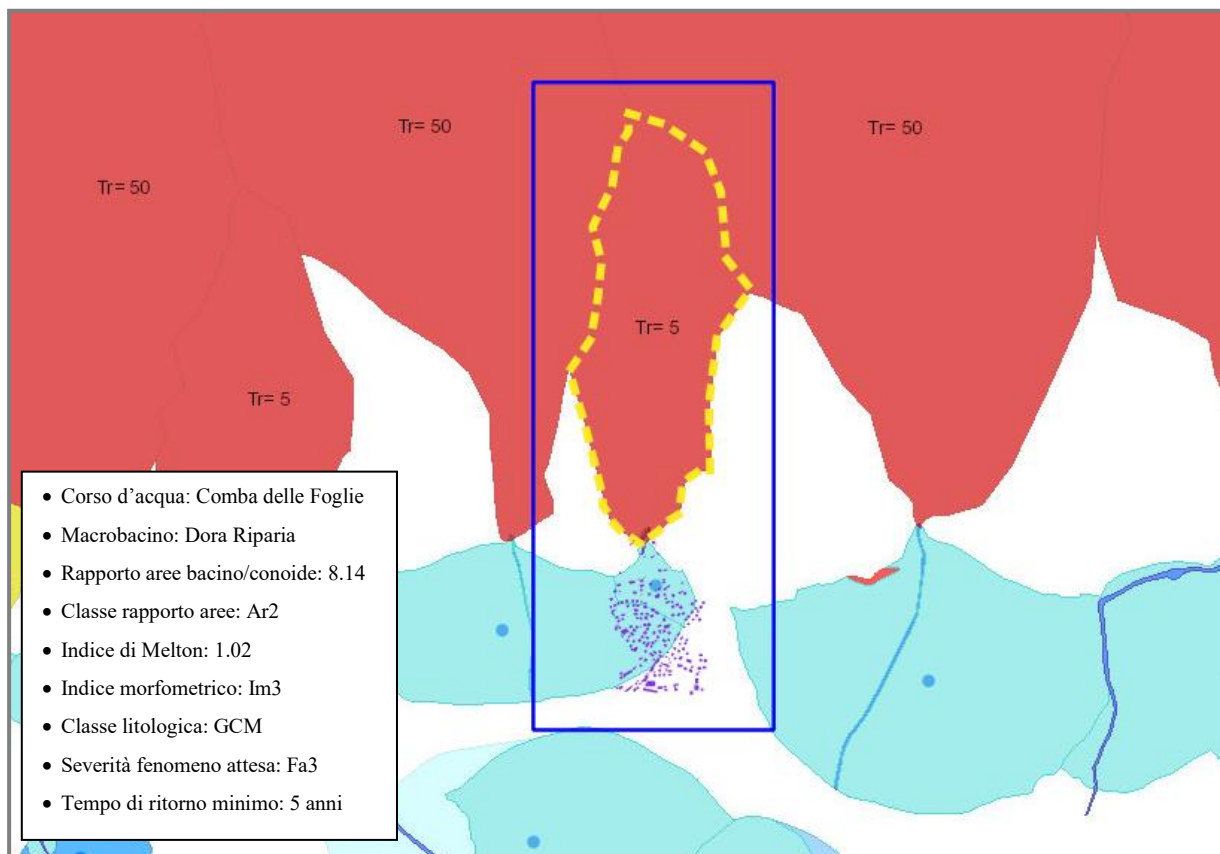


Figura 40: Conoidi Piemonte - Caratterizzazione bacini - severità fenomeno atteso con tempo di ritorno (paragrafo 9.1.3 - Arpa Piemonte – Conoidi alluvionali in Piemonte). In evidenza il bacino di Rio delle Foglie (linea tratteggiata gialla).

3.6 PIANO REGOLATORE GENERALE DEL COMUNE DI BUSSOLENO

Il comune di Bussoleno è situato in Valle di Susa (Provincia di Torino) e si sviluppa sui due versanti della valle intersecando uno dei maggiori fiumi piemontesi la Dora Riparia (Figura 6 e Figura 7). L'estensione territoriale del comune è di circa 37 km² e la quota media del centro abitato è di circa 440 mslm.

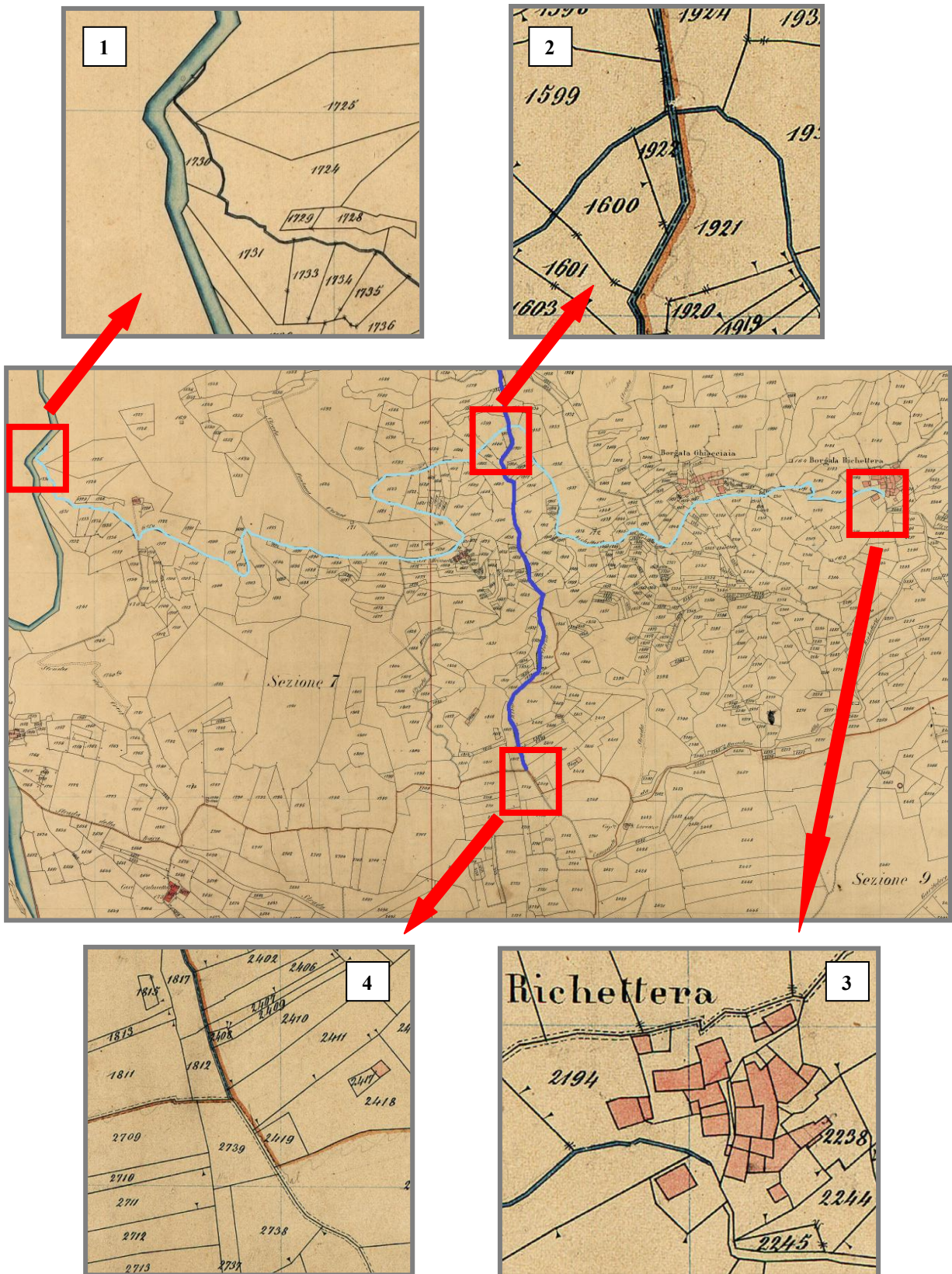
La frazione San Lorenzo si sviluppa a partire dalla sponda sinistra della Dora fino all'apice di conoide del bacino Rio delle Foglie (si veda il paragrafo 3.1). La maggior parte delle costruzioni della zona, unitamente allo sviluppo della rete stradale per lo più residenziale, sono state realizzate nei tre decenni successivi alla guerra (dagli anni '50 agli anni '70). Fino a quel momento buona parte dell'area in conoide era impiegata per scopi agricoli soprattutto per la coltivazione delle viti. In particolare, alcuni edifici sono stati trasformati nel corso del tempo e, da piccole costruzioni ad uso agricolo della prima metà del novecento (*casotti* o *ciabot*), sono diventati vere e proprie abitazioni su più piani (al capitolo 4 viene illustrato un esempio di evoluzione edilizia).

Presso il Comune è stato possibile reperire una mappa catastale di fine ottocento (1867) nella quale è evidenziata l'idrografia principale della zona (Figura 41). Dalla mappa si osserva che il Rio Reforno (asta idrografica principale del bacino Rio delle Foglie) si interrompe in mezzo alle aree coltivate in apice di conoide (in prossimità delle attuali abitazioni colpite dalla colata di fango). La distribuzione dell'acqua nei campi avveniva tramite piccoli rii denominati *bialère* (o *bealere*). Inoltre le borgate Ghiacciaia e Richettera attingevano acqua dal Rio Moletta (che è sotteso ad un altro bacino idrografico) tramite una piccola bialéra posta alla quota compresa tra i 650 e i 700 metri che si sviluppa da ovest verso est e che interseca proprio il Rio Reforno della Comba delle Foglie.

E' verosimile quindi ipotizzare che l'acqua fornita dalla Comba delle Foglie non fosse sufficiente a garantire le necessità idriche delle borgate, ed inoltre, mancando un collegamento con il fiume principale della valle, questa veniva interamente impiegata per l'irrigazione delle viti senza necessità di riversare l'eccedenza idrica nella Dora.

In altre parole questa situazione confermerebbe il fatto che non vi è memoria negli ultimi decenni di alluvioni catastrofiche simili a quella accaduta nel 2018, e che le piccole bialère presenti sul territorio fossero sufficienti a regimare le acque in arrivo dalla Comba delle Foglie.

Figura 41: mappa catastale storica del comune di Bussoleno (al centro): in evidenza il Rio Reforno con linea blu scuro, e la presa d'acqua dal Rio Moletta verso le borgate con linea azzurro chiaro. Nei riquadri di dettaglio: 1-presa d'acqua dal Rio moletta, 2-intersezione tra Rio Reforno e la bialera, 3-arrivo della bialera nelle borgate, 4-tratto terminale del Rio Reforno nelle zone coltivate.



Nell'aprile 2014 il Comune di Bussoleno ha approvato le NTA - Norme Tecniche di Attuazione del PRGC - Piano Regolatore Generale Comunale (approvato ai sensi dell'art.15 della Legge Regionale 05.12.1977, n.56 e s.m.i, con Delibera della Giunta Regionale n.21-11637 del 22.06.2009), aggiornate alla Variante Parziale N. 7.

Con tale strumento normativo è stata disciplinata *“l'attività edilizia ed urbanistica in tutto il territorio del comune di Bussoleno conformemente alle seguenti finalità e contenuti di cui agli art. 11 e 12 della Legge Regionale n° 56/77 e s.m.i.:*

- *un equilibrato rapporto fra residenze e servizi, in relazione ai posti di lavoro individuati e secondo le indicazioni del Piano Territoriale e delle sue articolazioni sub-comprensoriali ed intercomunali;*
- *il recupero all'uso sociale del patrimonio edilizio ed infrastrutturale esistente;*
- *la difesa attiva del patrimonio agricolo, delle risorse naturali e del patrimonio storico-artistico ed ambientale;*
- *la riqualificazione dei tessuti edilizi e periferici e marginali e dei nuclei isolati di recente formazione;*
- *l'equilibrata espansione dei centri abitati sulla base di previsioni demografiche ed occupazionali rapportate alle indicazioni del Piano Territoriale;*
- *il soddisfacimento del fabbisogno pregresso e previsto di servizi e di attrezzature pubbliche;*
- *la programmata attuazione degli interventi pubblici e privati.”*

All'art. 75 *Fasce di rispetto dei fiumi, torrenti e dei canali* del capitolo VII *FASCE E ZONE DI RISPETTO* vengono elencati i corsi d'acqua per i quali è prevista la definizione delle relative fasce. Nello specifico *“i corsi d'acqua fluenti nel territorio di Bussoleno iscritti negli elenchi delle Acque Pubbliche sono:*

- *torrente Dora Riparia*
- *rio Boine o Pairolero*
- *rio Bennomo*
- *rio Gerardo*
- *rio di Rocciamelone*
- *torrente Falcemagna o Moletta”*

Non viene inserito nell'elenco il Rio Reforno sotteso al bacino Comba delle Foglie. In effetti tale rio, fino all'evento del 2018 e prima degli interventi di mitigazione realizzati tra il

2018 e 2019, terminava il suo sviluppo in superficie in prossimità dell'apice di conoide (così come accadeva in passato) e l'acqua veniva incanalata in una tubazione di dimensioni alquanto ridotte nonché nella rete di piccoli canali ad uso irriguo mascherata tra la vegetazione. Questo a conferma che, così come in passato, anche in tempi recenti i volumi di liquido che transitavano al tratto terminale della Comba delle Foglie erano poco significativi da un punto di vista idrogeologico. Va evidenziata quindi la totale assenza di un sistema di drenaggio delle acque.

Nella Relazione Geologica a corredo del PRGC, al capitolo 6, viene descritta l'idrografia secondaria comunale e in particolare al paragrafo 6.4 viene specificata la morfologia del conoide e la pericolosità e magnitudo del bacino in termini di fenomeni alluvionali. Si riporta il testo integrale del documento.

6.4.2 Geomorfologia del conoide di deiezione

Il conoide del rio Comba delle Foglie si estende da quota 498 m a quota 435 m, con una pendenza media di 8,8°. A monte e a valle dell'apice la pendenza dell'alveo risulta pari a 8°. Si tratta di un conoide poco evidente, mascherato dall'elevato grado di urbanizzazione ed antropizzazione. Il corso d'acqua, a carattere stagionale si presenta poco inciso, è visibile solo nella zona d'apice in posizione mediana rispetto al conoide, per una lunghezza di 150 m.

6.4.3 Effetti alluvionali

In caso di forti piogge, dato che il canale di scarico non ha recapito diretto nella Dora Riparia, il tirante idrico viene smaltito dalla fitta rete di canali irrigui. Nel corso dell'evento 2000 non sono stati segnalati danni.

6.4.4 Opere idrauliche

Non sono presenti opere idrauliche.

6.4.5 Pericolosità e magnitudo

In questo paragrafo sono determinate alcuni metodi empirici che consentono di valutare la pericolosità dell'asta e del bacino di alimentazione rispetto a fenomeni di trasporto solido intenso, anche denominati colate detritiche o *debris-flow*. Il metodo empirico di Autlizky (1980), che consente di organizzare razionalmente osservazioni fatte sul conoide senza prendere in esame il bacino di alimentazione, valuta la pericolosità di questo conoide come alta. Il numero di Melton rapportato alla pendenza del conoide in gradi indica che il processo prevalente è di tipo *debris-flow* (Marchi et al., 1993). È stata inoltre calcolata, utilizzando vari metodi della letteratura, la magnitudo, cioè la volumetria di materia-

le detritico potenzialmente trasportata durante eventi di piena eccezionali. I valori della magnitudo calcolati sono riportati in Tabella 14.

Metodo	Valore della magnitudo (m ³)
Bottino et al. (1996)	22.860
Hampel (1977)	65.002
Marchi e Tecca (1996)	13.000
Rickenmann e Zimmerman (1997)	28.928
Takei (1984)	15.960
Van Dine (1996)	13.000
Tropeano e Turconi (2000)	Non calcolato

Tabella 14 - magnitudo calcolata del rio Comba delle Foglie

Nel PAI questo conoide non è segnalato.

È stata individuata un'area a pericolosità elevata (classi IIIa e IIIb), che comprende la parte apicale del conoide, e un'area a pericolosità moderata (classe II) che comprende la restante parte.

È interessante osservare che durante l'alluvione del 2000, evento che ha segnato profondamente tutto il Piemonte, non son stati segnalati danni nell'area di conoide (Comune di Bussoleno PRGC Relazione Geologica, Regione Piemonte Rapporto Sull'evento Alluvionale Del 13 - 16 Ottobre 2000). Inoltre dalle valutazioni sulla pericolosità dell'asta e del bacino emerge che il tipo di fenomeno di trasposto solido atteso è di tipo debris-flow e che il volume medio stimato di massa detritica potenzialmente trasportata in caso di evento eccezionale è pari a circa 19.000 m³ (escludendo il dato estremo) (Figura 42).

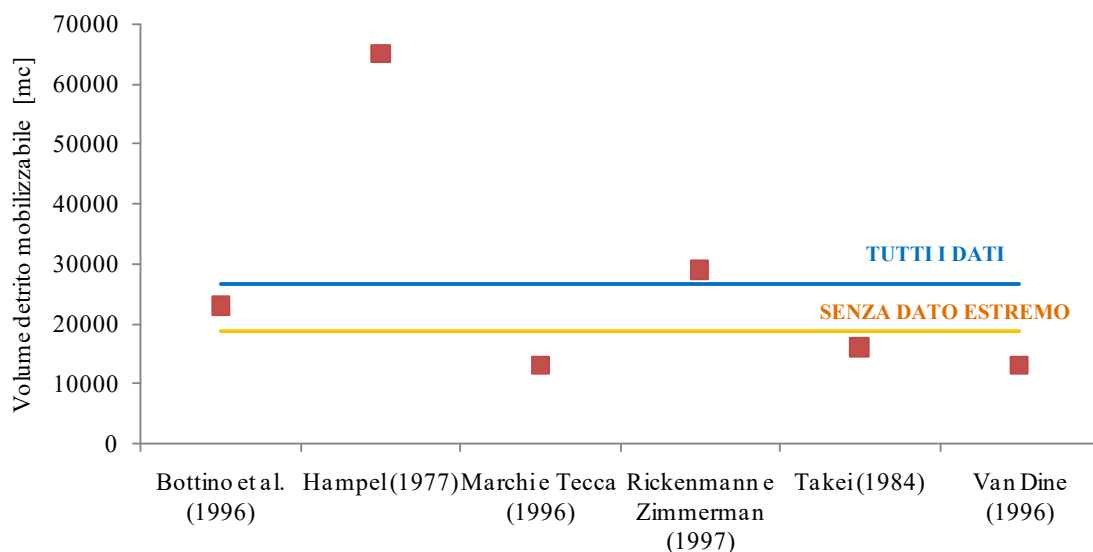


Figura 42: stima del volume detritico potenzialmente mobilizzabile (Rel. Geol. PRGC)

Il piano regolatore prevede - per l'area investigata nel presente lavoro - le seguenti classi di pericolosità (*Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica – Aggiornamento 2009*) :

CLASSE II

Porzioni di territorio nelle quali esistono condizioni di moderata pericolosità geomorfologica, derivanti dalla scarsa conoscenza della stratigrafia dei terreni di fondazione e della posizione della falda superficiale. Tali condizioni possono essere agevolmente superate attraverso l'adozione e il rispetto di modesti accorgimenti tecnici dettati dal D.M. 11 marzo 1988 e/o interventi di sistemazione idrogeologica realizzati in modo tale da non compromettere l'edificabilità delle aree circostanti.

La classe II è stata differenziata a seconda della posizione geomorfologica in tre zone.



Classe II z1

Aree a debole pendenza ricadenti nel versante montano. Ogni intervento deve essere effettuato prevedendo adeguate strutture di sostegno e predisponendo sistemi di drenaggio delle acque superficiali e/o profonde che prevengano fenomeni di saturazione della coltre detritico-colluviale.



Classe II z2

Aree ricadenti su settori di conoidi stabilizzati in cui il fattore penalizzante è la possibile presenza di pochi centimetri di acqua.



Classe II z3

Aree ricadenti nel fondovalle in cui il fattore penalizzante deriva dalla scarsa conoscenza della posizione della falda superficiale, dalle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione e dalla possibile presenza di pochi centimetri d'acqua.

CLASSE III

Porzioni di territorio nelle quali gli elementi di pericolosità geomorfologica (es. dinamica di versante e fluviale) sono tali da impedirne l'utilizzo qualora inedificate; nelle aree edificate l'aumento del carico antropico è consentito dopo l'esecuzione di interventi di riassetto territoriale e/o di manutenzione.

Classe IIIa (z1, z2, z3)



Aree inedificate di versante caratterizzate da elevata acclività (>30°) in cui si possono prevedere fenomeni franosi per saturazione e fluidificazione dei depositi sciolti superficiali; versanti ed aree soggetti a fenomeni valanghivi o a fenomeni di crollo; aree inedificate di fondovalle alluvionabili da parte di acque ad elevata energia; aree comprese nei conoidi alluvionali; aree comprese nella fascia di pertinenza della Dora Riparia e in quelle dei rii laterali e nelle fasce fluviali A e B (definite dalla L. 183/89).

È esclusa la possibilità di realizzare qualsiasi intervento. Per opere infrastrutturali di interesse pubblico non altrimenti localizzabili, vale quanto indicato all'art. 31 L.R. 56/77. Ad esclusione degli edifici ricadenti in aree di dissesto attivo o incipiente (rif. alle cartografie del PAI e alle carte dei dissesti del PRGC), è consentita la manutenzione dell'esistente e la realizzazione di ampliamenti funzionali e ristrutturazioni. Tali interventi sono condizionati all'esecuzione di studi di compatibilità geomorfologica comprensivi di indagini geologiche e litotecniche mirate a definire localmente le condizioni di pericolosità e a prescrivere gli accorgimenti tecnici alla loro mitigazione.

Per le aree comprese nelle fasce A e B si rimanda alla relativa normativa.

Classe IIIb (z1, z2, z3)*Classe IIIb2*

Aree edificate in cui, a seguito della realizzazione di opere di riassetto, sarà possibile la realizzazione di nuove edificazioni, ampliamenti o completamenti.

*Classe IIIb2f*

Aree edificate in cui, a seguito della realizzazione di opere di riassetto, sarà possibile la realizzazione di nuove edificazioni, ampliamenti o completamenti. Ambiti coincidenti con le aree inondabili retrostanti alle fasce B di progetto, precedentemente classificate nelle classi II, a cui, nella fase transitoria, vanno applicate le norme d'uso del suolo specificate all'articolo 3 comma 2 della deliberazione n. 12/2006 del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino nella seduta del 5 aprile 2006.

*Classe IIIb3*

Aree edificate in cui, a seguito della realizzazione di opere di riassetto, sarà possibile solo un modesto aumento del carico antropico. Sono da escludersi nuove unità abitative e completamenti.

*Classe IIIb4*

Aree in cui, anche a seguito della realizzazione di opere di riassetto, indispensabili per la difesa dell'esistente, non sarà possibile realizzare nuovi edifici, ampliamenti o completamenti.

Classe IIIc

Porzioni di territorio edificate ad alta pericolosità geomorfologica e ad alto rischio, per le quali non è proponibile un'ulteriore utilizzazione urbanistica neppure per il patrimonio esistente, rispetto al quale dovranno essere adottati i provvedimenti di cui alla Legge 9/7/1908 n.445.

Classe III s.l.

Settori di versante montano non edificati o con presenza di isolati edifici; zone ricadenti in gran parte in classe IIIa, con locali aree in classe IIIb e in classe II.

Le mappe illustrate da Figura 43 a Figura 45 sono state estratte dal GeoPortale-GisMaster del Comune di Bussoleno.

In Figura 46 si riporta inoltre una carta di sintesi della classificazione della pericolosità sovrapposta alla perimetrazione del deposito di fango post-colata (Regione Piemonte – Rapporto sull'evento di giugno 2018).

Si osserva che l'area in apice di conoide verso est (catastale 993 di Figura 43) è stata classificata come *Classe II*, ovvero porzione di territorio con moderata pericolosità geomorfologica nella quale non è compromessa l'edificabilità; in tale area la colata detritica ha effettivamente lambito le costruzioni in essa ricomprese senza comprometterne gli aspetti strutturali (vedere il paragrafo relativo all'evento); tuttavia, vista la vicinanza del materiale in transito con gli edifici, tale area dovrebbe essere riclassificata come quella limitrofa ovvero come Classe III. In questo caso il condizionale è d'obbligo dal momento che l'intera zona ha subito una pesante trasformazione a seguito dell'evento per fare posto alle opere di protezione/mitigazione e l'edificio sopra indicato verrà abbattuto proprio perché collocato all'interno della vasca di decantazione/laminazione.

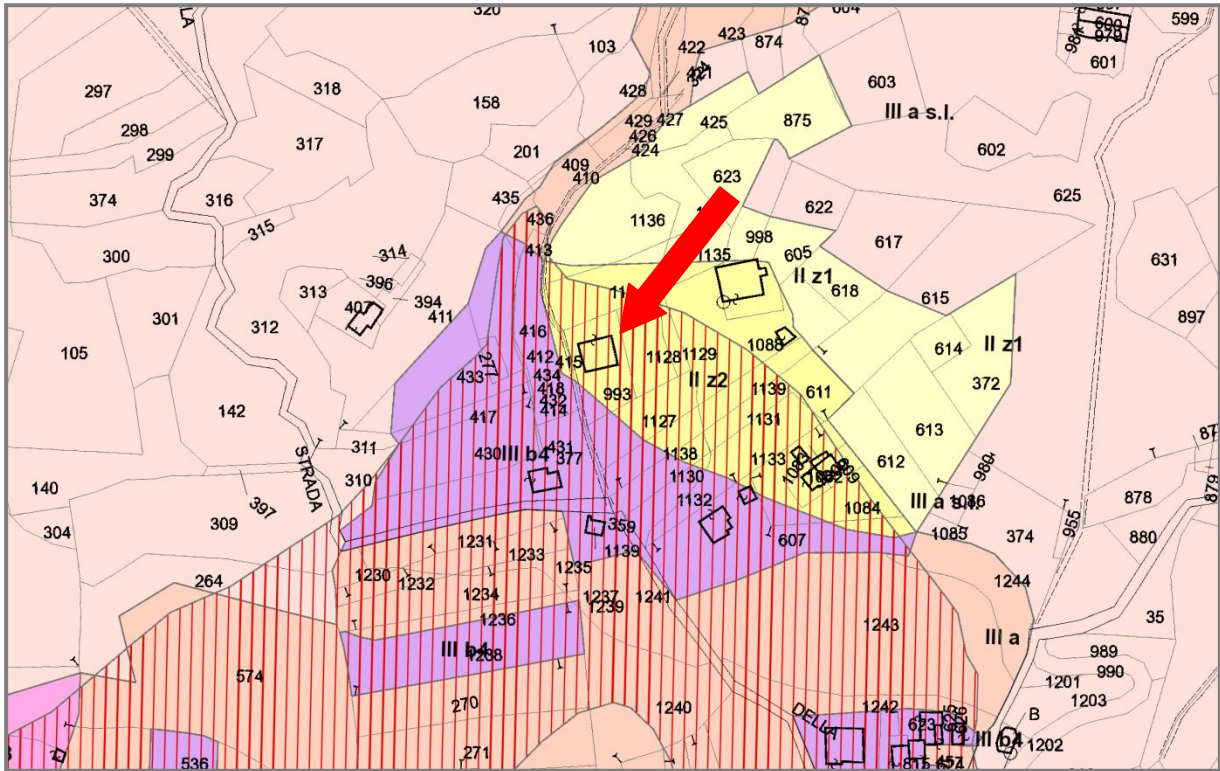


Figura 43: Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica - Frazione San Lorenzo ZONA NORD

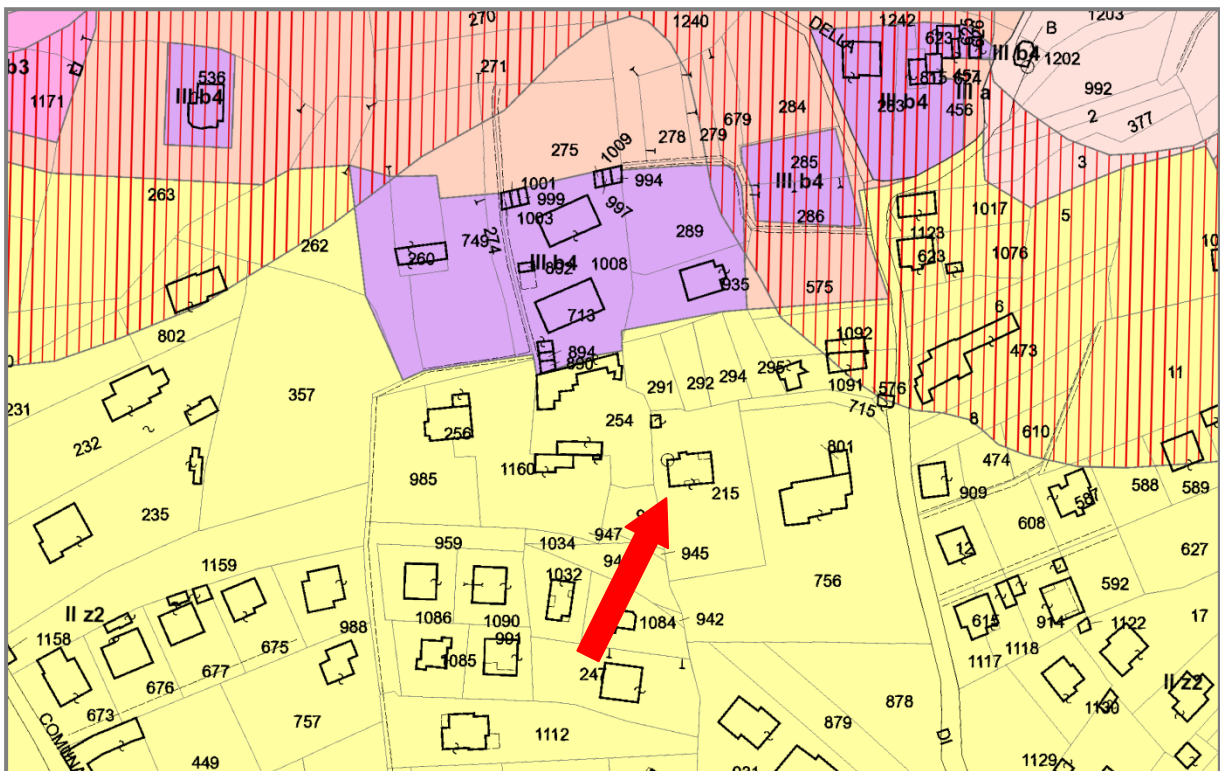


Figura 44: Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica - Frazione San Lorenzo ZONA CENTRO

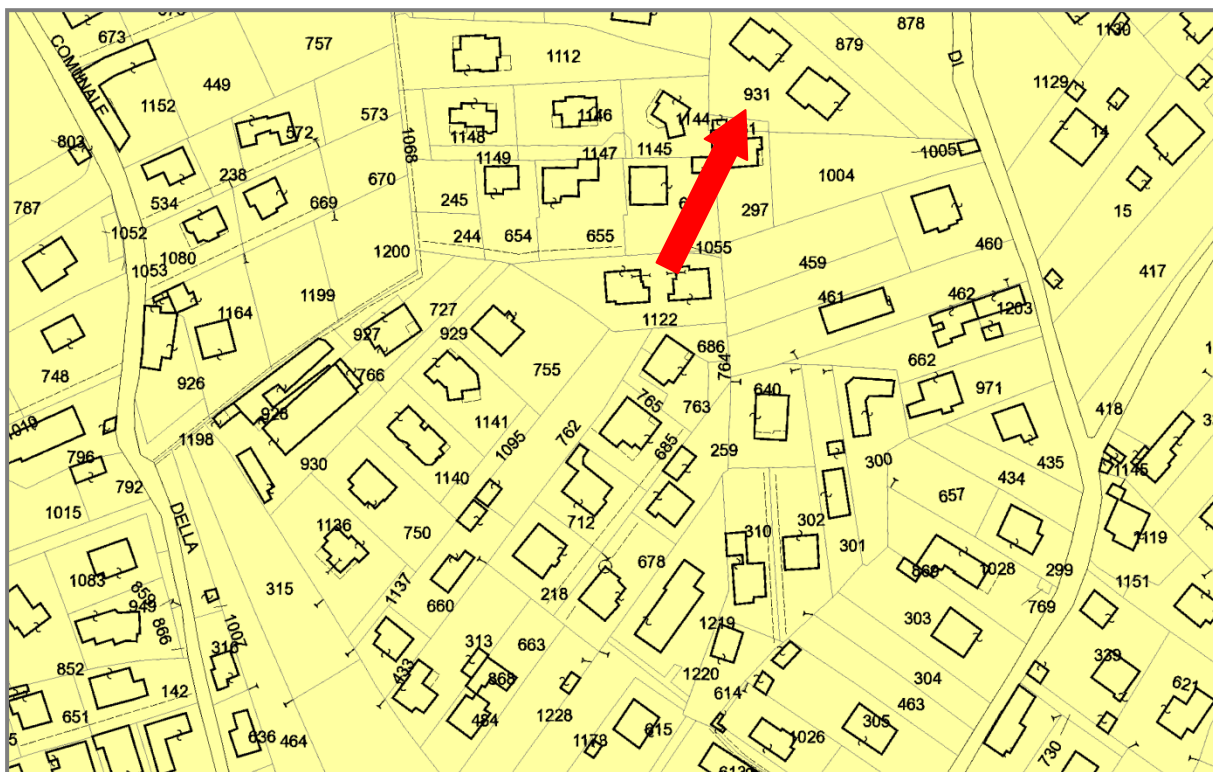


Figura 45: Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica - Frazione San Lorenzo ZONA SUD

Un ulteriore aspetto da rilevare è la classificazione delle parti mediana e distale del conoide che ricadono anch'esse in *Classe II* (moderata pericolosità geomorfologica ed idraulica), risultando quindi non congruenti con le effettive condizioni di pericolosità emerse nel corso dell'evento alluvionale del giugno 2018. In effetti i catastali 215 e 931 (Figura 44 e Figura 45) sono stati pesantemente colpiti dall'evento..

In sintesi va rilevato che il piano regolatore vigente dovrà essere aggiornato sia sulla base degli effetti dell'evento alluvionale del 2018 che ha ridisegnato la reale pericolosità a cui è soggetto il territorio bussolenese, ma soprattutto a seguito della realizzazione delle opere di protezione che modificano completamente l'evoluzione di eventuali fenomeni franosi e le nuove aree a rischio.

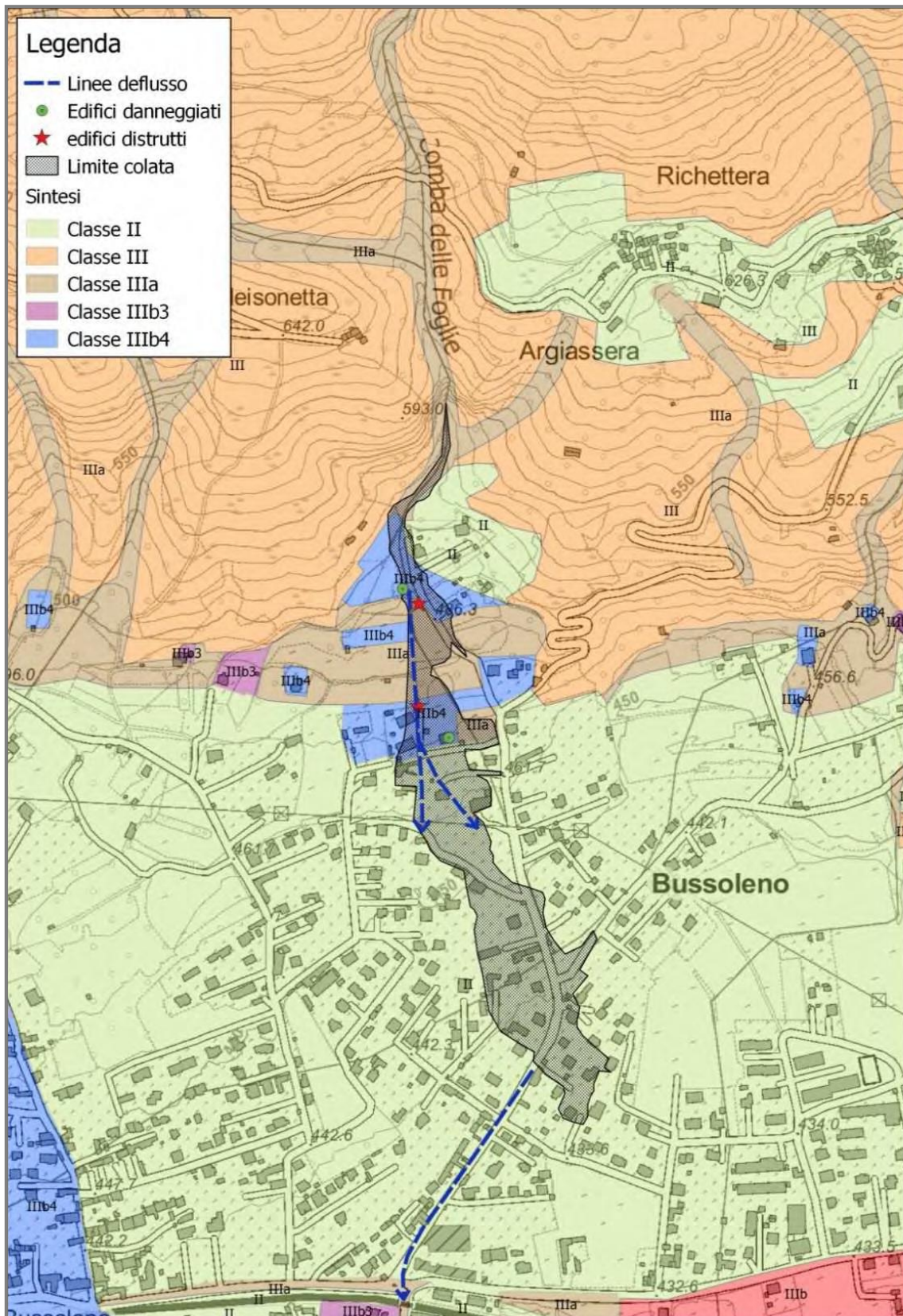


Figura 46: classificazione della pericolosità PRGC e perimetrazione del deposito (Regione P. – Fenomeni dissestivi in Valle di Susa)

3.7 RILIEVO IN CAMPO DEL DEPOSITO DEL DEBRIS-FLOW E DEI DANNI ALLE COSTRUZIONI

In data 28/02/19 è stato effettuato un sopralluogo presso la frazione San Lorenzo al fine di valutare i danni alle costruzioni e censire le altezze massime che ha raggiunto il deposito di fango. Va evidenziato che, essendo trascorsi otto mesi dall'evento alluvionale, tutto il materiale depositato è stato rimosso e parte delle abitazioni sono state restituite ai proprietari poiché nuovamente agibili. Tuttavia, la parte maggiormente colpita dall'evento è, alla data del sopralluogo, interdetta alle persone (zona rossa) e sulle pareti degli edifici sono ancora visibili le tracce del transito della colata e del deposito finale. Inoltre, va osservato che nel corso dei mesi invernali sono state realizzate delle opere geotecniche di difesa dell'abitato che hanno in parte modificato il nucleo abitato nell'apice di conoide ma non hanno di fatto impedito di riconoscere i segni dell'evento franoso del 2018.

Per ottimizzare le attività di rilievo in campo, la zona colpita è stata precedentemente studiata e i danni alle costruzioni più significativi sono stati classificati basandosi sulle fotografie e sui video forniti dalla Regione Piemonte e disponibili in rete. L'identificazione dei fabbricati è stata realizzata sfruttando il relativo codice catastale; in Figura 47 sono riportate le costruzioni oggetto di indagine con il corrispondente numero di particella catastale e la perimetrazione del deposito di fango (le informazioni catastali sono state reperite tramite il servizio cartografico WMS dell'Agenzia delle Entrate come specificato in allegato 9.1.1 *Catasto – Fabbricati - Servizio WMS Agenzia delle Entrate*). L'immagine completa di tutte le particelle catastali della zona di interesse è allegata in sezione 9.2.

Per ogni particella catastale investigata sono state messe a confronto le condizioni post-evento ricavate da materiale fotografico e video, e le condizioni pre-evento ricavate tramite il servizio Google Map Street View (ove disponibili). La progettazione “*a tavolino*” del sopralluogo ha permesso di ottimizzare al meglio le tempistiche e gli spostamenti all'interno della zona rossa permettendo quindi di ricavare quante più informazioni possibili con un'unica uscita in campo. Va sottolineato infatti che l'accesso alla zona rossa è stato possibile solo grazie alla presenza del volontario dell'AIB di Bussoleno e dell'ingegnere progettista delle opere di mitigazione costruite a seguito dell'evento franoso.

Il materiale fotografico a corredo del sopralluogo è allegato in sezione 9.3 *Allegato 3 – Materiale fotografico propedeutico al sopralluogo in sito del 28/02/19*.

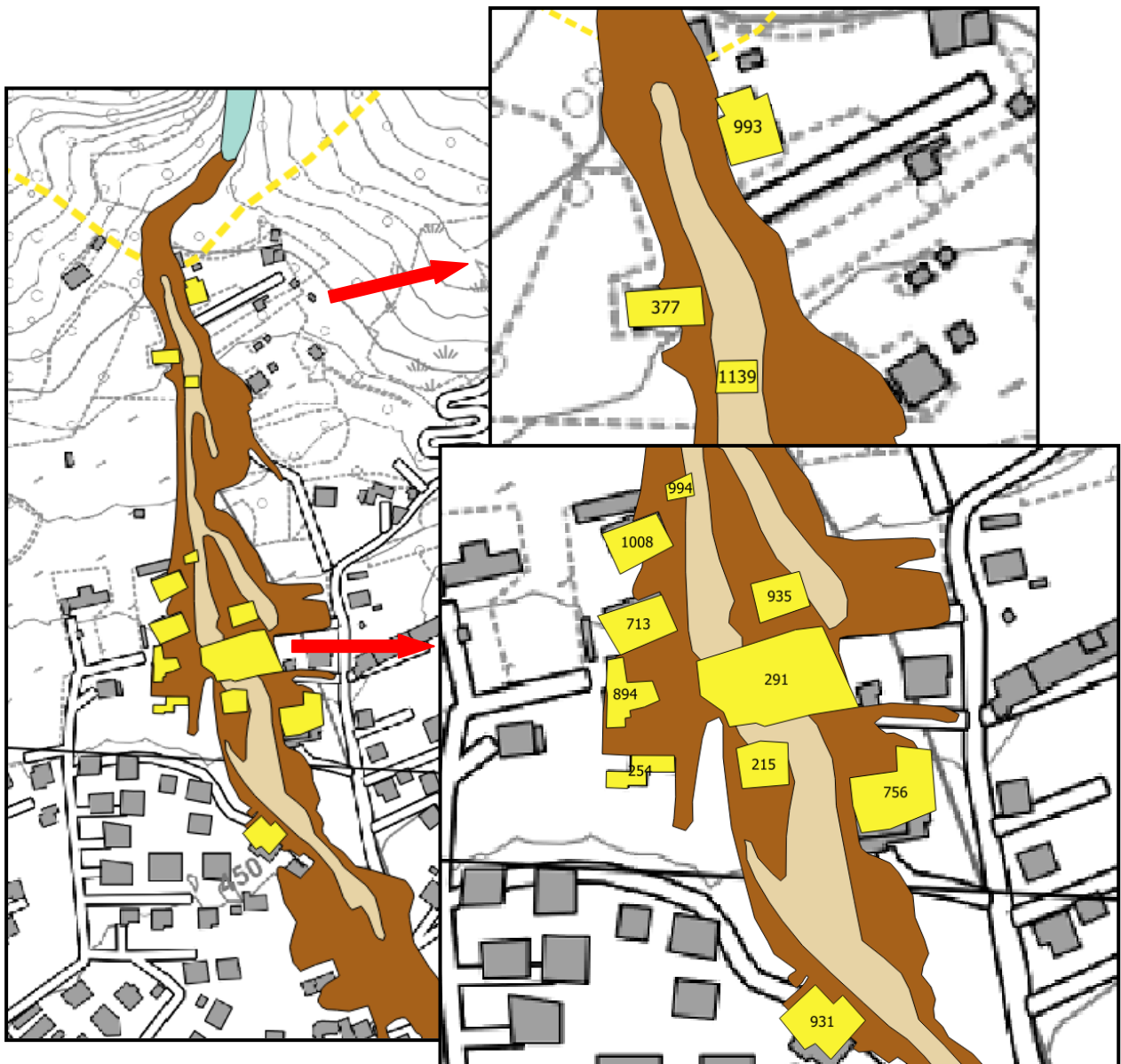


Figura 47: localizzazione delle particelle catastali esaminate durante il sopralluogo del 28 febbraio 2019; in evidenza il deposito della colata di fango (nei colori marroni chiaro e scuro) e il numero delle particelle catastali (dettagli a destra)

Durante il sopralluogo sono state rilevate le altezze del deposito di fango e le altezze massime raggiunte dalla colata durante la sua corsa verso valle (altezze date dagli schizzi di fango sulla parete). Il dettaglio della localizzazione delle misure effettuate e i valori corrispondenti sono specificati rispettivamente in Figura 48 e in Tabella 9. Si riportano inoltre a seguire alcuni scatti tra i più significativi realizzati durante fase di rilievo mentre il materiale fotografico completo è visibile in sezione 9.4 *Allegato 4 – Materiale fotografico del sopralluogo in sito del 28/02/19*.

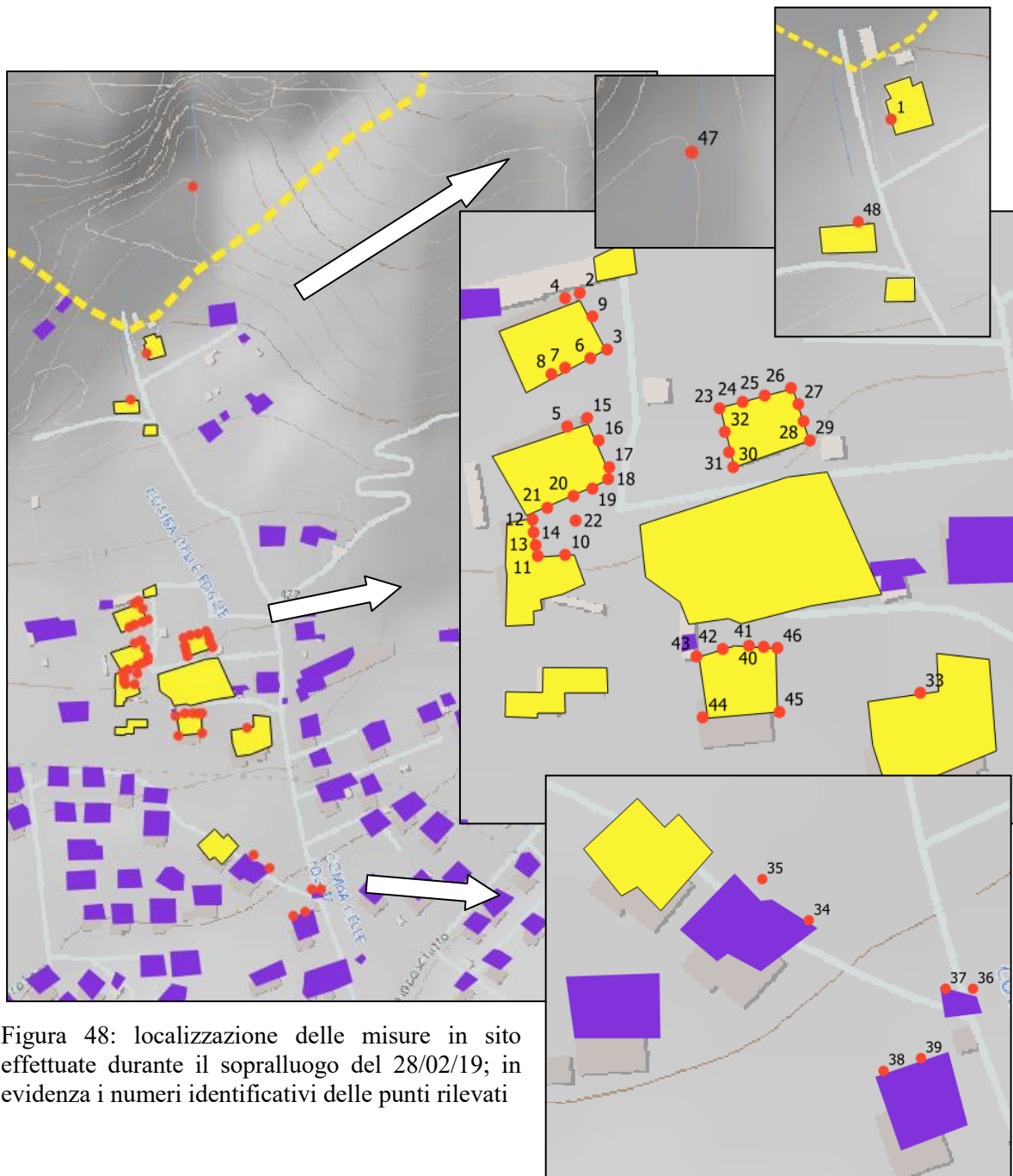


Figura 48: localizzazione delle misure in sito effettuate durante il sopralluogo del 28/02/19; in evidenza i numeri identificativi delle punti rilevati

Il rilievo in campo è stato utile non solo per comprendere al meglio la morfologia del territorio, della zona abitata e la dinamica che verosimilmente può aver interessato la colata di fango, ma soprattutto per poter validare il codice di calcolo attraverso il confronto delle altezze del deposito simulato con le altezze reali misurate appunto durante la spedizione, nonché confrontare l'energia di impatto della massa in movimento con i danni alle abitazioni. Nel capitolo 4 sono presentati i risultati di tale confronto.

Tabella 9: rilievi effettuati durante il sopralluogo del 28/02/29; in evidenza lo spessore del deposito e l'altezza massima raggiunta dagli schizzi della massa durante il transito - misurati a partire da terra.

ID	Coord. X	Coord. Y	Altezza Deposito [cm]	Altezza Massima [cm]	ID	Coord. X	Coord. Y	Altezza Deposito [cm]	Altezza Massima [cm]
1	354598	5000987	90	90	25	354635	5000796	140	230
2	354593	5000818	90	90	26	354639	5000797	130	210
3	354598	5000808	120	120	27	354641	5000794	70	110
4	354590	5000817	130	130	28	354642	5000790	50	70
5	354592	5000791	130	130	29	354644	5000786	90	90
6	354594	5000806	60	60	30	354628	5000782	60	130
7	354589	5000804	50	50	31	354627	5000785	75	150
8	354585	5000802	10	10	32	354625	5000788	100	180
9	354596	5000814	100	230	33	354668	5000721	100	100
10	354590	5000762	140	140	34	354675	5000629	50	50
11	354583	5000761	140	140	35	354668	5000635	50	50
12	354582	5000769	70	70	36	354719	5000613	70	70
13	354582	5000767	70	70	37	354714	5000612	50	50
14	354583	5000764	105	105	38	354700	5000599	70	70
15	354595	5000791	60	60	39	354707	5000598	70	70
16	354597	5000786	70	180	40	354635	5000731	110	150
17	354599	5000781	100	160	41	354632	5000731	200	400
18	354597	5000778	100	100	42	354627	5000730	150	200
19	354594	5000777	90	90	43	354619	5000728	50	150
20	354590	5000776	70	70	44	354620	5000720	90	90
21	354584	5000774	40	40	45	354637	5000721	80	80
22	354592	5000771	140	140	46	354637	5000730	60	60
23	354626	5000793	140	300	47	354630	5001102	-	500
24	354631	5000795	190	290	48	354587	5000955	40	300

N.B. 1: le coordinate sono riferite al sistema di riferimento WGS 84 / UTM zona 32N EPGS:32632 con unità di misura in metri.

N.B. 2: l'altezza massima si riferisce agli schizzi di fango sulle pareti.



Figura 49: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (1) – Particella 377



Figura 50: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (2) – Particella 993



Figura 51: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (3) – Particella 994



Figura 52: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (4) – Particella 1008



Figura 53: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (5) – Particella 935



Figura 54: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (6) – Particella 935

4. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'EVENTO DEL 07 GIUGNO 2018 CON RASH^{3D}

4.1 CODICE DI CALCOLO RASH^{3D}

La simulazione dell'evento è stata condotta utilizzando il codice di analisi dinamica RASH^{3D} (Pirulli, 2005). Il codice si basa su un approccio della meccanica dei continui in cui la massa eterogenea reale è sostituita da un "fluido apparente" le cui caratteristiche intendono riprodurre attraverso un mezzo monofase il complesso comportamento della massa reale. Quindi non viene distinta la fase solida da quella liquida che rimarranno intimamente connesse tra loro durante tutta l'analisi senza mai alcuna separazione. Questo aspetto può avere delle notevoli ripercussioni nella fase conclusiva della simulazione, soprattutto nelle modellazione delle colate detritiche. Infatti, la massa in movimento – nella realtà – rallentando tende a sedimentare ed a stabilizzarsi mentre la componente liquida si separa e continua la sua corsa verso aree a quota inferiore. Tuttavia l'approccio monofasico permette di costruire codici di calcolo molto utili per comprendere le principali linee di deflusso della massa in transito, gli spessori della massa, il campo di velocità e le energie in gioco: in sintesi la magnitudo dell'evento simulato e la sua estensione.

Le equazioni di bilancio che descrivono il comportamento del fluido apparente in movimento sono l'equazione di conservazione della massa (una equazione) e della quantità di moto (tre equazioni nelle tre direzioni dello spazio). Il sistema di quattro equazioni può essere semplificato sotto le seguenti ipotesi:

- *densità costante nel tempo e nello spazio*
- *materiale incomprimibile*
- *integrazione delle equazioni lungo lo spessore (Savage and Hutter, 1989)*
- *assenza di componenti ortogonali di velocità nel bordo.*

L'ipotesi di incomprimibilità del materiale ha come conseguenza il fatto che il volume iniziale e quello finale della massa coincidono, e non è possibile osservare eventuali rigonfiamenti della massa stessa. In genere nelle colate di fango eventuali rigonfiamenti della

massa non sono il frutto di una variazione di densità del fluido, piuttosto da una incremento dei volumi mobilitati dovuti a fenomeni erosivi e di inglobamento di ostacoli incontrati durante la discesa (ad esempio vegetazione sradicata o raccolta lungo il percorso). Pertanto tali ipotesi può essere assunta senza compromettere in maniera significativa la simulazione dell'evento. L'integrazione delle equazioni porta ad avere una distribuzione del profilo di velocità costante lungo lo spessore della massa in movimento. Tale ipotesi è tanto più verosimile rispetto ai fenomeni reali, quanto più lo spessore è piccolo rispetto alla estensione areale della massa.

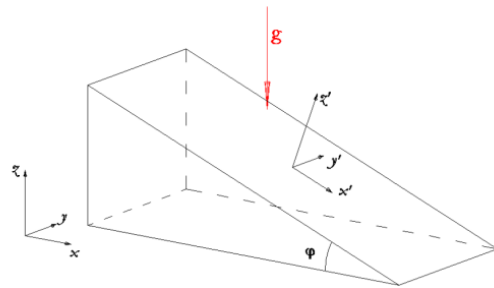
In sintesi, applicando le ipotesi sopra elencate, le equazioni che governano i fenomeno si semplificano e si riducono a tre come riportato in Equazione 6:

Equazione 6: equazioni di bilancio sotto le ipotesi semplificative – modello numerico del continuo

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_x}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v_y}h)}{\partial y} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial(\overline{v_x}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_x^2}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v_x v_y}h)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial(\overline{\sigma_{xx}}h)}{\partial x} + T_x + \rho g_x h$$

$$\rho \left(\frac{\partial(\overline{v_y}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_y v_x}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v_y^2}h)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial(\overline{\sigma_{yy}}h)}{\partial y} + T_y + \rho g_y h$$



in cui:

h	spessore della massa
ρ	densità
v_x e v_y	velocità medie nelle direzioni x e y
x e y	coordinate nelle direzioni x e y
t	tempo
g_x e g_y	proiezione del vettore accelerazione gravità nelle direzioni x e y
T_x e T_y	termini di resistenza alla base nelle direzioni x e y (tensioni)

L'applicativo RASH^{3D} utilizzando i dati del DTM in input esegue una *meshatura* dei punti.

L'applicativo RASH^{3D} fornisce i valori di velocità e altezza, sia istantanee che massime, raggiunte in ogni punto della nuova mesh: la geometria del percorso di propagazione della massa fluida non viene definita a priori, ma rappresenta il risultato analitico del codice stesso ed è funzione della topografia e del comportamento reologico del materiale in frana. Inoltre la massa, lungo il percorso, è libera di suddividersi in masse più piccole che seguono percorsi differenti e indipendenti compatibilmente con la morfologia del terreno.

I dati in ingresso del codice sono:

- modello digitale del terreno o di elevazione (DTM o DEM) nelle condizioni ante-evento
- geometria del volume di innesco (volumi e spessori)
- legge reologica del materiale in movimento

Per quanto riguarda il modello digitale del terreno va precisato che il codice richiede l'inserimento di un listato contenente le coordinate geografiche xyz di una maglia di punti a passo regolare (risoluzione) dell'area oggetto di indagine; questo significa che se si dispongono DEM con diverse risoluzioni questi non possono essere integrati direttamente nel codice ma devono essere precedentemente elaborati per ottenere un griglia regolare di coordinate. Per il presente lavoro erano disponibili DEM con risoluzione differente che sono stati tenuti separati, come meglio illustrati più avanti, al fine di non appesantire inutilmente lo studio dell'evento soprattutto nelle prime fasi di test.

La geometria del volume di innesco può essere definita sia come un unico volume, che come un insieme di volumi indipendenti che si muoveranno dinamicamente lungo il versante in modo indipendente l'uno dall'altro.

Per quanto concerne la reologia, RASH^{3D} permette l'utilizzo di due tipologie:

- reologia per attrito, che prevede come unico parametro da definire l'angolo di attrito alla base (ϕ)

$$\text{Friction} \quad \tau = \rho g h \cos \theta \tan \phi_a$$

- reologia di tipo Voellmy, in cui agli sforzi di attrito si sommano quelli derivanti dall'agitazione turbolenta, definiti attraverso un coefficiente di turbolenza (ξ) avente le dimensioni di un'accelerazione (Voellmy, 1955)

$$\text{Voellmy} \quad \tau = \rho g \left(h \cos \theta \tan \phi_a + \frac{v^2}{\xi} \right)$$

La scelta della reologia da applicare alla massa e la definizione dei valori da assegnare ai parametri che la descrivono rappresentano una fase estremamente delicata nel processo di simulazione dell'evento poiché tutto il complesso sistema di fenomeni reali che accadono all'interno e sul bordo del fluido in movimento (dissipazioni di energia che avvengono per effetto delle tensioni tangenziali) saranno descritti unicamente con i parametri selezionati.

Reologie più complesse permettono di aumentare il numero di parametri settabili e quindi di cogliere un maggior numero di aspetti che contraddistinguono il fenomeno dissettivo, ma parallelamente aumenta anche la difficoltà nell'individuare i valori di tali parametri che simulano al meglio il fenomeno, senza contare che non vi è alcuna garanzia sull'unicità della soluzione individuata.

Nel caso oggetto di studio la reologia di tipo attritivo è stata subito scartata in favore della reologie di tipo Voellmy poiché trattasi di colata rapida di detrito-fango in cui i fenomeni attritivi interni (non solo quelli esterni) assumono grande rilevanza nell'evoluzione dell'evento. Inoltre, per grandi velocità, anche una reologia di tipo laminare (Bingham) può essere inappropriata proprio per la presenza di collisioni tra le particelle all'interno della massa che dominano il comportamento e rendono la dinamica più simile ad un flusso in regime turbolento (Rickenmann, 1999). Una reologia di tipo Bingham può essere impiegata a patto di introdurre anche una legge costitutiva per la descrizione dei fenomeni attritivi legati alle collisioni tra le particelle (Tiranti e Deangeli, 2015).

4.2 CREAZIONE FILE DI INPUT PER RASH^{3D}

Il codice di calcolo prevede l'inserimento in input di un file di testo contenente le coordinate in $xyzh$ dei punti dell'area di interesse (topografia del terreno) e delle altezze della massa instabile. La maglia di punti deve essere regolare nelle due direzioni x e y . Arpa Piemonte ha fornito due file raster DEM con risoluzione a 1 metro e a 5 metri (entrambi riportati in Figura 55).

Il file a 5 metri copre tutta l'area oggetto di studio mentre quello maggiormente dettagliato riproduce la topografia della sola parte più a valle. Pertanto, poiché non è possibile integrare in RASH^{3D} maglie di punti con risoluzioni differenti, si è deciso di utilizzare solamente il DEM a 5 metri sebbene meno dettagliato.

Tramite il plug-in *Point sampling tool* presente in QGis è stato possibile estrarre il dato di quota di ogni cella del DEM a passo 5 metri basandolo su una maglia di punti regolari precedentemente costruita. Il dettaglio dell'estrazione del dato di quota (esempio) è illustrato in Figura 56. È stato quindi creato il file *.txt* da implementare in RASH^{3D} che contiene, per ogni punto della maglia, le coordinate topografiche e la quota.

Per quanto concerne la definizione del posizionamento della massa instabile all'interno del bacino Rio delle Foglie sono state valutate due diverse opzioni:

- *innesco concentrato*
- *innesco distribuito (areale)*

Preliminarmente va osservato che, essendo il presente lavoro una simulazione di un evento reale già accaduto, il dato relativo al volume di materiale mobilizzato è noto a priori dai sopralluoghi eseguiti dai tecnici della Regione Piemonte e di Arpa Piemonte durante la fase dei soccorsi nella fase post-evento. Tale volume è stato stimato tra i 15000 ed i 20000 metri cubi (Relazione Arpa).

Nel presente lavoro è stato ipotizzato un valore intermedio di materiale detritico-fangoso depositatosi a valle pari a 17000 m³.

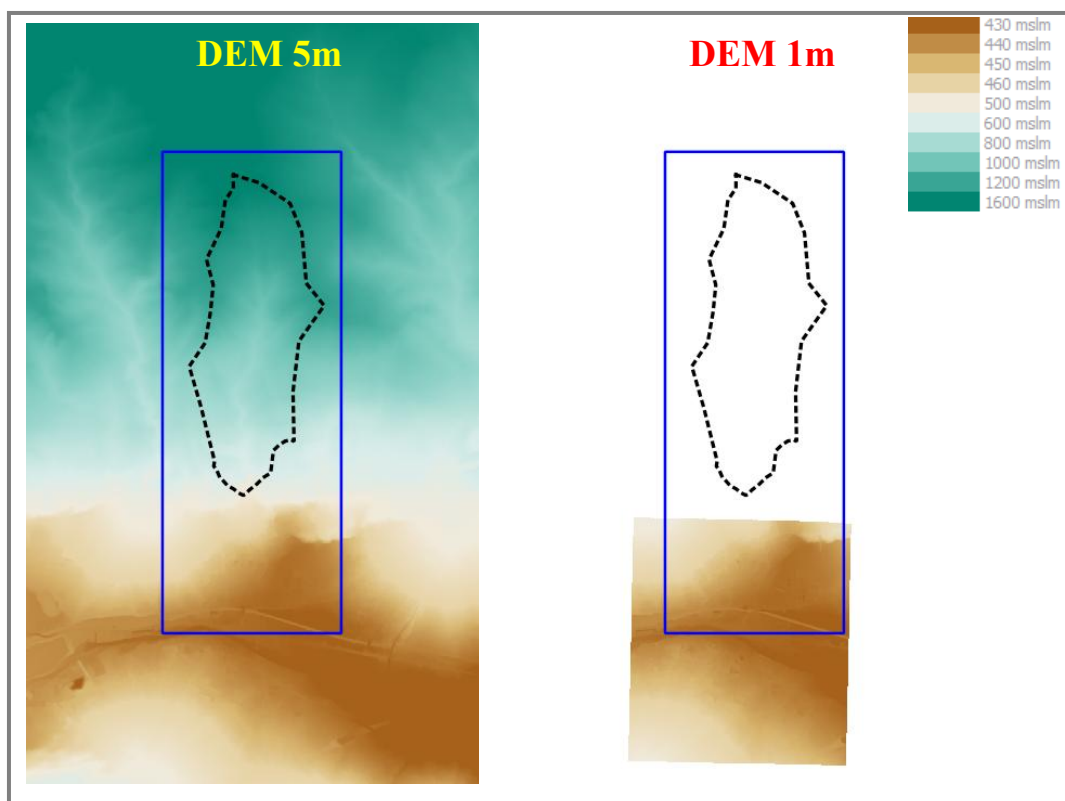


Figura 55: confronto dell'estensione dei due DEM forniti da Arpa Piemonte; nel rettangolo blu l'area di interesse per la simulazione, con linea tratteggiata in nero il bacino Rio delle Foglie

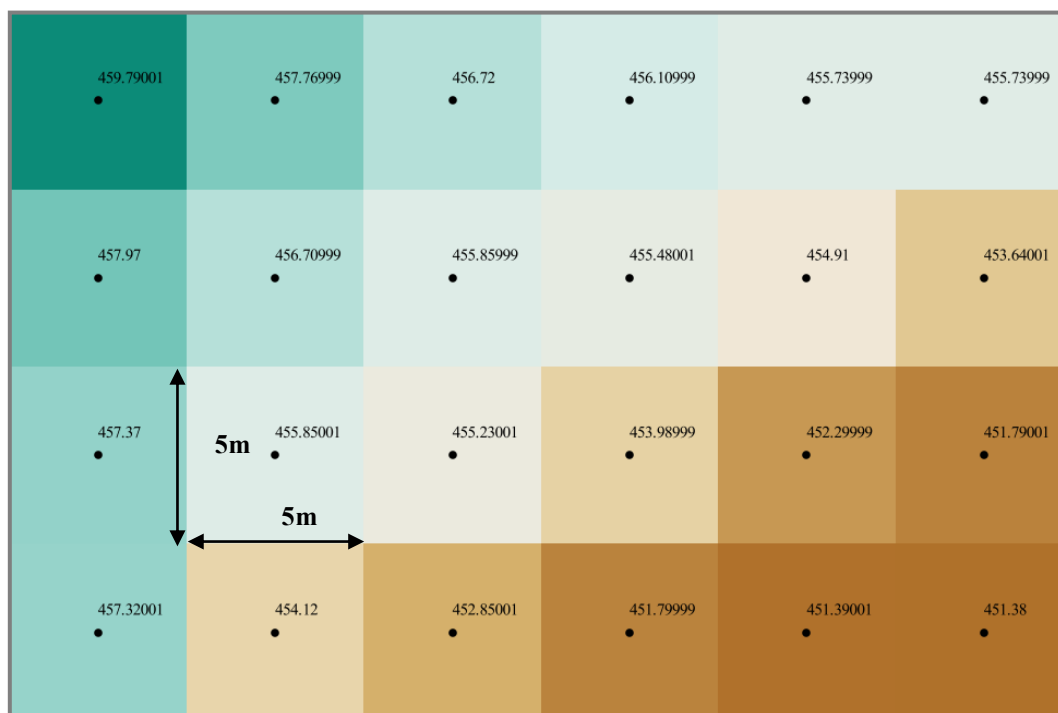


Figura 56: estrazione delle quote dal DEM 5 metri su maglia di punti regolari (esempio)

4.2.1 Innesco concentrato

La prima ipotesi di simulazione prevede il posizionamento della massa instabile in un'unica zona concentrata a circa metà lunghezza dell'incisione principale, dove convergono le aste secondarie (affluenti) della parte alta del bacino. Quest'ultima è la porzione di territorio maggiormente interessata dall'evento incendiario, con le maggiori pendenze e che ha contribuito in maniera significativa all'apporto di materiale detritico (Figura 57).

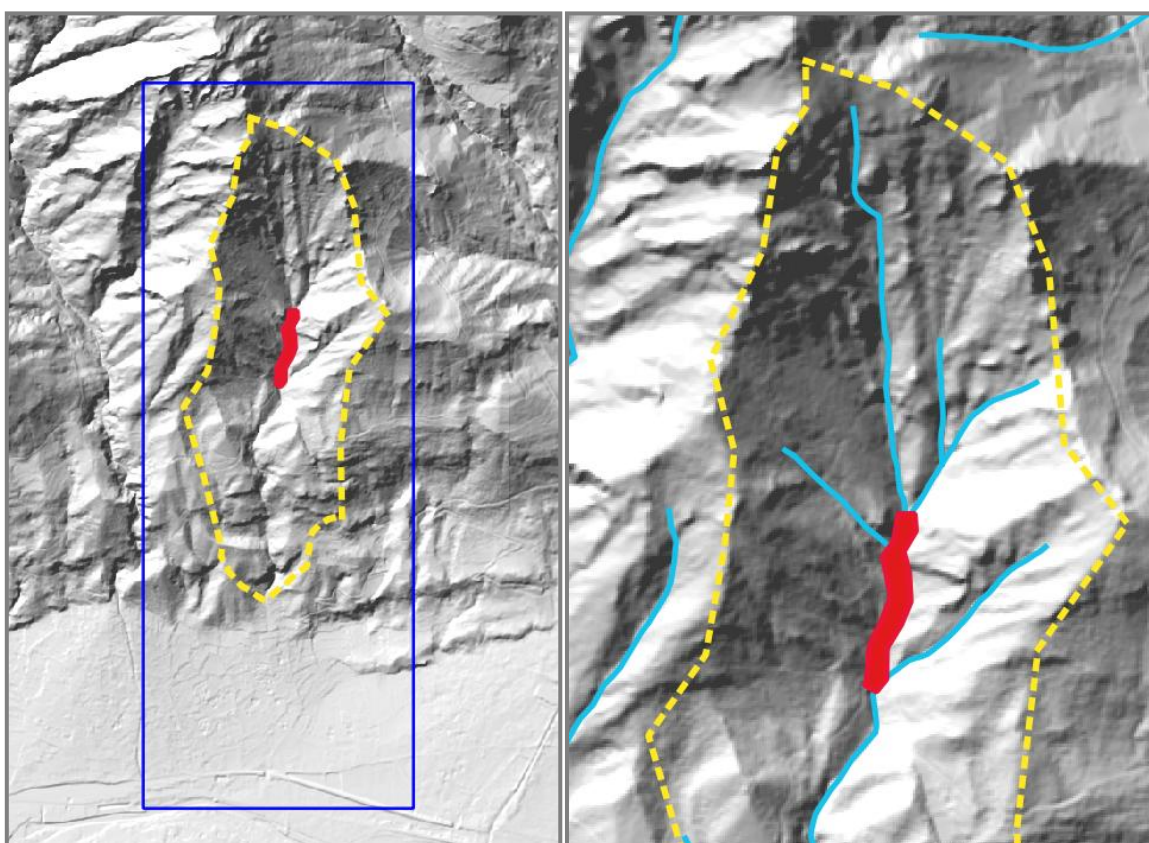


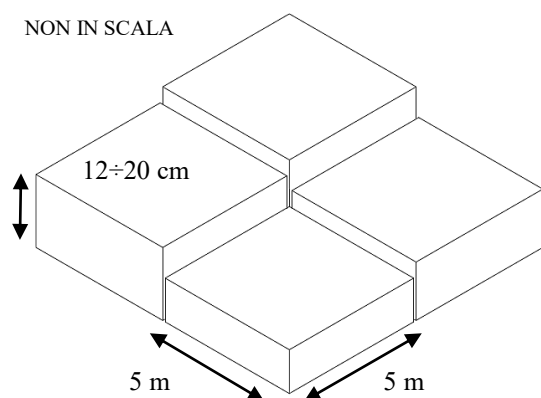
Figura 57: innesco concentrato della massa instabile lungo l'asta fluviale principale (area rossa)

Poiché la massa totale mobilitata ha un volume pari a 17000 m^3 e la superficie dell'area instabile (massa concentrata) selezionata ha una base pari a 14773 m^2 , l'altezza del materiale è stata impostata pari a 1.15 m .

4.2.2 Innesco distribuito

Al fine di valutare al meglio gli effetti di un innesco concentrato rispetto ad un innesco di tipo distribuito, è stata realizzata una seconda simulazione con il materiale instabile collocato

in singole celle all'interno del bacino idrografico distribuite su tutta l'area. Poiché il DEM disponibile ha una risoluzione di 5 metri, è stato scelto di definire il terreno come un insieme di celle (parallelepipedo rettangolo) con base 5x5 metri e altezza massima pari a 20 cm



(altezza che si ipotizza possa rappresentare la profondità di terreno che è stata dilavata con la pioggia). L'altezza mobilitata è correlata all'altezza critica (valore che fornisce fattore di sicurezza pari a 1), ovvero per ogni cella è stata calcolata tale altezza e la cella è ritenuta instabile solo se quest'ultima è inferiore al limite imposto di 20 cm.

Utilizzando l'altezza critica si tiene conto del fatto che con l'incremento della pendenza la quantità di terreno depositato in superficie diminuisce, mentre trascurando le celle che hanno altezze critiche superiori a 20 cm si vogliono rappresentare le aree a bassa pendenza dove può verificarsi l'accumulo di materiale in frana ma che non contribuiscono direttamente alla colata (aree di sedimentazione). Solo le celle instabili, mobilitandosi, hanno effettivamente contribuito a formare la colata, mentre le restanti sono rimaste salde alla loro posizione. In sintesi le celle mobilitate hanno una altezza che varia tra i 12 cm e 20 cm.

Va specificato che nella simulazione il volume di terra instabile sceso a valle ed il volume depositato in conoide hanno, per semplicità di calcolo la stessa densità; in effetti un approccio più rigoroso dovrebbe prevedere un valore di densità maggiore (e quindi un volume minore) per il terreno in *bulk* allo stato naturale sul versante (Nyman et al., 2015). Oltre a dover implementare questo aspetto nel software, il problema risiede nella mancanza di dati circa la caratterizzazione del terreno che costituisce i pendii del Rio delle Foglie.

L'instabilità dei parallelepipedi è stata determinata attraverso il calcolo dell'altezza critica imponendo per ogni cella il fattore di sicurezza pari a 1. Nello specifico per ogni cella è stato applicato il criterio di stabilità per il pendio indefinito completamente saturo con superficie di scorrimento parallela alla superficie del piano campagna e moto di filtrazione anch'esso parallelo al piano campagna come illustrato in Figura 58.

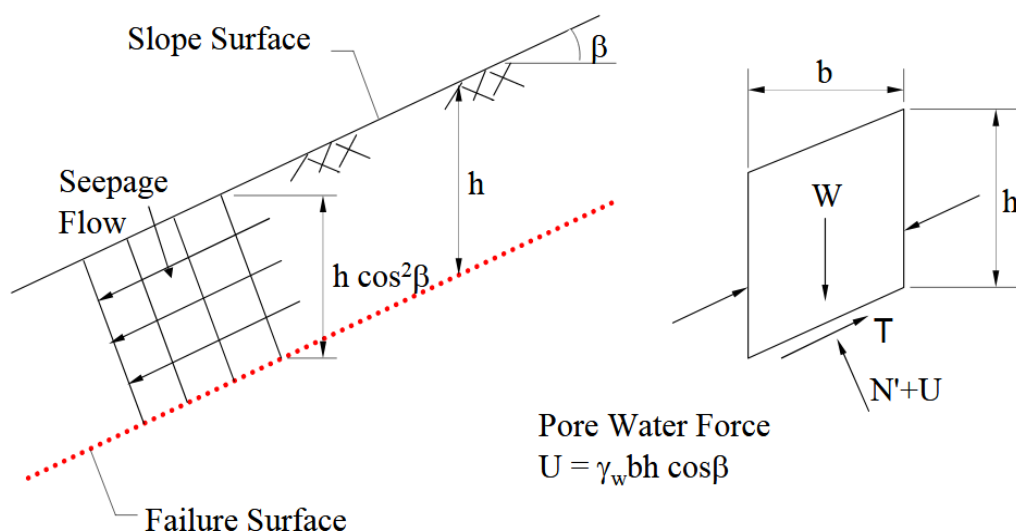


Figura 58: pendio indefinito di terreno omogeneo con filtrazione parallela al pendio (immagine tratta dal sito <https://civilengineeringbible.com/subtopics.php?i=68>)

Tale approccio trae spunto da quanto fatto nel lavoro di Stancanelli et al. (2017): in quel caso l'obiettivo era di modellare la suscettibilità all'innescò del debris-flow a seguito di una pioggia di progetto, ovvero realizzare una previsione. Nel lavoro di Stancanelli et al., complesso e articolato, il fattore di sicurezza è correlato a molteplici parametri tra i quali l'altezza piezometrica che a sua volta è funzione dell'intensità di pioggia, del tempo, delle caratteristiche del terreno e del livello di saturazione. Viceversa nel presente lavoro, trattandosi di una back-analysis, i volumi in gioco nella colata sono noti a priori e l'obiettivo è studiare come, evolvendosi lungo il pendio, tali volumi hanno impattato l'abitato in conoide.

I criteri impostati nel computo delle celle instabili sono i seguenti:

- *altezza massima dello strato di terreno instabile pari a 20 cm (calcolati ortogonalmente al pendio)*
- *linea piezometrica coincidente con il pendio (strato interamente saturo)*
- *pendio indefinito con filtrazione parallela al pendio*
- *peso saturo per unità di volume del terreno pari a 19 kN/m³*

Il terreno può ritenersi, ragionevolmente, saturo poiché l'evento alluvionale del 7 giugno è avvenuto a seguito di eventi meteorici accaduti nei giorni precedenti che avevano già causato degli allagamenti nell'abitato, pertanto è verosimile che l'intero bacino si trovasse in condizioni di rifiuto idrico e che l'aggiunta di ulteriore acqua abbia dapprima innescato

fenomeni di dilavamento superficiale e conseguentemente instabilità nelle celle per superamento del fattore di sicurezza.

Il fattore di sicurezza e l'altezza critica sono calcolati come riportato in Equazione 7.

Equazione 7: calcolo del fattore di sicurezza delle celle e dell'altezza critica (Taylor, 1948)

$$FS = \frac{c' + h(\gamma_{sat} - \gamma_w)\cos^2(\beta)\tan\varphi'}{\gamma_{sat}h\sin\beta\cos\beta}$$

$$z_{crit}(F = 1) = \frac{c'}{\gamma_{sat}\sin\beta\cos\beta - (\gamma_{sat} - \gamma_w)\cos^2(\beta)\tan\varphi'}$$

in cui:

h	spessore della massa misurato verticalmente (Figura 58)
c'	coesione
φ'	angolo di resistenza al taglio alla base
γ_{sat}	peso per unità di volume del terreno saturo
γ_w	peso per unità di volume dell'acqua
β	pendenza del pendio (Figura 58)

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche del terreno (γ_{sat} , φ' , c'), poiché al momento della redazione del presente studio non sono disponibili risultanze analitiche su campioni di terreno prelevati nel Rio delle Foglie, si è deciso di assegnare ai suddetti parametri dei valori arbitrari (geotecnicamente ammissibili) tali per cui la somma delle celle instabili (con fattore di sicurezza inferiore a 1) dia come risultato un valore prossimo a 17000 m³ di terreno. Sono stati quindi testate diverse combinazioni di valori per coesione ed angolo di resistenza al taglio fino a raggiungere un risultato soddisfacente.

In prima analisi le celle che contribuiscono alla formazione della colata, sono state selezionate all'interno del bacino idrografico Rio delle Foglie in una area definita *bacino ridotto* onde evitare che il codice di calcolo potesse far defluire la massa collocata in prossimità della linea spartiacque nei bacini idrografici adiacenti. In effetti, come si evince dal test eseguito sull'intero bacino, parte della massa fuoriesce dal bacino stesso interessando le zone adiacenti, come illustrato in Figura 59.

Sempre in Figura 59 è possibile osservare che, anche riducendo il bacino all'interno della linea spartiacque, una parte della massa continua a fuoriuscire e non raggiunge l'abitato della frazione San Lorenzo.

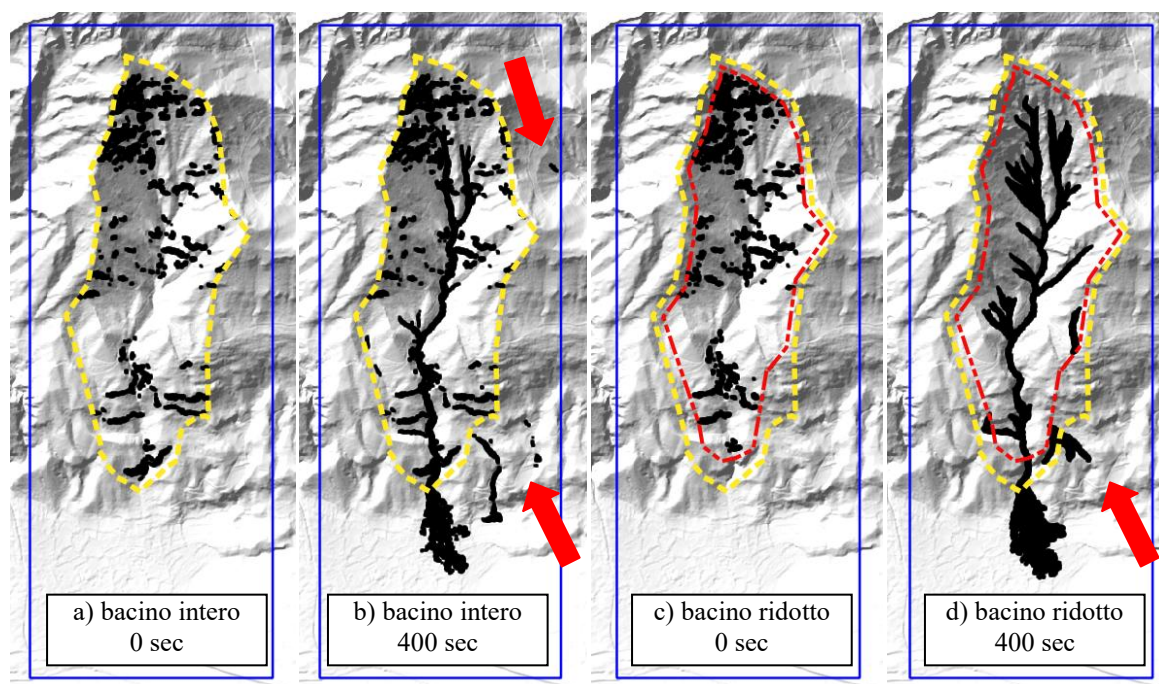


Figura 59: definizione delle celle instabili (in nero) nell'intero bacino (linea gialla) nel bacino ridotto (linea rossa). Nell'ordine da sx a dx: a) celle instabili bacino intero a 0sec (stato iniziale) e b) simulazione a 400sec; c) celle instabili bacino ridotto a 0sec e d) simulazione a 400sec (h_{max}); in evidenza (freccia rossa) la fuoriuscita del materiale dal bacino.

E' stato quindi necessario ridurre drasticamente la porzione di territorio che contribuisce alla formazione della colata in modo tale che i 17000 m^3 di materiale instabile possano transitare tutti attraverso l'apice di conoide. Tale restrizione può sembrare eccessiva quanto arbitraria, ma va ricordato che lo scopo del lavoro è studiare l'interazione della colata - della quale è noto il volume totale - con il centro abitato, pertanto le ipotesi sull'innesco sono funzionali a definire le velocità e le altezze con cui la massa si è propagata e depositata in conoide piuttosto che caratterizzare il comportamento del bacino stesso.

In sintesi il calcolo delle celle instabili è stato condotto sulla porzione di territorio indicata in Figura 60 e i parametri meccanici scelti sono specificati in Tabella 10. Il confronto tra innesco concentrato e distribuito è illustrato al paragrafo 4.6.

Figura 60: bacino ridotto finale per la simulazione con innesco distribuito (linea verde)

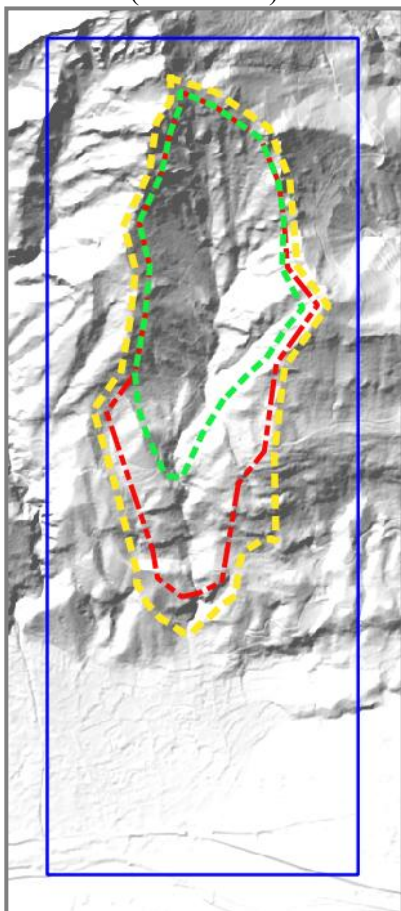


Tabella 10: parametri meccanici del terreno e volume finale di materiale instabile

Parametro	Valore
Peso per unità di volume γ_{sat} [kN/m ³]	19
Angolo di resistenza al taglio φ' [kN/m ³]	22
Coesione c' [Pa]	2150
Altezza massima celle H [m]	0.2
Altezza totale massa instabile [m]	683
Volume totale [m ³]	17064

4.2.3 Inserimento degli edifici nel modello

La presenza di edifici nell'area di conoide è stata inserita nel modello implementato in RASH^{3D} attribuendo alle quote topografiche dei punti che si trovano all'interno del perimetro delle costruzioni un'altezza fittizia di 20 metri che va a sommarsi alla quota reale del terreno ricavata dal DTM 5m.

Va ricordato che il file in input nel codice di calcolo RASH^{3D} deve avere una struttura regolare nel piano (coordinate x e y) e pertanto non è possibile riprodurre fedelmente il perimetro degli edifici dal momento che la maglia di punti ha un passo regolare di 5 metri ed in alcune costruzioni di piccole dimensioni è stato possibile individuare solo un punto al loro interno. In Figura 61 è riportato un esempio dell'assegnazione della quota aggiuntiva e l'effetto che questa operazione ha avuto sul modello triangolato di RASH^{3D}.

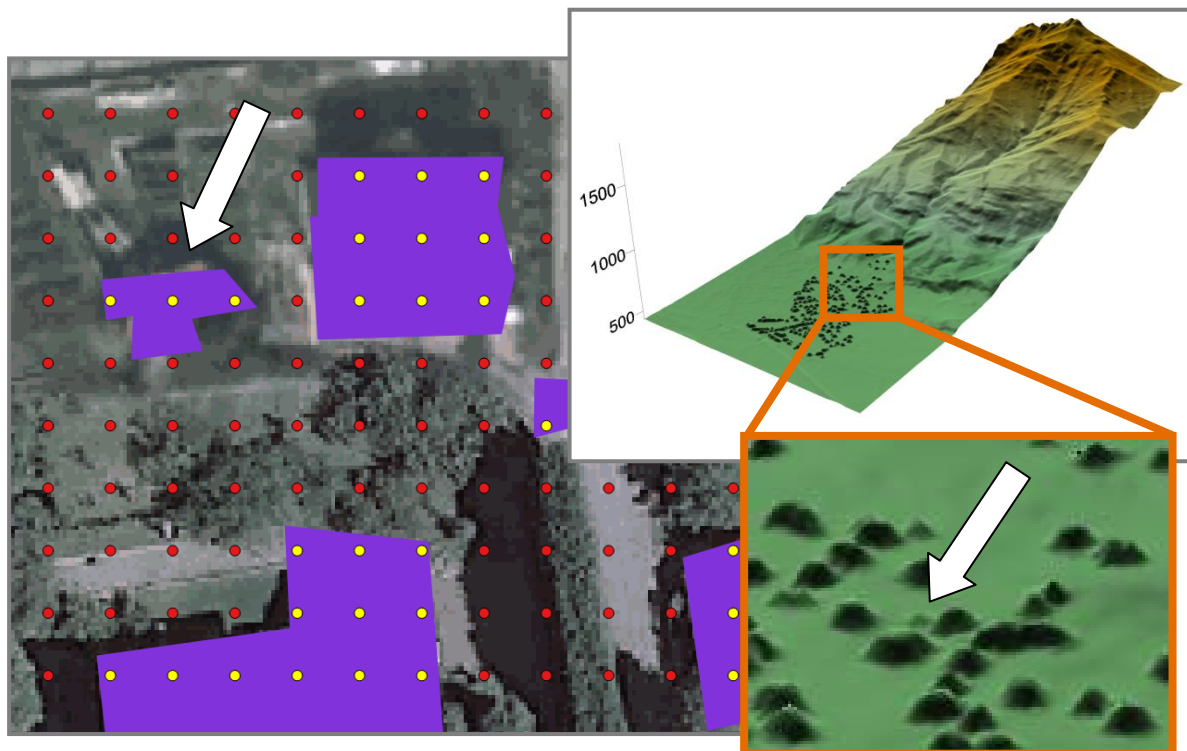


Figura 61 : rappresentazione degli edifici (viola) nel modello implementato su RASH^{3D}. Punti della maglia 5x5 metri con valore di quota da DEM (rossi) e punti con assegnazione di quota aggiuntiva di 20 metri per la presenza di edifici (gialli). In evidenza la costruzione con soli tre punti gialli all'interno. Sullo sfondo l'ortofoto AGEA 2015. A sinistra il modello in vista 3D e il dettaglio della rappresentazione degli edifici in RASH^{3D}.

La scelta di aumentare la quota del terreno di 20 metri in corrispondenza degli edifici ha due effetti importanti:

- il primo è quello di creare una “*curvatura*” del terreno in prossimità della costruzione sufficientemente elevata da creare un ostacolo insormontabile per la massa in movimento e simulare quindi al meglio la presenza della costruzione;
- il secondo effetto è legato all'estrazione delle altezze e della velocità della massa nell'output di RASH^{3D}; infatti, proprio per come è stato generato il modello del terreno le suddette informazioni non potranno essere estratte immediatamente a ridosso delle pareti delle abitazioni (in corrispondenza del perimetro reale), ma andranno rilevate ad una certa distanza dalla costruzione (offset) e queste ultime confrontate quindi con i valori misurati in campo.

4.3 SIMULAZIONE DELL'EVENTO CON RASH^{3D}

Utilizzando i file predisposti come da paragrafo precedente, sono state avviate diverse modellazioni con RASH^{3D}. La reologia scelta è quella proposta da Voellmy specificata al paragrafo 4.1. In prima analisi si è scelto di effettuare le simulazioni con innesco concentrato e settando i parametri reologici (coefficiente di attrito e turbolenza – Voellmy) con valori “estremi” così da comprendere meglio come questi ultimi influiscono sulla variabilità del fenomeno. Tali coppie di valori rappresentano un primo tentativo di simulazione con lo scopo di comprendere quali grandezze governano maggiormente il fenomeno e qual è l'intervallo di indagine da esplorare nella ricerca della miglior coppia di parametri.

I valori di primo tentativo sono stati selezionati tra quelli proposti da Hung O. and Evans S.G. (1996) e riassunti in Figura 62 (si specifica che il coefficiente di attrito riportato in tabella è espresso come tangente dell'angolo di attrito).

No.	Case	Frictional	Bingham		Voellmy	
		Bulk Friction Angle (deg)	Yield Strength (kPa)	Viscosity (kPa.s)	Friction Coeff.	Turbulence Coeff. (m/s ²)
1-1	Pandemonium Ck.	13	-	-	0.1	1000
1-2	Frank	16	100	10	0.1	700
1-3	Avalanche Lake N.	10	200	10	0.1	700
1-3a	Avalanche Lake S.	11	200	10	0.1	500
1-5	Hope	18	200	10	0.1	500
1-6	Dusty Creek	21	100	10	0.2	200
1-8	Rubble Creek	13	-	-	0.07	100
1-9	Turbid Creek	17.5	-	-	0.1	300
1-10	Kennedy River	23	50	10	0.1	300
1-11	Mystery Creek	17	90	9	0.1	600
1-12	Lake of the Woods	20	200	10	0.24	200
2-1	Mt. St. Helens	9.5	278	50	0.08	500
2-2	Madison Canyon	16	100	20	0.2	500
2-3	Sherman Glacier	10	16	1.6	0.03	1000
2-4	Gros Ventre	16	140	14	0.22	500
3-1	Vai Pola	16	150	30	0.1	500
3-2	Mt. Granier	12	80	10	0.09	1000
3-4	Diablerets	20	400	40	0.2	450
3-5	Elm	14	100	10	0.14	500
3-6	Goldau	12	100	10	0.1	500
3-8	Flims	23	-	-	0.21	500
4-1	Ontake	8	-	-	0.03	200
5-3	Mayunmarca	12	100	10	0.1	500

Figura 62: parametri reologici *best-fit* per back-analyses (Hung O. and Evans S.G.,1996)

Sono stati selezionati tre valori di coefficiente di attrito e tre valori di turbolenza ottenendo nove combinazioni come riepilogato in Tabella 11. Il risultato della modellazione numerica è illustrato nelle figure seguenti e in Allegato 9, e lo scenario in esse rappresentato si riferisce all'altezza del deposito al tempo di analisi di 400 secondi (tempo reale dell'evento), con *cut-off* dell'altezza minima a 10 cm.

Tabella 11: combinazioni di primo tentativo dei parametri reologici e reologia di Voellmy.

$Voellmy \quad \tau = \rho g \left(h \cos \theta \tan \phi_a + \frac{v^2}{\xi} \right)$		Turbolenza ξ [m/s²]		
		100	500	1000
Coeff. di attrito ϕ_a [°]	1.72	1-1	1-2	1-3
	5.71	2-1	2-2	2-3
	11.3	3-1	3-2	3-3

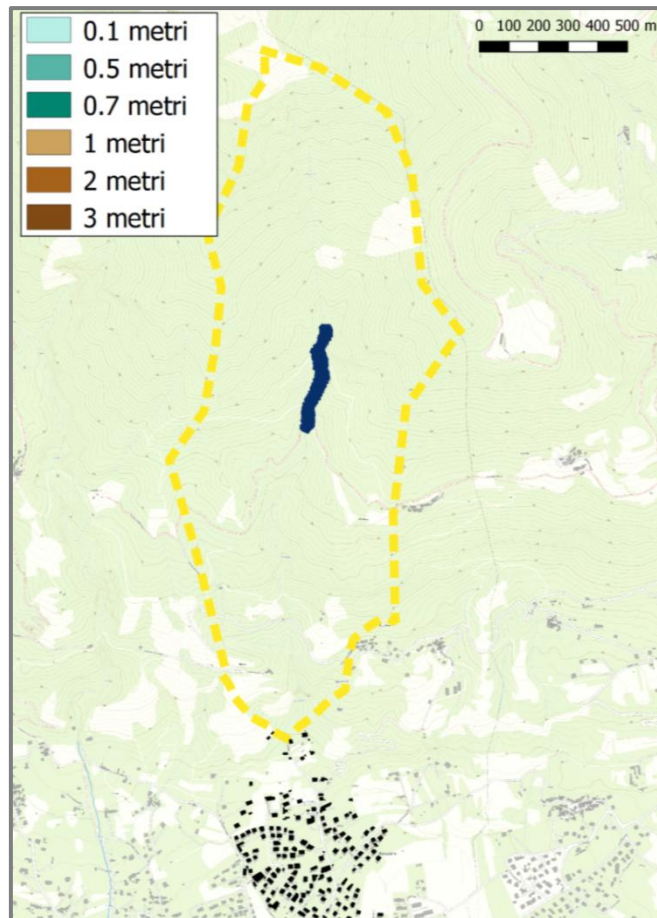


Figura 63: risultato della modellazione numerica al tempo 0 secondi; in evidenza innesco con massa concentrata di circa 17000 metri cubi (area blu).

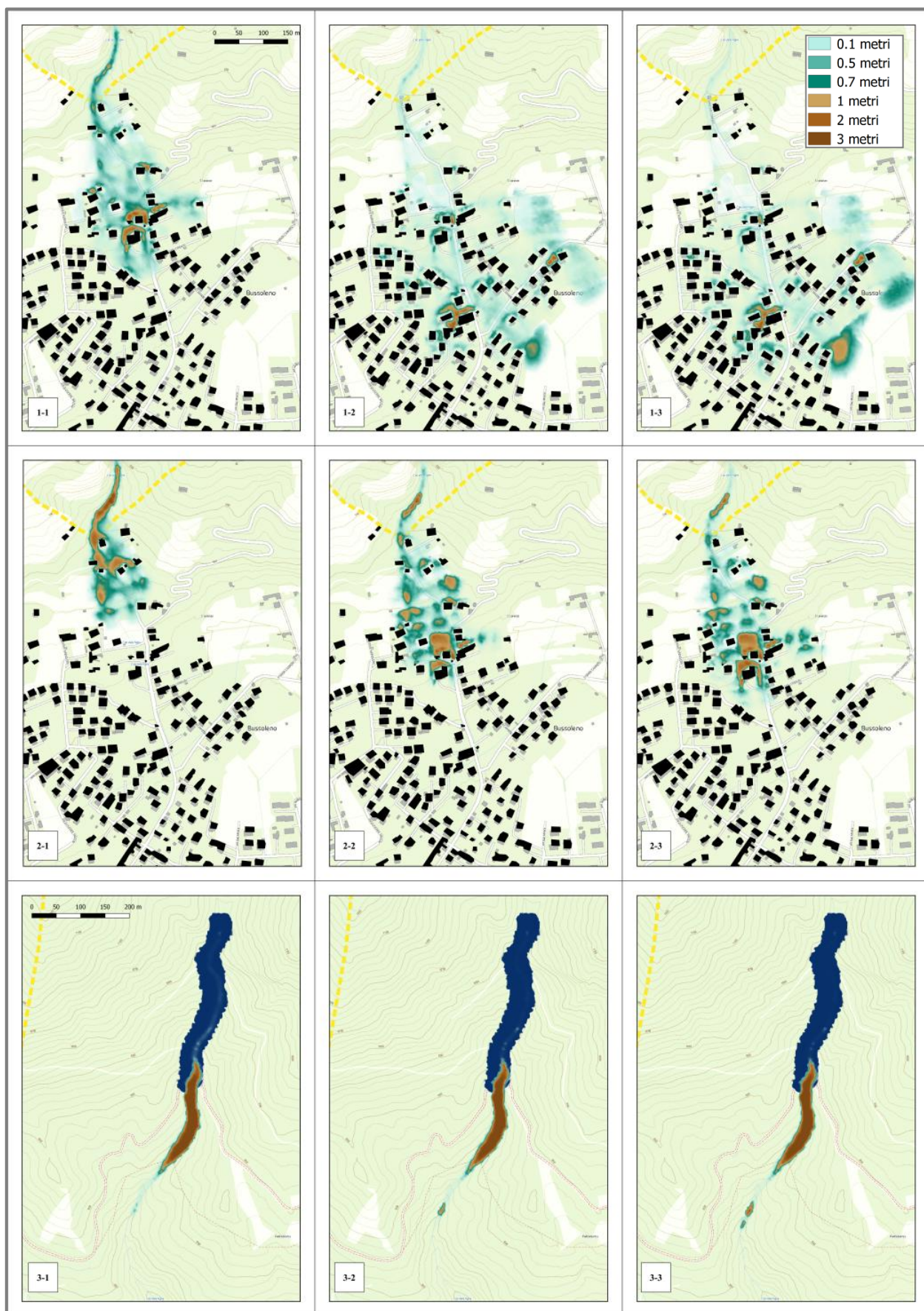


Figura 64: risultato della modellazione numerica al tempo 400 secondi con i parametri di Tabella 11.

Osservando i primi risultati si rileva che:

- la modellazione con coefficiente di attrito pari a $11,3^\circ$ mostra che la massa avanza di poco rispetto all'innesco iniziale, percorrendo un tratto brevissimo dell'asta principale, e non raggiunge nemmeno l'apice di conoide. Il fenomeno franoso visto nel suo insieme (dall'innesco fino al deposito finale) è molto sensibile all'attrito e meno alla turbolenza;
- la turbolenza assume grande significato nella zona di conoide - dove la massa non è più incanalata – definendo il modo in cui il materiale si espande. Al crescere del valore di turbolenza, che corrisponde ad una diminuzione dell'attrito interno, il materiale in movimento tende ad allargarsi occupando una superficie maggiore e lambendo un maggior numero di ostacoli;
- il tempo di analisi di 400 secondi può essere considerato significativo per valutare il deposito finale dell'evento dal momento che nella maggior parte delle simulazioni la massa raggiunge, o addirittura supera, le costruzioni che sono state maggiormente colpite dall'evento e che sono utilizzate come controllo;
- i valori dei due parametri reologici, che meglio potranno rappresentare l'evento, vanno ricercati nell'intervallo tra 1.72° e 5.71° per il coefficiente di attrito e tra 100 m/s^2 e 500 m/s^2 per la turbolenza.

Si riportano di seguito (da Tabella 12 a Tabella 17) i valori di altezza del deposito e velocità della massa estratti dalla modellazione numerica con un tempo di analisi (riferito al tempo dell'evento) pari a 400 secondi e in Figura 65 l'inquadramento dei catastali che sono stati investigati. Per ogni coppia di valori di attrito e turbolenza vengono indicati il valore di altezza massima raggiunta in metri e la velocità massima della massa in metri al secondo. I valori sono stati approssimati al decimetro per quanto riguarda l'altezza ed ai decimi di metro al secondo per la velocità.

Ricordando che al crescere dell'angolo di attrito aumenta la resistenza la moto con la conseguenza che la massa “*tende a fermarsi prima*”, e che all'aumentare della turbolenza diminuisce la resistenza la moto e quindi si ottiene l'effetto contrario, da una prima analisi dei valori tabellati si osserva (come già evidenziato dall'analisi della Figura 64) che il fenomeno è molto più sensibile all'angolo di attrito piuttosto che alla turbolenza. In effetti al crescere della turbolenza (da 100 a 1000 m/s^2) i valori di altezza e velocità aumentano in media del 50% mentre passando da un angolo di attrito di 1.72° a 5.71° i valori si dimezzano.

Fa eccezione la coppia di valori 5.71° e 100m/s^2 per la quale si registrano alcuni valori nulli: tale situazione è legata al fatto che con la durata di analisi impostata per l'indagine, pari a 400 secondi, la massa raggiunge solo le prime costruzioni in apice di conoide (catastali 377 e 993) e arriva lambire le case poco più a valle. Questa informazione fa comprendere immediatamente che la citata coppia di valori non è idonea a rappresentare l'evento. Infatti se si considera che la massa deve percorrere poco più di due chilometri per arrivare all'abitato, tenuto conto che - in generale - questo tipo di fenomeni sono caratterizzati da velocità che arrivano anche a 20 m/s (Chiarle et. al), è lecito aspettarsi che il fluido fangoso raggiunga l'abitato entro i 400 secondi.

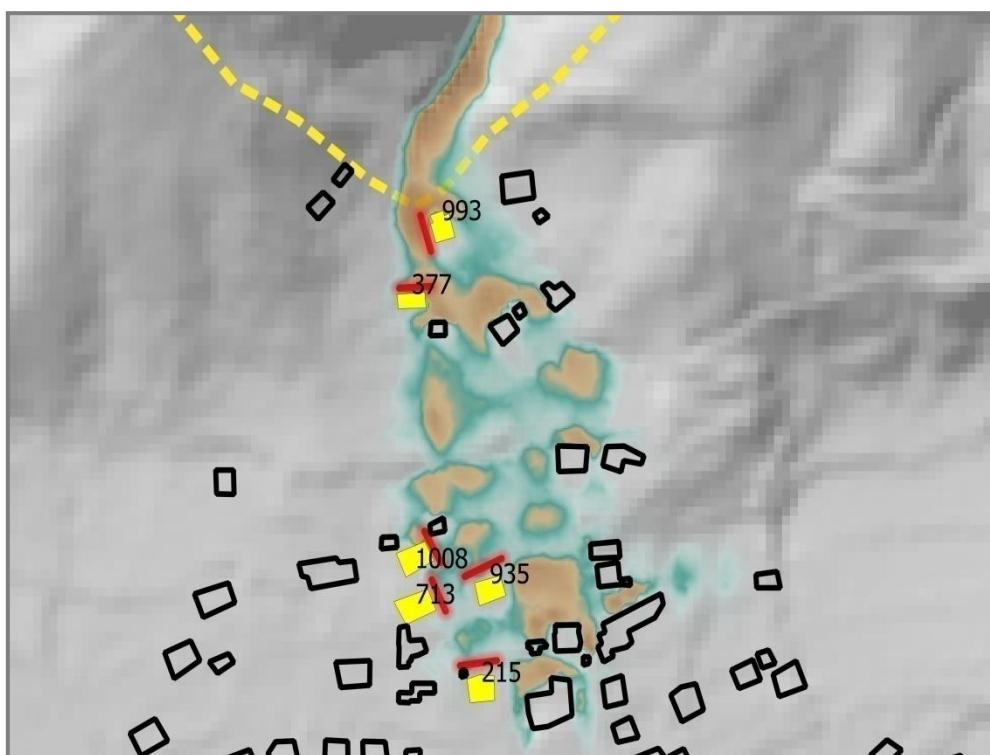


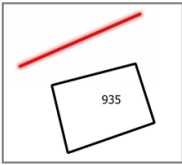
Figura 65: numeri catastali investigati nell'output di Rash. In evidenza la linea rossa disegnata accanto all'edificio lungo la quale è stata eseguita l'estrazione del dato. Sullo sfondo la simulazione con attrito di $5,71^\circ$ e turbolenza di 500 m/s^2 .

Altro aspetto interessante è dato dai valori di altezza massima per il caseggiato con catastale 993; è l'unico caso nel quale all'aumento della turbolenza corrisponde una diminuzione di spessore. Tale comportamento è ascrivibile al fatto che la costruzione si trova in apice di conoide (è la prima costruzione ad essere investita dalla massa) ed è lambita dalla massa in movimento sul prospetto ovest proprio mentre quest'ultima sta lasciando il bacino idrografico seguendo una traiettoria curvilinea in senso antiorario; all'aumentare della turbolenza si ottiene un fluido che dissipa meno energia al suo interno, acquista velocità e

pertanto l'effetto di curvatura della traiettoria si amplifica con il risultato che il 993 viene lambito sempre meno dalla massa. Tale comportamento è confermato dai valori registrati presso il catastale 377 che, trovandosi dal lato opposto della linea di deflusso (rispetto al 993), vede raddoppiare il valore di altezza di fango passando da una turbolenza di 100m/s^2 a 1000m/s^2 .

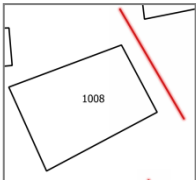
Le velocità massime sono riscontrabili in apice di conoide con valori che superano i 9 m/s .

Tabella 12: risultati della modellazione numerica per Catastale 935 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).



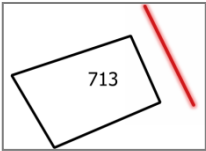
		Turbolenza ξ [m/s^2]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito ϕ_a [°]	1.72	$h_{\max} = 1.2\text{ m}$	1.7	1.8
		$v_{\max} = 2.4\text{ m/s}$	4.3	5.2
	5.71	0.0	0.9	0.9
		0.0	2.5	2.9

Tabella 13: risultati della modellazione numerica per Catastale 1008 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).



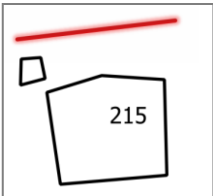
		Turbolenza ξ [m/s^2]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito ϕ_a [°]	1.72	$h_{\max} = 1.3\text{ m}$	1.3	1.3
		$v_{\max} = 2.8\text{ m/s}$	4.5	5.4
	5.71	0.0	0.8	0.8
		0.3	2.0	2.5

Tabella 14: risultati della modellazione numerica per Catastale 713 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).



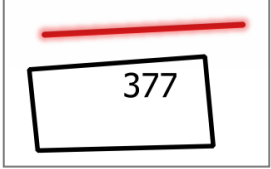
		Turbolenza ξ [m/s^2]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito ϕ_a [°]	1.72	$h_{\max} = 0.4$ m	0.4	0.4
		$v_{\max} = 1.8$ m/s	3.2	3.8
	5.71	0.0	1.8	2.0
		0.0	1.8	2.0

Tabella 15: risultati della modellazione numerica per Catastale 215 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).



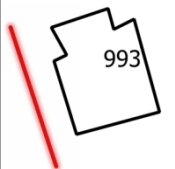
		Turbolenza ξ [m/s^2]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito ϕ_a [°]	1.72	$h_{\max} = 0.8$ m	1.0	1.2
		$v_{\max} = 2.0$ m/s	3.3	3.7
	5.71	0.0	1.0	1.2
		0.0	2.4	2.6

Tabella 16: risultati della modellazione numerica per Catastale 377 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).



		Turbolenza ξ [m/s ²]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito ϕ_a [°]	1.72	$h_{\max} = 1.8$ m	3.0	3.4
		$v_{\max} = 3.2$ m/s	7.7	9.0
	5.71	1.7	1.8	2.2
		2.1	3.5	5.9

Tabella 17: risultati della modellazione numerica per Catastale 993 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).



		Turbolenza ξ [m/s ²]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito ϕ_a [°]	1.72	$h_{\max} = 2.1$ m	2.1	1.4
		$v_{\max} = 4.4$ m/s	8.7	9.2
	5.71	2.1	2.3	2.8
		3.6	5.3	7.5

A seguito della prima fase di indagine, la ricerca dei valori di attrito e turbolenza - che esprimono al meglio la simulazione dell'evento - è stata condotta nell'intervallo compreso tra

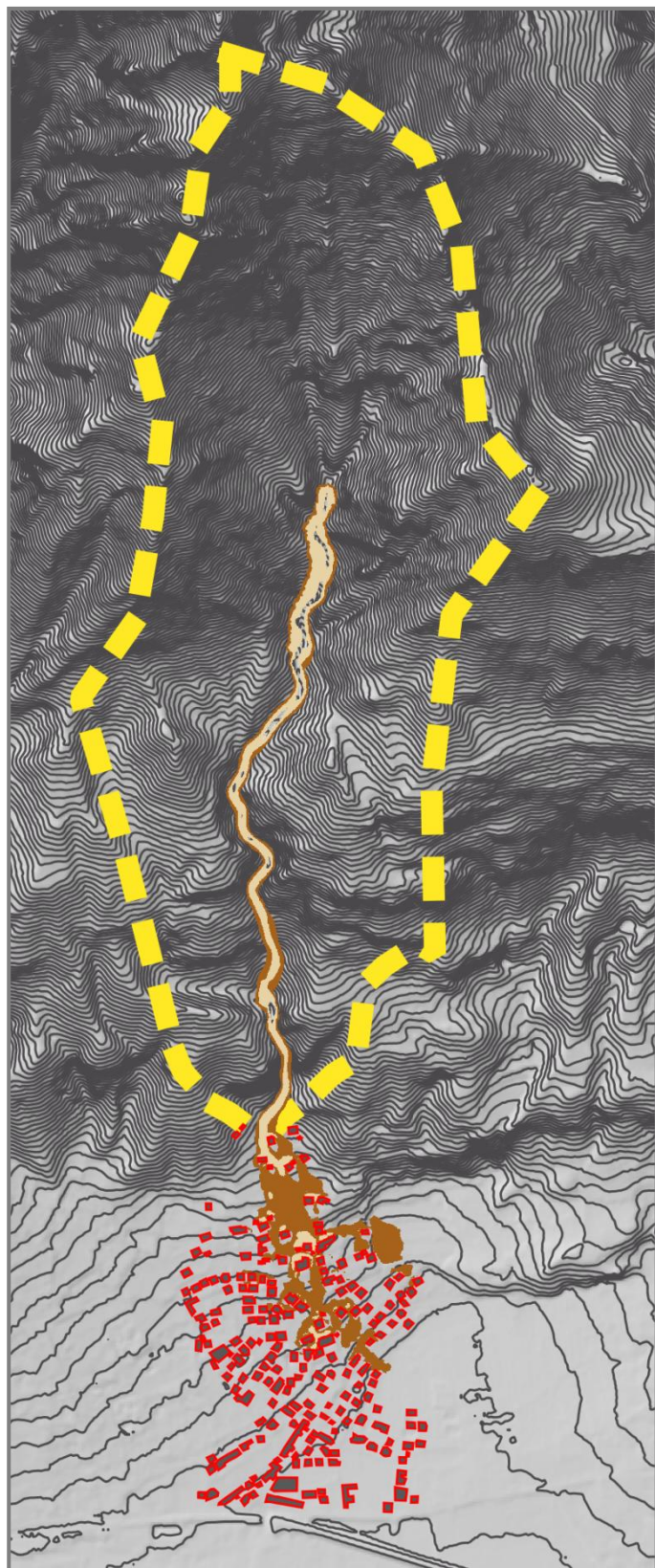


Figura 66: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . In marrone il valore di altezza massima (scuro $<1\text{m}$, chiaro $>1\text{m}$)

$1,72^\circ$ e $5,71^\circ$ (coefficiente di attrito). Nello specifico è stato utilizzato un coefficiente di attrito pari a $2,86^\circ$ e turbolenza variabile da 100 m/s^2 e 1000 m/s^2 . Si riporta in Figura 66 il risultato della simulazione con coefficiente di attrito pari a $2,86^\circ$ e turbolenza di 500 m/s^2 , dalla quale si possono evincere chiaramente sia il percorso della massa (con innesco concentrato) sia la zona interessata dall'evento in area di conoide. I risultati esposti si riferiscono ad un tempo di analisi di 400 secondi (tempo reale dell'evento) e viene messa in evidenza l'altezza massima raggiunta dalla massa in ogni punto del territorio al termine dei 400 secondi. Il *cut-off* sullo spessore minimo è pari a 20 cm. La colata, dopo aver lasciato l'area di distacco, percorre l'intera incisione principale mantenendo delle altezze particolarmente elevate (in marrone chiaro è indicata l'altezza $>1\text{m}$) fino al raggiungimento dell'apice di conoide. Qui la massa, incontrando una riduzione di pendenza (l'intera area di conoide ha un dislivello complessivo che non raggiunge i 100 mslm), inizia a rallentare e ad espandersi investendo l'abitato della frazione San Lorenzo.

Dall'immagine di Figura 66 è chiaramente visibile la direzione principale del flusso detritico che va da nord a sud nel primo tratto per poi ripiegare verso est a partire dalla zona mediana del conoide.

Il bacino Comba delle foglie (tratteggiato in giallo) si chiude con una cascata e subito dopo l'asta principale forma un'ansa in senso antiorario che culmina a ridosso delle prime costruzioni del conoide (Catastali 377 e 993). In questa zona, come visibile nell'ingrandimento di Figura 67, la massa mantiene ancora uno spessore elevato (superiore ai 2 metri) per poi espandersi e occupare una superficie sempre maggiore - dal momento che non è più incanalata - con spessori che scendono in generale sotto al metro (aree in marrone scuro). Nel dettaglio si osserva inoltre che il deposito si accumula in corrispondenza delle abitazioni più a valle con spessori ancora una volta superiori ad un metro.

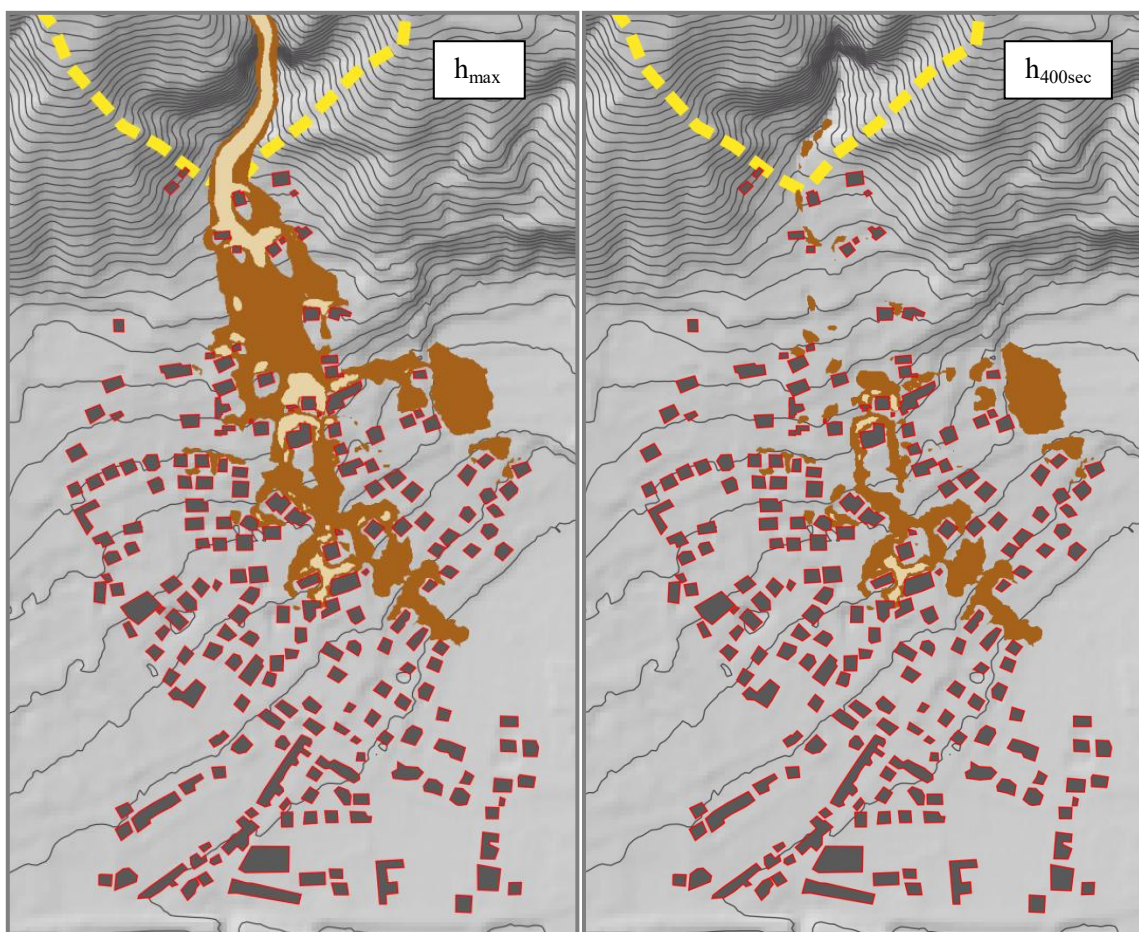


Figura 67: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . In marrone il valore di altezza del deposito (scuro $<1\text{m}$, chiaro $>1\text{m}$). A sinistra i valori di altezza massima e a destra il deposito al tempo di 400 secondi (*cut-off* inferiore pari a 20 cm).

Sempre in Figura 67 ($h_{400\text{sec}}$) è possibile osservare le altezze del deposito finale al tempo di 400 secondi; la colata ha attraversato tutto l'abitato della zona apicale e si sta dirigendo verso la parte più a sud del versante sinistro Valsusino in direzione Dora Riparia. Si notano alcuni accumuli di materiale in corrispondenza delle abitazioni della zona mediana del conoide con altezze superiori al metro.

In corrispondenza di alcuni Catastali sono state estratte dalla simulazione le curve relative alle altezze massime raggiunte dalla colata in funzione della turbolenza (Figura 68, Figura 69, Figura 70). I Catastali 377 e 993 sono collocati in apice di conoide e sono le prime costruzioni ad essere interessate dal fenomeno, mentre il Catastale 935 è situato nella zona mediana.

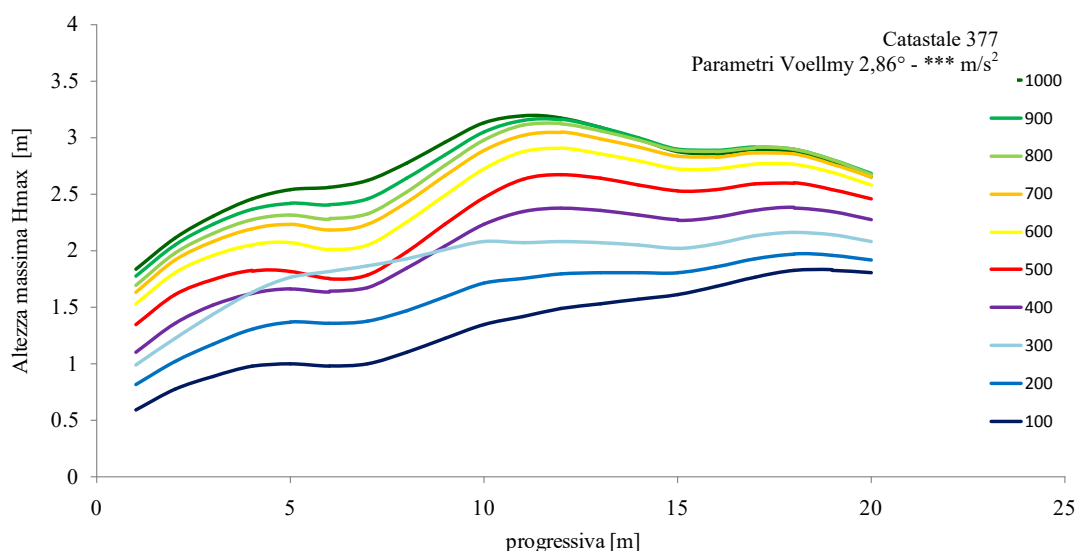


Figura 68: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 377 in funzione della turbolenza. Coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$ e tempo di analisi 400 secondi. Linea di indagine visibile in Figura 65.

L'analisi degli spessori massimi mostra che all'incremento della turbolenza (al quale corrisponde una diminuzione dell'attrito interno secondo la formulazione di Voellmy) fa seguito un aumento delle altezze massime coerentemente a quanto ci si aspetterebbe. Per i catastali 993 e 935 si osserva che la differenza massima tra altezza con turbolenza pari a 100 m/s^2 e 1000 m/s^2 è inferiore al metro. In particolare per il Catastale 993, l'intervallo è del tutto trascurabile in prossimità della parte più a sud della linea investigata. Per il Catastale 935 invece la differenza è di poco inferiore ai due metri. Tali differenze sono legate alla posizione delle abitazioni in conoide ed alla direzione e modalità con cui la colata detritica entra in contatto con queste ultime. In effetti il catastale 377 si trova proprio subito sotto l'ansa dell'asta principale in apice di conoide in posizione "sfavorevole" e quindi risente fortemente

delle variazioni delle caratteristiche reologiche del materiale detritico, mentre il Catastale 993 viene lambito dalla massa in movimento: gli effetti reali dell'evento si traducono in un danneggiamento pesante strutturale a carico del primo, mentre per il secondo non vi sono danni rilevanti (vedere foto in Allegato 4 – paragrafo 9.4).

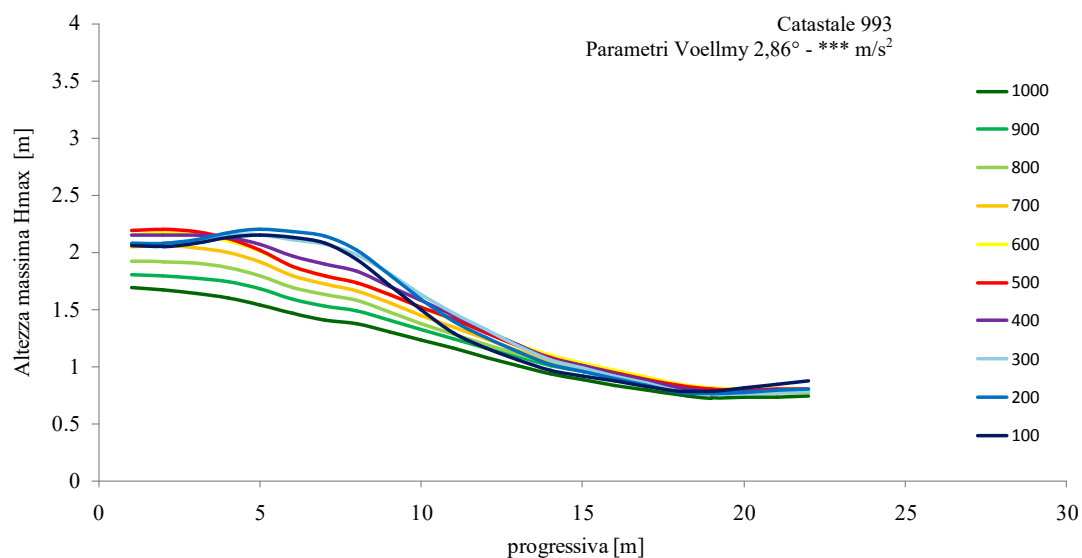


Figura 69: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 993 in funzione della turbolenza. Coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$ e tempo di analisi 400 secondi. Linea di indagine visibile in Figura 65.

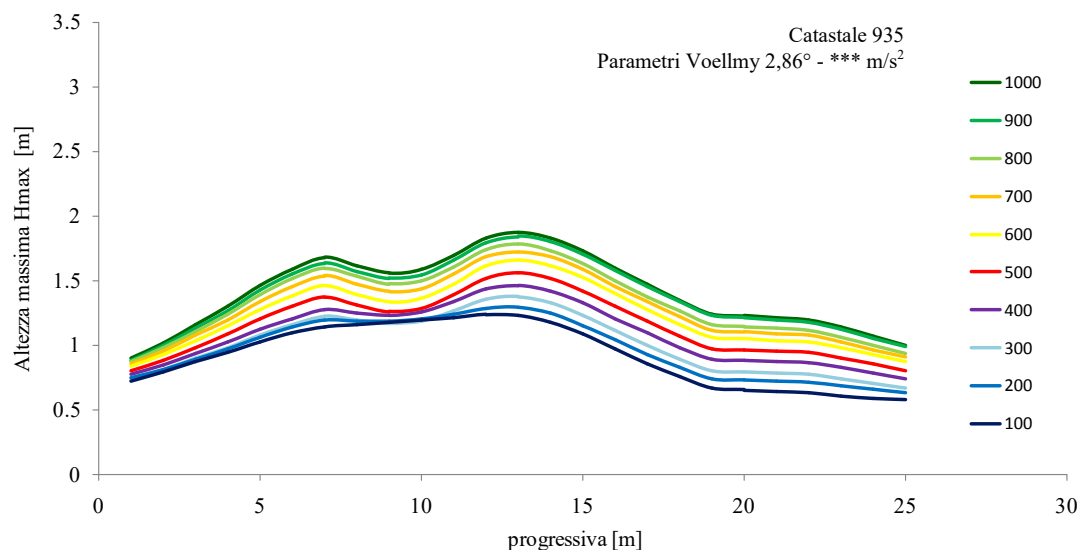


Figura 70: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 935 in funzione della turbolenza. Coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$ e tempo di analisi 400 secondi. Linea di indagine visibile in Figura 65.

Dopo le prime simulazioni, la modellazione numerica è stata condotta confrontando i risultati di quest'ultima con le misurazioni in campo del sopralluogo del febbraio 2019.

4.4 COMPARAZIONE TRA LE SIMULAZIONI E I RILIEVI IN CAMPO – CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

In data 28/02/19 è stato effettuato un sopralluogo presso la frazione San Lorenzo di Bussoleno al fine di valutare i danni alle costruzioni e censire le altezze massime che ha raggiunto il deposito di fango (vedere paragrafo 3.7). Le altezze raggiunte dalla massa in transito sono utili per calibrare i parametri delle reologie selezionate nella modellazione numerica. I valori raccolti in campo sono catalogati in Tabella 9.

E' importante ricordare che il confronto tra valori reali raccolti in sito e i risultati della simulazione numerica, non può essere fatto *tout court*; la modellazione numerica rappresenta - per definizione - una simulazione di un evento reale basata sull'applicazione di leggi fisico-matematiche. Per far sì che la rappresentazione risulti il più fedele possibile alla realtà sarebbero necessarie informazioni estremamente dettagliate che alla data di redazione della presente tesi non sono disponibili, senza contare i limiti del codice di calcolo che costringe ad una semplificazione delle informazioni in esso introdotte come ad esempio l'approccio ad un sistema monofasico omogeneo che non tiene conto dell'effetto di sedimentazione della parte solida e conseguente allontanamento della parte liquida (separazione delle fasi), o ancora la rappresentazione degli ostacoli (ad esempio gli edifici) nel modello. Inoltre a complicare la modellazione entrano in gioco anche i volumi di materiale mobilitato che si distaccano dai versanti e giungono a valle: i rilievi eseguiti da Arpa Piemonte indicano un volume compreso tra 15000 m³ e 20000 m³, mentre nel Rapporto di Regione Piemonte i volumi stimati si aggirano attorno ai 30000 m³. Appare evidente che a fronte di cotanta incertezza sui dati raccolti in campo post-evento non possa che seguire una conseguente e significativa incertezza sui risultati del modello.

In sintesi, i dati tra rilievi in campo e quelli estratti dal modello numerico devono essere confrontati basandosi sugli ordini di grandezza e sugli andamenti piuttosto che sul valore tal quale.

Le misure rilevate in campo sono state interpolate in modo da ottenere un pseudo-deposito circoscritto all'area intorno alle costruzioni maggiormente coinvolte dall'evento. Il risultato dell'interpolazione è illustrato in Figura 71. Tuttavia va osservato che i punti rilevati in campo coprono solo una parte del deposito (segni lasciati dal fango sulle abitazioni) e mancano completamente le informazioni all'interno del deposito e nel perimetro, perciò nelle parti più esterne dell'interpolazione i dati potrebbero essere sottostimati rispetto all'evento reale o

comunque non rappresentativi. Pertanto, si è preferito effettuare i confronti e calibrare il modello utilizzando direttamente le altezze rilevate in campo.

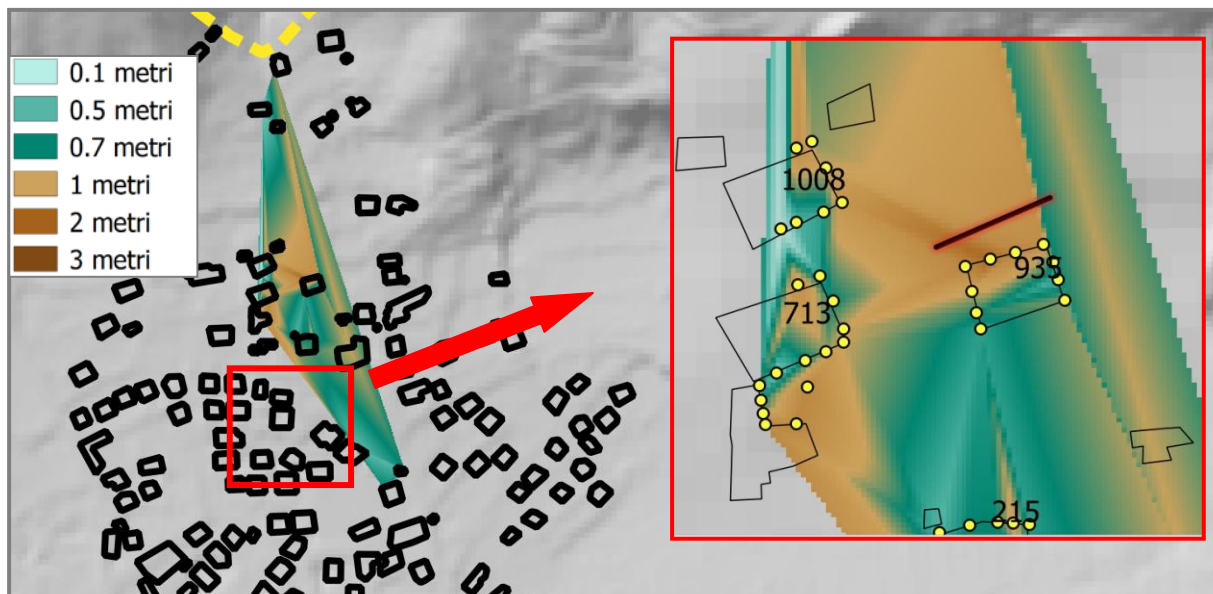
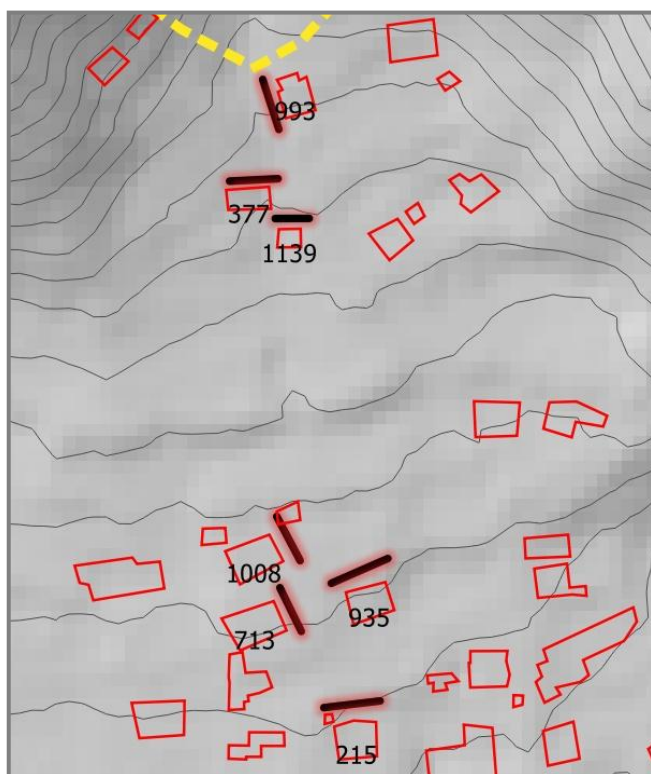


Figura 71: interpolazione dei dati misurati in campo di Tabella 9 al paragrafo 3.7. In evidenza i punti rilevati il 28 febbraio 2019 (punti gialli). Questo modello è stato scartato in favore del confronto diretto con i singoli punti rilevati nel febbraio 2019.



Le linee di indagine sulle quali vengono effettuati i confronti sono le medesime indicate in Figura 65 e che qui si richiamano per facilità di lettura.

Il primo confronto viene eseguito sui catastali in apice di conoide (Figura 72 e Figura 73) con turbolenza fissata a 500 m/s^2 e coefficienti di attrito variabile ($1,72^\circ - 2,86^\circ - 5,71^\circ$). L'altezza del deposito misurata durante l'indagine in sito è indicata con una linea nera. Da una prima analisi del Catastale 377 si osserva che il coefficiente di attrito pari a $5,71^\circ$ porta a sottostimare notevolmente le

altezze massime della colata con valori massimi che si assestano a 1,5 metri circa, mentre

negli altri due casi le altezze massime sono comprese tra 2,5 e 3 metri circa, decisamente più coerenti con i valori rilevati in campo. Per avere una stima delle altezze in linea con queste ultime simulazioni è necessario compensare l'elevato angolo di attrito (5.71°) con un notevolmente incremento della turbolenza fino a 2000 m/s^2 ovvero associando alla massa in moto un comportamento sostanzialmente laminare.

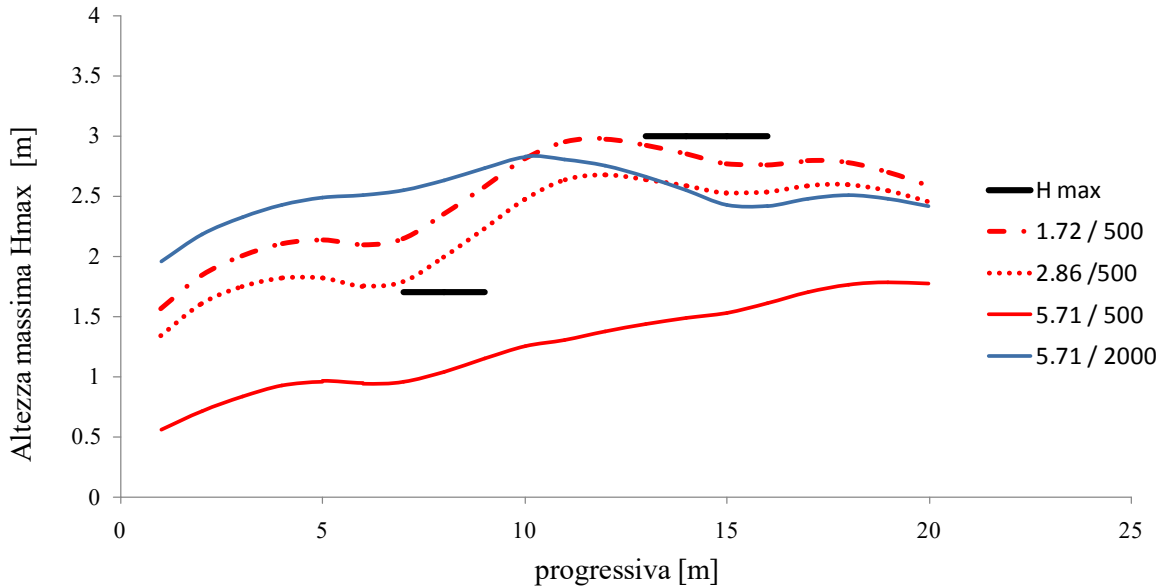


Figura 72: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 377 in funzione del coefficiente di attrito. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[\text{m/s}^2]$. H_{max} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

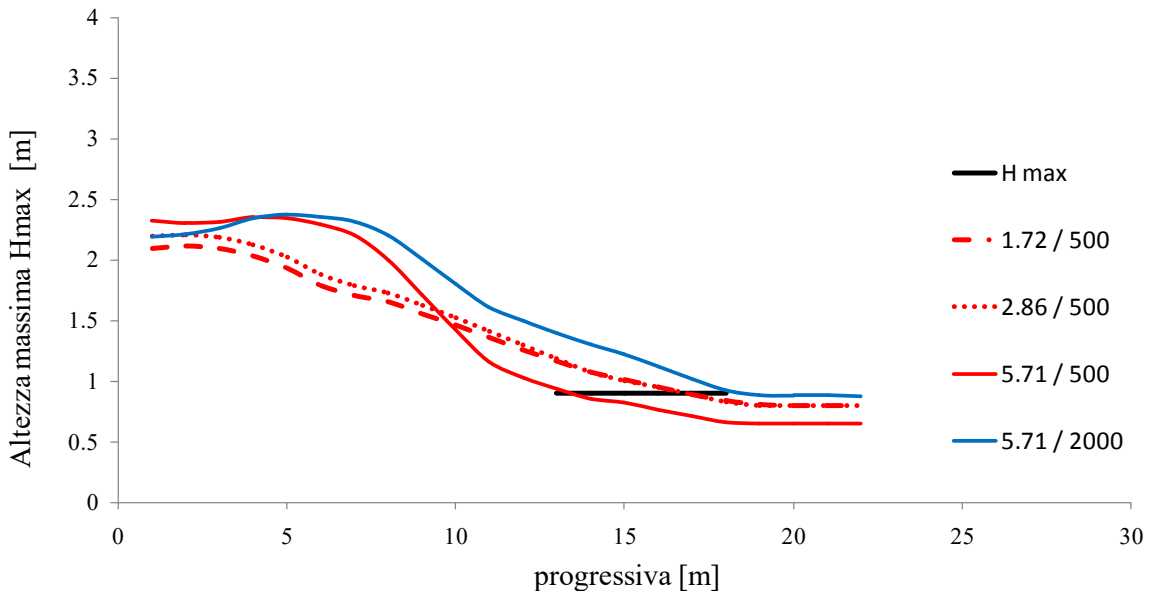


Figura 73: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 993 in funzione del coefficiente di attrito. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[\text{m/s}^2]$. H_{max} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

In sintesi, si osserva che in corrispondenza dell'area di conoide, dove l'acclività si riduce drasticamente rispetto al bacino, l'attrito assume un effetto preponderante rispetto al turbolenza riducendo quindi l'avanzamento della colata verso valle. Pertanto si conferma la necessità di investigare i parametri di Voellmy con coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$. L'effetto è meno marcato nel Catastale 993 e ciò è dovuto al fatto che nella sezione investigata, la massa lambisce l'edificio lateralmente – e non frontalmente come nel 377.

Analogamente a quanto fatto poco sopra, si riporta l'altezza massima estratta dalla simulazione per il Catastale 935 in Figura 74 (casa danneggiata pesantemente con distruzione del muro di tamponamento). Anche in questo caso si osserva che un angolo di attrito elevato non permette alla massa di giungere nella zona mediana di conoide; inoltre anche aumentando la turbolenza a 2000 m/s^2 , non si riescono ad ottenere valori confrontabili con i rilievi in campo proprio perché, con un flusso pseudo-laminare, la dissipazione energetica avviene tutta a carico dell'elevato attrito col terreno.

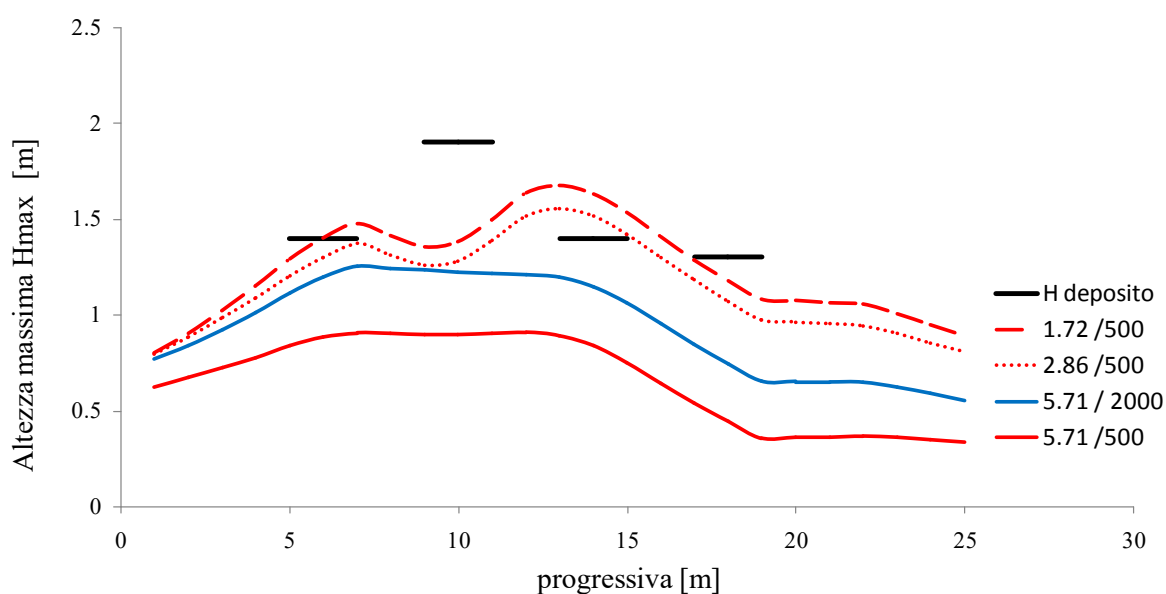


Figura 74: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 935 in funzione del coefficiente di attrito. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[\text{m/s}^2]$. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

Le analisi condotte finora non tengono conto di due aspetti fondamentali necessari per la corretta rappresentazione dell'evento di debris-flow:

- *edifici distrutti*
- *ricomparsa della vecchia bialéra.*

In effetti, fino a questa fase della simulazione sono stati mantenuti intatti tutti gli edifici presenti sul territorio ivi compresi quelli che sono andati distrutti. Una rappresentazione più veritiera, al contrario, deve tenere conto che con lo svolgersi del fenomeno alluvionale due costruzioni collocate lungo la linea di deflusso principale sono state distrutte lasciando aperta la strada alla restante massa in movimento.

Per quanto riguarda la bialéra, i sopralluoghi effettuati subito dopo l'evento e le indagini condotte nel sopralluogo del febbraio 2019 (Figura 75), hanno inaspettatamente mostrato come la colata detritica, attraverso un processo erosivo, abbia riportato alla luce il vecchio canale sepolto nel tempo dalle continue modificazioni del territorio (Figura 13 a pagina 24).



Figura 75: sopralluogo del 28 febbraio 2019; in evidenza la vecchia bialéra riemersa dopo il passaggio della massa fluida, che ne ha favorito il deflusso in direzione nord-sud.

L'aspetto erosivo non è importante dal punto di vista dei volumi mobilitati, dal momento che il fenomeno è avvenuto in area di conoide, ovvero nel tratto terminale dell'evento franoso, ma proprio perché si è creata una via preferenziale per la massa in movimento come

se quest'ultima fosse incanalata. Questi due aspetti sono stati implementati nel file di input di RASH^{3D} riprogettando il DTM 5m attraverso l'eliminazione delle due costruzioni distrutte e



Figura 76: modifiche apportate al DTM 5m. In evidenza le case distrutte in viola, la bialera in beige, le strade con linea nera.

abbassando la quota del piano campagna in corrispondenza della bialera di un 1 metro. Inoltre, con l'obiettivo di rappresentare la presenza dei muretti di recinzione della abitazioni che hanno agito da confinamento della massa fluida, anche le strade sono state ribassate di un 1 metro rispetto alla quota presente nel DTM 5m (dallo studio delle simulazioni è emerso che tale aspetto non ha contribuito in modo preponderante allo svolgimento del fenomeno ma è stato deciso di mantenerlo nelle modifiche al DTM per coerenza metodologica). In Figura 76 si riportano le modifiche apportate al DTM 5m.

ELIMINAZIONE DELLE COSTRUZIONI DISTRUTTE E INTRODUZIONE DELLA BIALERA NEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO A 5 METRI

La modifica al DTM 5m ha condotto a risultati particolarmente interessanti sia sotto l'aspetto del deflusso della colata che rispetto agli spessori del deposito. In Figura 77 vengono messe a confronto la simulazione senza le modifiche e quella modificata ottenute entrambe con coefficiente di attrito pari a $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 .

L'aspetto più rilevante che si osserva dal confronto è la presenza chiara di una linea di deflusso principale della colata che va da nord a sud lungo il solco della bialera. Questa modifica al flusso si ripercuote anche sulle costruzioni e sulle aree più a valle che ora sono maggiormente investite dal fango rispetto alla prima simulazione.

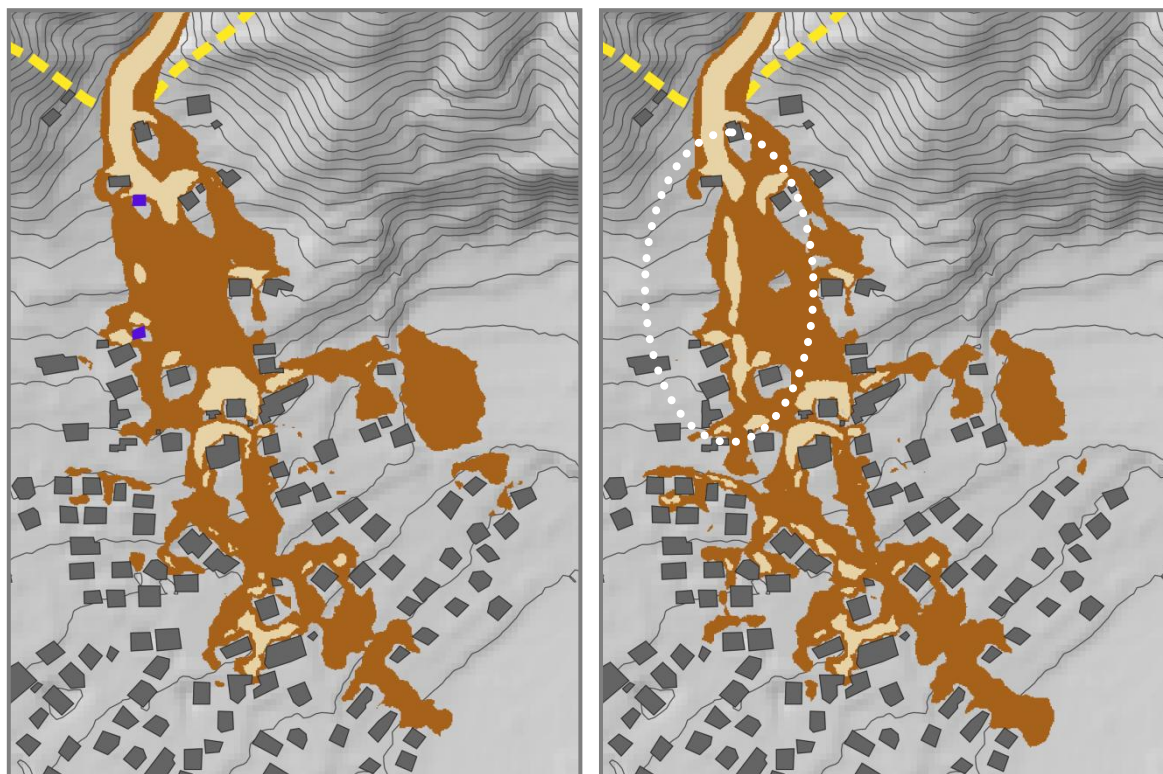


Figura 77: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . In marrone il valore di altezza massima del deposito (scuro $<1\text{m}$, chiaro $>1\text{m}$). Confronto tra modello originale (sx) e modello modificato con eliminazione edifici distrutti e introduzione della bialéra (dx). In evidenza (zona tratteggiata) la linea di deflusso principale.

Confrontando il dettaglio delle costruzioni nella zona mediana con le foto dell'evento, appare evidente come la modifica introdotta nel DTM 5m sia da ritenersi coerente con la realtà e necessaria per una corretta rappresentazione del fenomeno.

Ad esempio il lato sud del Catastale 215 è stato fortemente interessato dalla colata come si evince dalla foto di Figura 78, scattata poco dopo l'evento: il confronto tra le due simulazioni illustrato in Figura 79 e la foto, mostra che solo la condizione nella quale sono stati eliminati gli edifici e aggiunta la bialéra è in grado di rappresentare adeguatamente il fenomeno.

Nel secondo caso infatti tutta l'area prospiciente il lato sud dell'edificio è interessata dal fango mentre nella modello originale del DTM una parte dell'area non ne è coinvolta, e se si escludono i valori di altezza inferiori a 20 cm l'area rimane sostanzialmente intonsa.



Figura 78: lato sud del Catastale 215 dopo l'evento franoso (foto Santo La Ferlita studio Rosso).

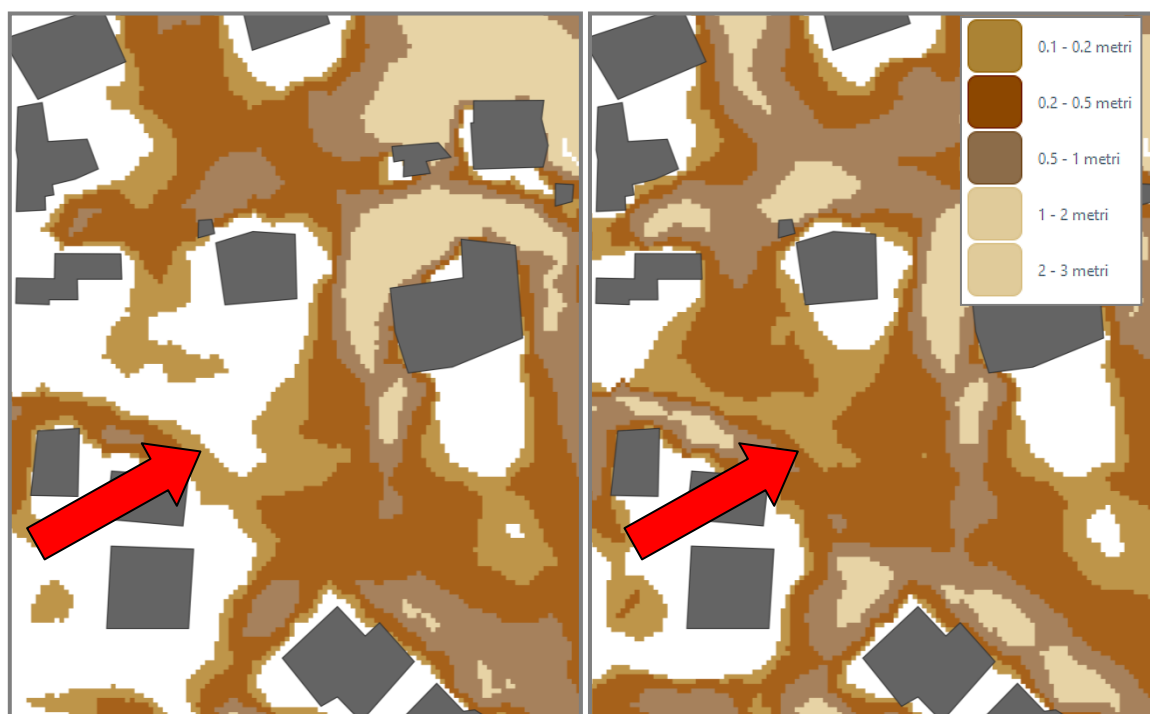


Figura 79: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . Confronto tra modello originale (sx) e modificato con eliminazione edifici distrutti e introduzione della bialéra (dx). In evidenza (freccia rossa) l'area investita dal flusso di fango (lato sud catastale 215).

Da un punto di vista analitico il confronto tra le due simulazioni viene condotto nelle medesime sezioni di indagine viste sinora con coefficiente di attrito variabile ($1,72^\circ - 2,86^\circ - 5,71^\circ$) e turbolenza pari a 500 m/s^2 . Le costruzioni prese a riferimento sono quelle che si trovano nella parte mediana del conoide a valle della bialéra (catastali 1108, 713, 215 e 935).

I risultati sono rappresentati dalla Figura 80 alla Figura 83. Con il colore rosso sono raffigurate le simulazioni pre-modifiche, e viceversa in blu quelle post-modifiche (l'acronimo C_B_S sta per Case Bialéra Strade). Il confronto viene effettuato con le altezze delle tracce di fango misurate sulle pareti degli edifici durante il sopralluogo di febbraio 2019.

In tutte e quattro le sezioni si osserva un incremento delle altezze massime raggiunte dal deposito in condizioni di DTM modificato, indipendentemente dal coefficiente di attrito. In generale si conferma che l'attrito pari a $5,71^\circ$ non è in grado di rappresentare adeguatamente il fenomeno; i due catastali 1008 e 713 mostrano un incremento significativo dell'altezza (linea continua blu) ma questo è dovuto più al posizionamento della linea di controllo rispetto all'edificio che non ad un miglioramento della simulazione con modifica del DTM. Questo aspetto verrà approfondito più avanti.

Osservando le simulazioni con attrito pari a $1,72^\circ$ e $2,86^\circ$ si nota come gli andamenti delle altezze, oltre ad aumentare rispetto al modello senza bialéra, ricalcano in maniera soddisfacente le H_{deposito} rilevate sulle facciate, a conferma della bontà della modellazione numerica. In particolare l'effetto è maggiormente evidente per i catastali 1008 e 713 che vengono lambiti lateralmente dalla massa (lato est dell'edificio) e sono collocati in prossimità del garage andato distrutto, e per il catastale 215 che, grazie alla nuova direzione principale di deflusso (Figura 77), viene correttamente investito dal flusso detritico (il catastale 935 - collocato più a monte del 215- rappresenta un ostacolo per quest'ultimo e quindi la direzione principale del deflusso condiziona fortemente gli effetti sul 215).

Inoltre, sempre per i medesimi angoli di attrito, si osserva che non vi sono differenze sostanziali tra i due andamenti sia in termini di forma che di altezze, e si può quindi confermare ancora una volta che ciò che maggiormente regola l'evoluzione della colata nella parte mediana del conoide, dove le pendenze sono contenute e dove la massa in transito ha già dissipato parte della propria energia, è il valore della turbolenza (che è pari a 500 m/s^2 in tutte le simulazioni qui proposte) piuttosto che l'angolo di attrito.

Il catastale 935, nel lato esposto a nord in direzione del deflusso principale della colata, non risente eccessivamente della modifica del DTM e questo perché, in entrambi i casi analizzati, non vi sono ostacoli significativi a monte di questa costruzione.

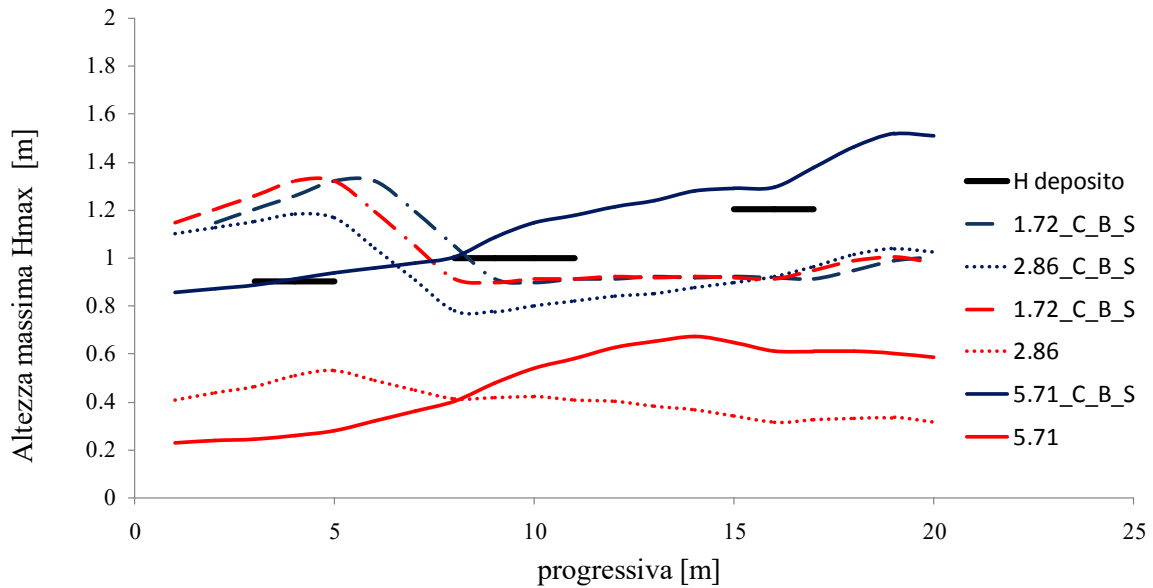


Figura 80: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

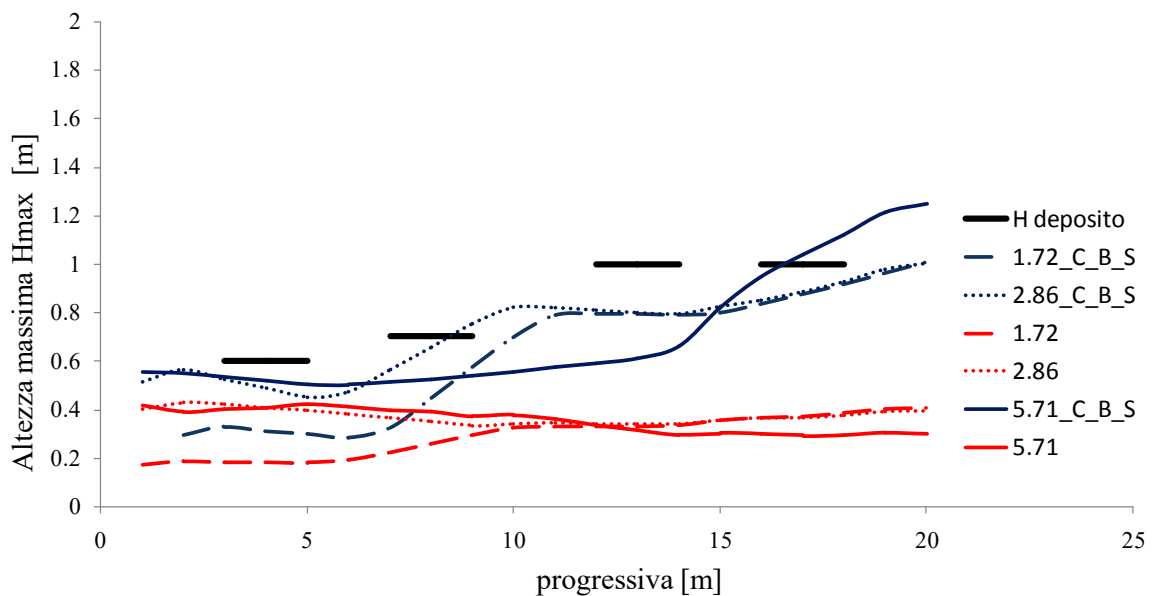


Figura 81: Catastale 713 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

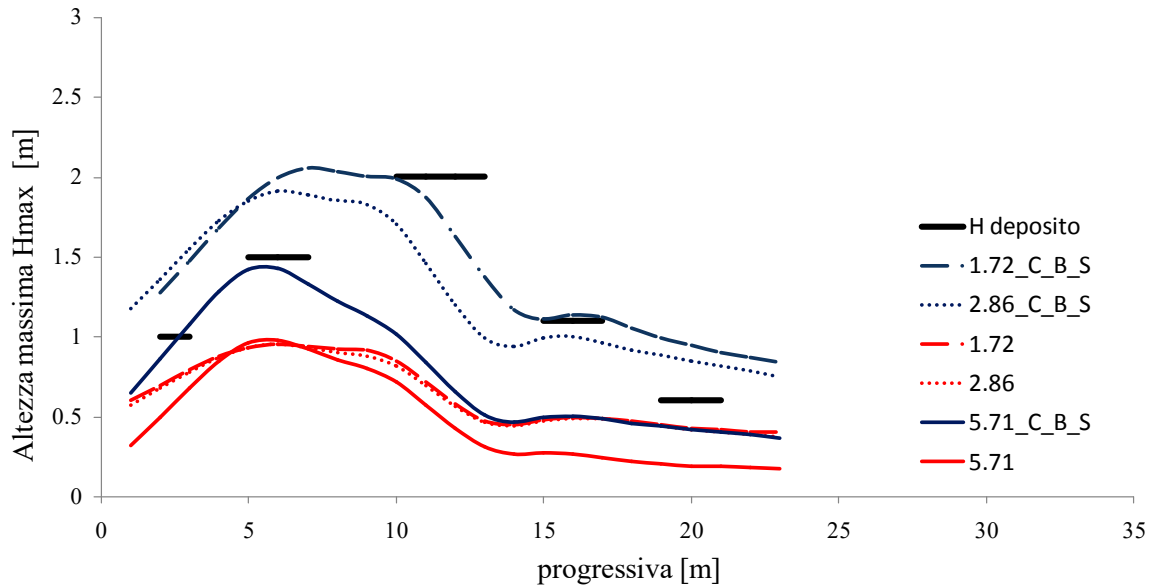


Figura 82: Catastale 215 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

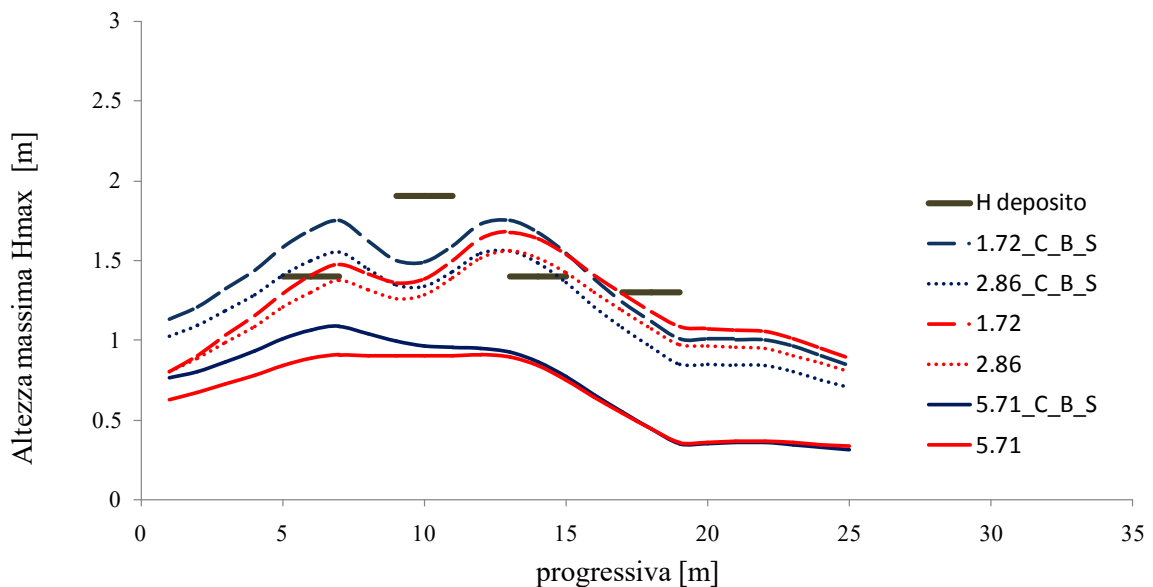
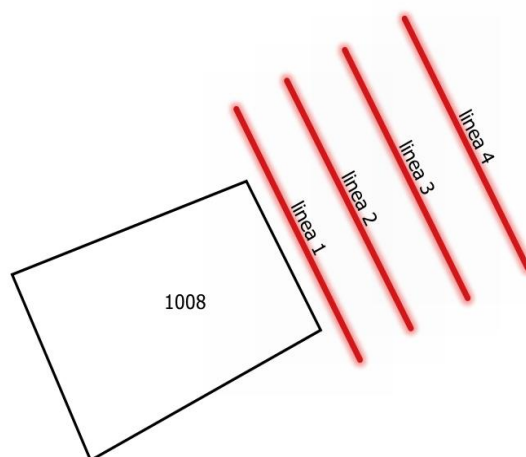


Figura 83: Catastale 935 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

L'effetto della posizione della linea di indagine rispetto agli edifici è illustrata nelle Figura 84 e Figura 85. Il confronto è stato attuato su quattro linee di indagine nel lato est del Catastale 1008, in cui la più lontana dista circa 15 metri dall'edificio.

Prima di procedere con le valutazioni, va ricordato che l'implementazione degli edifici nel modello è stata realizzata incrementando i punti del DTM che ricadevano all'interno delle costruzioni, di 20 metri (rispetto al piano campagna) e l'effetto finale è quello di aver generato una superficie curva in prossimità delle costruzioni (e non uno scalino netto ad angolo retto) come illustrato in Figura 61 a pagina 87. Questo spiega perché la linea di indagine impiegata per ricavare le curve da porre a confronto è stata posizionata a circa 5 metri dall'edificio. L'immagine seguente mostra le linee di indagine investigate di fronte al lato est del Catastale 1008:



L'osservazione degli andamenti del deposito, estratti in posizioni differenti, mostra chiaramente quanto detto pocanzi, ovvero la necessità di individuare una linea di indagine che sia sufficientemente distaccata dall'edificio affinché sia rappresentativa della modellazione: in entrambe le condizioni ($5,71^\circ$ e $2,86^\circ$ con presenza della bialéra) la *linea 1* (più vicina all'edificio) mostra un andamento privo di significato con altezze massime e minime rispettivamente pari a 130cm e 10cm per il $5,71^\circ$ e 180cm e 10cm per il $2,86^\circ$.

L'altro aspetto interessante è dato dalla elevata variabilità dei profili ottenuti con attrito $5,71^\circ$ rispetto al $2,86^\circ$; nel primo caso i valori di altezza massima nelle tre curve arrivano a discostarsi tra loro di oltre mezzo metro mentre nel secondo caso la differenza non supera i 20 cm, inoltre, sempre nel secondo caso, le tre curve mostrano un andamento molto più simile tra loro, che si traduce in una maggiore affidabilità nelle misure ricavate dalla modellazione rispetto alla sezione di indagine.

Ciò può essere dovuto al fatto che, come già osservato in precedenza, un angolo di attrito elevato, nelle aree di conoide con pendenze ridotte, non è in grado di esprimere al meglio il comportamento dinamico della massa in transito.

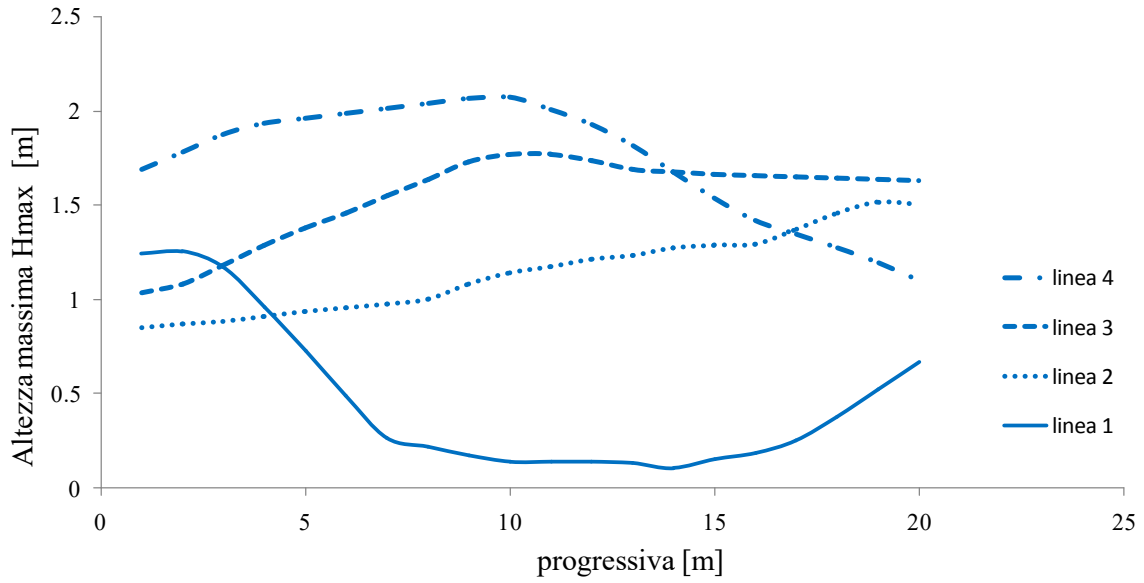


Figura 84: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione della distanza di rilievo del dato numerico dall'edificio. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito pari a $5,71^\circ$ e turbolenza pari a 500 m/s^2 .

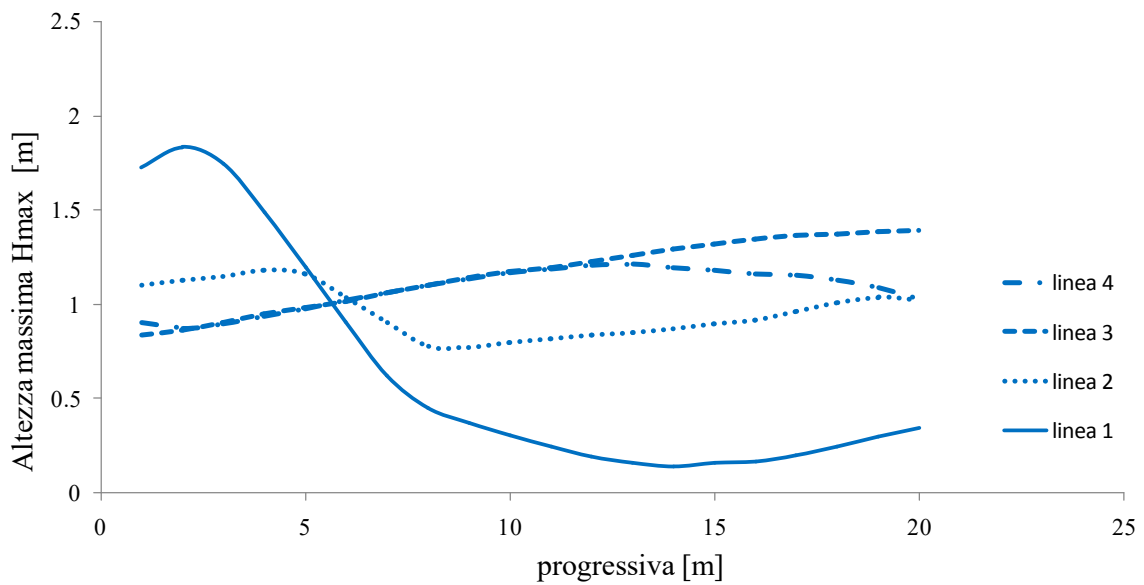


Figura 85: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione della distanza di rilievo del dato numerico dall'edificio. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito pari a $2,86^\circ$ e turbolenza pari a 500 m/s^2 .

Si riportano nelle figure da Figura 86 a Figura 89 i risultati grafici delle simulazioni ottenute con le seguenti impostazioni:

- *DTM modificato (modello C_B_S - Case Bialéra Strade)*
- *coefficiente di attrito: 2,86°*
- *turbolenza: 500 m/s²*
- *durata dell'analisi: 400 secondi*
- *tipologia di innesco: concentrato*
- *volume di innesco: 17000 m³*

A 400 secondi la massa ha superato le prime case del conoide e continua ad avanzare nella parte bassa dell'abitato. All'interno della bialéra c'è ancora del detrito in movimento ma l'altezza non supera - tranne che in qualche punto isolato - il mezzo metro. Le altezze massime raggiunte dal deposito il percorso di deflusso principale della colata e le aree in corrispondenza degli edifici dove vi è stato il maggior accumulo di materiale.

La carta della velocità istantanea a 400 secondi mostra che il materiale – nell'area oggetto di studio e controllo – possiede ancora valori non trascurabili, superiori a 2 m/s, ma il confronto con la carta della velocità massima raggiunta dalla colata indica che il fenomeno è in diminuzione, con tutte velocità registrate al tempo 400 secondi inferiori alle velocità massime raggiunte nei medesimi punti. Di conseguenza anche il deposito ha raggiunto - al tempo 400 secondi - l'altezza massima consentita dal modello e pertanto ai fini dello studio, comprensione e calibrazione del modello il tempo pari a 400 secondi può essere ritenuto sufficiente.

L'altezza massima assoluta raggiunta dalla colata è pari a 6,1 metri in prossimità dell'area di innesco.

La velocità massima assoluta raggiunta dalla colata è pari a 22 m/s in corrispondenza della cascata in apice di conoide (visibile nella carta di Figura 89 nel riquadro piccolo).



Figura 86: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Altezze istantanee del deposito al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 10 cm.

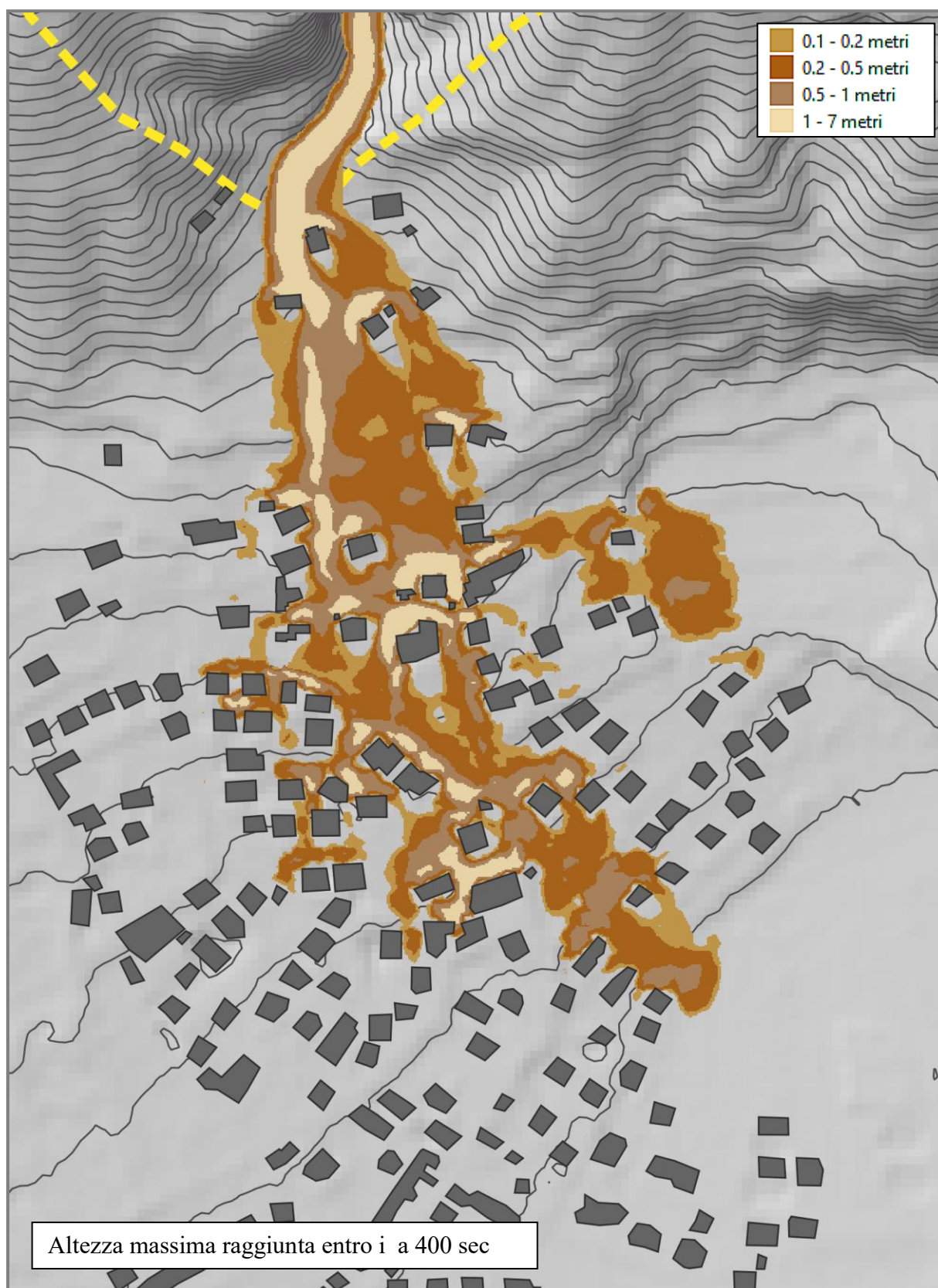


Figura 87: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Altezza massima raggiunta dalla colata al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 10 cm.

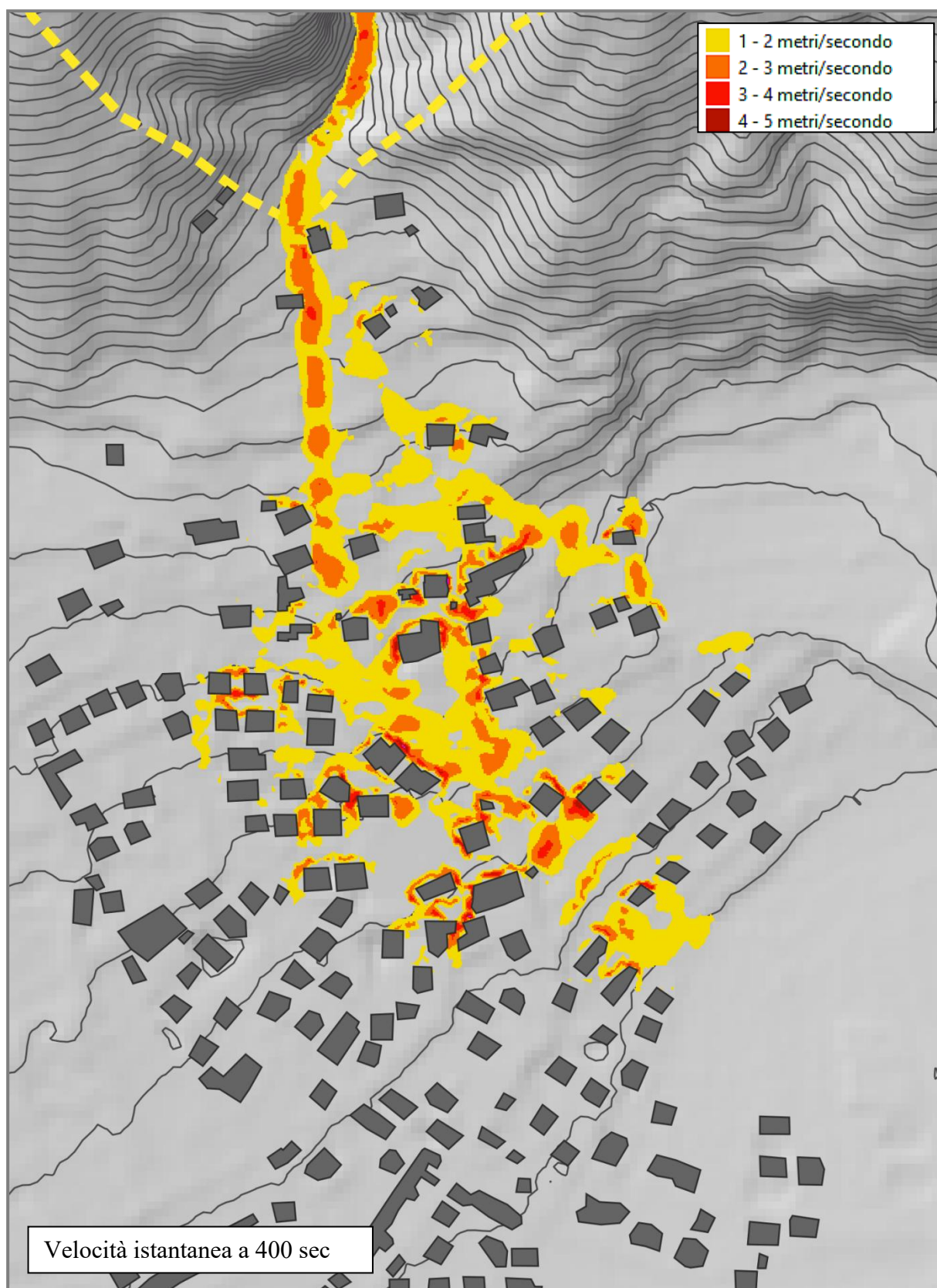


Figura 88: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Velocità istantanea al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 1 m/s.

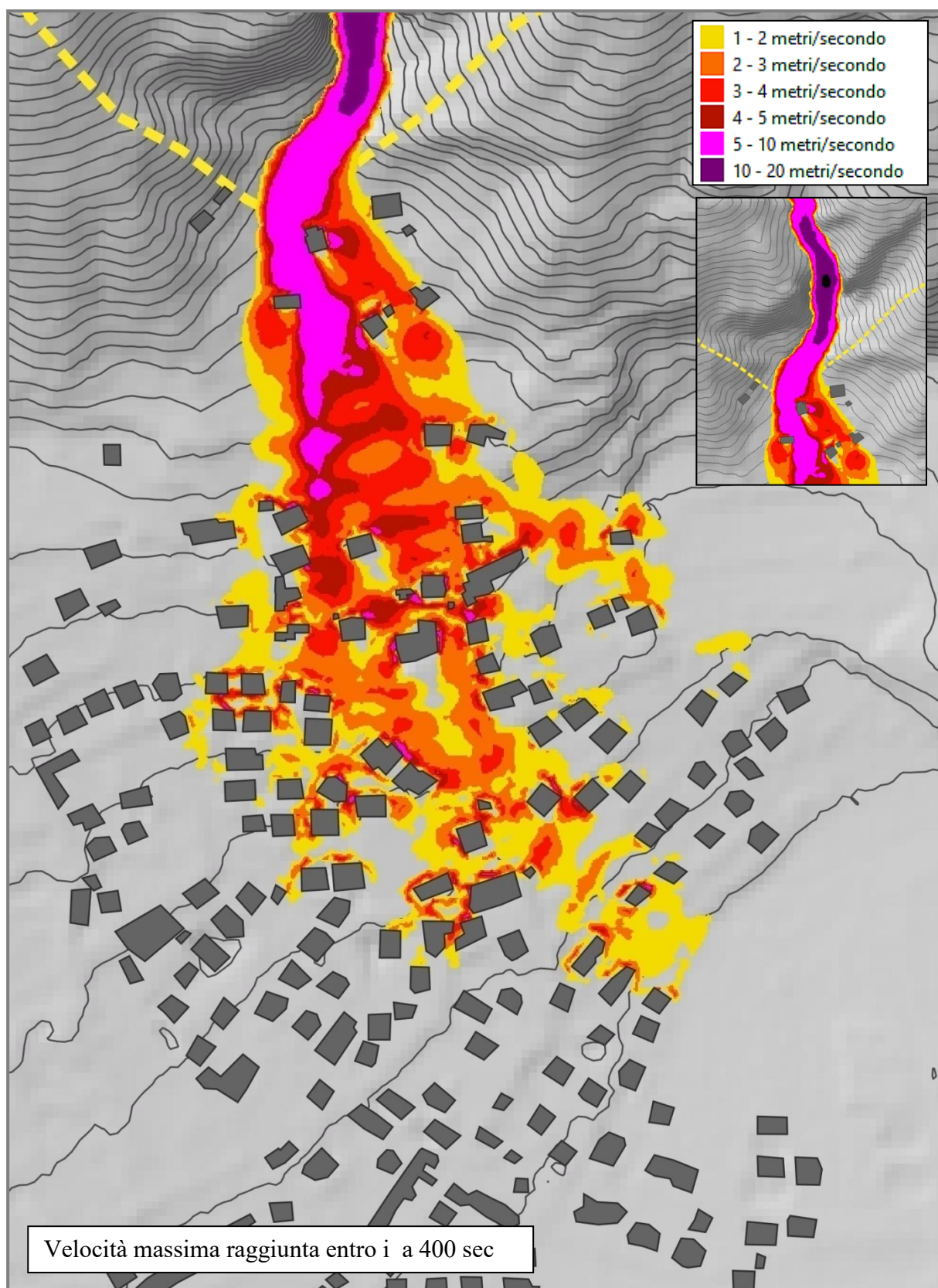


Figura 89: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Velocità massima raggiunta al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 1 m/s.

4.5 COMPARAZIONE TRA SIMULAZIONE NUMERICA E PERIMETRAZIONE DELL'EVENTO

I tecnici di Arpa Piemonte e di Regione Piemonte hanno provveduto, subito dopo l'evento, ad ispezionare l'area coinvolta e a perimetrare il deposito del materiale in conoide. Le immagini sono riportate in Figura 18 e Figura 19 a pagina 30. La perimetrazione mette in evidenza la tipologia di materiale detritico riscontrato in conoide ovvero il materiale grossolano (ghiaia ciottoli e massi in matrice fine) e il materiale fine (sabbioso-limoso con ghiaia e ciottoli). Purtroppo sono state eseguite sporadiche misurazioni dello spessore del deposito e tutte al di fuori dell'area di controllo utilizzata nel presente elaborato. Quindi la comparazione diretta tra il risultato del modello numerico e la reale distribuzione areale della colata appare alquanto impraticabile. Tuttavia possono essere fatte delle considerazioni di carattere generale su alcuni punti peculiari dell'area investigata. In Figura 90 si riporta il confronto tra la perimetrazione dell'evento reale e la simulazione numerica.

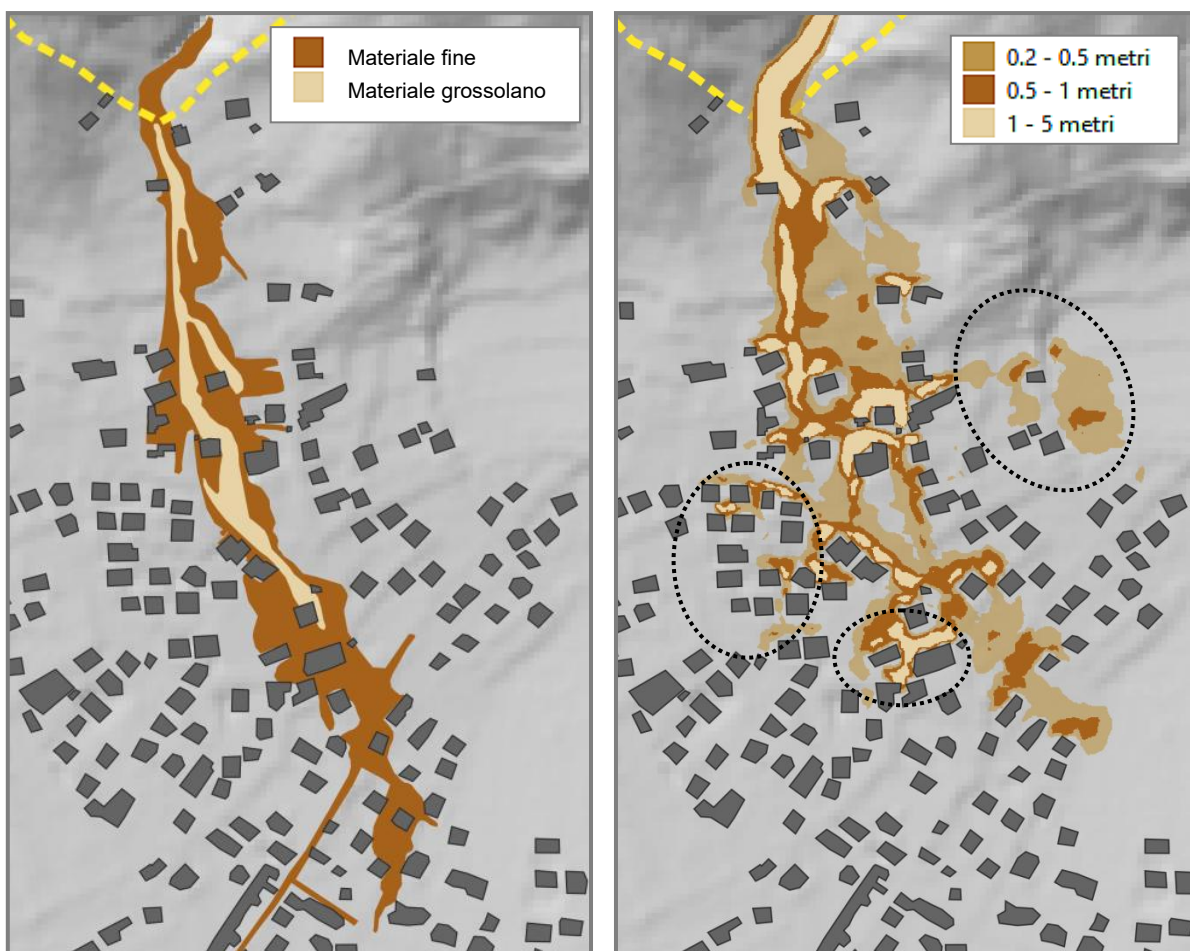


Figura 90: comparazione tra la perimetrazione del deposito post-evento a cura di Arpa Piemonte e il risultato della simulazione (altezza massima del deposito a 400 secondi con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. *Cut-off* inferiore a 20 cm).

La simulazione numerica è stata compiuta con le seguenti impostazioni: innesco concentrato, coefficiente di attrito di $2,86^\circ$ turbolenza 500m/s^2 , tempo di analisi di 400 secondi, l'assenza delle costruzioni distrutte e la presenza della bialéra (modello C_B_S).

Dal confronto emerge che nella modellazione numerica l'area interessata dal fenomeno è maggiore rispetto alla perimetrazione, e maggiore è anche il numero di abitazioni che vengono travolte dal flusso detritico con spessore superiore al metro. Lo studio del materiale fotografico mostra che - per buona parte della perimetrazione - i contorni netti del deposito tracciati dai tecnici in sito sono realistici, e che le case pesantemente colpite dall'evento si trovano nell'area da questi ultimi individuata. Nella simulazione si osservano zone colpite da altezze significative (aree tratteggiate in nero) che nella realtà hanno subito un evento di tipo alluvionale di materiale molto fluido (acqua fangosa). Se invece si analizza la comparazione, escludendo gli spessori minori di 50 cm (Figura 91), si nota che le principali linee di deflusso del materiale corrispondono tra le due immagini in modo più che soddisfacente.

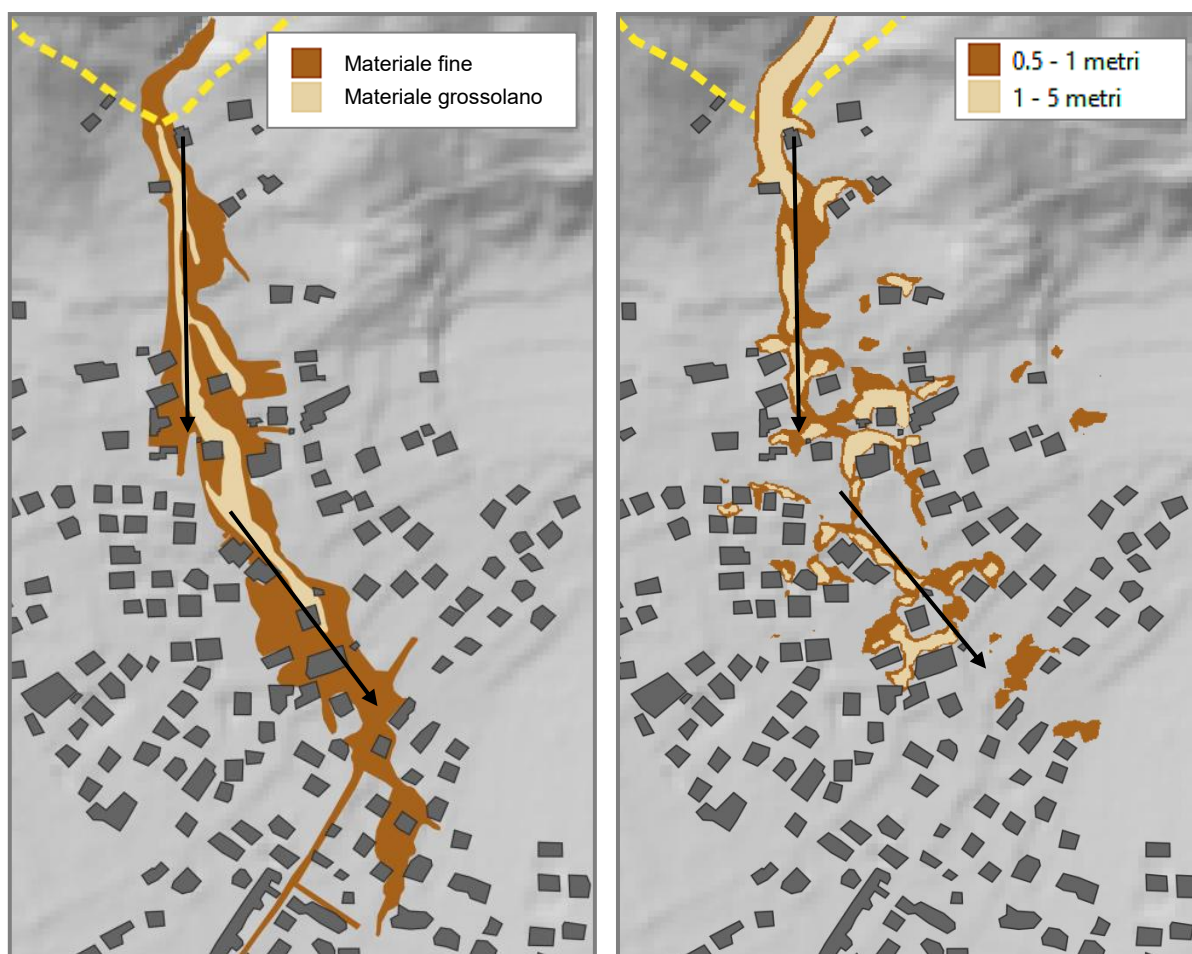


Figura 91: comparazione tra la perimetrazione del deposito post-evento a cura di Arpa Piemonte e il risultato della simulazione (altezza massima del deposito a 400 secondi con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. *Cut-off* inferiore a 50 cm). Principali linee di deflusso (frecche nere).

Dal confronto emerge che se la modellazione numerica fosse stata utilizzata in fase previsionale, questa avrebbe fornito risultati a favore di sicurezza proprio perché l'area potenzialmente colpita è più vasta.

La difficoltà del modello numerico a rappresentare il fenomeno risiede in molteplici aspetti già sollevati nei paragrafi precedenti, tra i quali si ricordano l'*approccio monofasico* (il codice si basa su un approccio della meccanica dei continui nel quale la massa eterogenea reale è sostituita da un "fluido apparente" le cui caratteristiche intendono riprodurre attraverso un mezzo monofase il complesso comportamento della massa reale) e il *modello digitale del terreno* a piccola scala (la modellazione fin qui studiata è basata su un DTM a 5 metri).

Per quanto concerne il primo aspetto va ricordato che la colata detritica è definita come un miscuglio d'acqua e sedimenti miscelati insieme in modo da formare un'unica massa fluida, la quale però rimane perfettamente amalgamata e omogenea fintanto che le velocità sono consistenti (ordine dei metri al secondo), ma non appena rallenta - per effetto dell'attrito sia alla base che interno con dissipazione di energia - le due fasi solida e liquida tendono a separarsi con sedimentazione della prima e allontanamento verso quote più basse della seconda.

Questo aspetto non può in alcun modo essere rappresentato in un modello monofasico poiché in quest'ultimo le due fasi restano intrinsecamente miscelate per tutta la durata della modellazione. Un modello che prevede la separazione delle due fasi è detto bifasico in cui la fase solida e liquida sono trattate separatamente e sono descritte con specifiche equazioni costitutive distinte sia per le due fasi che per le forze di interazione (Martino e Sabatino, 2002) con possibili regimi dinamici differenti tra lo strato basale a contatto con il terreno e quello superficiale; tuttavia va rilevato che questo tipo di modellazione richiede la definizione di molteplici parametri di difficile identificazione che rendono i risultati meno attendibili.

Rispetto al DTM va considerato il raster utilizzato nel presente elaborato ha una risoluzione di 5 metri nelle due direzioni planimetriche e per confronto la perimetrazione della colata indica una larghezza trasversale di circa 100 metri, ovvero 20 volte la risoluzione del DTM. Per cogliere gli aspetti a piccola scala è necessario procedere con DTM a risoluzione maggiore (che non sono disponibili nell'area considerata) in modo da cogliere con maggior precisione l'andamento altimetrico a piccolissima scala.

A questo si aggiunge il fatto che l'abitato è caratterizzato da villette recintate con muretti bassi in calcestruzzo che hanno svolto il ruolo di canalizzazione del materiale in movimento

(muretti longitudinali rispetto alla direzione di deflusso) ma anche di elementi di protezione da colate detritiche (una versione ridotta di briglia di consolidamento, Figura 92). Questi elementi non sono presenti nel modello digitale del terreno e sono difficilmente integrabili dal momento che le dimensioni in gioco sono 10 volte inferiori rispetto al DTM a 5 metri utilizzato. Si riporta ad esempio quanto accaduto nella zona indicata con il cerchio rosso di Figura 93. La presenza di elementi in calcestruzzo lungo le abitazioni ha contenuto la colata in certe aree (il modello non è in grado di simulare questo tipo di situazione).



Figura 92: fotografia dell'area interessata dall'evento di debris-flow a febbraio 2019 (otto mesi dopo l'evento). In evidenza i muretti di recinzione trasversali alla direzione principale di deflusso che hanno contribuito ad arrestare l'avanzata della colata (freccie rosse). Parte di muretto danneggiato (freccia blu). Il bacino idrografico Comba delle Foglie (freccia bianca). A sinistra il catastale 935. A destra i catastali 713 e 1008.

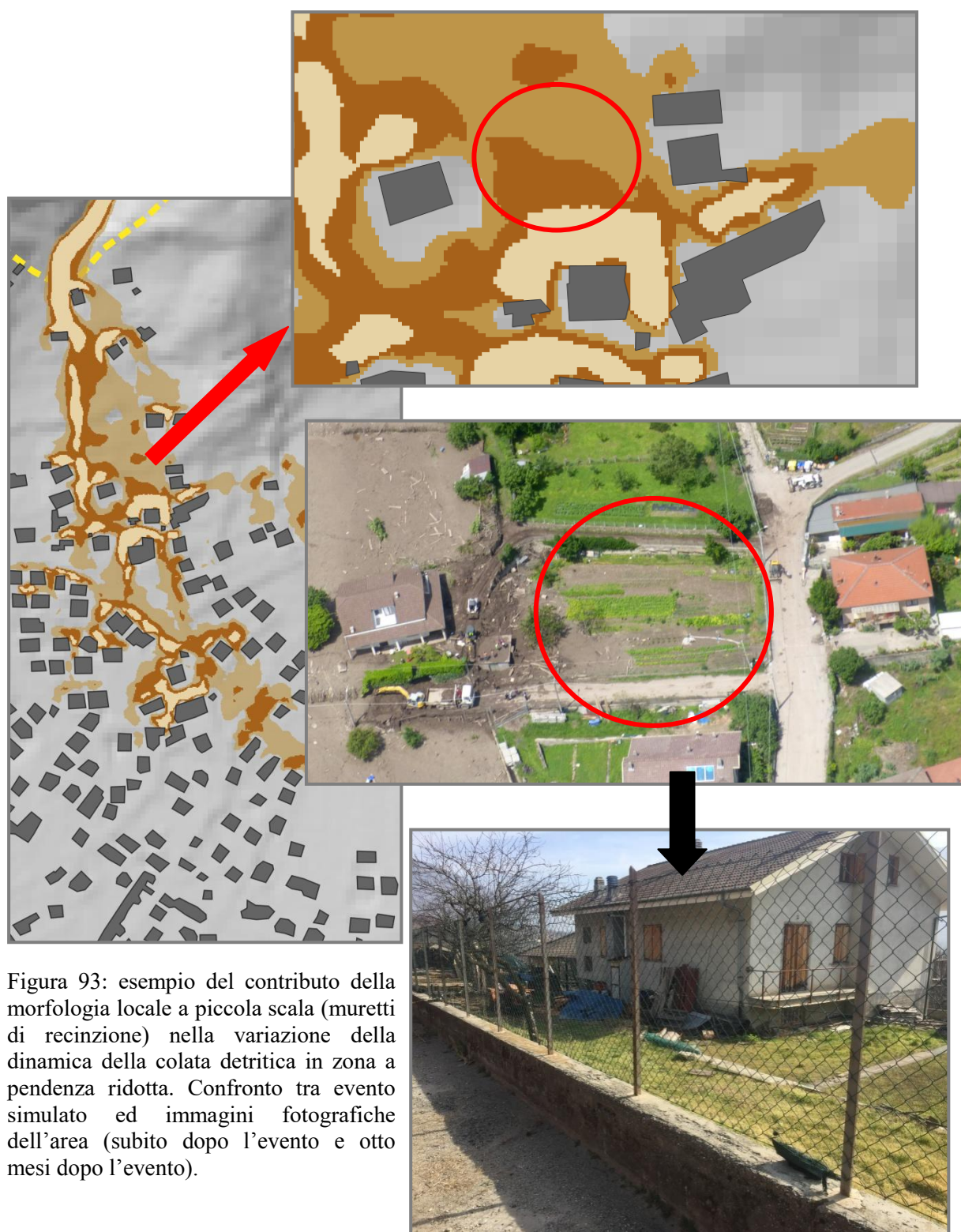


Figura 93: esempio del contributo della morfologia locale a piccola scala (muretti di recinzione) nella variazione della dinamica della colata detritica in zona a pendenza ridotta. Confronto tra evento simulato ed immagini fotografiche dell'area (subito dopo l'evento e otto mesi dopo l'evento).

4.6 COMPARAZIONE TRA INNESCO CONCENTRATO E DISTRIBUITO

Nella prima fase della modellazione è stato scelto di collocare l'intera massa in frana in un'area di innesco concentrata - a circa metà lunghezza dell'asta principale e ad una quota compresa tra gli 850 e i 1000 m.s.l.m. - con l'obiettivo di concentrare lo studio del fenomeno nell'area di conoide dove la massa interseca le costruzioni, e ricavare quindi i valori dei

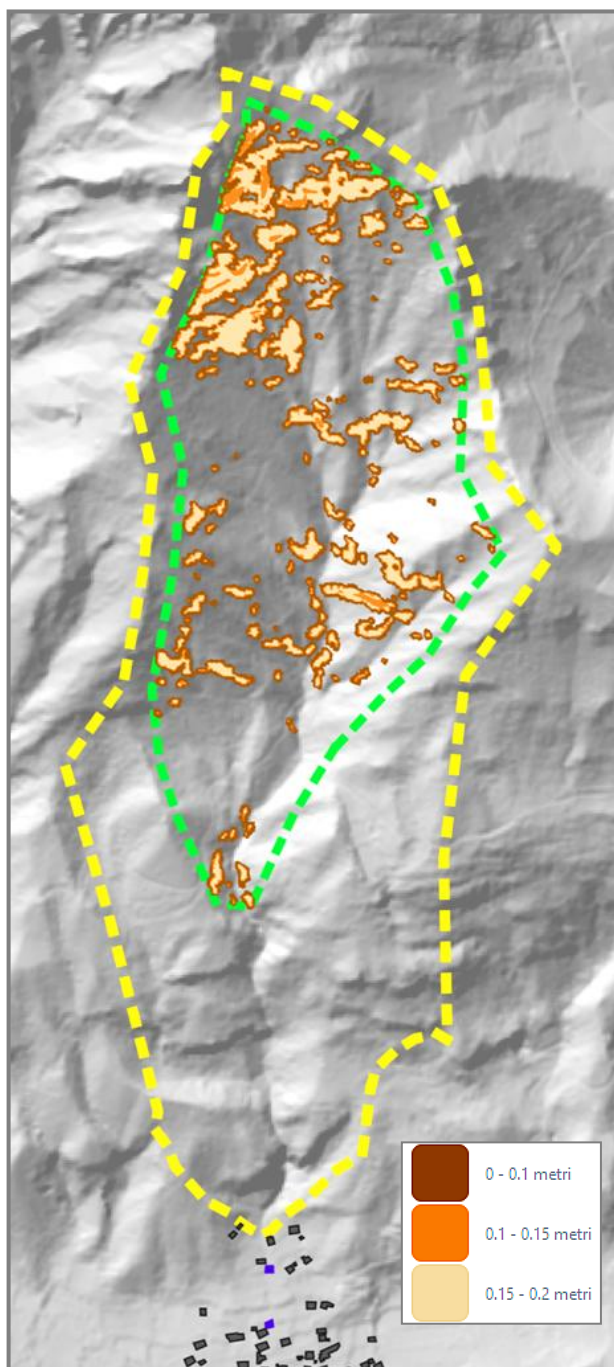


Figura 94: innesco distribuito ID al tempo 0 secondi. Massa instabile presente nel bacino ridotto (linea tratteggiata verde)

parametri che meglio rappresentano l'evolversi dell'evento. Tuttavia non può essere trascurato il fatto che in questo tipo di fenomeno il materiale che giunge a valle non si è distaccato da una zona precisa ma, al contrario, è il frutto di una erosione-distacco-dilavamento areale che interessa tutto il bacino idrografico (Tiranti et al., 2015). In sintesi nel caso esaminato, tutti i versanti - interessati prima dall'incendio e successivamente dalle piogge intense - hanno contribuito ad accrescere il volume della colata che ha raggiunto la frazione San Lorenzo. Pertanto si ritiene opportuno approfondire gli effetti che si osservano a valle a seguito di una massa che si distacca da più punti distribuiti sui versanti. A tal proposito è stato realizzato un modello di innesco distribuito come meglio specificato al paragrafo 4.2. La massa totale mobilizzata è pari a circa 17000 m^3 esattamente come nel caso dell'innesco concentrato. La rappresentazione della massa instabile distribuita sui versanti è illustrata in Figura 94 (tempo di analisi 0 secondi) con spessori compresi entro i 20 cm.

La modellazione numerica in questo caso è stata avviata con le seguenti impostazioni:

- ID - $1,72^\circ$ - 500 m/s^2
- ID - $2,86^\circ$ - 500 m/s^2
- ID - $2,86^\circ$ - 1000 m/s^2

che vengono confrontate con la simulazione di riferimento $2,86^\circ$ e 500 m/s^2 con innesco concentrato IC e con DTM modificato (assenza di edifici distrutti e presenza di bialéra e strade). I Catastali investigati sono il 1008, 713, 215 e 935 e sono illustrati da Figura 95 a Figura 98. Un primo sguardo ai risultati evidenzia che non vi sono variazioni nella forma del profilo investigato in tutte le varianti proposte, cambiano solamente le altezze massime misurate.

L'analisi dei diagrammi mostra chiaramente che l'innesco distribuito fornisce spessori di deposito inferiori rispetto all'innesco concentrato in ogni condizione sperimentata. Nello specifico si osserva che per i due catastali 1008 e 713, edifici in cui la massa lambisce lateralmente le pareti, con l'innesco distribuito non solo i valori sono sempre più bassi, ma nei tre casi proposti né la variazione di coefficiente di attrito ($1,72^\circ$ vs $2,86^\circ$) né di turbolenza (500 m/s^2 vs 1000 m/s^2) influenzano significativamente i risultati. Per gli altri due Catastali, 215 e 935, che vengono colpiti frontalmente dalla colata, solo nel caso di innesco distribuito con elevata turbolenza (colata più fluida) si riescono ad ottenere valori confrontabili con l'innesco concentrato. Ciò è particolarmente evidente per il 215 nel quale le due configurazioni (IC $2,86/500$ vs ID $2,86/1000$) sono sostanzialmente sovrapponibili.

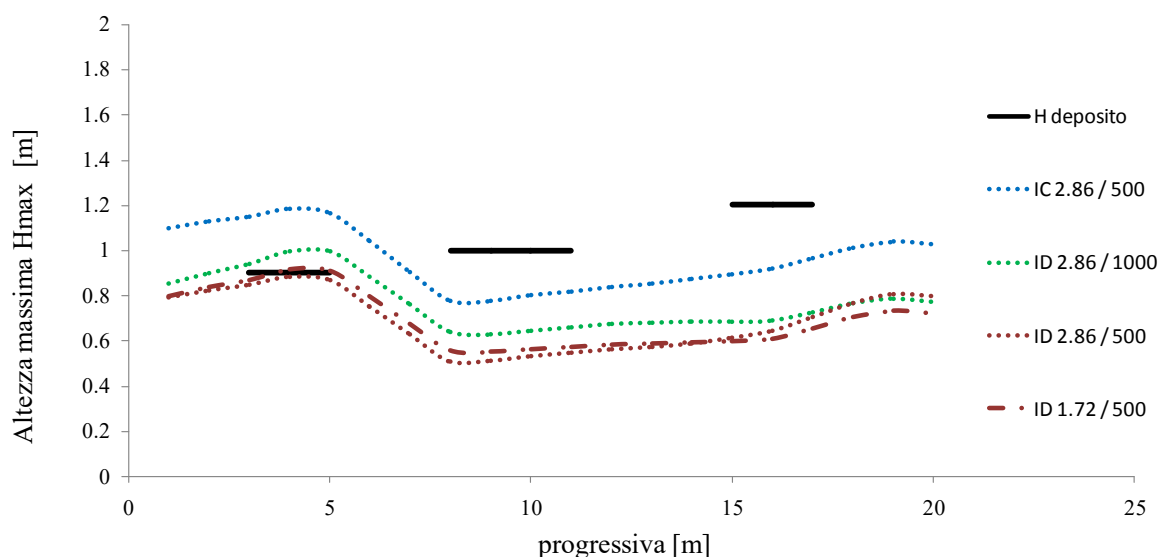


Figura 95: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s^2]. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

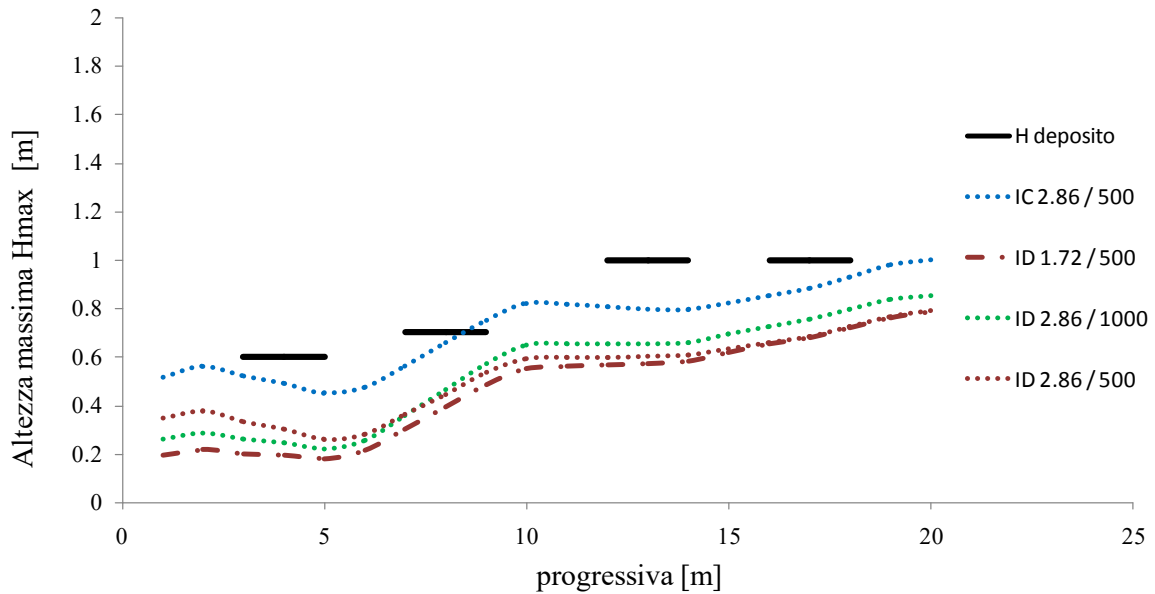


Figura 96: Catastale 713 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

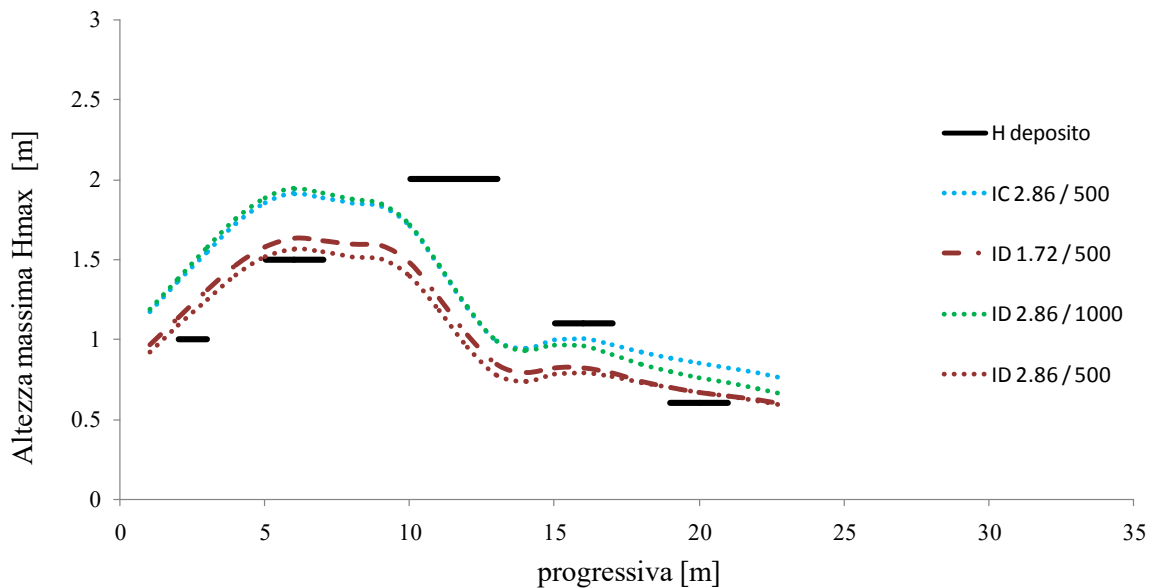


Figura 97: Catastale 215 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

Osservando tutti i risultati, lo scarto massimo tra l'innesco concentrato e distribuito arriva a circa mezzo metro: se da un punto di vista degli ordini di grandezza lo si può ritenere un *range* non particolarmente eccessivo, da un punto di vista energetico e della spinta che la massa esercita sugli edifici uno scarto di oltre il 30% può comportare la distruzione o meno di un fabbricato.

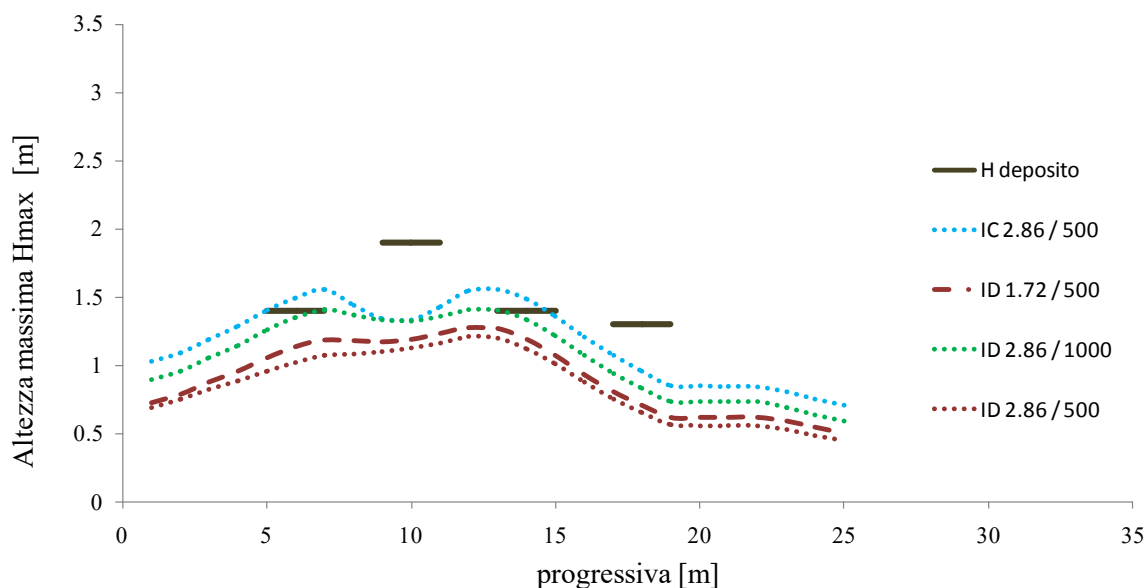


Figura 98: Catastale 935 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s^2]. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

Va precisato che la comparazione tra le due tipologie di innesco è stata realizzata estraendo il dato interpolato di altezza massima del deposito al tempo di analisi di 400 secondi. Per l'innesco di tipo distribuito - nel quale le aree instabili che contribuiscono alla colata sono posizionate sui versanti a quote maggiori rispetto a quello concentrato, e pertanto è lecito aspettarsi un tempo di analisi maggiore - i dati osservati in prossimità degli edifici di controllo potrebbero essere sottostimati. In effetti, la mappa delle velocità, in Figura 99, mostra che nell'area oggetto di studio la massa si muove con valori superiori a 4 m/s, mentre nell'ipotesi di innesco concentrato i valori sono generalmente inferiori a 3 m/s.

Per meglio comprendere il problema, è stato simulato il medesimo evento con innesco distribuito, ma con durata di analisi pari a 900 secondi. I risultati sono stati controllati nel Catastale 215 che, tra tutti i Catastali di controllo, si trova più a sud e quindi più lontano. Il risultato, esposto nel diagramma di Figura 100, mostra chiaramente che al tempo istantaneo di 400 secondi la massa non è ancora stabilizzata infatti dopo ulteriori 500 secondi (a tempo di 900 sec) i valori massimi scendono di quasi un metro. Tuttavia anche a 400 secondi il deposito ha già raggiunto la sua altezza massima, infatti il valore di altezza massima a 400 secondi e quello a 900 secondi (che sono identici), sono maggiori di quasi 40 cm.

In sintesi si può affermare che la comparazione condotta sinora tra innesco distribuito e concentrato può ritenersi valida al tempo di analisi considerato di 400 secondi.

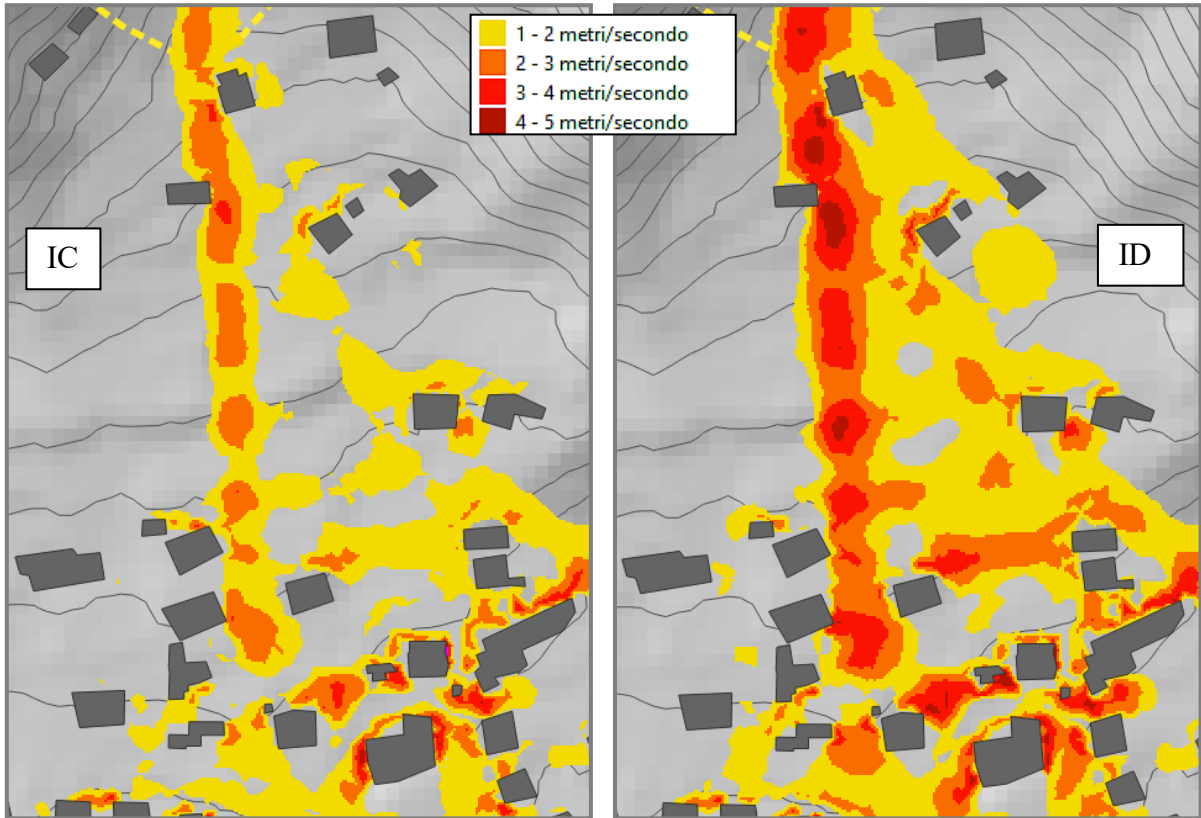


Figura 99: confronto tra innesco concentrato IC (sx) e distribuito ID (dx). Simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Velocità massima raggiunta al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 1 m/s.

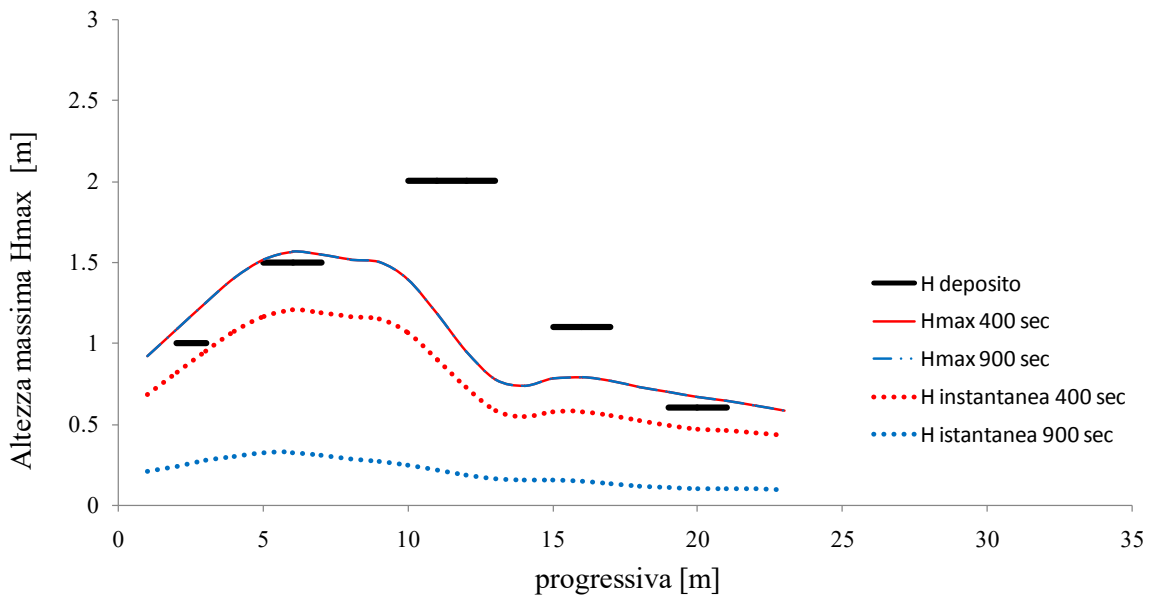


Figura 100: Catastale 215 - altezza massima del deposito e altezza istantanea in funzione della durata di analisi (400 secondi vs 900 secondi). Innesco di tipo distribuito. Attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

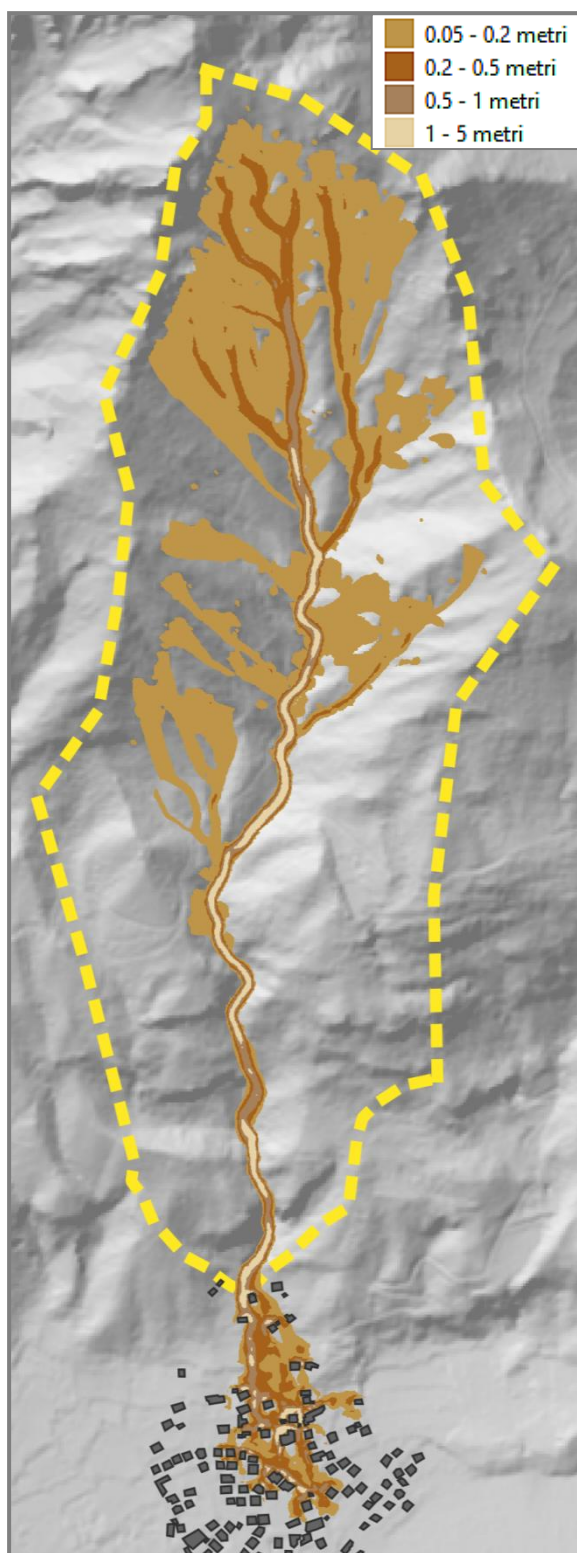


Figura 101: innesco distribuito ID al tempo di analisi di 400 secondi. Altezze massime raggiunte dal debris-flow. Cut-off inf. a 5cm.

Visto quanto sopra discusso in merito alla sottostima dell'innesco distribuito rispetto a quello concentrato, e assodato che le colate detritiche sono per loro natura un fenomeno ad innesco di tipo areale, è lecito chiedersi se la ricerca finora eseguita dei parametri reologici che meglio rappresentano l'evento impiegando il secondo approccio sia da considerarsi affidabile.

A tal proposito va osservato che i sopralluoghi effettuati dai tecnici subito dopo l'evento risalendo l'asta fluviale principale (Figura 102), hanno evidenziato che si sono formati dei depositi temporanei di detriti che, una volta superata la stabilità meccanica per eccessivo accumulo, sono collassati immettendo nell'asta principale grandi quantità di materiale. Si presume che l'accumulo sia avvenuto nel corso degli eventi meteorici dei giorni antecedenti l'evento del 07 giugno e che sia stato influenzato fortemente dalle zone con riduzione di pendenza che hanno agito da *condensatore di sedimenti temporaneo* (Kean et al., 2013).

Il modello ad innesco distribuito qui proposto (Figura 101) non è in grado di simulare al meglio questo fenomeno pertanto si ritiene che la modellazione con innesco concentrato, in questo tipo di condizione morfologica, rappresenti un approccio più

affidabile per quanto riguarda gli effetti a valle in conoide. Il superamento di tale limite potrebbe prevedere, per alcuni tratti dell'asta a bassa pendenza, una tensione di soglia analogamente a quanto avviene nel modello reologico di Bingham (1922).



Figura 102: condensatore di sedimenti temporaneo lungo l'asta principale.
Composizione fotografica (foto fornite da Santo La Ferlita studio Rosso – TO)

4.7 COMPARAZIONE TRA SCENARI CON DIFFERENTI VOLUMI DI MASSA MOBILITATA ALL'INNESCO

Nel presente elaborato è stato scelto di simulare l'evento franoso partendo dal dato di volume totale di materiale depositato in conoide al termine dell'evento; il rapporto di Arpa Piemonte stima un volume compreso tra i 15000m³ e i 20000 m³. Nella Relazione Geologica a corredo del PRGC, al capitolo 6, viene riportata, tra le altre informazioni, la magnitudo del bacino, ed emerge che il tipo di fenomeno di trasposto solido atteso è di tipo debris-flow e che il volume medio stimato di massa detritica potenzialmente trasportata in caso di evento eccezionale è pari a circa 19.000 m³ (paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura 42). Tale stima è coerente con quanto riscontrato nell'evento del 07 giugno 2018.

Tuttavia, sebbene lo scopo del presente lavoro sia l'ottenimento della miglior simulazione possibile dell'evento con il codice RASH^{3D} (back-analysis), è lecito chiedersi come potrebbe essere studiato il fenomeno in fase previsionale quando non si conoscono i volumi totali di materiale mobilitato. Il problema può essere affrontato in diversi modi e con diverse tecniche; ad esempio l'agenzia statunitense U.S. Geological Survey ha realizzato il software TRIGRS (Baum et al., 2008) che è in grado di identificare le celle instabili in un dato bacino idrografico in risposta ad eventi meteorici.

$$\psi(Z, t) = (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} \left\{ H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} \left\{ H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}$$

ψ is the ground-water pressure head;
 t is time;
 $Z = z/\cos \delta$, where Z is the vertical coordinate direction (positive downward) and depth below the ground surface, z is the slope-normal coordinate direction (also positive downward), and δ is the slope angle (figs. 1 and 2);
 d is the steady-state depth of the water table measured in the vertical direction;
 $\beta = \cos^2 \delta - (I_{zLT} / K_s)$;
 K_s is the saturated hydraulic conductivity in the Z direction;
 I_{zLT} is the steady (initial) surface flux;
 I_{nz} is the surface flux of a given intensity for the n^{th} time interval;
 $D_1 = D_0 / \cos^2 \delta$, where D_0 is the saturated hydraulic diffusivity ($D_0 = K_s / S_s$, where K_s is the saturated hydraulic conductivity and S_s is the specific storage);
 N is the total number of time intervals; and
 $H(t - t_n)$ is the Heaviside step function and t_n is the time at the n^{th} time interval in the rainfall infiltration sequence.

$$F_s(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta}$$

Figura 103: calcolo delle celle instabili con TRIGRS - Baum et al., 2008 (estratto)

Nello specifico, in TRIGRS, viene determinata la risposta di ogni cella in termini di altezza piezometrica in funzione del tempo, partendo da condizioni iniziali note di posizione della

falda e valutandone l'evoluzione a seguito di un dato ietogramma in ingresso, conoscendo la conducibilità idraulica del terreno, la pendenza, e così via.

Una volta nota l'altezza piezometrica funzione del tempo, la stabilità della cella viene valutata con la formula di Taylor (1948) come chiarito in Figura 103. In sintesi, seguendo questa metodologia è possibile determinare l'evoluzione temporale della fase di innesco e i volumi mobilitati su tutti i versanti. Tale approccio, molto complesso, è applicabile qualora siano disponibili tutte le informazioni necessarie da introdurre nel software.

Tiranti e Deangeli (2015) propongono un modello di innesco e propagazione basato sulla caratterizzazione litologica (sedimentologica) dei depositi presenti nel bacino e sui relativi processi torrentizi. In questo caso l'innesco è basato sullo schema del pendio indefinito soggetto a filtrazione parallela al pendio.

Nel presente lavoro la questione dell'innesco areale è stata enormemente semplificata, imponendo un volume noto di materiale instabile (innesco concentrato o distribuito) e studiandone gli effetti a valle (paragrafo 4.2). Per valutare il comportamento in fase previsionale ci si limita, quindi, ad imporre diversi volumi di massa instabile mantenendo inalterato l'approccio metodologico finora utilizzato, e il focus viene mantenuto sugli effetti nell'abitato in conoide.

I volumi investigati sono i seguenti:

- $17000 m^3$
- $20000 m^3$
- $30000 m^3$

Il modello preso a riferimento per effettuare la comparazione prevede l'innesco concentrato, un coefficiente di attrito di $2,86^\circ$ turbolenza $500m/s^2$, tempo di analisi di 400 secondi, l'assenza delle costruzioni distrutte e la presenza della bialéra (modello C_B_S). Il confronto viene eseguito sui Catastali 1008, 713, 215 e 935.

Un primo sguardo alle elaborazioni indicate da Figura 104 a Figura 107 mostra che all'incremento del volume di innesco corrisponde un incremento dell'altezza della massa depositata in conoide. Gli andamenti del deposito rimangono generalmente invariati con un ottima sovrapposizione nelle tre configurazioni per tutti i Catastali. Si può dedurre quindi che il modello selezionato in termini di DTM, di innesco e di parametri reologici, è in grado di rappresentare un possibile evoluzione del fenomeno di debris-flow senza apportare stravolgimenti significativi alle principali linee di deflusso del fluido in movimento.

In tutti e quattro i Catastali monitorati l'altezza del deposito concernente con il volume di innesco di 30000 m³ risulta maggiore dei valori registrati in campo sulle pareti degli edifici (H_{deposito}), viceversa le altezze relative ai 20000 m³ ricalcano adeguatamente le linee di controllo: ipotizzando quindi di aver modellato correttamente l'evento franoso, si rileva che i volumi di materiale detritico giunti a valle siano in effetti compresi tra i 15000 m³ e i 20000 m³ come specificato dai tecnici Arpa Piemonte.

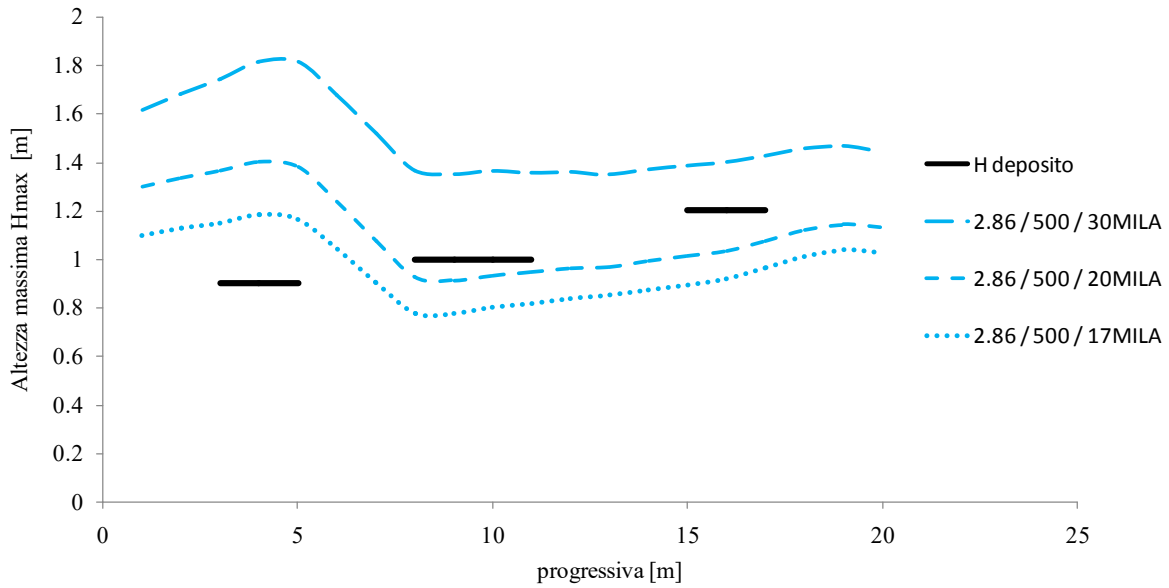


Figura 104: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s²]. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

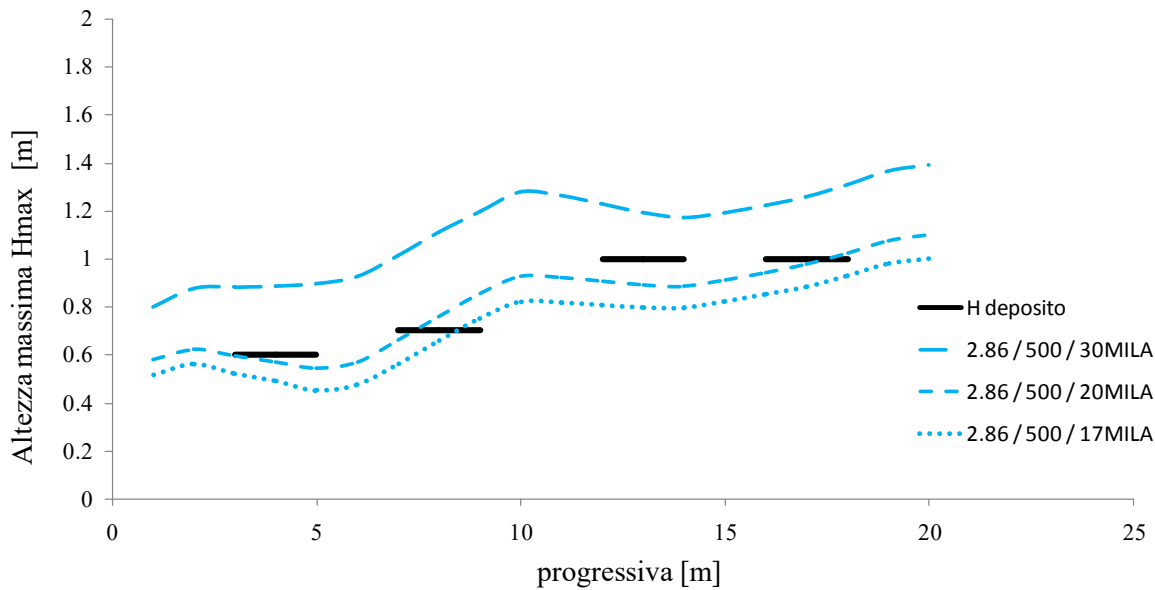


Figura 105: Catastale 713 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s²]. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

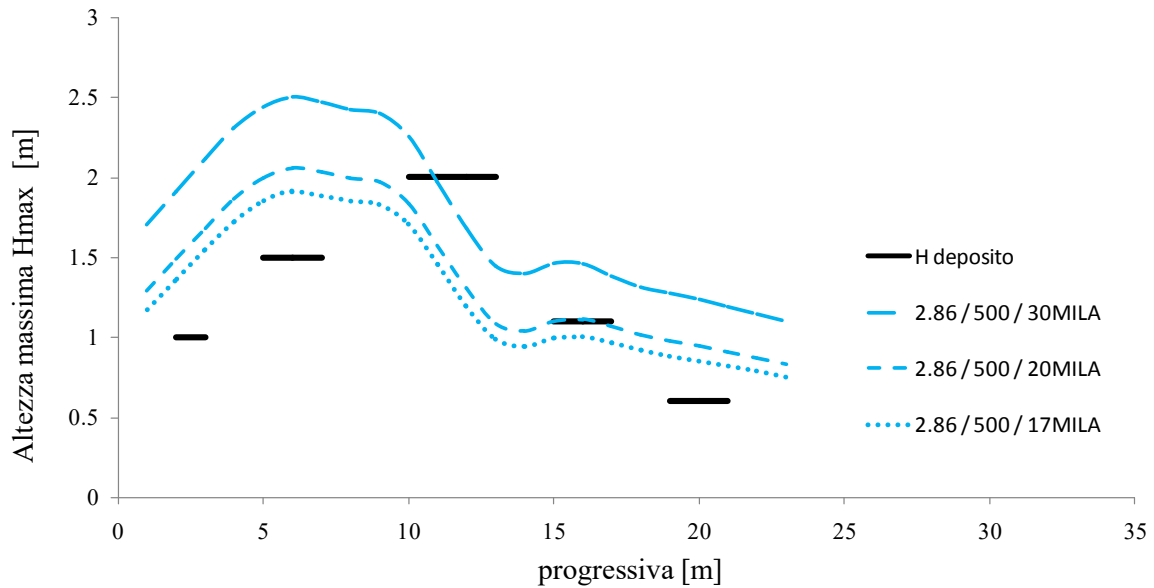


Figura 106: Catastale 215 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s²]. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

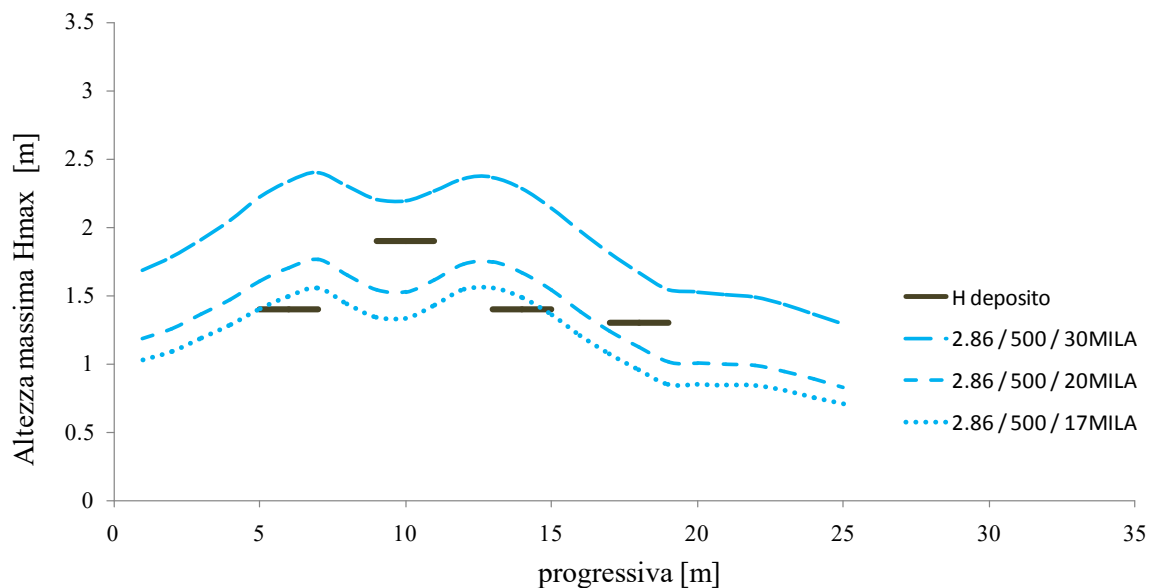


Figura 107: Catastale 935 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s²]. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.

Il rapporto tra i due volumi di colata investigati (30000 m^3 e 20000 m^3) rispetto al volume di riferimento (17000 m^3) sono rispettivamente 1,2 e 1,8. In Figura 108 vengono diagrammati i suddetti rapporti e comparati con i rapporti tra la media delle altezze massime del deposito nelle due configurazioni in corrispondenza dei quattro Catastali di controllo. Si evidenzia una minima variabilità tra i quattro Catastali, soprattutto nel rapporto 20/17 MILA, e - in generale

- valori confrontabili con il rapporto tra i volumi d'innesco. Questa tendenza alla proporzionalità diretta tra volume di innesco e altezza del deposito conferma quanto sopra specificato ovvero che indipendentemente dal volume iniziale, nella modellazione proposta si mantengono inalterate le principali linee di deflusso del fluido in movimento.

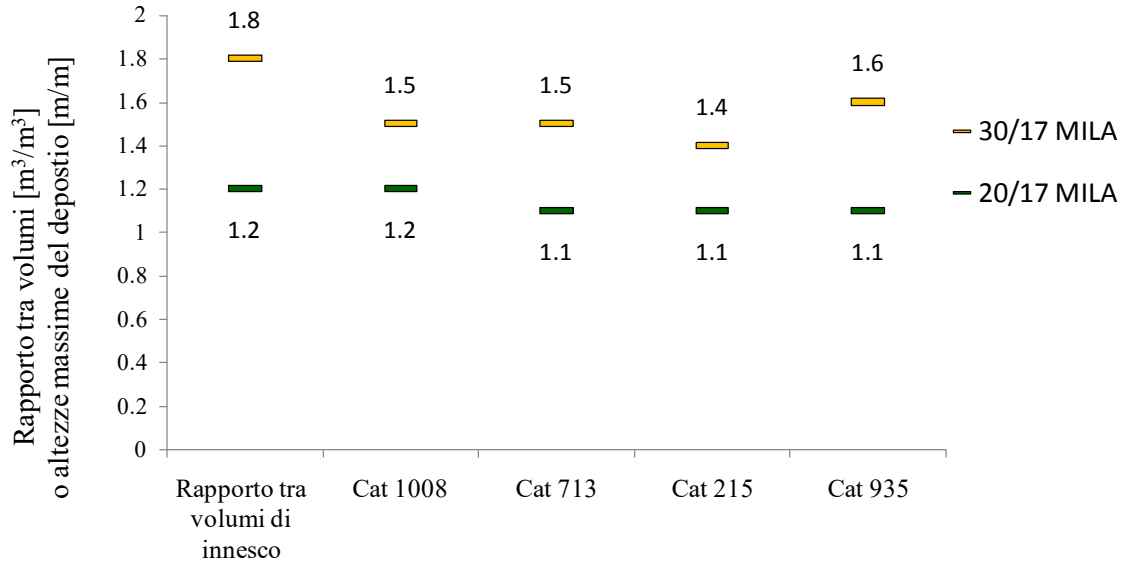


Figura 108: confronto tra il rapporto tra i volumi di innesco [m^3/m^3] e il rapporto tra le altezze massime misurate nei Catastali [m/m]. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito $2,86^\circ$ e turbolenza $500m/s^2$.

4.8 COMPARAZIONE TRA LA MODELLAZIONE NUMERICA E I DANNI ALLE COSTRUZIONI

La calibrazione dei parametri reologici impiegati nella modellazione numerica è stata fin qui discussa comparando le altezze del deposito con le misure delle tracce di fango sugli edifici rilevate in campo durante il sopralluogo di febbraio 2019. Un ulteriore strumento di ottimizzazione è rappresentato dall'analisi delle costruzioni che hanno subito dei danni a seguito dell'evento alluvionale. In effetti, se l'indagine fosse stata condotta non per effettuare una *back-analysis* ma scopi previsionali, oltre a valutare il comportamento dinamico del fluido e definire la morfologia del deposito, sarebbe stato necessario stimare l'incidenza dell'evento sulle costruzioni in termini strutturali. A tal proposito, quindi, è stata svolta una ricerca d'archivio presso l'Ufficio Catasto del Comune di Bussoleno per reperire informazioni sulle costruzioni coinvolte nell'evento del 07 giugno 2018.

Nello specifico è stato ricercato quel materiale che permettesse di ricostruire le caratteristiche costruttive degli edifici danneggiati o distrutti, come relazioni tecniche descrittive, relazioni sul cemento armato, disegni architettonici, ecc. Grazie alla catalogazione dei documenti catastali, messa in atto dai funzionari dello Sportello Unico per l'Edilizia Privata del Comune di Bussoleno, è stato possibile reperire le informazioni sui fabbricati che in taluni casi risultano complete, in altri povere di informazioni.

La ricerca si è concentrata su alcuni catastali che sono stati maggiormente coinvolti dall'evento. In particolare vi sono una abitazione pesantemente colpita (cat.935) e due costruzioni completamente distrutte (cat.994-garage e cat.1139) ; per i catastali vedere Figura 43 e Figura 44 a pagina 64.

Viene di seguito proposta una metodologia semplificata e speditiva per la valutazione della resistenza dell'edificio catastale 1139 che viene messa a confronto con l'energia di impatto. Si sottolinea che la procedura qui proposta è da intendersi come approccio metodologico semplificato per valutare l'affidabilità del modello di calcolo e non come procedura analitica rigorosa per la verifica della stabilità dell'edificio. In effetti, un'analisi strutturale rigorosa richiederebbe di investigare in maniera approfondita i materiali e le tecniche con le quali è stato costruito l'edificio, nonché uno studio sui possibili meccanismi di rottura delle murature e gli intervalli di confidenza dei risultati. Tutto ciò esula dallo scopo del presente elaborato nel quale ci si limita a verificare un'unica modalità di rottura in versione semplificata con lo

scopo di verificare se esiste almeno un meccanismo che porta al collasso dell'edificio compatibile con l'energia di impatto della colata detritica.

4.8.1 Catastale 1139

L'edificio analizzato, visibile in Figura 109, si trova in prossimità dell'apice di conoide lungo la linea di deflusso principale della colata. È costituito da un caseggiato di due piani con pianta regolare, con quote differenti di terreno tra il prospetto nord e sud (sul lato nord il terreno a tergo dell'edificio ne ricopre il piano terreno - Figura 110). Il caseggiato non è stato costruito in unica soluzione come mostrato nella foto più sotto, ma ha subito una serie di modifiche nel tempo. Infatti, in origine si trattava di un tipico *casotto* (o *ciabot*) che serviva per dare riparo dal sole e dalla pioggia ai contadini che lavoravano nelle vigne oltreché fungere da ricovero attrezzi e prodotti agricoli, e da presidio durante i periodi della vendemmia. Il *casotto* è una costruzione semplice con muratura portante in pietra - a secco o con malta di allettamento - disposta a ricorsi più o meno regolari - Figura 111. Molti *casotti*, nel corso dei decenni, hanno subito trasformazioni così pesanti da modificare radicalmente la struttura da un punto di vista architettonico e statico. La ricerca d'archivio diventa quindi indispensabile per comprendere in modo appropriato la struttura dell'edificio e le relative tecniche costruttive.



Figura 109: Catastale 1139 edificio distrutto dalla colata – vista lato sud (foto inserita nella richiesta danni allo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno)



Figura 110: Catastale 1139 edificio distrutto dalla colata – vista lato nord (foto scattata il 21 maggio 2018 da Santo La Ferlita - Studio Rosso – Torino)

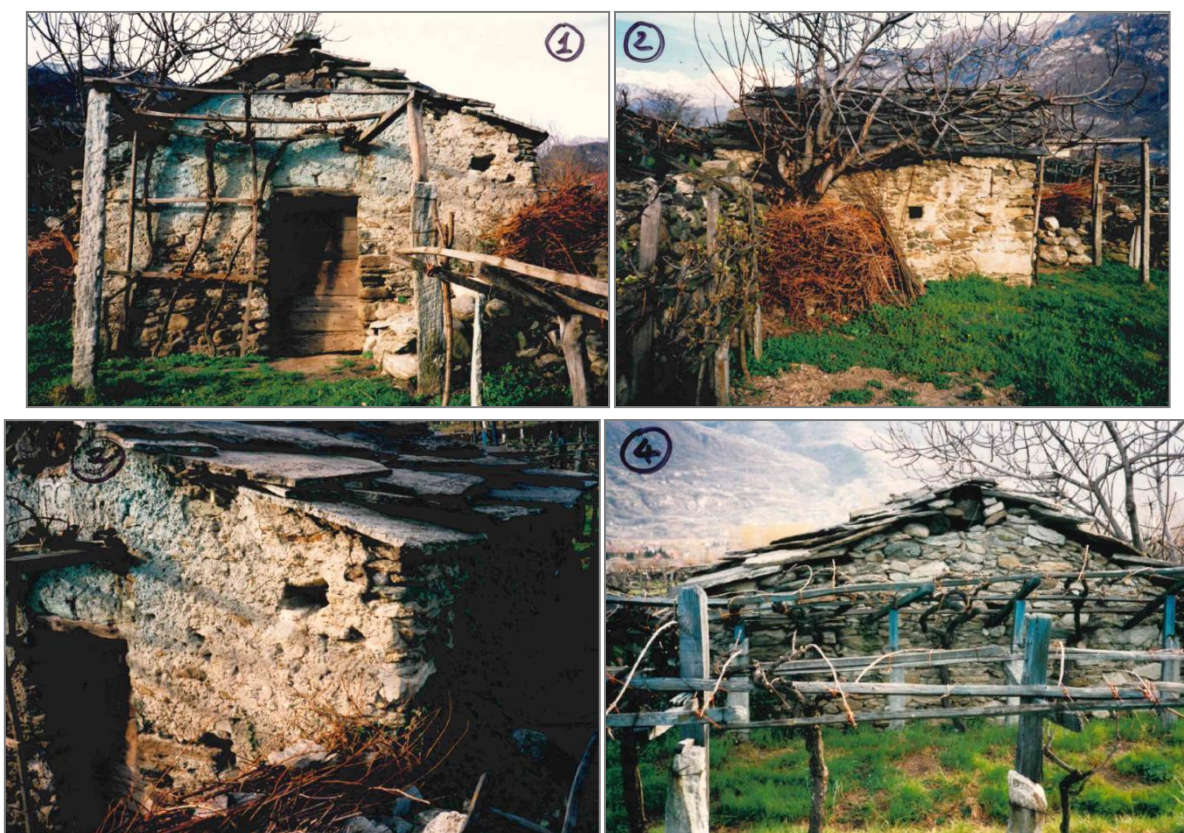


Figura 111: esempio di *casotto* (o *ciabot*) tipico del bussolenese (foto d'archivio fornita dallo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).

A seguito dell'evento calamitoso la costruzione è andata completamente distrutta come si evince dalle immagini nelle figure Figura 112 e Figura 113. La colata ha spazzato via completamente tutti i muri sia perimetrali che interni, lasciando sul terreno solamente la traccia della base della muratura.



Figura 112: foto aerea dell'apice di conoide; in evidenza - area tratteggiata in rosso - i resti sul terreno del catastale 1139 (foto di Daniele Drago Regione Piemonte Direzione Opere Pubbliche)



Figura 113: foto dei resti sul terreno del catastale 1139 dopo il passaggio della colata detritica– vista lato ovest (foto inserita nella richiesta danni allo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno)

La comparazione tra i risultati della modellazione numerica e gli effetti sull'edificio viene condotta mettendo a confronto la spinta della colata esercitata sul lato nord (azione sollecitante) e la resistenza offerta dalla muratura (azione resistente).

AZIONE SOLLECITANTE

Il calcolo della spinta di una colata detritica su un ostacolo è oggetto di continui studi e ricerche da parte della comunità scientifica. Le formulazioni finora proposte si differenziano per la dinamica di impatto distinguendosi in approccio idrostatico, approccio idrodinamico, e misto. Nel primo caso l'impatto è regolato dall'altezza della massa, mentre nel secondo dalla velocità del fluido.

La prevalenza di una componente rispetto all'altra (statica vs dinamica) può essere stimata tramite il numero di Froude ovvero il rapporto tra la velocità e la radice quadrata del prodotto accelerazione di gravità per altezza. Per bassi valori di tale numero la componente statica è dominante rispetto a quella dinamica viceversa è l'approccio idrodinamico quello più rappresentativo del fenomeno e quindi della forza di impatto.

Le formule per il calcolo della spinta sono generalmente espresse nelle due forme riportate in Equazione 8.

Equazione 8: calcolo della spinta della colata detritica su di un ostacolo

$$F_{\text{stat}} = k_{\text{stat}} \rho g h A \quad \text{formulazione idrostatica}$$

$$F_{\text{din}} = k_{\text{din}} \rho v^2 A \quad \text{formulazione idrodinamica}$$

in cui:

h	spessore del materiale
ρ	densità media del fluido
v	velocità del fluido
A	area di impatto
k	coefficiente di spinta idrostatico o idrodinamico
g	accelerazione di gravità

Alcune delle formulazioni proposte da diversi autori sono riepilogate in Tabella 18 nelle quali ciò che cambia è il valore attribuito al coefficiente di spinta idrostatico o idrodinamico. Nella medesima tabella viene riportata anche una formulazione di tipo misto in cui è presente sia il contributo dell'altezza che quello della velocità (Hübl e Holzinger, 2003).

Tabella 18: formule per il calcolo della spinta di una colata detritica da diversi autori

Autore	Formula	Coeff. di spinta k (a)
Lichtenhahn (1973)	$p_{max}=k\rho gh$	2.8 – 4.4
Scotton and Deganutti (1997)	$p_{max}=k\rho gh$	2.5 – 7.5
Watanabe and Ike (1981)	$p_{max}=a\rho v^2$	2.0 – 4.0
Zhang (1993)	$p_{max}=a\rho v^2$	3.0 – 5.0
Canelli et al. (2012)	$F=k\rho v^2 A$	1.5 – 5.5
Hubl and Holzinger (2003)	$p_{max}=5\rho v^{0.8}(gh)^{0.6}$	-----

La modellazione impiegata nel calcolo della spinta sollecitante è caratterizzata dalle seguenti impostazioni: innesco concentrato, coefficiente di attrito di $2,86^\circ$, turbolenza 500m/s^2 , tempo di analisi di 400 secondi e soprattutto la presenza di tutte le costruzioni integre (condizione pre-evento).

Nella sezione investigata la velocità massima e l'altezza massima sono state raggiunte dal fronte della colata nell'intervallo compreso tra i 120 ed i 140 secondi dall'innesco, dopodiché

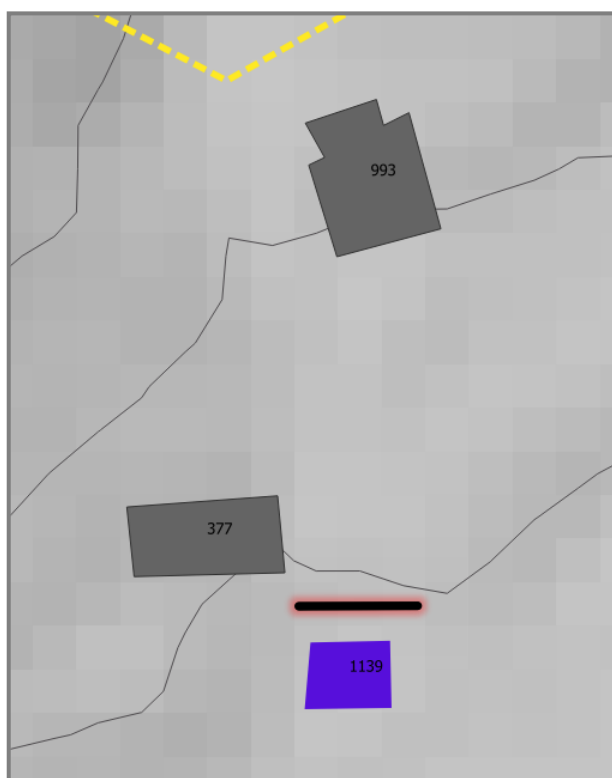


Figura 114: catastale 1139. Linea di estrazione dei dati di velocità e altezza dal modello numerico.

i valori sono progressivamente scesi con il progredire del fenomeno. Questa condizione corrobora la metodologia applicata sinora che prevede la modifica del DTM (modello C_B_S al paragrafo 4.4 a pagina 100). In effetti se la velocità massima di fronte al Catastale 1139 fosse stata raggiunta dopo il passaggio del fronte della colata - in un istante di tempo molto maggiore di 140 secondi - la simulazione C_B_S che prevede l'eliminazione del caseggiato 1139 e l'introduzione della bialera sarebbero potuti sembrare puramente artificiosi, viceversa, visti i risultati della simulazione, l'ipotesi secondo cui la colata ha distrutto fin da subito l'edificio facendosi quindi largo lungo

una linea di flusso di direzione nord-sud appare affidabile e coerente. L'altezza massima raggiunta è 2.65 metri e la velocità massima è di 5.8 m/s (valori massimi misurati sulla linea di sezione investigata in Figura 114).

Per il calcolo della spinta vengono applicati sia l'approccio idrostatico che idrodinamico, senza utilizzo dei coefficienti di spinta (soluzione a favore della resistenza della costruzione). La densità della colata detritica è stata cautelativamente posta pari a 1800 kg/m^3 e la spinta con distribuzione costante lungo l'altezza (Hübl et al., 2009). L'area interessata dal fango è la parete nord del catastale 1139: $A=8.5 \times 2.65=22.5 \text{ m}^2$. I risultati sono riepilogati nella tabella seguente:

Formula	Coeff. di spinta $k (a)$	Fmax (kN)
$F_{max}=k\rho ghA$	1	1054
$F_{max}=a\rho v^2 A$	1	1364

AZIONE RESISTENTE

Nel 1953 i proprietari del caseggiato hanno presentato pratica edilizia per il rifacimento del tetto e da tale documento (illustrato nelle figure Figura 115 e Figura 116) è stato possibile ricavare le misure della costruzione sia in pianta che in prospetto.

L'azione resistente della muratura è stata valutata ipotizzando un meccanismo di rottura per taglio con fessurazione diagonale come indicato nella CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018." Di cui si allegano alcuni estratti. Nel caso in esame si considera una muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari).

Nel caso di muratura irregolare, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano del pannello può essere valutata con la relazione seguente:

$$V_i = l \cdot t \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} = l \cdot t \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}} \quad [\text{C8.7.1.16}]$$

dove:

l è la lunghezza del pannello

t è lo spessore del pannello

σ_0 è la tensione normale media, riferita all'area totale della sezione (= P/lt , con P forza assiale agente, positiva se di compressione)

f_{td} e τ_{0d} sono, rispettivamente, i valori di calcolo della resistenza a trazione per fessurazione diagonale e della corrispondente resistenza a taglio di riferimento della muratura ($f_t = 1,5 \tau_0$); nel caso in cui tale parametro sia desunto da prove di compressione diagonale, la resistenza a trazione per fessurazione diagonale f_t si assume pari al carico diagonale di rottura diviso per due volte la sezione media del pannello sperimentato valutata come $t(l+h)/2$, con t , l e h rispettivamente spessore, base e altezza del pannello.

b è un coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione, dipendente dalla snellezza della parete. Si può assumere $b = h/l$, comunque non superiore a 1,5 e non inferiore a 1, dove h è l'altezza del pannello.

Tabella C8.5.I -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f	τ_0	f_{v0}	E	G	w
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Tabella C8.5.II -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

Tabella 19: calcolo del peso della struttura del catastale 1139

Peso muratura		Solaio primo piano		Tetto	
area in pianta 2 lati est-ovest in m ²	7	peso voltine kN/ m ²	2.5	peso portante kN/ m ²	3.5
area in pianta 3 lati nord-sud in m ²	8.5	peso pavimento kN/ m ²	0.3	peso isolamento kN/ m ²	0.24
area totale in pianta in m ²	15.5	peso totale kN/ m ²	2.8	peso intonaco 1 cm kN/ m ²	0.2
altezza edificio in m	5.8	area solaio in m ²	38.25	peso totale kN/ m ²	3.44
volume muratura in m ³	89.9	peso totale solaio kN	107.1	area solaio in m ²	38.25
peso muratura kN/ m ³	19			peso totale tetto in kN	150.7
peso totale muratura kN	1708.1				
PESO TOTALE DELLA STRUTTURA					
1966 kN					

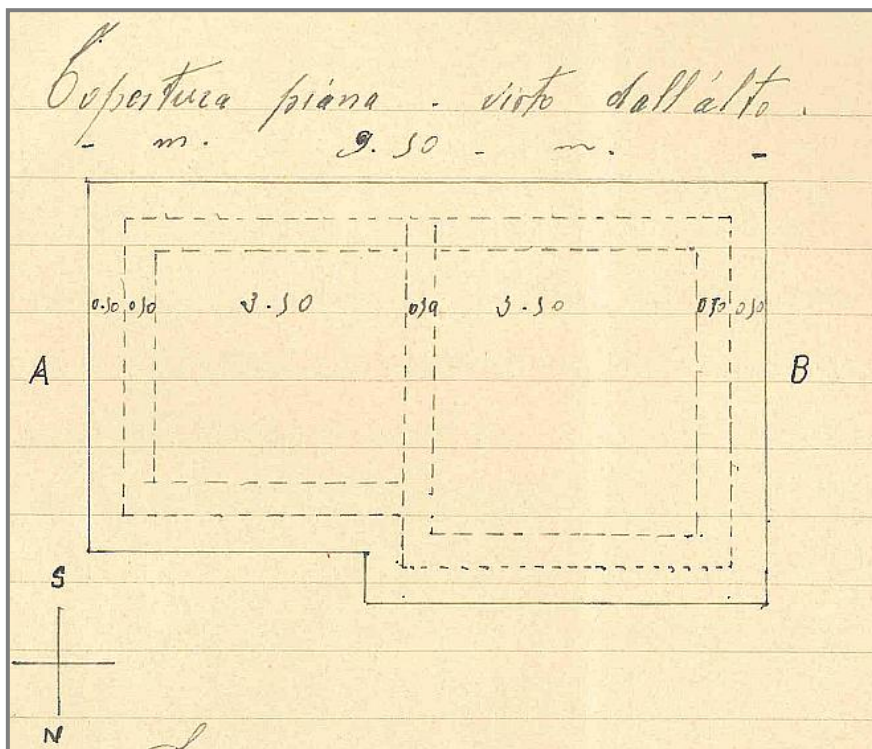


Figura 115: pianta del catastrale 1139 – estratto dalla pratica edilizia per di rifacimento del tetto, anno 1953 (pratica d'archivio fornita dallo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).

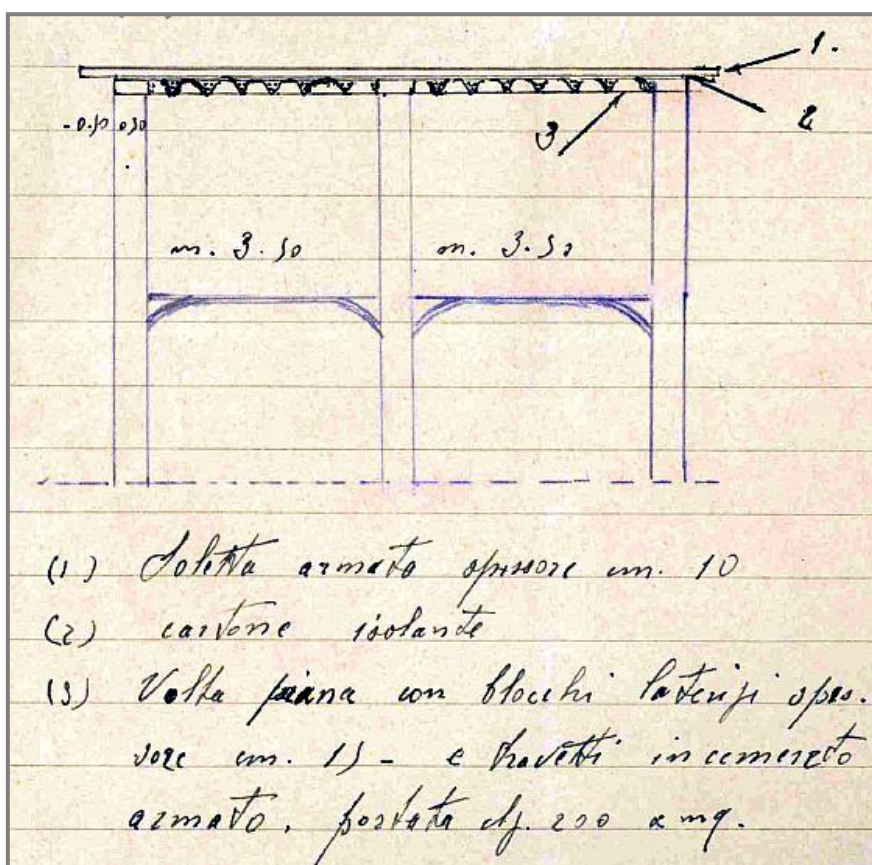


Figura 116: prospetto del catastrale 1139 – estratto dalla pratica edilizia per di rifacimento del tetto, anno 1953 (pratica d'archivio fornita dallo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).

Il peso a metro cubo della muratura è preso dalla tabella della circolare sopra citata, mentre i valori per le voltine sono stati ricavati dal “Manuale dell’ingegnere civile e industriale” (Colombo Giuseppe, 1890 - Manuali Hoepli) di cui si allega un estratto.

124. Peso proprio e sopracarico dei solai.		
1) Peso proprio (carico permanente):		
a) Per l'orditura del solaio (esclusi i travi maestri):		
Travicelli di legno e assito	in media al mq. kil.	35
Travicelli di ferro con sbadacchi e assito	» » »	40
Travicelli di ferro con vólte di quarto	» » »	250
Il peso del ferro al mq. nei solai metallici è di 16 ÷ 20 kil. pei solai leggeri, 20 ÷ 26 pei solai a vólte, 30 ÷ 50 pei solai con travi maestri.		
b) Pei pavimenti e soffitti:		
Pavim. di legno semplice colla sua armatura....	al mq. kil.	20 ÷ 30
Pavim. a tavolette (<i>parquet</i>) »	» »	50 ÷ 80
Pavim. di piastrelle col suo letto	» »	60 ÷ 90
Soffitto di stuoie e intonaco semplice	» »	20 ÷ 30
Soffitto di correntini con stucchi.....	» »	70 ÷ 120
2) Sopracarico (carico accidentale):		
Solai leggeri (camere sottotetto ecc.)	al mq. kil.	80 ÷ 100
Solai ordinari (camere d'abitazione)....	» »	150 ÷ 180
Sale da ballo e di riunione	» »	250 ÷ 300
Opifici con macchine.....	» »	270 ÷ 350
Magazzini.	» »	400 ÷ 500

Il calcolo della forza resistente per taglio è calcolata ipotizzando che solo le tre murature in direzione nord-sud offrano una resistenza al taglio rispetto alla direzione della colata.

Calcolo della resistenza a taglio per fessurazione diagonale		
Lunghezza parete in m	l	5
Spessore singola parete in m	t_{sing}	1.5
Numero pareti resistenti	n	3
Spessore totale parete in m	t	1.5
Peso Totale struttura in kN	P	1966
Area muratura in m ²	A	15.5
Tensione normale in kN/m ²	σ_0	126.8
Tensione di taglio in N/mm ²	τ_0	0.032
Coefficiente correttivo		1.5
Tensione di taglio in N/mm ²	τ_{0d}	0.048
Altezza edificio in m	h	5.8
Coefficiente di snellezza $b=h/l$	h/l	1.16
Forza resistente per taglio in kN	V	774

VERIFICA DELLA STRUTTURA

Il valore della forza resistente (774 kN) è inferiore al minimo dei valori sollecitanti (1054 kN). Se è pur vero che i due valori sono dello stesso ordine di grandezza non vanno trascurate le seguenti assunzioni fatte nel processo analitico, tese ad incrementare il valore della resistenza e a diminuire quello della sollecitazione:

- *Sollecitazione*
 - *coefficiente di spinta pari a 1*
 - *densità del materiale detritico pari a 1800 kg/m³*
- *Resistenza*
 - *resistenza media a taglio pari al limite superiore dell'intervallo ammesso 0,032 MPa*
 - *coefficiente correttivo per la muratura pari a 1,5 considerata con malta molto buona*

Se si calcolasse la resistenza con taglio pari a 0.018 MPa e coefficiente correttivo pari a 1 (malta scadente) la forza resistente scenderebbe a 417 kN, viceversa applicando il più basso tra coefficienti di spinta e forza idrostatica la sollecitazione minima salirebbe a $1054 \times 2,5 = 2635$ kN, con un rapporto quindi tra Resistenti e Sollecitanti di oltre sei volte. Inoltre nel calcolo non si tiene conto che la muratura del catastale 1139 era già sollecitata dalla spinta del terreno a tergo nel lato nord e che i valori di velocità massima ed altezza massima sono stati ricavati dal modello con volume totale mobilitato pari a 17000 m³.

Si ritiene quindi che la distruzione dell'edificio, avvenuta realmente, sia compatibile con la modellazione numerica sin qui proposta.

5. INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO NEL COMUNE DI BUSSOLENO

Il Comune di Bussoleno è dotato di un Piano Regolatore Generale Comunale con il quale è stata disciplinata l'attività edilizia ed urbanistica in tutto il territorio del comune di Bussoleno. Nel Piano vengono inseriti i corsi d'acqua fluenti nel territorio di Bussoleno tra i quali non è presente il Rio Reforno del bacino Comba delle Foglie. Infatti, come già discusso al paragrafo 3.6, fino al giugno 2018 non si ravvisava la necessità di gestire le acque provenienti da tale bacino tanto non prevedere alcun sistema di drenaggio delle acque superficiali-meteoriche.

L'evento del 07 giugno 2018 non solo ha modificato il territorio invaso dalla colata ma ha costretto l'Amministrazione bussolenese a rivedere la gestione del territorio in conoide al fine di mitigare il rischio da possibili ulteriori colate detritiche. Va sottolineato infatti che con l'evento del 07 giugno non tutto il materiale instabile presente nei versanti è stato trascinato a valle dalle piogge e quindi persiste a tutt'oggi il rischio di ulteriori colate detritiche. Inoltre il rischio di *flash flooding* post-incendio permane per diversi anni (Cannon et al., 2010), perciò diventa indispensabile dotare il territorio di un opportuno sistema di regimazione delle acque meteoriche.

Per proteggere l'abitato e salvaguardare gli ambienti naturali sono stati previsti interventi di mitigazione del rischio di tipo passivo, ovvero che servono a dissipare le energie scaturite a seguito di eventuali dissesti ed a contenere i materiali di risulta, e di tipo attivo che mirano ad eliminare o ridurre le cause di innesco del fenomeno franoso.

MITIGAZIONE DEL RISCHIO: INTERVENTI PASSIVI

L'Amministrazione comunale di Bussoleno, subito dopo l'evento franoso, ha immediatamente avviato le procedure per la dichiarazione dello Stato di Emergenza e ha emesso con le Ordinanze Contingibili e Urgenti numero 80 e numero 81 del 14 giugno 2018 con le quali, tra le altre cose, provvedeva ad affidare ad uno studio di ingegneria la progettazione delle opere di mitigazione (Comune di Bussoleno, Progetto Definitivo Esecutivo, 2018).

La tipologia di opere previste in somma urgenza sono:

- *Barriera flessibile in acciaio per la protezione dalle colate detritiche in alveo;*
- *Bacino di accumulo del trasporto solido in apice di conoide;*
- *Bacino di accumulo del trasporto solido supplementare;*
- *Vasche di laminazione;*
- *Canalette a sezione trapezia per deflusso a cielo aperto;*
- *Condotte interrato per deflusso intubato;*
- *Vasche di dissipazione energia cinetica della corrente e pozzetti di ispezione*

All'interno del bacino e in apice di conoide sono quindi previsti interventi di mitigazione del rischio di tipo passivo (Figura 118, Figura 119).

Per la frazione solida si prevedono una rete debris-flow e dei bacini di accumulo del trasporto solido.

Per la frazione liquida si prevedono delle vasche di laminazione per la riduzione delle portate di colmo di un'eventuale piena e il convogliamento delle acque raccolte verso la Dora Riparia attraverso un sistema di collettamento completamente nuovo che si sviluppa lungo i margini dell'abitato della Frazione San Lorenzo (Figura 119).

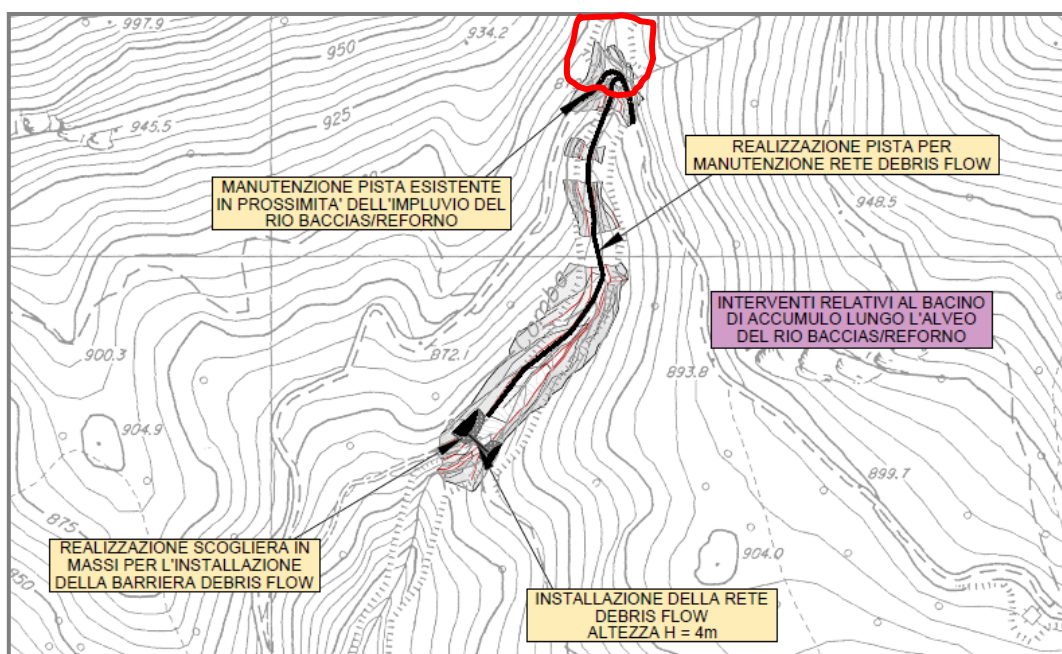


Figura 117: ubicazione della rete debri-flow (estratto da Comune di Bussoleno – Progetto Definitivo-Esecutivo – Planimetria generale di progetto). Con linea rossa il tratto terminale dell'area con innesco concentrato nella simulazione del capitolo 4.

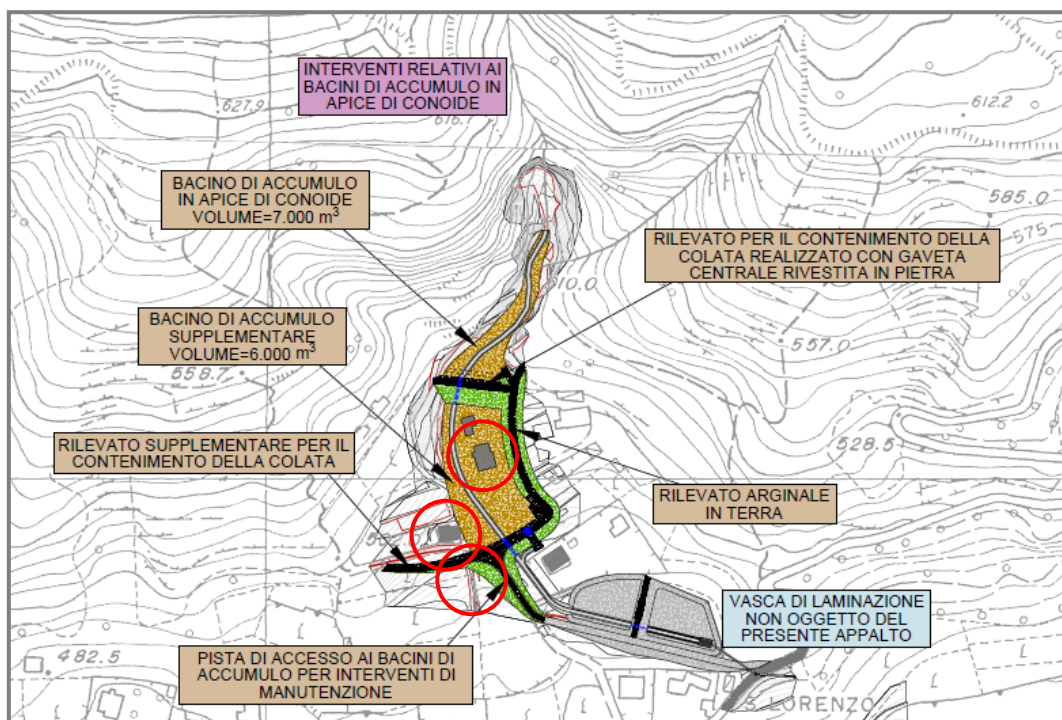


Figura 118: ubicazione dei bacini di accumulo (estratto da Comune di Bussoleno – Progetto Definitivo-Esecutivo – Planimetria generale di progetto). Con linea rossa le abitazioni in apice di conoide coinvolte nell’evento di colata detritica del 07 giugno 2018 (Catastali 933, 377,1139)

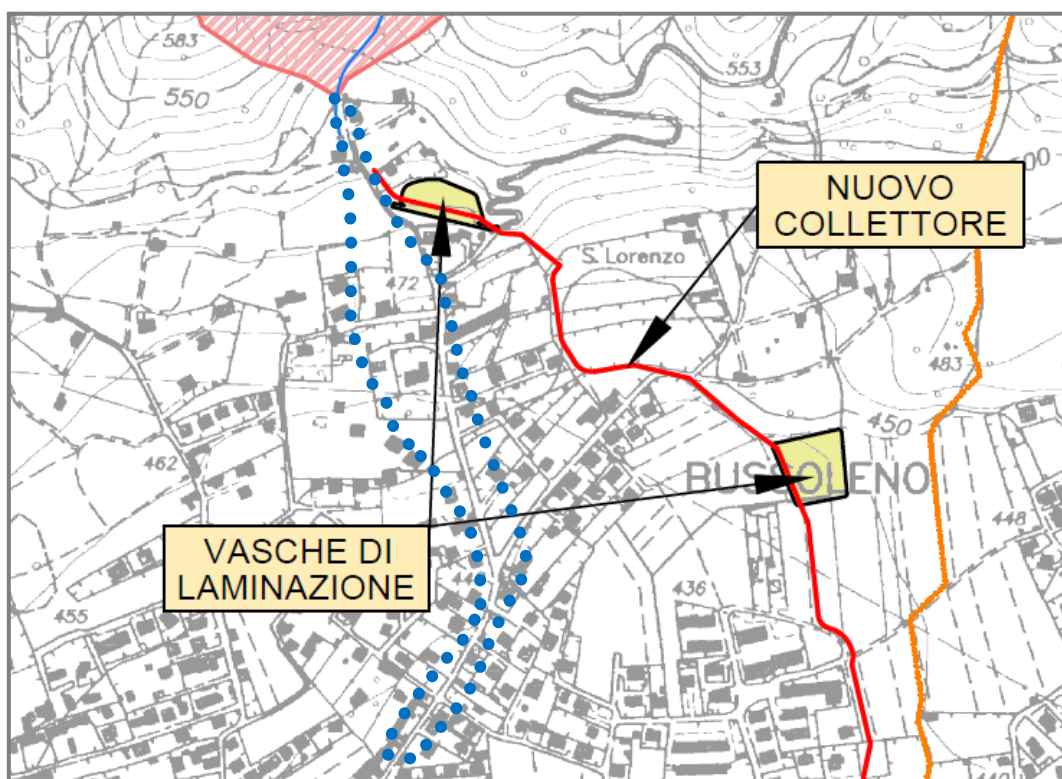


Figura 119: ubicazione delle vasche di laminazione (estratto da Comune di Bussoleno – Progetto Definitivo-Esecutivo – Corografia). Con linea tratteggiata blu l’area coinvolta dall’evento di colata detritica del 07 giugno 2018.

Durante il sopralluogo del 09 febbraio 2019 le opere di mitigazione risultavano in via di completamento, tuttavia mancavano ancora alcune lavorazioni collaterali come la demolizione delle costruzioni ubicate all'interno dei bacini di accumulo. Si riportano, da Figura 120 a Figura 123 alcune fotografie scattate durante la visita ispettiva.



Figura 120: bacino di accumulo in apice di conoide da 7000 m³. Vista verso valle. (foto scattata il 28/02/2019)



Figura 121: bacino di accumulo supplementare da 6000 m³. Vista verso valle. In evidenza i catastali 993 e 377 che dovranno essere demoliti (foto scattata il 28/02/2019)



Figura 122: canale di scarico del bacino di accumulo supplementare. Vista verso monte. In evidenza i rilevati dei due bacini di accumulo (foto scattata il 28/02/2019)



Figura 123: vasca di laminazione a monte (foto scattata il 28/02/2019)

Il quadro economico degli interventi, desunto dai quadri economici del progetto definitivo-esecutivo e dall'Albo Pretorio del Comune di Bussoleno, sono riepilogati in Tabella 20

Tabella 20: costi sostenuti per gli interventi di ripristino e per la progettazione e costruzione delle opere passive di mitigazione (alla data di redazione del presente elaborato)

Voce di spesa	Importo in euro
a) Rimozione detriti e ripristino della viabilità	287228
b) Smaltimento in discarica	9760
c) Progettazione e costruzione dei bacini di accumulo e della rete debris-flow	250000
d) Progettazione e costruzione delle vasche di laminazione	250000
e) Sorveglianza del cantiere e della "zona rossa"	3965
f) Altro (vestiario e attrezzature tecniche, contributi volontariato,)	13695

a) b) e) f) importi desunti dall'Albo Pretorio (liquidazioni)

c) e d) importi desunti dal quadro economico del progetto

MITIGAZIONE DEL RISCHIO: INTERVENTI ATTIVI

Oltre agli interventi di mitigazione del rischio di tipo passivo, sono previsti interventi di tipo attivo. Gli interventi di tipo attivo agiscono sulle cause che innescano il fenomeno di debris-flow così da impedire, o perlomeno limitare, che il fenomeno si verifichi.

In particolare, il 18 aprile la Giunta regionale ha approvato il *Piano straordinario di interventi di ripristino del territorio in seguito agli incendi boschivi dell'autunno 2017* (D.G.R. n. 29-8813). Il Piano, che ha validità fino al 31 agosto 2029, promuove una serie di interventi di ricostituzione della vegetazione, con lo scopo di accelerarne localmente i processi creando tipologie strutturali di bosco a diversa fase dinamica e resilienza, e salvaguardare la biodiversità.

Le azioni della copertura vegetale nei confronti dei fenomeni dissestivi di tipo areale, possono essere riassunte in:

- funzione aggregativa della componente vegetale del suolo che ne migliora le caratteristiche geotecniche: incremento dell'angolo di attrito e della coesione
- contrasto all'erosione sia areale che lineare grazie agli apparati radicali e dei fusti
- l'intercettazione dell'acqua meteorica con riduzione del run-off e miglioramento dell'infiltrazione nel terreno

Nelle figure seguenti (da Figura 124 a Figura 126) si riportano le cartografie inserite nel Piano relativamente alle funzioni prevalenti del territorio, alla severità dell'incendio del 2017 e alla priorità di intervento. Le cartografie si riferiscono a tutta l'area Valsusina interessata dagli incendi.

Le funzioni prevalenti dei popolamenti forestali inclusi nei perimetri di incendio sono state classificate come segue:

- Protezione reticolo idrografico: tutte le foreste incluse in una fascia di ampiezza 15 m dall'asse dell'elemento idrografico considerato
- Protezione reticolo viario: tutte le foreste incluse in una fascia di ampiezza 20 m dall'asse dell'elemento viario considerato (monte e valle)
- Foreste di protezione diretta: tutte le foreste poste a quote uguali o superiori ad un bene da proteggere entro una distanza di 400 metri da questo. La protezione diretta è definita a prescindere dalla pendenza del versante poiché include anche il rischio correlato ai fenomeni erosivi indotti dal passaggio dell'incendio.
- Foreste di protezione generale: tutte le foreste che assolvono ad un ruolo di protezione generica dei versanti nei confronti dell'erosione del suolo
- Naturalistica: tutte le foreste incluse in aree protette o siti della rete Natura 2000⁷
- Turistico-ricreativa: tutte le foreste, ad elevata fruizione turistica
- Produzione: tutte le foreste con potenzialità produttive
- Evoluzione Libera: tutte le foreste che non prevedono forme di gestione attiva.

Gli interventi previsti nella Comba delle Foglie, che è stata interessata da incendi di severità media e alta, sono riassumibili in Protezione diretta, Fruizione e Protezione generale, oltreché Sicurezza del reticolo idrografico e viario.

La priorità di intervento è alta nella parte più a nord del bacino (da cui si presume sia arrivata buona parte del materiale detritico) e media nella restante parte.

⁷ Natura 2000 è una rete di siti di interesse comunitario (SIC), e di zone di protezione speciale (ZPS) creata dall'Unione europea per la protezione e la conservazione degli habitat e delle specie, animali e vegetali, identificati come prioritari dagli Stati membri dell'Unione europea. https://it.wikipedia.org/wiki/Natura_2000

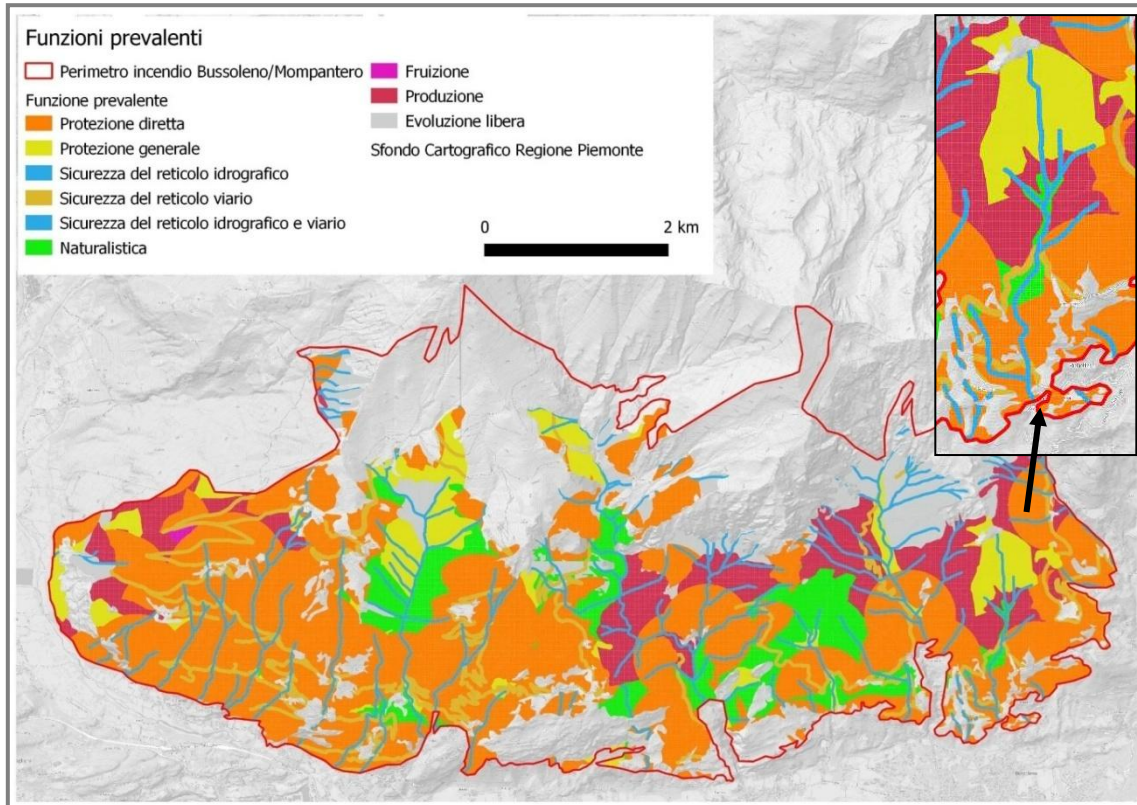


Figura 124: Piano straordinario di interventi per il ripristino del territorio. Funzioni prevalenti del territorio. Nel riquadro la Comba delle Foglie.

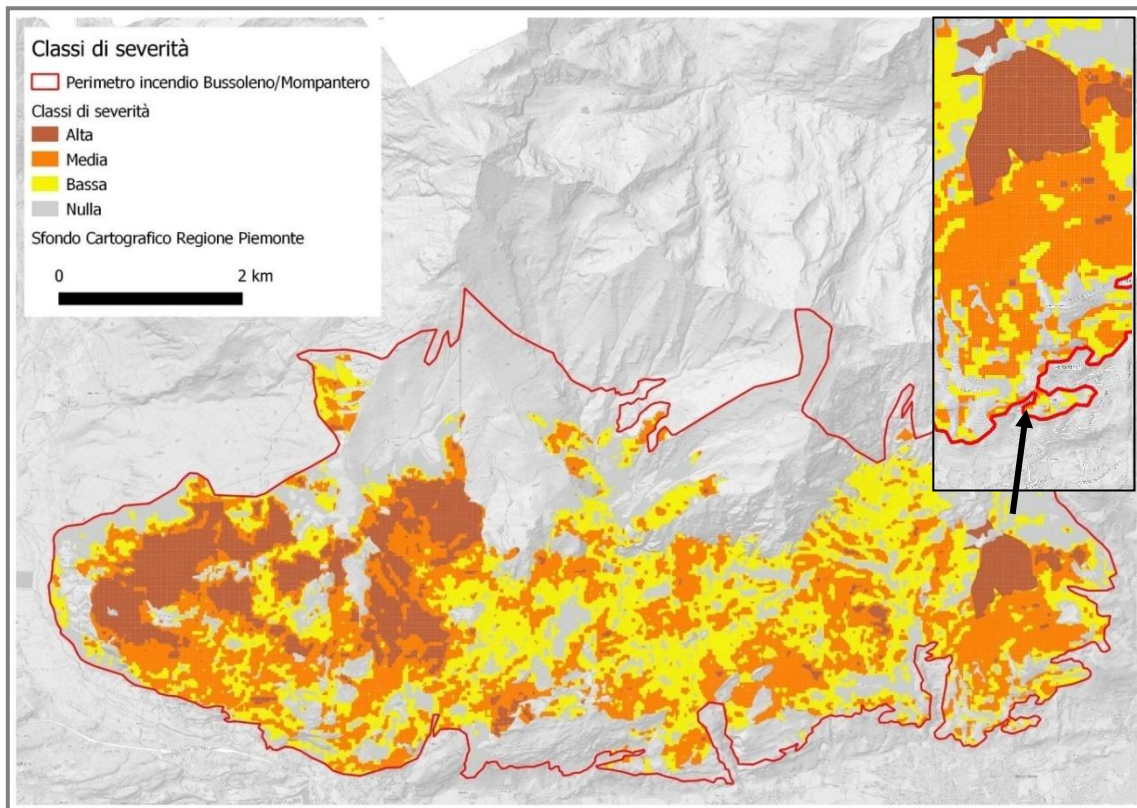


Figura 125: Piano straordinario di interventi per il ripristino del territorio. Classe di severità dell'incendio. Nel riquadro la Comba delle Foglie.

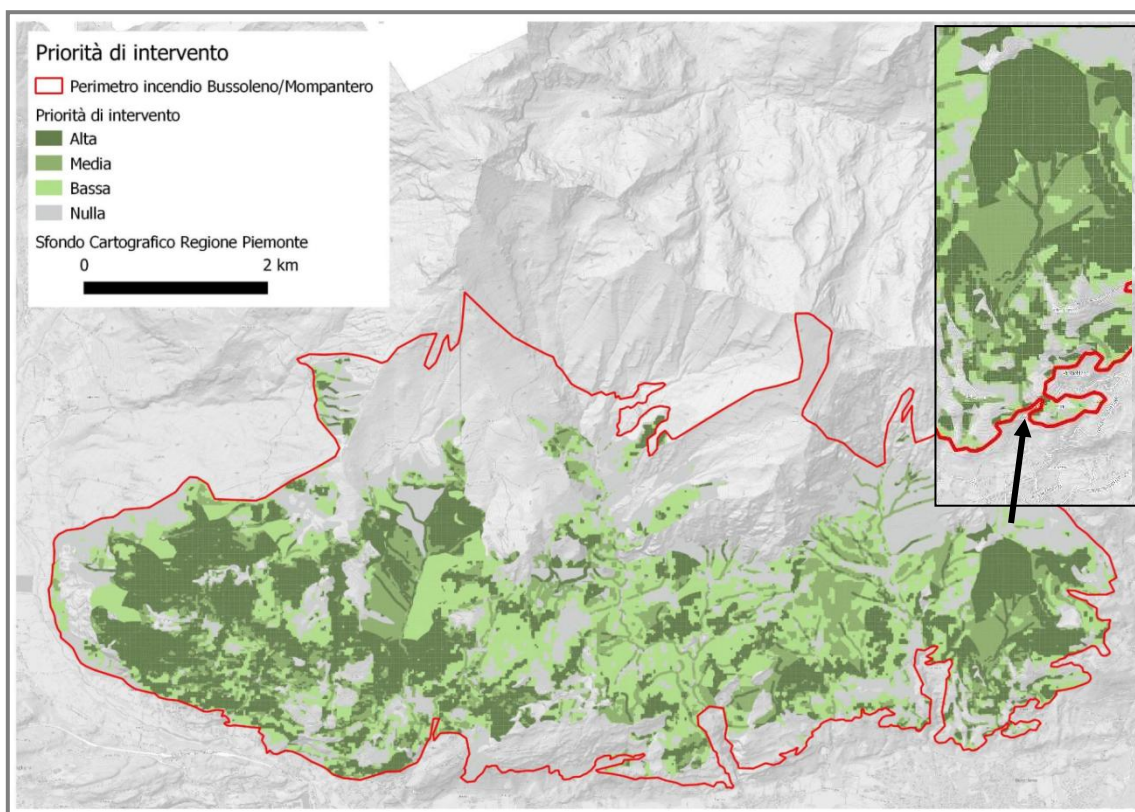


Figura 126: Piano straordinario di interventi per il ripristino del territorio. Priorità di intervento. Nel riquadro la Comba delle Foglie.

L'approvazione di un piano straordinario in seguito agli incendi boschivi non deve essere considerato un strumento normativo scontato che viene messo in pratica meccanicamente a seguito di eventi incendiari per mitigare il rischio da eventi franosi. Va ricordato, infatti, che la legge quadro nazionale in materia di incendi boschivi (L. 353/2000 art. 10) pone una serie di divieti che riguardano le superfici forestali e pascolive percorse da incendi, per periodi di tempo variabili tra i 15 e i 5 anni. Tra queste, ad esempio, vi è il grosso vincolo che per 5 anni è vietato utilizzare risorse finanziarie pubbliche per eseguire “attività di rimboscimento e di ingegneria ambientale”.

La motivazione di quest'ultimo divieto risiede nella volontà di ostacolare situazioni speculative (la cosiddetta “industria del fuoco”) nelle quali gli incendi sono appiccati con lo scopo di accedere alle risorse pubbliche messe a disposizione per i lavori di ricostituzione boschiva. Quindi, nel caso in esame, è stato necessario utilizzare gli strumenti previsti dalla legge regionale in materia forestale (n. 4/2009) la quale prevede che “*per ragioni di pubblica utilità e urgenza, quali la prevenzione dei rischi di dissesto idrogeologico, caduta valanghe e incendio boschivo, e per motivi fitosanitari*” possono essere attuati piani straordinari di intervento finalizzati al “*miglioramento della stabilità del patrimonio forestale, al*

rafforzamento delle potenzialità protettive e ambientali e alla creazione delle premesse per la sua valorizzazione economica”.

Gli interventi prevedono:

- taglio allestimento ed esbosco
- costruzione delle opere antierosive (palizzate)
- ricostituzione attiva (semina e piantagione)

Gli stanziamenti previsti per gli interventi da attuarsi in tutto il territorio comunale bussolenese sono riassunti in Tabella 21 e si riferiscono a scenari di costo minimi e massimi basati sul livello di meccanizzazione utilizzato, sul volume di legname tagliato, sul volume di legname utilizzato per le palizzate, la semina e la piantagione.

Tabella 21: costi di ripristino per interventi attivi di mitigazione del rischio per il Comune di Bussoleno in migliaia di euro

Scenario	Proprietà comunale	Proprietà privata
<i>1 Bassa meccanizzazione</i>	181÷234	923÷1124
<i>2 Elevata meccanizzazione</i>	140÷166	497÷573

6. CONCLUSIONI

Il giorno 07 giugno 2018 verso le 14:30 (ora locale) una colata di detriti e fango, formatasi nel bacino della Comba delle Foglie, ha colpito la zona nord del comune di Bussoleno (TO) in corrispondenza della frazione di San Lorenzo. Il fenomeno dissestivo ha avuto origine a seguito di una serie di eventi meteorici a carattere temporalesco che hanno interessato l'area, dopo che questa è stata investita da un vasto incendio nell'autunno 2017.

L'evento franoso ha comportato diversi disagi alla popolazione oltretutto la distruzione e il danneggiamento strutturale di diverse costruzioni.

I tecnici dei vari Enti coinvolti durante la fase emergenziale hanno perimetrato l'area coinvolta dal materiale detritico ed hanno stimato un volume di materiale depositato in conoide compreso tra 15000 m³ e 20000 m³.

INCENDIO E COLATA DETRITICA

La relazione tra incendio e colata detritica è ampiamente documentata nella letteratura scientifica. I fenomeni di debris-flow si manifestano entro pochi anni dall'incendio (generalmente entro due anni). La rapida ricrescita del manto erboso nei mesi successivi all'incendio non deve trarre in inganno sulla vulnerabilità del bacino idrografico. I tempi di recupero di un'area devastata dall'incendio possono variare da 2 a 6 anni a seconda che la superficie bruciata sia costituita da praterie piuttosto che da foresta. Le conseguenze dell'incendio sui versanti sono molteplici e gravose:

- riduzione dell'accumulo meteorico fornito dell'apparato fogliare degli alberi
- aumento dell'erosione superficiale per mancanza di tronchi, arbusti e radici che aumentano la coesione del terreno
- riduzione della capacità di assorbimento dell'acqua nel terreno da parte delle radici
- formazione di uno strato impermeabile di terreno "cotto" dal calore, appena pochi centimetri sotto la superficie.

Tutte queste modifiche contribuiscono ad amplificare il ruscellamento dai versanti.

L'incendio può incrementare la quantità di sedimenti disponibili al debris-flow fino a 3 volte rispetto al normale tasso di erosione nella foresta indisturbata.

La maggiore probabilità di colata detritica post-incendio viene riscontrata laddove il terreno ha un elevato contenuto di argilla e dove il versante è maggiormente ripido.

Va evidenziato che non è corretto definire una proporzionalità diretta tra la severità di un incendio e gli effetti al suolo: anche un incendio di modeste dimensioni può creare condizioni particolarmente favorevoli allo sviluppo di colate detritiche. A tal proposito, il rischio di erosione e di dilavamento dei versanti dovrebbe essere preso in conto non solo laddove vi è stato un incendio violento ma anche nelle situazioni in cui la pratica dell'incendio controllato è impiegata come politica di gestione del territorio, proprio perché anche in questa ultima situazione possono verificarsi fenomeni che indeboliscono il terreno. In regione Piemonte, con l'entrata in vigore della nuova legge regionale sugli incendi boschivi (Legge regionale n. 15 il 4 ottobre 2018)⁸ e l'approvazione del Piano sulla qualità dell'aria nel Bacino Padano (Deliberazione della Giunta Regionale 28 settembre 2018, n. 57-7628)⁹, l'accensione dei fuochi e l'abbruciamento dei residui vegetali è normata da regole molto restrittive come ad esempio *l'abbruciamento di materiale vegetale derivante dalle normali attività agricole e selvicolturali è vietato su tutto il territorio regionale nel periodo compreso tra il 1° novembre e il 31 marzo*¹⁰.

MODELLAZIONE NUMERICA DELL'EVENTO CON RASH^{3D} (PIRULLI, 2005)

La dinamica del fenomeno è stata riprodotta attraverso una modellazione numerica (back-analysis). La modellazione è stata condotta con il codice di calcolo RASH^{3D} (Pirulli, 2005).

Le caratteristiche essenziali della modellazione sono:

- il materiale viene rappresentato con un approccio monofasico
- il modello digitale del terreno ha una risoluzione spaziale di 5 metri

⁸Legge regionale n. 15 il 4 ottobre 2018 - Norme di attuazione della legge 21 novembre 2000, n. 353 (Legge quadro in materia di incendi boschivi).

⁹ Deliberazione della Giunta Regionale 28 settembre 2018, n. 57-7628 - Integrazione alla DGR 42-5805 del 20.10.2017, approvata in attuazione dell'Accordo di Programma per l'adozione coordinata e congiunta di misure di risanamento della qualità dell'aria nel Bacino Padano.

¹⁰Sito consultato in data 11/06/2019 <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/foreste/tutela-bosco-territorio/accensione-fuochi-per-eliminare-residui-vegetali>

- è stata impiegata una reologia a due parametri: coefficiente di attrito e turbolenza (Voellmy)
- il volume del materiale mobilitato è pari a 17000 m³ ed è stato collocato in un'area concentrata, a circa metà dell'asta principale in corrispondenza della sezione di chiusura che raccoglie le incisioni secondarie
- l'area esaminata durante la modellazione è situata nella parte apicale e mediana del conoide, e vengono utilizzati alcuni catastali come elementi di controllo.

Dalla simulazione dell'evento si rileva che:

- valori di coefficiente di attrito superiori a 5,71° non sono in grado di rappresentare correttamente il fenomeno soprattutto in area di conoide dove la pendenza generalmente non supera il 30% (16,7°) e dove la dinamica dell'evento è governata maggiormente dalla turbolenza
- valori elevati di turbolenza (1000 m/s²) favoriscono l'espansione areale della massa ma tendono a sovrastimare l'area di effettivo deposito finale
- un tempo di analisi di 400 secondi (tempo reale dell'evento) è sufficiente perché la massa in transito raggiunga le altezze e le velocità massime all'interno dell'area investigata.

I valori dei due parametri reologici, che meglio rappresentano l'evento, sono stati ricercati nell'intervallo compreso tra 1,72° e 5,71° per il coefficiente di attrito e tra 100 m/s² e 500 m/s² per la turbolenza, ed il modello è stato calibrato comparandolo con le altezze del deposito rilevate in campo durante il sopralluogo del febbraio 2019. Dopo molteplici simulazioni si è giunti alla seguente coppia 2,86° e 500 m/s²: gli spessori del deposito sono generalmente compatibili con buona parte delle tracce lasciate sulle pareti delle abitazioni.

MODELLO TOPOGRAFICO C_B_S

Nella prima fase analitica si è osservato che il modello topografico iniziale non rappresenta correttamente il fenomeno. La direzione principale del deflusso non è coerente con quanto è accaduto nella realtà. In effetti la distruzione del caseggiato in apice di conoide e l'erosione del terreno lungo il tracciato della vecchia bialéra hanno favorito una direzione preferenziale del deflusso che nella modellazione non è presente. A tal proposito è stata apportata una modifica al DTM eliminando il caseggiato distrutto e introducendo la bialéra. Quest'ultima è stata inserita abbassando la quota topografica di 1 metro. Poiché le recinzioni delle case sono

costituite da muretti che hanno incanalato la massa fluida lungo le strade, si è deciso di rappresentare queste ultime nel modello abbassando la quota topografica di un metro (modello Case Bialera Strade C_B_S).

La nuova configurazione fornisce risultati soddisfacenti: gli spessori massimi raggiunti dal deposito, in corrispondenza dei punti di controllo, aumentano divenendo maggiormente confrontabili con i dati rilevati in campo. La velocità massima assoluta raggiunta dalla colata in conoide è compresa tra 5÷10 m/s. Si conferma la coppia di parametri reologici $2,86^\circ$ e 500 m/s^2 .

MODELLO C_B_S VS PERIMETRAZIONE DEL DEPOSITO

Il confronto della modellazione con la perimetrazione dell'evento è complessa dal momento che quest'ultima è basata solo sulla classificazione granulometrica del materiale e non sullo spessore del deposito. Tuttavia l'analisi del deflusso principale della massa fluida mostra che la simulazione con il modello C_B_S è coerente con quanto riportato nella perimetrazione a cura dei tecnici Arpa.

L'area interessata dal fenomeno è inferiore a quanto simulato con la modellazione numerica. In quest'ultima vi è un incremento delle zone investite dal fango e si riscontrano accumuli di materiale che non corrispondono alla perimetrazione reale. Si ritiene che tale aspetto sia legato ai seguenti problemi:

- con la modellazione monofasica non è possibile separare la fase solida da quella liquida, e pertanto il materiale in movimento continua ad espandersi coerentemente con i valori assegnati ai parametri reologici. Nella parte bassa del conoide il modello presenta delle zone interessate da deposito di fango che nella realtà hanno subito un evento di tipo alluvionale con materiale liquido
- a piccola e piccolissima scala il modello digitale del terreno con risoluzione a 5 metri non è in grado di cogliere le variazioni topografiche del terreno che, per fenomeni di questo tipo, sono determinanti nel definire i percorsi preferenziali del materiale in transito.

INNESCO CONCENTRATO VS INNESCO DISTRIBUITO

La colata detritica è un fenomeno franoso il cui innesco è di tipo areale e coinvolge interi versanti dei bacini idrografici. A tal proposito è stata condotta una simulazione con innesco distribuito. I 17000 m³ di materiale instabile sono stati posizionati sui versanti con spessori che non superano i 20 cm. La distribuzione è stata ottenuta attraverso il calcolo del fattore di sicurezza delle singole celle del DEM 5x5m. Sono stati mantenuti i medesimi parametri reologici.

L'analisi delle altezze del deposito finale nei punti di controllo mostra che con l'innesco distribuito si ottengono profili di altezze sovrapponibili a quelli dell'innesco distribuito, ma con valori sempre inferiori. Tuttavia va evidenziato che in presenza di riduzioni di pendenza lungo l'incisione principale si formano dei bacini temporanei di deposito di sedimenti che collassano solo a seguito di eventi meteorici intensi. In sintesi, è come se ci fossero diversi inneschi concentrati lungo l'asta principale.

VARIABILITÀ DEL VOLUME DI INNESCO

Sono stati simulati tre eventi con 17000 m³, 20000 m³ e 30000 m³. In tutti e tre gli eventi il profilo del deposito nelle aree di controllo rimane sostanzialmente invariato. Ciò che cambia sono le altezze del deposito che sono proporzionali al volume della massa iniziale.

Questa tendenza alla proporzionalità diretta tra volume di innesco e altezza del deposito in tutti i punti di controllo evidenzia che nella modellazione proposta si mantengono inalterate le principali linee di deflusso del fluido in movimento indipendentemente dal volume iniziale di innesco.

VERIFICA DELLA VULNERABILITÀ DELL'EDIFICIO DISTRUTTO

Un edificio in apice di conoide è stato completamente raso al suolo dal passaggio della colata detritica. Si è deciso di sfruttare questa informazione per verificare l'attendibilità del modello numerico attraverso il confronto dell'azione sollecitante della colata e l'azione resistente della costruzione. La comparazione è affrontata in maniera molto semplificata pertanto ciò che viene valutato sono gli ordini di grandezza dei risultati.

Dalla simulazione numerica dell'evento sono stati estratti l'altezza e la velocità della colata ed è stata calcolata la forza di impatto sulla costruzione. Parallelamente è stata stimata la resistenza offerta dalla costruzione tenendo conto della tipologia di edificio e degli aspetti strutturali più importanti. I dati sul caseggiato sono stati ricavati dallo studio della documentazione in archivio presso il Comune di Bussoleno.

I risultati mostrano che la forza sollecitante della colata è maggiore di quella resistente. Si ritiene quindi la modellazione numerica proposta nel presente elaborato sia compatibile con la distruzione dell'edificio avvenuta realmente.

EPILOGO

In sintesi si può concludere che è possibile modellare la dinamica di colate detritiche utilizzando un approccio monofasico ed una reologia a due parametri. Affinché la modellazione risulti soddisfacente è necessario valutare i seguenti aspetti:

- utilizzare un DTM con risoluzione di 1 metro
- investigare l'area per valutare la presenza di elementi che possano influire sul deflusso del materiale in transito
- analizzare la cartografia storica per comprendere l'evoluzione del sistema di drenaggio delle acque meteoriche
- valutare la presenza di riduzioni di pendenze nell'asta principale del bacino che favoriscono una concentrazione di sedimenti e concorrono a prediligere una modellazione dell'innescò di tipo concentrato
- utilizzare un valore di coefficiente di attrito di tipo Voellmy inferiore a $5,71^\circ$ e turbolenza maggiore di 500 m/s^2 .

Con il modello ottenuto è possibile valutare la vulnerabilità delle costruzioni a patto di approfondire gli aspetti strutturali degli edifici coinvolti e la loro trasformazione nel tempo.

Uno sviluppo del presente elaborato potrebbe prevedere l'utilizzo di differenti valori dei parametri reologici per il bacino e per il conoide, e in area di conoide differenziare ulteriormente l'effetto attritivo offerto dall'erba, dalla pavimentazione stradale, dal bosco ecc.

Inoltre per poter simulare il multi-innesco concentrato potrebbe essere valutata l'introduzione di una differente reologia in corrispondenza dei concentratori di sedimenti, che preveda una soglia minima di tensione resistente prima del collasso del materiale instabile.

7. RIFERIMENTI

- Arpa Piemonte - Dipartimento Sistemi Previsionali - Dipartimento Tematico Geologia e Dissesto, *RAPPORTO EVENTO DEL 07/06/2018 - Colata detritica nel comune di Bussoleno*, Torino - giugno 2018, Aggiornamento 25/6/2018, <https://www.arpa.piemonte.it/arpa-comunica/file-notizie/2018/rapporto-evento-bussoleno2.pdf>
- Arpa Piemonte - Dipartimento Sistemi Previsionali - Dipartimento Tematico Geologia e Dissesto, *Analisi regionale finalizzata alla valutazione della severità e della ricorrenza del fenomeno atteso in conoide - Progetto AlcotraRiskNat*- http://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/analisi-severita-ricorrenza-997_997.pdf
- Arpa Piemonte - A cura del Dipartimento Piemonte Nord-Ovest, Dipartimento Sistemi Previsionali, Dipartimento Rischio Industriale ed Energia, Area Funzionale Tecnica, Ufficio Stampa, *Rapporto tecnico sulla qualità dell'aria e sulle attività dell'Agenzia a supporto dell'emergenza per gli incendi boschivi in Piemonte nel mese di ottobre 2017*, dicembre 2017, <https://www.arpa.piemonte.it/arpa-comunica/file-notizie/2017/rapporto-qa-incendi-boschivi-ottobre-2017.pdf>
- 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*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1159, Reston, Virginia.
- Bingham E.C. (1922), *Fluidity and Plasticity*, McGraw-Hill, New York.
- Blahut J., van Westen C.J., Sterlacchini S. (2010), Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas, *Geomorphology* 119, pp.36-51
- British Columbia – Ministry of Forest, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development, *Landslide and Flooding Risks DUE TO WILDFIRES What you can do to recognize and deal with the hazard*, pamphlet https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/natural-resource-use/resource-roads/local-road-safety-information/landslide_flooding_risks_due_to_wildfires-brochure.pdf
- Canelli L, Ferrero AM, Migliazza M, Segalin A (2012), *Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers — experimental tests and impact analysis*, *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12: 1693–1699
- Cannon S.H., Gartner, J.E., Holland-Sears A., M. Thurston B., Gleason J.A. (2003). *Debris flow response of basins burned by the 2002 Coal Seam and Missionary Ridge fires, Colorado*, Association of Engineering Geologists Special Publication. 14.
- Cannon S.H., Gartner J.E., Wilson R.C and Laber J.L. (2008), *Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California*, *Geomorphology*, v.96, pp.250-269
- Cannon S.H., Gartner J., G. Rupert M., A. Michael J., H. Rea A., Parrett C. (2010), *Predicting the probability and volume of postwildfire debris flows in the intermountain western United States*, *Geological Society of America Bulletin - GEOL SOC AMER BULL.* 122. 127-144

- Chiarle M., Arattano M., Turconi L., Giuliano M., Mortara G., *Le colate detritiche torrentizie*
Presentazione per il percorso didattico sui rischi naturali in ambiente transfrontaliero
http://www.provincia.torino.gov.it/protciv/file-storage/download/pdf/progetti_europei/risknat/champeyron/colate_detritico_torrentizie.pdf
- CNR – IRPI (2019) *Rapporto Periodico sul Rischio posto alla Popolazione italiana da Frane e Inondazioni Anno 2018*, Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
- Comune di Bussoleno, *Comune Di Bussoleno - Provincia Di Torino - Piano Regolatore Generale Comunale, Norme Tecniche Di Attuazione - Aggiornate Alla Variante Parziale N. 7, Aprile 2014*, <https://www.comune.bussoleno.to.it/it-it/servizi/abitare-c/piano-regolatore-generale-comunale-prgc-68-191-1-feec5bf5322ad08fb1428a58b651064c>
- Comune di Bussoleno, *Comune Di Bussoleno - Provincia Di Torino - Piano Regolatore Generale Comunale Relazione Geologica – Aggiornamento alluvione Maggio 2008, Giugno 2009, Tavola VII a – Carta di sintesi – Aggiornamento post-alluvione 2008, Integrazione Novembre 2009* <https://www.comune.bussoleno.to.it/it-it/servizi/abitare-c/piano-regolatore-generale-comunale-prgc-68-191-1-feec5bf5322ad08fb1428a58b651064c>
- Comune di Bussoleno, *Colata detritica del 07/06/2018 sul conoide del rio Baccias/Reformo e Comba delle Foglie – Lavori di somma urgenza per il convogliamento delle portate liquide del rio al recapito finale - Progetto Definitivo-Esecutivo – Elaborati vari, Giugno 2018.*
- Corominas J. (1996), *The angle of reach as a mobility index for small and large landslide*, Canadian Geotechnical Journal, 33, pp 260-271
- Coussot P., Meunier M. (1996), *Recognition, classification and mechanical description of debrisflows*, Earth-Science Reviews 40, 209-227
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996), *Landslide types and processes*, In: Landslides - Investigation and Mitigation, Special Report 247, 36-75. Washington: Transportation Research Board 247:36-75
- DeBano L. F. and Krammes J. S. (1966), *Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures*, Hydrological Sciences Journal, 11:2, 14-19
- DeBano L.F., Osborn J. F., Krammes J.S., and Letey J. Jr. (1967), *Soil wettability and wetting agents . . . our current knowledge of the problem*, Berkeley, Calif., Pacific SW. Forest & Range Exp. Sta. 13 pp., illus. (U.S. Forest Serv. Res. Paper PSW-43)
- DeBano L.F. (2000), *Fire-induced water repellency: An erosional factor in wildland environments*, In: Ffolliott, Peter F.; Baker Jr., Malchus B.; Edminster, Carleton B.; Dillon, Madelyn C.; Mora, Karen L., tech. coords. Land Stewardship in the 21st Century: The Contributions of Watershed Management; 2000 March 13-16; Tucson, AZ. Proc. RMRS-P-13. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 307-310.
- Di Mauro B., Fava F., Busetto L., Crosta G.F. and Colombo R. (2014), *Post-fire resilience in the Alpine region estimated from MODIS satellite multispectral data*, Intern. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 32 (2014), pp.163-172
- Fell R. (1994), *Landslide risk assessment and acceptable risk*, Canadian Geotechnical Journal, 1994, Vol. 31, No. 2 : pp. 261-272
- Ferro V. (2006), *La sistemazione dei bacini idrografici*. Mc Graw Hill, Milano.

- Friedel M.J. (2011), *Adatadriven approach for modeling post-fire debris-flow volumes*, Environmental Modelling & Software 26 (2011), pp.1583-1598
- Gartner J. E.; Bigio E. R., Cannon S. H. (2004), *Compilation of Post Wildfire Runoff-Event Data from the Western United States*; U.S.G. Survey , Open-File Report 2004-1085;
- GeoPortale – GisMaster – Sportello Unico Digitale – Comune di Bussoleno
<https://geoportale.sportellounicodigitale.it/GisMaster/GisMaster/VisualDescNR.aspx?IdCliente=001044>
- Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., and Stark C. P. (2008), *The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update*, Landslides, 5(1), 3–17
- Hübl J, Holzinger G (2003), *Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke fudie Geschiebemanagement in Wildba hen: Kleinmassstellige Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern*, WLS Report 50 Band 3, Institute of Mountain Risk Engineering
- Hübl J., Suda J., Proske D., Kaitna R. and Scheidl C.(2009), *Debris flow impact estimation*, Proceedings of the 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic engineering, Ohrid, Macedonia, 137–148
- Hungr O. and Evans S.G. (1996), *Rock avalanche run out prediction using a dynamic model*, Proceeding 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Vol.1, pp.233-238
- Hungr O., Evans S. G., Bovis M.J., Hutchinson J. N. (2001), *A review of the classification of landslides of the flow type*, Environmental & Engineering Geoscience VII, 221-238.
- Iverson R. M. (1997), *The physics of debris flow*, Reviews of Geophysics 35, 245-296.
- Jakob M. and Hungr, O., (2005), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer-Verlag, Tiergartenstrasse 17, 69121 Heidelberg, Germany/Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, Hardbound p. 781.
- Kean J. W. and Staley D. M. (2011), *Direct measurements of the hydrologic conditions leading up to and during post-fire debris flow in Southern California, USA*, Italian Journal of Engineering Geology and Environment – Book, 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment Padua, Italy - 14-17 June 2011, pp.685-694
- Kean J. W., S. W. McCoy, G. E. Tucker, D. M. Staley, and J. A. Coe (2013), *Runoff-generated debris flows: Observations and modeling of surge initiation, magnitude, and frequency*, Journal Of Geophysical Research: Earth Surface, 118, pp.2190–2207
- J.W. Kean, D.M. Staley, and S.H. Cannon (2011), *In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions*, Journal of Geophysical Research Vol. 116, F04019
- Lichtenhahn C (1973), *Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. Kolloquium uber Wildbachsperren*, Mitteilungen der Forstlichen Bundesanstalt Wien 102:91–127
- Leroueil S. (2001), *Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms*, Géotechnique 51, No. 3, 197±24
- Martino R. e Sabatino C. (2002), *Considerazioni sulla differenza di velocità tra fase solida e liquida in un flusso di un miscuglio granulare*, Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche. Potenza, 16-19 Settembre 2002.

- Nyman P., Smith H.G., Sherwin C.B., Langhans C., Lane P.N.J. and Sheridan G.J. (2015), *Predicting sediment delivery from debris flows after wildfire*, *Geomorphology* 250, pp. 173-186
- Parsons A., Robichaud Peter R., Lewis Sarah A., Napper C., and Clark Jess T. (2010), *Field Guide for Mapping Post-Fire Soil Burn Severity*, United States Department of Agriculture - Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-243, October 2010
- Pirulli M. (2005), *Numerical modelling of landslide runout, a continuum mechanics approach*, Tesi di Dottorato in Ingegneria Geotecnica, - Politecnico di Torino Italia
- Pirulli M. e Sorbino G. (2006), *Effetto della reologia sull'analisi della propagazione di flussi di detrito*, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006 - Pisa, 26-28 Giugno 2006
- Regione Piemonte - Direzione Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Montagna,Foreste, Protezione Civile, Trasporti e Logistica, *Fenomeni dissestivi in Valle di Susa (TO) del giugno 2018*, Relazione a supporto della dichiarazione di stato di emergenza ai sensi della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 26/10/2012 (G.U. n. 30 del 5/2/2013), Aggiornamento al 18/06/2018
- Regione Piemonte - Assessorato Ambiente, Energia, Risorse Idriche, Tutela Del Suolo, Lavori Pubblici, Protezione Civile, Tutela, Pianificazione e Vigilanza Parchi, *Rapporto sull'evento alluvionale del 13 - 16 ottobre 2000 - Parte II - Effetti sulle aree antropizzate: quadro preliminare*, Data aggiornamento: 23 ottobre 2000 http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/relazioni-tecniche/analisi-eventi/eventi-2000/2000ottobre-effetti-al-suolo-indice.pdf/at_download/file
- Regione Veneto - Direzione Regionale Foreste ed Economia Montana - Servizio Antincendi Boschivi – *Tipologie di incendio - Manuale di formazione di base in materia di incendi boschivi* - Edizione 2009 <https://www.regione.veneto.it/static/www/agricoltura-e-foreste/tipologiediincendioA5.pdf>
- Rickenmann D. (1999), *Empirical relationships for debris flow*, *Natural Hazard*, 19, pp 47-77.
- Savage S.B. and Hutter K. (1989), *The Motion of a Finite Mass of Granular Material down a Rough Incline*, *Journal of Fluid Mechanics*, 199, 177-215
- Scotton P and Deganutti A (1997), *Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments*. In: Chen C (ed) *Proceedings of the 1st. international conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment*, American Society of Civil Engineers, New York, pp 777–786
- Stoffel M., Tiranti D., Huggel C. (2014), *Climate change impacts on mass movements--case studies from the European Alps*, *Science of the Total Environment* 493, 1255-1266
- Stoof C.R, Ferreira A.J.D, Mol W., Van del Berg J., De Kort A., Drooger S., Slingerland E.C., Mansholt A.U., Ferreira C.S.S. and Ritsema C.J. (2014), *Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low-moderate severity fire*, *Geoderma* 239-240 (2015), pp.58-67
- Takahashi T. (2007), *Debris flow, Mechanics, Prediction and Countermeasures*, Ed. Taylor & Francis.
- Taylor A.B. and Schwarz H.E. (1952), *Unit- hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics*, *Transactions of American Geophysical Union*, Vol . 33, No. 2, pp.235-246.

- Taylor D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*, New York: J. Wiley and Sons; London: Chapman and Hall
- Tiranti D., Bonetto S., Mandrone G. (2008), *Quantitative basin characterization to refine debris-flow triggering criteria and processes: an example from the Italian western Alps*, *Landslides* (2008) 5:45-57
- Tiranti D., Cremonini R., Marco F., Gaeta A. R., and Barbero S. (2014), *The DEFENSE (DEbris Flows triggered by storms-Nowcasting System): an early warning system for torrential processes by radar storm tracking using a Geographic Information System (GIS)*. *Computer & Geosciences* 70, (2014), pp.96–109
- Tiranti D. and Deangeli C. (2015), *Modeling of debris flow depositional patterns according to the catchment and sediment source area characteristics*, *Frontiers in Earth Science* 3:8 · February 2015
- Tiranti D., Cremonini R., Asprea I. and Marco F. (2016), *Driving Factors for Torrential Mass-Movements Occurrence in the Western Alps*, *Frontiers in Earth Science* 4(8):1-13 February 2016
- Tiranti D., Cavalli M., Crema S., Zerbato M., Graziadei M., Barbero S., Cremonini R., Silvestro C., Bodrato G., Tresso F. (2016), *Semi-quantitative method for the assessment of debris supply from slopes to river in ungauged catchments*, *Science of Total Environment* 2016 Jun 1;554-555:337-48
- Varnes D. J. (1978.), *Slope movement types and processes*, In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33
- Venäläinen A., Korhonen N., Hyvärinen O., Koutsias N., Xystrakis F., Urbieta I. & Moreno J. (2013), *Temporal variations and change of forest fire danger in Europe in 1960-2012*, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. 1. 6291-6326. 10.5194/nhessd-1-6291-2013.
- Verdin K.L., Dupree J.A. and Elliott J.G. (2012), *Probability and volume of potential postwildfire debris flows in the 2012 Waldo Canyon Area near Colorado Springs, Colorado*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1158, 8p
- Voellmy A. (1955), *On the destructive force of avalanches*, SLF, Davos, Switzerland, 190pp.
- Watanabe M, Ike (1981), *Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima, Japan*. In: Erosion sediment transport measurement. Int Assoc Hydrol Florence Sci Publ 133:245–25
- Wieczorek G.F. and Glade T. (2005), *Climatic factors influencing occurrence of debris flows*, in: *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer- Verlag, Tiergartenstrasse 17, 69121 Heidelberg, Germany/Praxis
- Zhang S (1993), *A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flow, in China*. *Nat Hazards* 7:1–23

TUTTE LE IMMAGINI, ORIGINALI OD ELABORATE, GLI SCREENSHOTS DAL WEB, LA DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA, GLI ARTICOLI DAI GIORNALI ONLINE E LE CITAZIONI ORIGINALI, APPARTENGONO AI LEGITTIMI PROPRIETARI I QUALI SONO STATI ESPRESSAMENTE RICHIAMATI DI VOLTA IN VOLTA NEL TESTO SALVO ERRORI OD OMISSIONI INVOLONTARI. L'UNICO SCOPO DEL PRESENTE DOCUMENTO E' DI RAPPRESENTARE LA TESI FINALE DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE AL POLITECNICO DI TORINO. NON VI E' ALCUNO SCOPO DI LUCRO.

8. INDICI DELLE TABELLE E DELLE FIGURE

8.1 INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: statistiche degli eventi di frana e di inondazione con vittime nel periodo 1 gennaio – 31 dicembre 2018 (CNR IRPI, 2019).....	6
Figura 2: Statistiche degli eventi di frana e di inondazione con vittime nel periodo 1968-2017 (CNR IRPI, 2019).....	6
Figura 3: sistema DEFENSE – Arpa Piemonte (Tiranti et al., 2014)	10
Figura 4: mutamento del terreno e della vegetazione a seguito di un incendio (British Col. pamphlet).....	12
Figura 5: illustrazione degli effetti del fuoco sulla vegetazione, in superficie e sulle proprietà del terreno in profondità (Parsons A. et al, 2010)	14
Figura 6: localizzazione del comune di Bussoleno:	19
Figura 7: localizzazione del bacino Rio delle Foglie (linea gialla tratteggiata) all'interno del comune di Bussoleno (linea arancione).....	20
Figura 8: frazione San Lorenzo nel comune di Bussoleno (linea tratteggiata rossa).	20
Figura 9: deposito della colata detritica avvenuta il 07 giugno 2018 nel comune di Bussoleno	21
Figura 10: sorvolo con elicottero dell'area colpita dall'evento del 07 giugno 2018; in evidenza il flusso di fango e detriti che avanza in area di conoide (foto Santo La Ferlita studio Rosso – TO).....	22
Figura 11: sorvolo con elicottero dell'area dall'evento del 07 giugno 2018; in evidenza la costruzione gravemente danneggiata (freccia bianca) e le due costruzioni completamente distrutte (freccie nere) - (foto Santo La Ferlita studio Rosso – TO)	22
Figura 12: sorvolo con elicottero dell'area colpita dalla colata il 07 giugno 2018; in evidenza la direzione del flusso (freccia bianca) e il deposito di fango in conoide (linea tratteggiata) - (foto Santo La Ferlita studio Rosso – TO).....	23

- Figura 13: veduta aerea del deposito della colata due giorni dopo l'evento; in evidenza la vecchia bialera riemersa dopo il passaggio della massa fluida (foto scattata il 09 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Direzione Opere Pubbliche) . 24
- Figura 14: limiti laterali del deposito in prossimità del Catastale 1008: in evidenza tronchi e rami immersi nella matrice fangosa (foto scattata il 09 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Direzione Opere Pubbliche)..... 25
- Figura 15: Andamento giornaliero delle precipitazioni in media Valle di Susa nel 2018 rispetto alla norma climatica 1971-2000 (Dati ed elaborazione Arpa Piemonte - Rapporto evento del 07/06/2018)..... 26
- Figura 16: scarpate del bacino Comba delle Foglie; in evidenza l'erosione superficiale con formazione di *rills* (foto scattata il 09 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Dir. Opere Pubbliche) 28
- Figura 17: erosione di materiale lungo l'asta principale e denudazione del materiale grossolano sottostante (foto scattata il 08 giugno 2018 da Daniele Drago Regione Piemonte Dir. Opere Pubbliche) 29
- Figura 18: perimetrazione del deposito. In beige chiaro il materiale grossolano (ghiaia ciottoli e massi in matrice fine), in marrone scuro materiale fine (sabbioso-limoso con ghiaia e ciottoli). Perimetrazione a cura di Arpa Piemonte. Sfondo cartografico: Base Cartografica di Riferimento Annuale 2015 raster b/n 1:10.000. 30
- Figura 19: perimetrazione del deposito. In beige chiaro il materiale grossolano (ghiaia ciottoli e massi in matrice fine), in marrone scuro materiale fine (sabbioso-limoso con ghiaia e ciottoli). Perimetrazione a cura di Arpa Piemonte. Sfondo cartografico: Ortofoto Ambito progetto Europeo RISK NAT..... 31
- Figura 20: area della Val Susa investita dall'incendio dell'ottobre 2017 (area rossa)e bacino Rio delle Foglie (linea tratteggiata gialla). Perimetrazione dell'incendio a cura del Nucleo tutela forestale, ambientale e agroalimentare dei Carabinieri (Arpa Piemonte – Rapporto evento del 07/06/2018)..... 35
- Figura 21: veduta di fiamme alte una cinquantina di metri, del 29 ottobre, nelle pinete di Mompantero, alla base del Rocciamelone, sotto raffiche di foehn a 90 km/h (f. Luca Giunti – tratta dal sito <http://www.nimbus.it/clima/2017/171101SiccitaIncendiNordOvest.htm>)..... 36
- Figura 22: le fiamme sull'alta montagna di Bussoleno (Davide Petrizzelli – tratta dal sito <http://www.torinotoday.it/cronaca/incendi-boschivi-24-ottobre-2017.html>)..... 37

Figura 23: Carta della severità degli incendi e delimitazione dei bacini interessati (Regione Piemonte – Rapporto sull’evento Giugno 2018).....	37
Figura 24: massima raffica giornaliera nel periodo 1 ott - 5 nov del 2017 – nelle stazioni di rilevamento ubicate in Val di Susa (Arpa P. Rapporto tecnico su incendi boschivi 2017).....	39
Figura 25: versanti colpiti dall’incendio sette mesi dopo l’evento	40
Figura 26: tronchi carbonizzati lungo il pendio (foto scattata il 05 giugno 2018).....	41
Figura 27: radici carbonizzate sette mesi dopo l’evento incendiario; in evidenza il terreno modificato e indebolito dall’incendio, ed eroso dalle piogge con roccia sottostate denudata (foto scattata il 05 giugno 2018).	41
Figura 28: base dei tronchi bruciata e terreno coperto di ceneri (foto del 05 giugno 2018). ...	42
Figura 29: fusti carbonizzati e terreno eroso; in questa zona anche il manto erboso fatica a ricrescere (foto scattata il 05 giugno 2018).	42
Figura 30: un leggero strato d’erba ricopre il terreno ma i segni dell’erosione sono evidenti.	43
Figura 31: ripresa dall’elicottero in data 07/05/18: in evidenza i boschi colpiti dall’incendio (foto Santo LaFerlita studio Rosso – Torino).....	43
Figura 32: dettaglio del DEM – ad ogni cella di 5x5 metri è associato un valore di quota topografica.....	45
Figura 33: carta dell’acclività del bacino Rio delle Foglie, espressa in percentuale (elaborata con QGis dal DEM 5m).....	46
Figura 34: Distribuzione di frequenza delle pendenze - classi del 2%	47
Figura 35: curva ipsografica e altitudine media del bacino – calcolata dal DEM 5m	48
Figura 36: reticolo idrografico (blu) del bacino Rio delle Foglie (linea tratteggiata gialla)....	48
Figura 37 : profilo altimetrico dell’incisione principale del bacino (Arpa Piemonte - RAPPORTO EVENTO DEL 07/06/2018).....	49
Figura 38: carta forestale da PFT 2000 ritagliata sulla Comba delle Foglie (Reg. Piemonte). 50	
Figura 39: Quadro generale dei dissesti e classificazione del bacino (Arpa Piemonte - RAPPORTO EVENTO DEL 07/06/2018).....	52
Figura 40: Conoidi Piemonte - Caratterizzazione bacini - severità fenomeno atteso con tempo di ritorno (paragrafo 8.1.3 - Arpa Piemonte – Conoidi alluvionali in Piemonte). In evidenza il bacino di Rio delle Foglie (linea tratteggiata gialla).....	56

Figura 41: mappa catastale storica del comune di Bussoleno (al centro): in evidenza il Rio Reforno con linea blu scuro, e la presa d'acqua dal Rio Moletta verso le borgate con linea azzurro chiaro.	58
Figura 42: stima del volume detritico potenzialmente mobilizzabile (Rel. Geol. PRGC).....	61
Figura 43: Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica - Frazione San Lorenzo ZONA NORD.....	64
Figura 44: Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica - Frazione San Lorenzo ZONA CENTRO.....	64
Figura 45: Piano Regolatore - Variante Parziale n.7 - Carta di sintesi e della pericolosità geomorfologica - Frazione San Lorenzo ZONA SUD.....	65
Figura 46: classificazione della pericolosità PRGC e perimetrazione del deposito (Regione P. – Fenomeni dissestivi in Valle di Susa)	66
Figura 47: localizzazione delle particelle catastali esaminate durante il sopralluogo del 28 febbraio 2019; in evidenza il deposito della colata di fango (nei colori marroni chiaro e scuro) e il numero delle particelle catastali (dettagli a destra)	68
Figura 48: localizzazione delle misure in sito effettuate durante il sopralluogo del 28/02/19; in evidenza i numeri identificativi delle punti rilevati.....	69
Figura 49: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (1) – Particella 377	70
Figura 50: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (2) – Particella 993	71
Figura 51: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (3) – Particella 994	72
Figura 52: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (4) – Particella 1008	72
Figura 53: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (5) – Particella 935	73
Figura 54: rilievo in campo delle altezze del deposito e dei danni (6) – Particella 935	73
Figura 55: confronto dell'estensione dei due DEM forniti da Arpa Piemonte; nel rettangolo blu l'area di interesse per la simulazione, con linea tratteggiata in nero il bacino Rio delle Foglie	80
Figura 56: estrazione delle quote dal DEM 5 metri su maglia di punti regolari (dettaglio)	80
Figura 57: innesco concentrato della massa instabile lungo l'asta fluviale principale (area rossa)	81
Figura 58: pendio indefinito di terreno omogeneo con filtrazione parallela al pendio (immagine tratta dal sito https://civilengineeringbible.com/subtopics.php?i=68)	83
Figura 59: definizione delle celle instabili (in nero) nell'intero bacino (linea gialla) nel bacino ridotto (linea rossa). Nell'ordine da sx a dx: celle instabili bacino intero a 0sec	

(stato iniziale) e simulazione a 400sec, celle instabili bacino ridotto a 0sec e simulazione a 400sec (h_{max}); in evidenza (freccia rossa) la fuoriuscita del materiale dal bacino.....	85
Figura 60: bacino ridotto finale per la simulazione con innesco distribuito (linea verde).....	86
Figura 61 : rappresentazione degli edifici (viola) nel modello implementato su RASH ^{3D} . Punti della maglia regolare 5x5 metri con valore di quota da DEM (rossi) e punti con assegnazione di quota aggiuntiva di 20 metri per la presenza di edifici (gialli). In evidenza la costruzione con soli tre punti gialli all'interno. Sullo sfondo l'ortofoto AGEA 2015. A sinistra il modello in vista 3D e il dettaglio della rappresentazione degli edifici in RASH ^{3D}	87
Figura 62: parametri reologici <i>best-fit</i> per back-analyses (Hungar O. and Evans S.G.,1996)..	88
Figura 63: risultato della modellazione numerica al tempo 0 secondi; in evidenza innesco con massa concentrata di circa 17000 metri cubi (area blu).	89
Figura 64: risultato della modellazione numerica al tempo 400 secondi con i parametri di Tabella 11.	90
Figura 65: numeri catastali investigati nell'output di Rash. In evidenza la linea rossa disegnata accanto all'edificio lungo la quale è stata eseguita l'estrazione del dato. Sullo sfondo la simulazione con attrito di $5,71^\circ$ e turbolenza di 500 m/s^2	92
Figura 66: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . In marrone il valore di altezza massima (scuro <1m, chiaro >1m).....	96
Figura 67: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 . In marrone il valore di altezza del deposito (scuro <1m, chiaro >1m). A sinistra i valori di altezza massima e a destra il deposito al tempo di 400 secondi (<i>cut-off</i> inferiore pari a 20 cm).....	97
Figura 68: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 377 in funzione della turbolenza. Coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$ e tempo di analisi 400 secondi. Linea di indagine visibile in Figura 61.....	98
Figura 69: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 993 in funzione della turbolenza. Coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$ e tempo di analisi 400 secondi. Linea di indagine visibile in Figura 61.....	99
Figura 70: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 935 in funzione della turbolenza. Coefficiente di attrito pari $2,86^\circ$ e tempo di analisi 400 secondi. Linea di indagine visibile in Figura 61.....	99

- Figura 71: interpolazione dei dati misurati in campo di Tabella 9 al paragrafo 3.6. In evidenza i punti rilevati il 28 febbraio 2019 (punti gialli). Questo modello è stato scartato in favore del confronto diretto con i singoli punti rilevati nel febbraio 2019. 101
- Figura 72: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 377 in funzione del coefficiente di attrito. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s^2]. H_{max} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 102
- Figura 73: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 993 in funzione del coefficiente di attrito. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s^2]. H_{max} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 102
- Figura 74: altezza massima del deposito in corrispondenza del catastale 935 in funzione del coefficiente di attrito. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in [m/s^2]. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 103
- Figura 75: sopralluogo del 28 febbraio 2019; in evidenza la vecchia bialéra riemersa dopo il passaggio della massa fluida, che ne ha favorito il deflusso in direzione nord-sud. 104
- Figura 76: modifiche apportate al DTM 5m. In evidenza le case distrutte in viola, la bialéra in beige, le strade con linea nera. 105
- Figura 77: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza $500 m/s^2$. In marrone il valore di altezza massima del deposito (scuro $<1m$, chiaro $>1m$). Confronto tra modello originale (sx) e modificato con eliminazione edifici distrutti e introduzione della bialéra (dx). In evidenza (zona tratteggiata) la linea di deflusso principale..... 106
- Figura 78: lato sud del Catastale 215 dopo l'evento franoso (foto Santo La Ferlita studio Rosso)..... 107
- Figura 79: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza $500 m/s^2$. Confronto tra modello originale (sx) e modificato con eliminazione edifici distrutti e introduzione della bialéra (dx). In evidenza (freccia rossa) l'area investita dal flusso di fango (lato sud catastale 215). 107
- Figura 80: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400

- secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 109
- Figura 81: Catastale 713 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 109
- Figura 82: Catastale 215 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 110
- Figura 83: Catastale 935 - altezza massima del deposito in funzione del coefficiente di attrito e delle modifiche al DTM (C_B_S - Case Bialéra Strade). Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza pari a 500 m/s^2 . H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici..... 110
- Figura 84: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione della distanza di rilievo del dato numerico dall'edificio. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito pari a $5,71^\circ$ e turbolenza pari a 500 m/s^2 112
- Figura 85: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione della distanza di rilievo del dato numerico dall'edificio. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito pari a $2,86^\circ$ e turbolenza pari a 500 m/s^2 112
- Figura 86: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Altezze istantanee del deposito al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 10 cm. 114
- Figura 87: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Altezza massima raggiunta dalla colata al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 10 cm..... 115
- Figura 88: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Velocità istantanea al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 1 m/s. 116
- Figura 89: risultato della simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. Velocità massima raggiunta al tempo 400 secondi. *Cut-off* inferiore a 1 m/s. 117
- Figura 90: comparazione tra la perimetrazione del deposito post-evento a cura di Arpa Piemonte e il risultato della simulazione (altezza massima del deposito a 400

- secondi con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. *Cut-off* inferiore a 20 cm). 118
- Figura 91: comparazione tra la perimetrazione del deposito post-evento a cura di Arpa Piemonte e il risultato della simulazione (altezza massima del deposito a 400 secondi con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza 500 m/s^2 , modello C_B_S. *Cut-off* inferiore a 50 cm). Principali linee di deflusso (freccie nere). 119
- Figura 92: fotografia dell'area interessata dall'evento di debris-flow a febbraio 2019 (otto mesi dopo l'evento. In evidenza i muretti di recinzione trasversali alla direzione principale di deflusso che hanno contribuito ad arrestare l'avanzata della colata (freccie rosse). Parte di muretto danneggiato (freccia blu). Il bacino idrografico Comba delle Foglie (freccia bianca). A sinistra il catastale 935. A destra i catastali 713 e 1008. 121
- Figura 93: esempio del contributo della morfologia locale a piccola scala (muretti di recinzione) nella variazione della dinamica della colata detritica in zona a pendenza ridotta. Confronto tra evento simulato ed immagini fotografiche dell'area (subito dopo l'evento e otto mesi dopo l'evento). 122
- Figura 94: innesco distribuito ID al tempo 0 secondi. Massa instabile presente nel bacino ridotto (linea tratteggiata verde) 123
- Figura 95: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[\text{m/s}^2]$. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici. 124
- Figura 96: Catastale 713 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[\text{m/s}^2]$. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici. 125
- Figura 97: Catastale 215 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[\text{m/s}^2]$. H_{deposito} corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici. 125
- Figura 98: Catastale 935 - altezza massima del deposito in funzione del tipo di innesco (IC concentrato – ID distribuito) Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e

turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.....	126
Figura 99: confronto tra innesco concentrato IC (sx) e distribuito ID (dx). Simulazione con attrito $2,86^\circ$ e turbolenza $500 m/s^2$, modello C_B_S. Velocità massima raggiunta al tempo 400 secondi. <i>Cut-off</i> inferiore a 1 m/s.	127
Figura 100: Catastale 215 - altezza massima del deposito e altezza istantanea in funzione della durata di analisi (400 secondi vs 900 secondi). Innesco di tipo distribuito. Attrito $2,86^\circ$ e turbolenza $500m/s^2$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.	127
Figura 101: innesco distribuito ID al tempo di analisi di 400 secondi. Altezze massime raggiunte dal debris-flow. <i>Cut-off</i> inf. a 5cm.....	128
Figura 102: condensatore di sedimenti temporaneo lungo l'asta principale.....	129
Figura 103: calcolo delle celle instabili con TRIGRS - Baum et al., 2008 (estratto)	130
Figura 104: Catastale 1008 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.	132
Figura 105: Catastale 713 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.	132
Figura 106: Catastale 215 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.	133
Figura 107: Catastale 935 - altezza massima del deposito in funzione del volume di innesco. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito in [deg] e turbolenza in $[m/s^2]$. $H_{deposito}$ corrisponde alle altezze delle tracce rilevate sulle pareti degli edifici.	133
Figura 108: confronto tra il rapporto tra i volumi di innesco $[m^3/m^3]$ e il rapporto tra le altezze massime misurate nei Catastali $[m/m]$. Tempo di analisi 400 secondi. Attrito $2,86^\circ$ e turbolenza $500m/s^2$	134
Figura 109: Catastale 1139 edificio distrutto dalla colata – vista lato sud (foto inserita nella richiesta danni allo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).....	136
Figura 110: Catastale 1139 edificio distrutto dalla colata – vista lato nord (foto scattata il 21 maggio 2018 da Santo La Ferlita - Studio Rosso – Torino).....	137

Figura 111: esempio di <i>casotto</i> (o <i>ciabot</i>) tipico del bussolenese (foto d'archivio fornita dallo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).	137
Figura 112: foto aerea dell'apice di conoide; in evidenza – area tratteggiata in rosso- i resti sul terreno del catastale 1139 (foto di Daniele Drago Regione Piemonte Direzione Opere Pubbliche).....	138
Figura 113: foto dei resti sul terreno del catastale 1139 dopo il passaggio della colata detritica– vista lato ovest (foto inserita nella richiesta danni allo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno)	138
Figura 114: catastale 1139. Linea di estrazione dei dati di velocità e altezza dal modello numerico.....	140
Figura 115: pianta del catastale 1139 – estratto dalla pratica edilizia per di rifacimento del tetto, anno 1953 (pratica d'archivio fornita dallo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).....	143
Figura 116: prospetto del catastale 1139 – estratto dalla pratica edilizia per di rifacimento del tetto, anno 1953 (pratica d'archivio fornita dallo Sportello Edilizia del Comune di Bussoleno).....	143
Figura 117: ubicazione della rete debri-flow (estratto da Comune di Bussoleno – Progetto Definitivo-Esecutivo – Planimetria generale di progetto). Con linea rossa il tratto terminale dell'area con innesco concentrato nella simulazione del capitolo 4. ..	148
Figura 118: ubicazione dei bacini di accumulo (estratto da Comune di Bussoleno – Progetto Definitivo-Esecutivo – Planimetria generale di progetto). Con linea rossa le abitazioni in apice di conoide coinvolte nell'evento di colata detritica del 07 giugno 2018 (Catastali 933, 377,1139)	149
Figura 119: ubicazione delle vasche di laminazione (estratto da Comune di Bussoleno – Progetto Definitivo-Esecutivo – Corografia). Con linea tratteggiata blu l'area coinvolta dall'evento di colata detritica del 07 giugno 2018.	149
Figura 120: bacino di accumulo in apice di conoide da 7000 m ³ . Vista verso valle. (foto scattata il 28/02/2019)	150
Figura 121: bacino di accumulo supplementare da 6000 m ³ . Vista verso valle. In evidenza i catastali 993 e 377 che dovranno essere demoliti (foto scattata il 28/02/2019)..	150
Figura 122: canale di scarico del bacino di accumulo supplementare. Vista verso monte. In evidenza i rilevati dei due bacini di accumulo (foto scattata il 28/02/2019).....	151
Figura 123: vasca di laminazione a monte (foto scattata il 28/02/2019)	151

Figura 124: Piano straordinario di interventi per il ripristino del territorio. Funzioni prevalenti del territorio. Nel riquadro la Comba delle Foglie. 154

Figura 125: Piano straordinario di interventi per il ripristino del territorio. Classe di severità dell'incendio. Nel riquadro la Comba delle Foglie. 154

Figura 126: Piano straordinario di interventi per il ripristino del territorio. Priorità di intervento. Nel riquadro la Comba delle Foglie. 155

8.2 INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: classificazione basata sul tipo di movimento e sul materiale coinvolto (Varnes, 1978).....	3
Tabella 2: classificazione della magnitudo della frana basata sul volume (Fell, 1994).....	4
Tabella 3: classificazione dei fenomeni franosi secondo Hungr et al. (2001)	4
Tabella 4: classificazione basata sulle velocità (Cruden & Varnes, 1996)	5
Tabella 5: carta forestale del bacino Comba delle Foglie – tipologia di copertura Gruppo	51
Tabella 6: carta forestale del bacino Comba delle Foglie – tipologia di copertura Categoria .	51
Tabella 7: tempo di ritorno associato alla soglia di precipitazione di innesco, per le classi di bacino in ciascun sistema vallivo del Piemonte (Tiranti et al., 2014)	53
Tabella 8:Caratteristiche delle tre classi di bacino nelle Alpi occidentali (Tiranti et al., 2014)	53
Tabella 9: rilievi effettuati durante il sopralluogo del 28/02/29; in evidenza lo spessore del deposito e l'altezza massima raggiunta dagli schizzi della massa durante il transito - misurati a partire da terra.....	70
Tabella 10: parametri meccanici del terreno e volume finale di materiale instabile.....	86
Tabella 11: combinazioni di primo tentativo dei parametri reologici e reologia di Voellmy..	89
Tabella 12: risultati della modellazione numerica per Catastale 935 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).	93
Tabella 13: risultati della modellazione numerica per Catastale 1008 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).	93
Tabella 14: risultati della modellazione numerica per Catastale 713 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).	94
Tabella 15: risultati della modellazione numerica per Catastale 215 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).	94
Tabella 16: risultati della modellazione numerica per Catastale 377 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).	95

Tabella 17: risultati della modellazione numerica per Catastale 377 (valori massimi letti lungo la linea rossa disegnata accanto all'edificio). Altezza massima in metri (in alto) e velocità massima in metri al secondo (in basso).	95
Tabella 18: formule per il calcolo della spinta di una colata detritica da diversi autori	140
Tabella 19: calcolo del peso della struttura del catastale 1139	142
Tabella 20: costi sostenuti per gli interventi di ripristino e per la progettazione e costruzione delle opere passive di mitigazione (alla data di redazione del presente elaborato)	152
Tabella 21: costi di ripristino per interventi attivi di mitigazione del rischio per il Comune di Bussoleno in migliaia di euro	156

9. ALLEGATI

9.1 ALLEGATO 1 – SCHEDE METADATI SERVIZI WEB

9.1.1 Catasto – Fabbricati - Servizio WMS Agenzia delle Entrate

- <https://www.agenziaentrate.gov.it/wps/content/nsilib/insi/schede/fabbricatiterreni/consultazione+cartografia+catastale/servizio+consultazione+cartografia>
- <https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php>

Informazioni dalla sorgente	
Nome Sorgente	Fabbricati contextualWMSLegend=0&crs=EPSG:4258&dpiMode=7&featureCount=10&format=image/png&layers=fabbricati&styles=&url=https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php
Sorgente	contextualWMSLegend=0&crs=EPSG:4258&dpiMode=7&featureCount=10&format=image/png&layers=fabbricati&styles=&url=https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php
SR	EPSG:4258 - ETRS89 - Geografico
Estensione	6.0000000000000009,35.000000000000000 : 19.000000000000000,48.0000000000000711
Unità	gradi
Larghezza	n/d
Altezza	n/d
Tipo di dato	Impossibile determinare il tipo di dati del raster.
Informazioni WMS	Layer selezionati Altri layer
Proprietà del server	
Proprietà	Valore
Versione WMS	1.3.0
Titolo	Cartografia Catastale
Riassunto	Agenzia delle Entrate - Servizio di consultazione della cartografia catastale WMS. Le informazioni sono allineate con la banca dati cartografica del Catasto, costantemente aggiornata in modalità automatica mediante gli atti tecnici predisposti dai professionisti abilitati. Licenza CC-BY-NC-ND. L'Agenzia è l'amministrazione titolare dei dati. La citazione della titolarità è sempre obbligatoria in caso d'uso.
Parole chiave	Cartografia catastale Particelle catastali Pianificazione del territorio e catasto Cadastral parcels infoMapAccessService
Risorsa online	-
Persona di riferimento	Agenzia delle Entrate – Direzione Centrale Servizi Catastali, Cartografici e di Pubblicità Immobiliare Proprietario Agenzia delle Entrate
Canoni	CC-BY-NC-ND
Vincoli di accesso	Dato pubblico
GetCapabilitiesUrl	https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php
GetMapUrl	https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php?language=ita&
GetFeatureInfoUrl	https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php?language=ita&
GetLegendGraphic	https://wms.cartografia.agenziaentrate.gov.it/inspire/wms/ows01.php?language=ita&version=1.3.0&service=WMS&request=GetLegendGraphic&sld_version=1.1.0&layer=fabbricati&format=image/png&STYLE=default&
Formati immagine	image/png image/jpeg
Interroga formati	text/html text/plain application/vnd.ogc.gml
Conteggio layer	11

Proprietà		Layer selezionati		
Nome	Valore	Nome	Format	URL
Nome	fabbricati			
Visibilità	Visibile			
Titolo	Fabbricati			
Riassunto	I fabbricati - e ciascuna porzione di essi che avendo caratteristiche architettoniche e costruttive proprie, costituisce distinta particella edilizia - si rappresentano con le linee corrispondenti alla loro proiezione sul piano orizzontale. Tale linea è continua e chiusa per le parti di fabbricato nelle quali la proiezione coincide con il loro perimetro esterno sul terreno.			
Può interrogare	No			
Può essere trasparente	Sì			
Può ingrandire	Sì			
Conteggio a cascata	0			
Larghezza fissa	0			
Altezza fissa	0			
Disponibile in SR	EPSG:6706			
Disponibile in SR	EPSG:4258			
Disponibile in SR	EPSG:25832			
Disponibile in SR	EPSG:25833			
Disponibile in SR	EPSG:25834			
Disponibile nello stile		Nome	default	
		Titolo	default	
		Riassunto		
		LegendURLs	Format	URL
			image/png	https://wms.cartografia.agenziaentrato.gov.it/inspire/wms/ows01.php?language=ita&version=1.3.0&service=WMS&request=GetLegendGraphic&sld_version=1.1.0&layer=fabbricati&format=image/png&STYLE=default

9.1.2 Carta forestale e altre coperture del territorio (2000)

<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/index.jsp>

ENTE PA			
Ente	Regione Piemonte (r_piemon)		
IDENTIFICAZIONE			
Titolo	Carta forestale e altre coperture del territorio (2000)		
Formato di presentazione	Mappa digitale: Mappa in formato raster o vettoriale		
Identificatore	r_piemon:b0409b29-a511-4667-a4a4-3b15af266eae		
Id livello superiore	r_piemon:b0409b29-a511-4667-a4a4-3b15af266eae		
Descrizione	Dati geografici relativi alla Carta forestale e altre coperture del territorio, realizzata da IPLA sulla base dei dati raccolti nel corso degli studi per i Piani Forestali Territoriali della Regione Piemonte (convenzionalmente aggiornati all'anno 2000). I livelli geografici consultabili sono: carta forestale e altre coperture del territorio, carta forestale, altre coperture, superfici boscate, formazioni lineari.		
Tipo di rappresentazione spaziale	Dati vettoriali: I dati vettoriali sono utilizzati per rappresentare dati territoriali		
Lingua della risorsa	Italiano		
Set dei caratteri	UTF8: Formato di trasferimento di UCS a dimensione variabile a 8 bit, basato sullo standard ISO/IEC 10646		
Categoria Tematica			
Tema	Biota		
Punto di contatto			
Nome dell'Ente	/Enti vari/IPLA - Istituto per le Piante da Legno e l'Ambiente	E-mail	ipla@ipla.org
Ruolo	Autore: Gruppo autore della risorsa	Risorsa online	Sito web (http://www.ipla.org/)
Punto di contatto			
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1807A - Foreste	E-mail	foreste@regione.piemonte.it
Ruolo	Punto di contatto: Soggetto che può essere contattato per avere informazioni o acquisire la risorsa	Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/foreste/cms/)
Scala equivalente			
Denominatore	10000		
QUALITÀ E VALIDITÀ			
Livello di qualità	Dataset: Le informazioni si applicano ad un dataset		
Genealogia	Dati raccolti nel corso degli studi per i Piani Forestali Territoriali della Regione Piemonte (convenzionalmente aggiornati all'anno 2000)		
Accuratezza posizionale			
Unità di misura	m		
Valore	4		
Conformità			
Titolo	REGOLAMENTO (UE) N. 1089/2010 DELLA COMMISSIONE del 23 novembre 2010 recante attuazione della direttiva 2007/2/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'interoperabilità dei set di dati territoriali e dei servizi di dati territoriali		
Data	2010-12-08		
Tipo data	Pubblicazione: Data che identifica quando la risorsa è stata pubblicata		
Grado di conformità:	conforme		
SISTEMA DI RIFERIMENTO			
Identificatore			
Testo	WGSS4/UTM 32N		
DISTRIBUZIONE DEI DATI			
Formato	Vettoriale (SHP)		
Versione formato	N.A.		
Distributore			
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1807A - Foreste		
E-mail	foreste@regione.piemonte.it		
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/foreste/cms/)		
Ruolo	Distributore: Soggetto che distribuisce la risorsa		
Risorsa on-line			
Risorsa online	Applicativo web con la sezione di scarico dati in oggetto (External-Link: http://www.sistemapiemonte.it/popala/authenticator/LoginSisPieAction.do)		
Risorsa on-line			
Mappa interattiva	Carta forestale e altre coperture del territorio (2000) - Geoservizio WMS (OGC-WMS Server: http://geomap.reteunitaria.piemonte.it/ws/vtmonfor/rp-01/cartaforwms/wms_vtmonfor_cartafor?)		
Risorsa on-line			
Risorsa online	Carta forestale e altre coperture del territorio (2000) - Geoservizio WFS (http://geomap.reteunitaria.piemonte.it/ws/vtmonfor/rp-01/cartaforwfs/wfs_vtmonfor_cartafor?)		

9.1.3 Arpa Piemonte – Conoidi alluvionali in Piemonte

http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalserver_arpa/catalog/search/resource/details.page?uuid=ARLPA_TO%3A07.03.19-D_2014-09-19-14%3A45&title=Arpa%20Piemonte%20-%20Conoidi%20alluvionali%20in%20Piemonte

Arpa Piemonte - Conoidi alluvionali in Piemonte

Informazioni sui Metadati

Identificatore del File: ARLPA_TO:07.03.19-D_2014-09-19-14:45
 Id file precedente: ARLPA_TO:07.03.19-D_2014-09-19-14:45
 Livello gerarchico: Dataset
 Data di creazione dei Metadati: 2011-03-25
 Lingua dei Metadati: Italiano
 Nome dello Standard: DM - Regole tecniche RNDT
 Versione dello Standard: 10 novembre 2011

Responsabile dei Metadati

Nome dell'Ente: Arpa Piemonte
 Ruolo: Punto di contatto

Informazioni per contattare l'Ente

Sito web: <http://www.arpa.piemonte.it>
 Telefono: 011 19680111
 E-mail: webgis@arpa.piemonte.it

Identificazione dei dati

Titolo: Arpa Piemonte - Conoidi alluvionali in Piemonte

Descrizione: Cartografia morfologica "Conoidi alluvionali" in Piemonte in scala 1:10.000, corredata dalle informazioni contenute nell'"Archivio conoidi" (caratteristiche generali dell'apparato, posizione rispetto alla valle principale, evoluzione del conoide in senso longitudinale, rapporti con altri apparati, informazioni disponibili sui fenomeni torrentizi che si sono verificati in epoca storica) e dalla "Caratterizzazione bacini" di alimentazione dal punto di vista morfometrico e litologico. L'ambito di analisi copre i rilievi alpini dalla Valle Ossola (VCO) all'alta Valle Tanaro nonché i rilievi appenninico-collinari piemontesi (fino alla Valle Scrivia - AL). Lo strumento d'indagine consiste principalmente nella foto-interpretazione del Volo Regione Piemonte Alluvione 2000 e nell'analisi in ambiente GIS delle Ortoimmagini Terraltaly IT2000 - aggiornamento 2007, integrate da speditivi rilievi di terreno

Data di creazione: 2010-11-03
 Data di pubblicazione: 2010-11-03
 Data di revisione: 2012-12-31
 Formato di presentazione: Mappa digitale
 Identificatore: ARLPA_TO:07-03-19
 Id livello superiore: ARLPA_TO:07-03-19
 Lingua: Italiano

Altri dettagli e informazioni supplementari

Informazioni supplementari: http://webgis.arpa.piemonte.it/w-metadoc/geo_dissesto/conoidi_piemonte_descrizione_attributi.pdf
 supplementari: http://www.risknat-alcotra.org/ma/allegati/atlante-conoidi-piemonte-introduzione-def_1025.pdf

Rappresentazione e risoluzione spaziale

Tipo di rappresentazione spaziale: Dati vettoriali
 Sistema di Riferimento: WGS84/UTM 32N
 Scala equivalente 1: 10000

<div data-bbox="194 197 596 510"> <p>Responsabile e Contatti per i dati</p> <p>Responsabile della Risorsa</p> <p>Nome dell'Ente: Arpa Piemonte Ruolo: Proprietario</p> <p>Informazioni per contattare l'Ente</p> <p>Sito http://www.arpa.piemonte.it web: http://www.arpa.piemonte.it Telefono: 011 19680111 E-mail: webgis@arpa.piemonte.it</p> </div>
<div data-bbox="194 533 596 819"> <p>Punto di contatto</p> <p>Nome dell'Ente: Arpa Piemonte Ruolo: Punto di contatto</p> <p>Informazioni per contattare l'Ente</p> <p>Sito http://www.arpa.piemonte.it web: http://www.arpa.piemonte.it Telefono: 011 19680111 E-mail: webgis@arpa.piemonte.it</p> </div>
<div data-bbox="194 875 1406 1391"> <p>Qualità dei dati</p> <p>Livello: Dataset</p> <p>Storia Per la realizzazione della cartografia morfologica di conoidi e bacini di alimentazione e dell'archivio informativo generale sugli apparati sono state utilizzate del l'analisi stereoscopica di coppie di fotografie aeree (Compagnia Riprese Aeree, Parma, Volo post alluvione ottobre 2000, lotto Nord 2000-2001; Luigi Rossi, dato: Brescia, Volo post alluvione 2000, lotto Sud 2000) e l'analisi di immagini ortorettificate (Ortoimmagini Terraltaly IT2000 aggiornamento 2007); localmente sono state utilizzate anche altre riprese aeree, scattate tra il 1954 e il 2008, e sono stati effettuati speditivi controlli tramite rilevamenti sul terreno. Le informazioni storiche su eventi e danni pregressi sono estratte dalla Banca Dati di Arpa che contiene informazioni a partire dal XV secolo. La caratterizzazione dei bacini deriva principalmente da analisi in ambiente GIS</p> <p>Accuratezza posizionale</p> <p>Unità di misura: m Valore: 4</p> <p>Conformità (INSPIRE)</p> <p>Titolo: Specifiche Dati INSPIRE Data: 2007-04-25 Tipo data: publication Descrizione: Fare riferimento alle specifiche indicate</p> </div>
<div data-bbox="194 1429 1406 1839"> <p>Distribuzione dei dati</p> <p>Accesso on-line</p> <p>Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/rest/services/geologia_e_dissesto/Conoidi_alluvionali_in_Piemonte/MapServer Protocollo: Map Service REST</p> <p>Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/w-metadoc/Download/conoidi_piemonte.zip Protocollo: Download</p> <p>Risorsa on line: http://marcopolo.arpa.piemonte.it/ags101free/services/geologia_e_dissesto/Conoidi_alluvionali_in_Piemonte/MapServer/WMServer Protocollo: Web Map Service 1.3.0</p> <p>Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/services/geologia_e_dissesto/Conoidi_alluvionali_in_Piemonte/MapServer/WFSserver Protocollo: Web Feature Service 1.1.0</p> </div>


9.1.4 AGEA 2015 – Ortofoto RGB - Geoservizi WMS E WMTS

<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/?sezione=catalogo>

ENTE PA	
Ente	Regione Piemonte (r_piemon)

IDENTIFICAZIONE	
Titolo	AGEA 2015 - Ortofoto RGB - Geoservizi WMS e WMTS
Identificatore	r_piemon:0281f0a4-cdf3-4660-8418-5ef2e67d2d18_resource
Descrizione	<p>I geoservizi WMS e WMTS AGEA 2015 permettono la visualizzazione delle ortofoto a colori del volo eseguito dal Consorzio TeA nell'estate del 2015 sul Piemonte per conto di AGEA (Agenzia per le erogazioni in agricoltura).</p> <p>Le ortofoto hanno risoluzione al 50x50 cm2 nelle zone montane alpine e 20x20 cm2 nelle zone di pianura e appenniniche.</p> <p>Ortofoto 20cm / Ortofoto 50cm ©2015 Consorzio TeA - Tutti i diritti riservati.</p>
Data	
Data	2017-11-22
Tipo data	Creazione: Data che identifica quando la risorsa è stata creata
Responsabile	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1613A - Sistema informativo territoriale e ambientale
Ruolo	Proprietario: Soggetto proprietario della risorsa
E-mail	cartografico@regione.piemonte.it
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/territorio/cartografia/index.htm)
Responsabile	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte
Ruolo	Proprietario: Soggetto proprietario della risorsa
E-mail	info-geoportale@regione.piemonte.it
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it)
Punto di contatto	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1613A - Sistema informativo territoriale e ambientale
Ruolo	Punto di contatto: Soggetto che può essere contattato per avere informazioni o acquisire la risorsa
E-mail	cartografico@regione.piemonte.it
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/territorio/cartografia/index.htm)

IDENTIFICAZIONE DEI SERVIZI	
Tipo di aggancio	Strettamente accoppiati: Strettamente accoppiati: dati associati
Nome	view
Autore di riferimento	www.w3c.org
Operazioni contenute	
Nome dell'operazione	GetMap
DCP (Distributed Computing Platforms)	Servizi Web: DCP is WebServices
Punto di connessione	
Risorsa online	Servizio WMTS (http://niger3.csi.it/mapproxy/service?REQUEST=GetCapabilities&service=WMTS)
Punto di connessione	
Mappe interattive	Servizio WMS (OGC-WMS Server: http://niger3.csi.it/mapproxy/service?REQUEST=GetCapabilities&service=WMS)

DISTRIBUZIONE DEI DATI	
Formato	OGC:WMS
Versione formato	OGC:WMS-1.3.0
Risorsa on-line	
Mappe interattive	repp_agea_2015 (OGC-WMS Server: http://niger3.csi.it/mapproxy/service?)
Vista in Google Earth	repp_agea_2015 
Risorsa on-line	
Risorsa online	WMTS (http://niger3.csi.it/mapproxy/service?REQUEST=GetCapabilities&service=WMTS)

METADATI	
Identificatore del file	r_piemon:0281f0a4-cdf3-4660-8418-5ef2e67d2d18
Lingua dei metadati	Italiano
Nome dello Standard	DM - Regole tecniche RNDT
Versione dello standard	10 novembre 2011
Set dei caratteri dei metadati	UTF8: Formato di trasferimento di UCS a dimensione variabile a 8 bit, basato sullo standard ISO/IEC 10646
Livello gerarchico	Service: Le informazioni si applicano alla capacità che un ente fornitore di servizi mette a disposizione di un ente di servizio utente attraverso una serie di interfacce che definiscono un comportamento, come un caso d'uso
Nome del livello gerarchico	service
Data dei metadati	2018-09-20
Responsabile dei metadati	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1613A - Sistema informativo territoriale e ambientale
Ruolo	Punto di contatto: Soggetto che può essere contattato per avere informazioni o acquisire la risorsa
E-mail	cartografico@regione.piemonte.it
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/territorio/cartografia/index.htm)

9.1.5 Arpa Piemonte - Atlante Piogge Intense

http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalserver_arpa/catalog/search/resource/details.page?uuid=ARLPA_TO%3A04.03.01-D_2013-04-12-15%3A22

Informazioni sui Metadati

Identificatore del File: ARLPA_TO:04.03.01-D_2013-04-12-15:22
Id file precedente: ARLPA_TO:04.03.01-D_2013-04-12-15:22
Livello gerarchico: Dataset
Data di creazione dei Metadati: 2011-07-07
Lingua dei Metadati: Italiano
Nome dello Standard: DM - Regole tecniche RNDT
Versione dello Standard: 10 novembre 2011

Responsabile dei Metadati

Nome dell'Ente: Arpa Piemonte
Ruolo: Punto di contatto

Informazioni per contattare l'Ente

Sito web: <http://www.arpa.piemonte.it>
Telefono: 011 19680111
E-mail: webgis@arpa.piemonte.it

Identificazione dei dati

Titolo: Arpa Piemonte - Atlante Piogge Intense

Descrizione: Il servizio Atlante delle piogge intense consente di ricavare in un qualsiasi punto del territorio regionale le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per assegnato tempo di ritorno per le durate da 10 minuti a 24 ore che rappresentano lo strumento essenziale nella progettazione idraulica e nella valutazione probabilistica delle portate di piena. L'analisi statistica ha utilizzato tutta la base dati disponibile comprensiva delle stazioni storiche del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale funzionanti dal 1913 al 2002 e delle stazioni della rete regionale realizzata a partire dal 1987.

Data di creazione: 2013
Data di pubblicazione: 2013-04
Formato di presentazione: Mappa digitale

Identificatore: ARLPA_TO:04.03.01
Id livello superiore: ARLPA_TO:04.03.01
Lingua: Italiano

Distribuzione dei dati

Accesso on-line

Risorsa on line: https://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/rest/services/meteorologia_clima/atlante_piogge/MapServer

Protocollo: Map Service REST

Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/Geoviewer2D/?config=other-configs/atlantepiogge_config.json

Protocollo: Applicazione Web

Risorsa on line: https://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/services/meteorologia_clima/atlante_piogge/MapServer/WMS/Server?

Protocollo: Web Map Service 1.3.0

Formato di distribuzione

Nome formato: SHP

Versione formato: ESRI-Shapefile

Distributore

Nome dell'Ente: Arpa Piemonte

Ruolo: Distributore

Informazioni per contattare l'Ente

Sito web: <http://www.arpa.piemonte.it>

Telefono: 011 19680111

E-mail: webgis@arpa.piemonte.it

9.1.6 Arpa Piemonte - Ortofoto Ambito progetto Europeo RISKNAT

http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalserver_arpa/catalog/search/resource/details.page?uuid=ARLPA_TO%3AORTO_risknat-2013-04-10-17%3A00&title=Arpa%20Piemonte%20-%20Ortofoto%20Ambito%20progetto%20Europeo%20RISKNAT

Informazioni sui Metadati

Identificatore del File: ARLPA_TO:ORTO_risknat-2013-04-10-17:00
 Id file precedente: ARLPA_TO:ORTO_risknat-2013-04-10-17:00
 Livello gerarchico: Servizio
 Data di creazione dei Metadati: 2013-10-04
 Lingua dei Metadati: Italiano
 Nome dello Standard: DM - Regole tecniche RNDT
 Versione dello Standard: 10 novembre 2011

Responsabile dei Metadati

Nome del riferimento: Arpa Piemonte
 Nome dell'Ente: Arpa Piemonte
 Ruolo: Punto di contatto

Informazioni per contattare l'Ente

Sito web: <http://www.arpa.piemonte.it>
 Telefono: 011 19680111
 E-mail: webgis@arpa.piemonte.it

Identificazione del servizio

Identificatore: ARLPA_TO:ORTO_risknat
 Titolo: Arpa Piemonte - Ortofoto Ambito progetto Europeo RISKNAT

Descrizione: Il servizio rende disponibile il mosaico delle ortofoto digitali a colori messe a disposizione nell'ambito del progetto strategico RISKNAT, al fine di disporre di una copertura omogenea di immagini dell'area di cooperazione transfrontaliera (Italia-Francia-Svizzera), da utilizzare come supporto alla rappresentazione dei dati geomatici condivisi nel Geoportale Risknat. L'attuale versione del servizio copre le regioni Piemonte, Liguria, Valle d'Aosta, Provence-Alpes-Côte d'Azur. Nello specifico sono state utilizzate le seguenti coperture di immagini con risoluzione geometrica di 0,5-1m: Immagini Terraitaly - © Blom CGR 2000-2007, Ortofoto 2005 - Regione Valle d'Aosta, BD ORTHO © IGN Paris ©, World Imagery - Esri Inc. Il servizio è fruibile on line come map service multiscalare (tiled) con 14 diversi livelli di dettaglio compresi tra la scala 1:9.000.000 e 1:2.500. Il sistema di riferimento adottato è WGS84 - WEB MERCATOR (Auxiliary Sphere) - EPSG:3857. Il servizio è accessibile anche in modalità WMS e WMTS.

Data di pubblicazione: 2011-06-01

Caratteristiche del servizio

Accesso on-line

Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/rest/services/topografia_dati_di_base/Ortofoto_risknat_WM_Compact/MapServer
 Protocollo: Image Service REST

Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/rest/services/topografia_dati_di_base/Ortofoto_risknat_WM_Compact/MapServer/WMS/Server?
 Protocollo: Web Map Service 1.3.0

Risorsa on line: http://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/rest/services/topografia_dati_di_base/Ortofoto_risknat_WM_Compact/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml
 Protocollo: Web Map Tile Service 1.0.0

Responsabile e Contatti per il servizio

Responsabile della Risorsa

Nome del riferimento: Arpa Piemonte
 Nome dell'Ente: Arpa Piemonte
 Ruolo: Proprietario

Informazioni per contattare l'Ente

Sito web: <http://www.arpa.piemonte.it>
 Telefono: 011 19680111
 E-mail: webgis@arpa.piemonte.it

Punto di contatto

Nome del riferimento: Arpa Piemonte
 Nome dell'Ente: Arpa Piemonte
 Ruolo: Punto di contatto

Informazioni per contattare l'Ente


Sito web: <http://www.arpa.piemonte.it>
 Telefono: 011 19680111
 E-mail: webgis@arpa.piemonte.it

9.1.7 Regione Piemonte - Base Cartogr. di Rifer. Annuale 2015 raster b/n 1:10.000

<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/>

▼ IDENTIFICAZIONE	
Titolo	BDTRE - BASE CARTOGRAFICA DI RIFERIMENTO - 2015 - WMS (Raster 1:10.000)
Identificatore	r_piemon:43d07685-4799-478f-ae2-78c60b67a266_resource
Descrizione	Geo-servizio WMS che permette la visualizzazione della Base Cartografica di Riferimento in scala 1:10.000 (Ed. 2015), cioè l'allestimento cartografico derivato dalla BDTRE (Banca Dati Territoriale di Riferimento degli Enti).
▼ Data	
Data	2015-01-22
Tipo data	Creazione: Data che identifica quando la risorsa è stata creata
▼ Responsabile	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1613A - Sistema informativo territoriale e ambientale
E-mail	cartografico@regione.piemonte.it
Ruolo	Proprietario: Soggetto proprietario della risorsa
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/sit/)
▼ Responsabile	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte
E-mail	info-geoportale@regione.piemonte.it
Ruolo	Proprietario: Soggetto proprietario della risorsa
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it)
▶ Parole chiave & Temi INSPIRE	
▼ Punto di contatto	
Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1613A - Sistema informativo territoriale e ambientale
E-mail	cartografico@regione.piemonte.it
Ruolo	Punto di contatto: Soggetto che può essere contattato per avere informazioni o acquisire la risorsa
Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/sit/)
▼ IDENTIFICAZIONE DEI SERVIZI	
Tipo di aggancio	Strettamente accoppiati: Strettamente accoppiati: dati associati
Risorsa accoppiata	BDTRE 2015 - RASTER B/N 1:10.000
Metadata UUID	r_piemon:2d74b6ef-8d7b-47e4-8c49-96ad4289e1eb
Riferimento esterno XLink	http://www.geoportale.piemonte.it/geonetworkrp/srv/en/csw?request=GetRecordById&service=CSW&version=2.0.2&id=r_piemon:2d74b6ef-8d7b-47e4-8c49-96ad4289e1eb&elementSetName=full&outputSchema=http://www.isotc211.org/2005/qmd
Name	view
Autorità di riferimento	www.w3c.org
▼ Operazioni contenute	
Nome dell'operazione	GetMap
DCP (Distributed Computing Platforms)	Servizi Web: DCP is WebServices
▼ Punto di connessione	
Risorsa online	http://geomap.reteunitaria.piemonte.it/WEBCAT/CAPABILITIES/wms_reqp_basecarto10bn_2015.xml (http://geomap.reteunitaria.piemonte.it/WEBCAT/CAPABILITIES/wms_reqp_basecarto10bn_2015.xml)
▼ VINCOLI RELATIVI ALL'ACCESSO E ALL'USO	
▶ Vincoli sulla risorsa	
▶ Vincoli sulla risorsa	
▼ Vincoli sulla risorsa	
Vincoli di sicurezza	Non riservato: Disponibile per la divulgazione generale

▼ DISTRIBUZIONE DEI DATI

Formato	OGC:WMS
Versione formato	1.3
▼ Risorsa on-line	
Mappa interattiva	regp_basecarto10bn_2015 (OGC-WMS Server: http://geomap.reteunitaria.piemonte.it/WEBCAT/CAPABILITIES/wms_regp_basecarto10bn_2015.xml)
Vista in Google Earth	regp_basecarto10bn_2015 

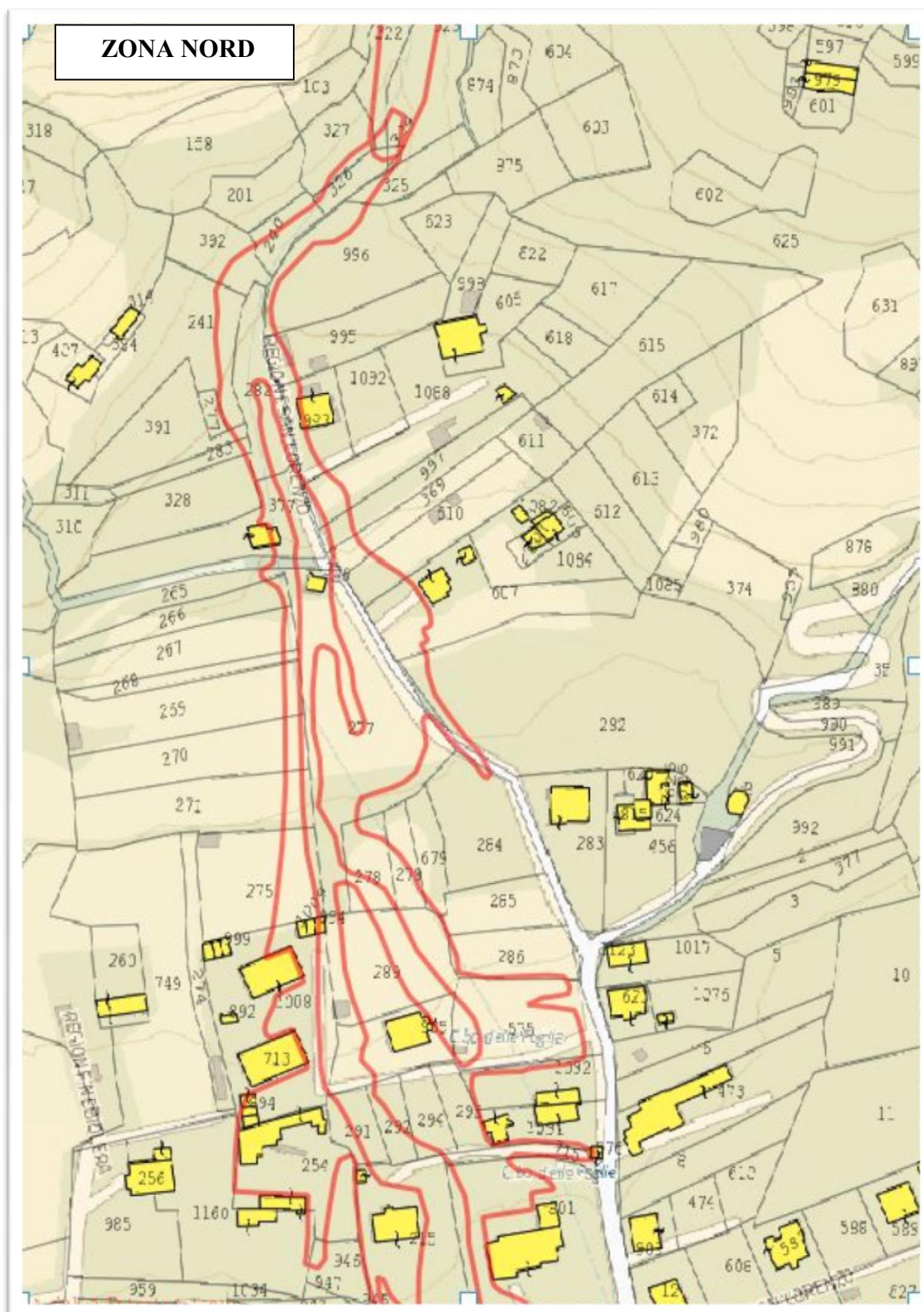
▼ METADATI

Identificatore del file	r_piemon:43d07685-4799-478f-aef2-78c60b67a266
Lingua dei metadati	Italiano
Nome dello Standard	DM - Regole tecniche RNDT
Versione dello standard	10 novembre 2011
Set dei caratteri dei metadati	UTF8: Formato di trasferimento di UCS a dimensione variabile a 8 bit, basato sullo standard ISO/IEC 10646
Livello gerarchico	Service: Le informazioni si applicano alla capacità che un ente fornitore di servizi mette a disposizione di un ente di servizio utente attraverso una serie di interfacce che definiscono un comportamento, come un caso d'uso
Nome del livello gerarchico	service
Data dei metadati	2018-06-07

▼ Responsabile dei metadati

Nome dell'Ente	Regione Piemonte - A1613A - Sistema informativo territoriale e ambientale	E-mail	cartografico@regione.piemonte.it
Ruolo	Punto di contatto: Soggetto che può essere contattato per avere informazioni o acquisire la risorsa	Risorsa online	Sito web (http://www.regione.piemonte.it/sit/)

9.2 ALLEGATO 2 – PARTICELLE CATASTALI RICAVATE DAL SITO DELL'AGENZIA DELLE ENTRATE



9.3 ALLEGATO 3 – MATERIALE FOTOGRAFICO PROPEDEUTICO AL SOPRALLUOGO IN SITO DEL 28/02/19

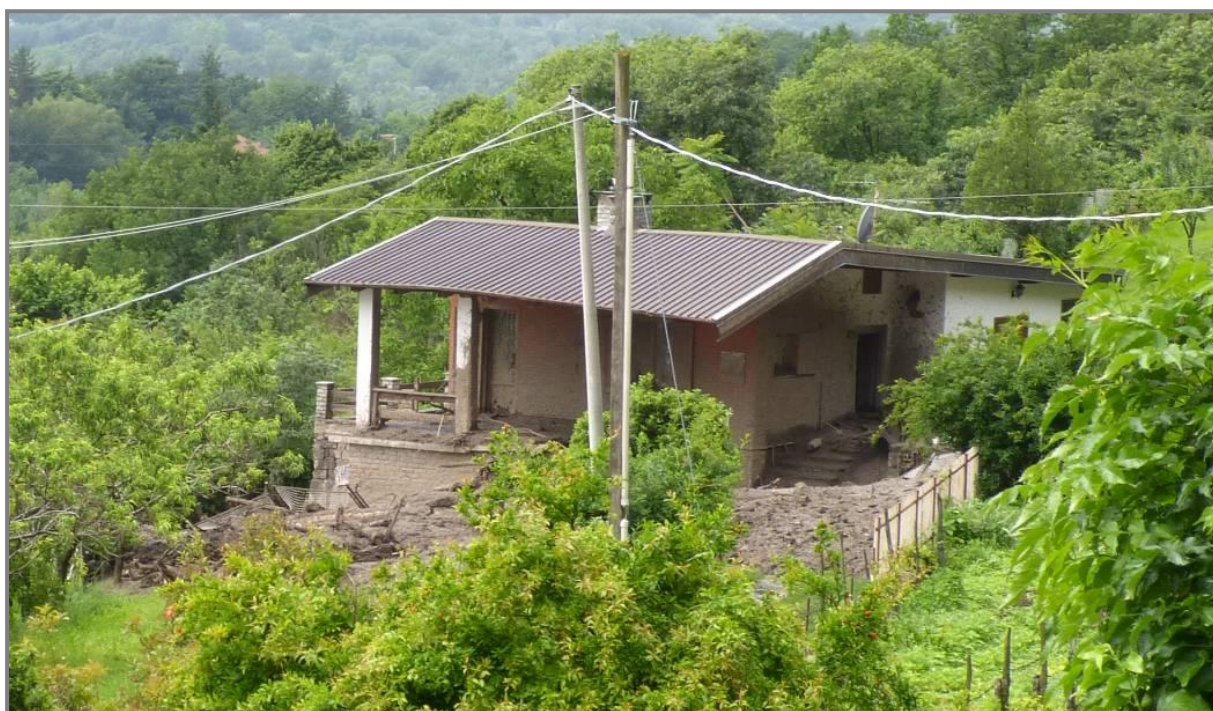
Le foto – scattate nei giorni successivi all’evento franoso - sono state fornite dai tecnici della Direzione Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Montagna,Foreste, Protezione Civile, Trasporti e Logistica della Regione Piemonte, mentre le immagini pre-evento sono tratte dal servizio web Google Map Street View (ove disponibile).

Particella Catastale: 993





Particella Catastale: 377







Particella Catastale: 1008





Particella Catastale: 713





Particella Catastale: 935





Particella Catastale: 894



Particella Catastale: 254



Particella Catastale: 291



Particella Catastale: 291-292-294



Particella Catastale: 215



Particella Catastale: 756



Particella Catastale: 931

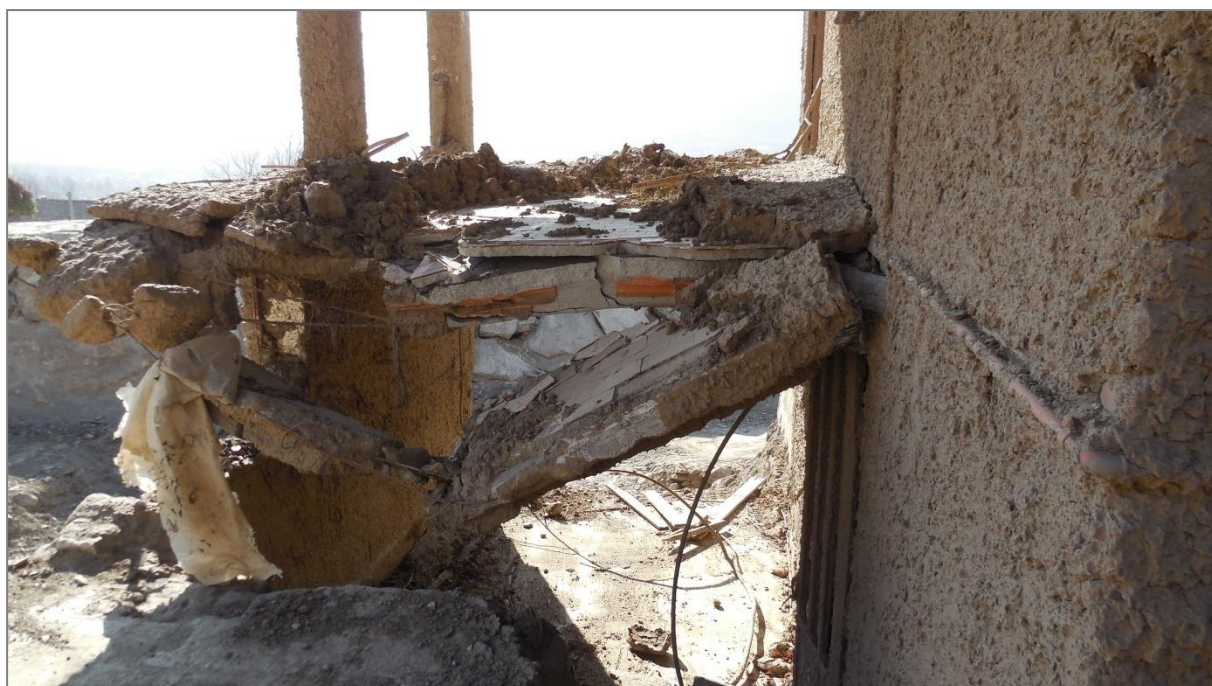


**9.4 ALLEGATO 4 – MATERIALE FOTOGRAFICO DEL SOPRALLUOGO IN SITO
DEL 28/02/19 – RILIEVO DANNI E SPESSORI DEL DEPOSITO**

Particella Catastale 377



Particella Catastale 377



Particella Catastale 377



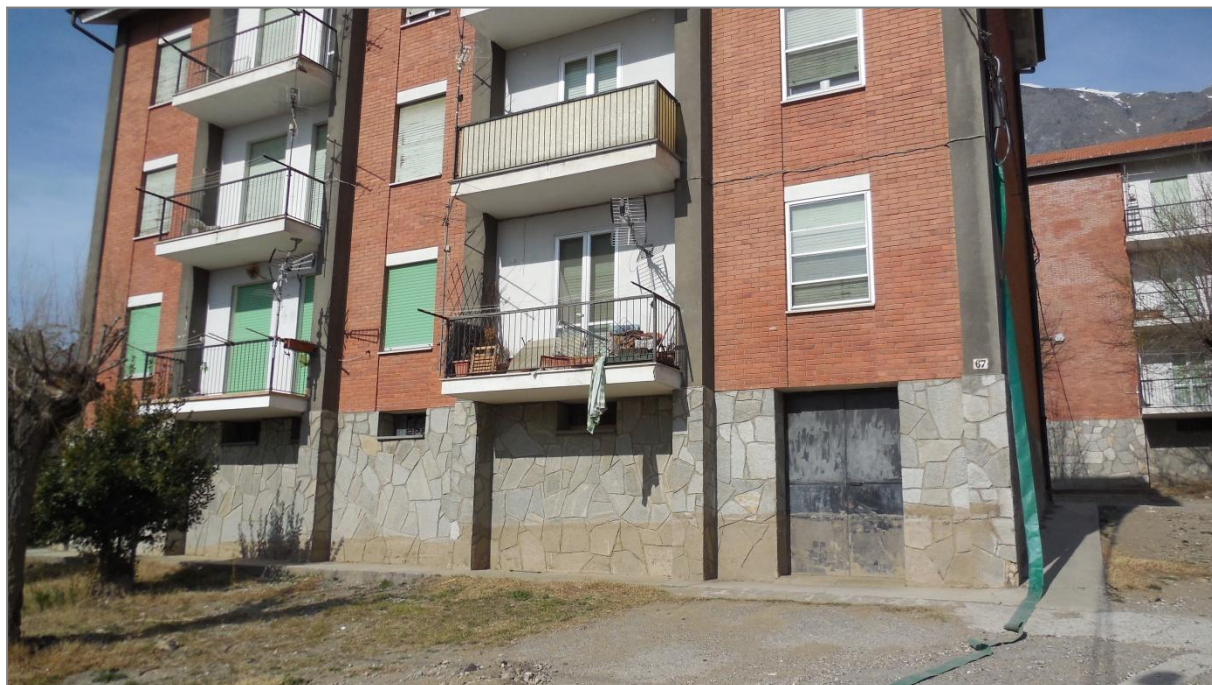
Particella catastale 993



Particella catastale 994



Particella catastale 713



Particella catastale 935



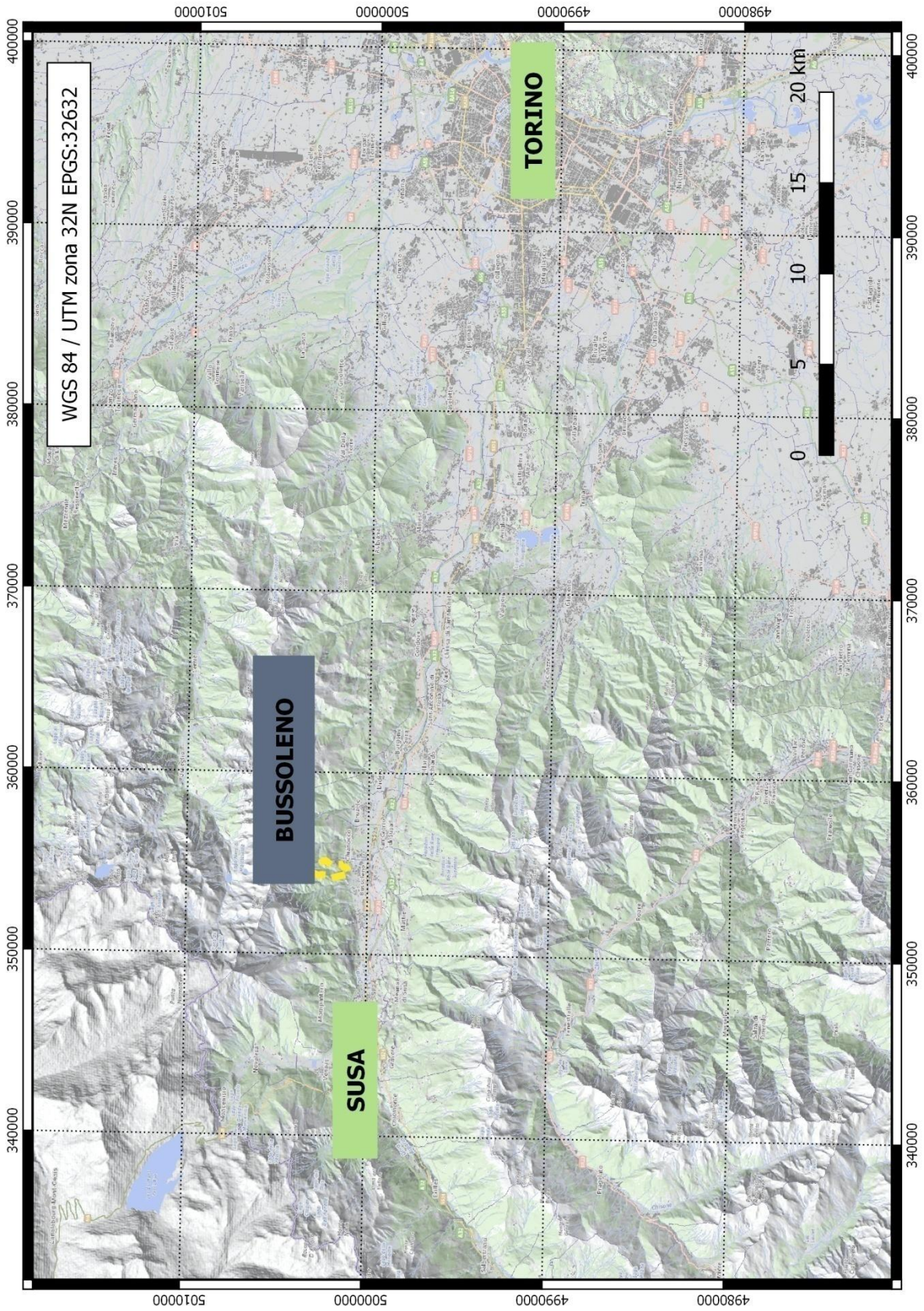
Particella catastale 894

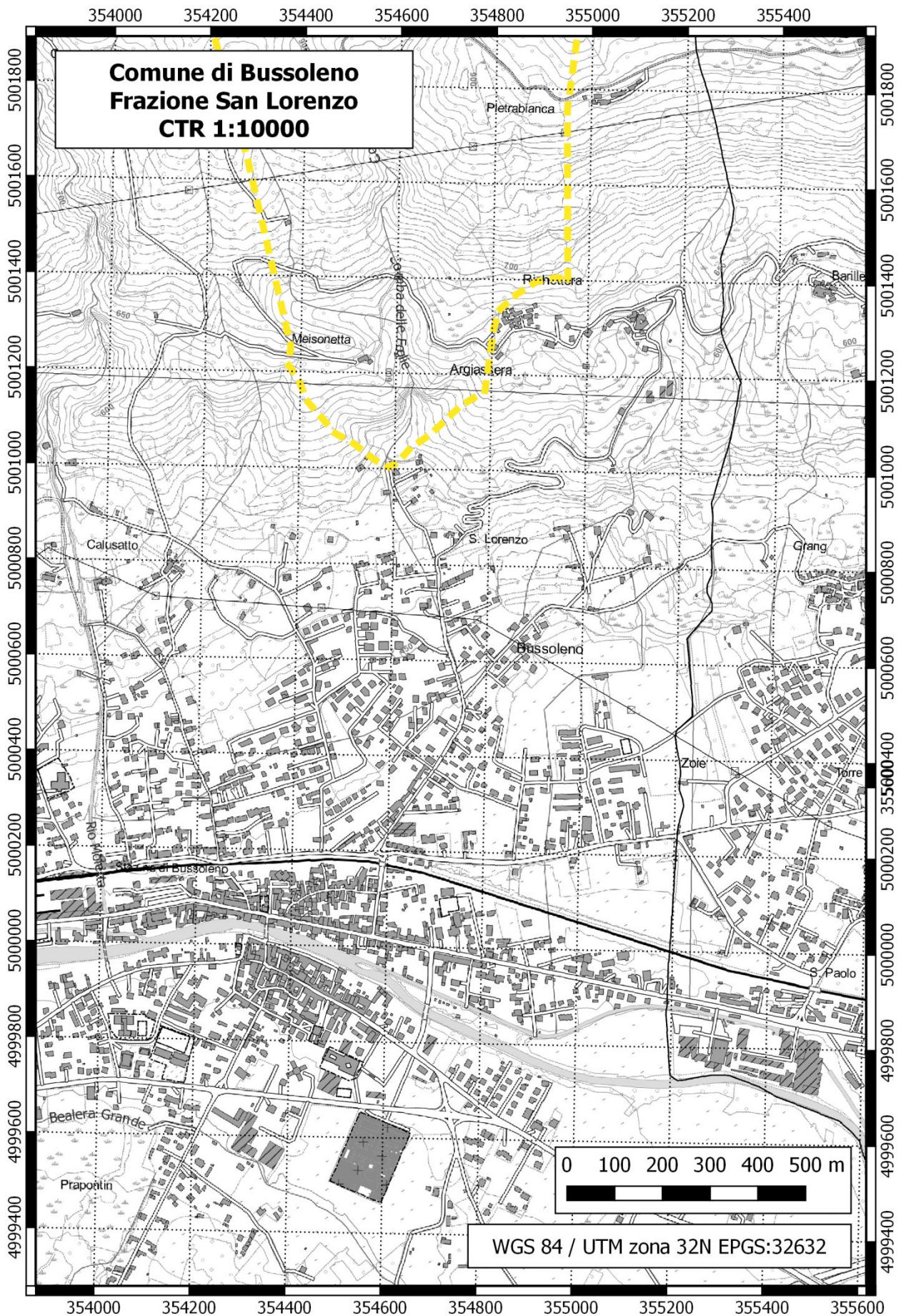


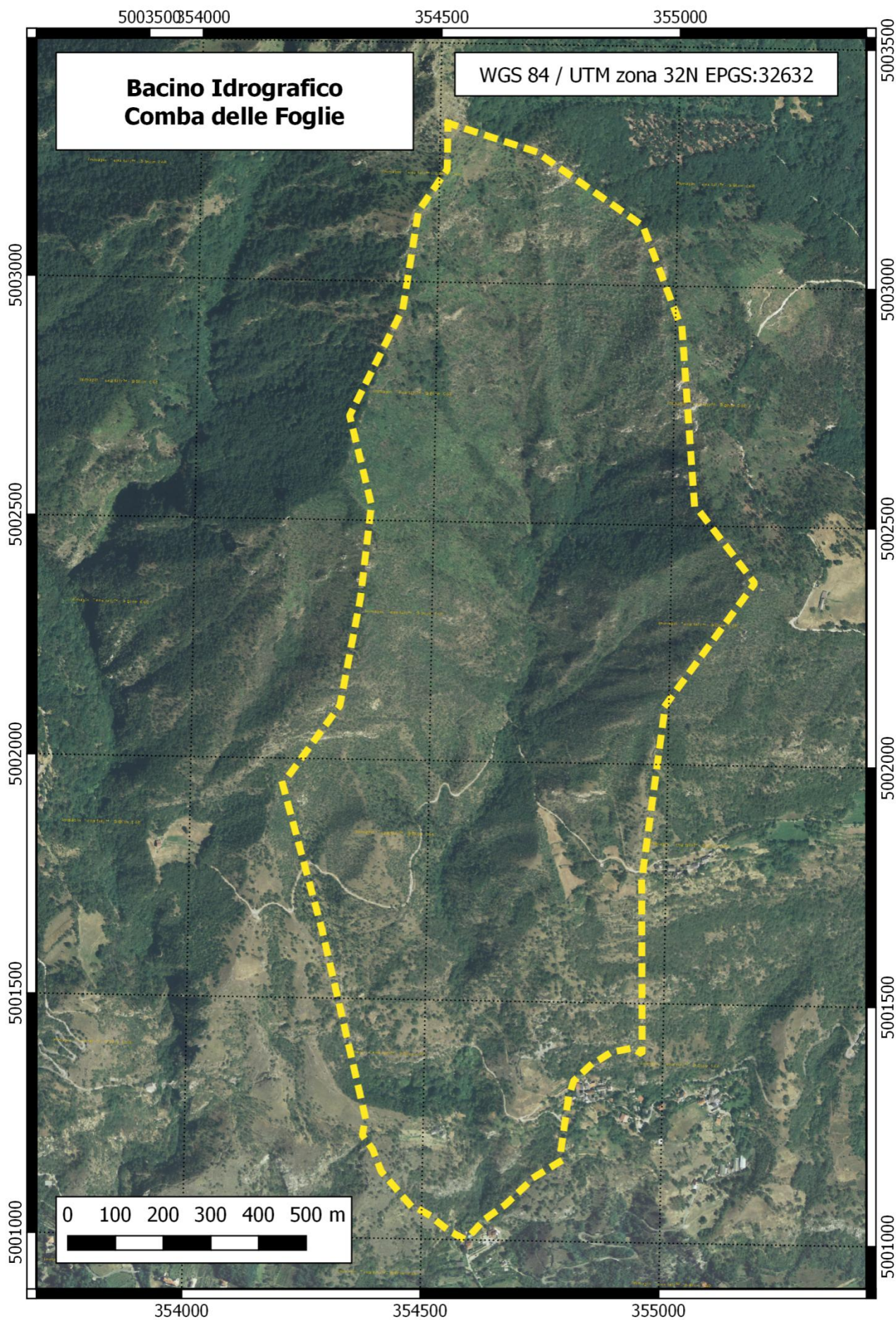
Particella catastale 215

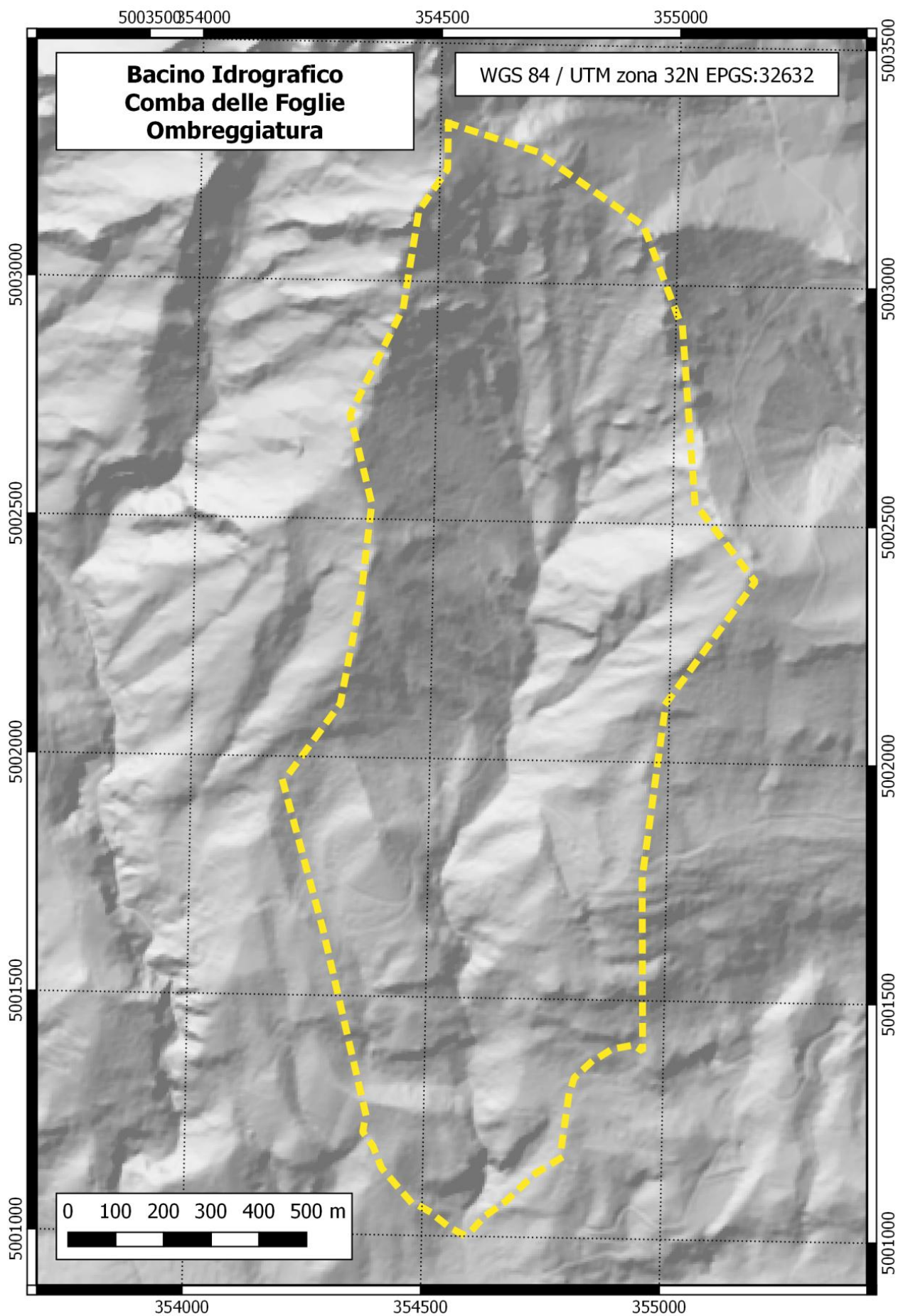


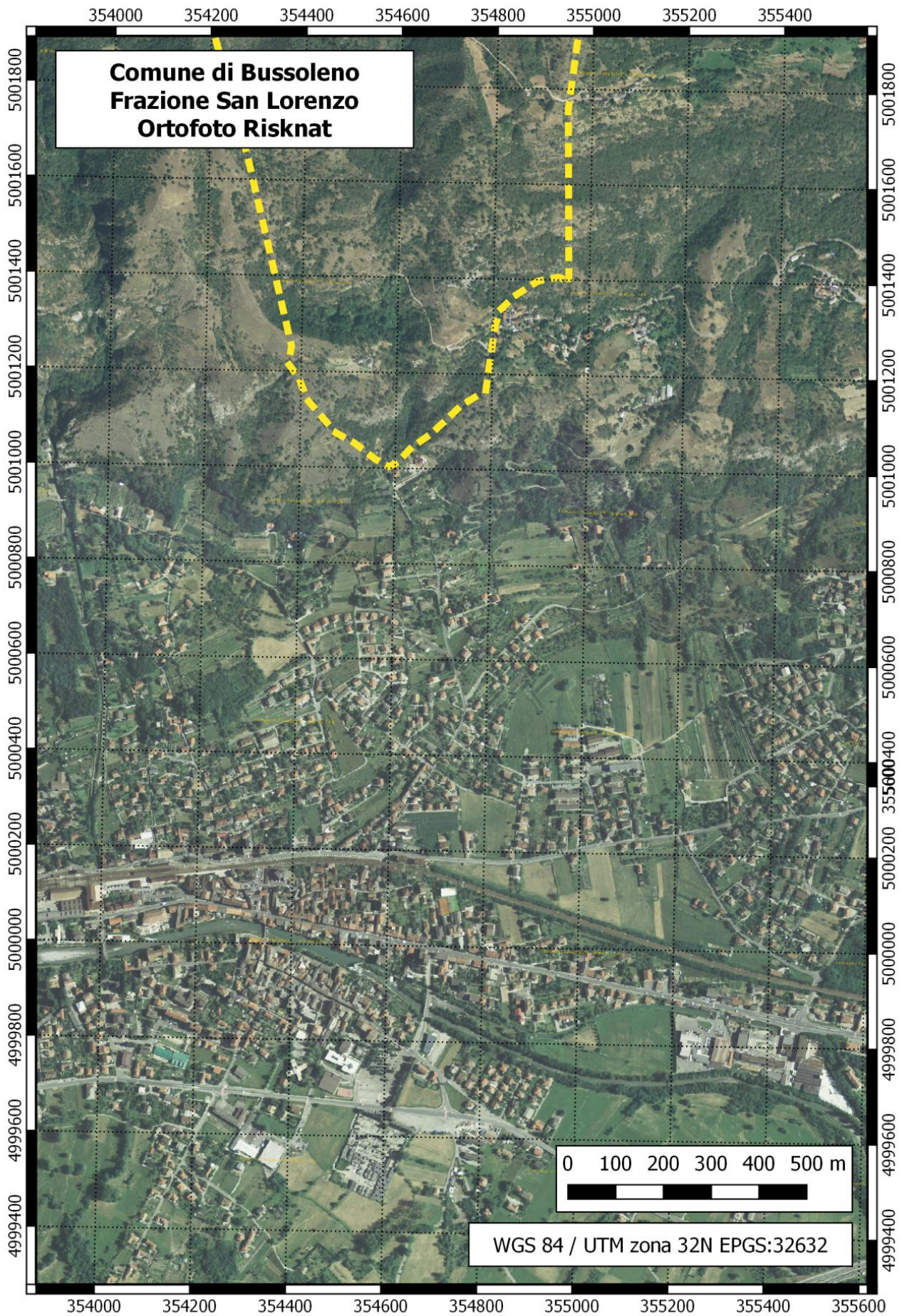
9.5 ALLEGATO 5 – INQUADRAMENTO DEL SITO













9.6 ALLEGATO 6 – RISULTATI DELLA SIMULAZIONE DI PRIMO TENTATIVO

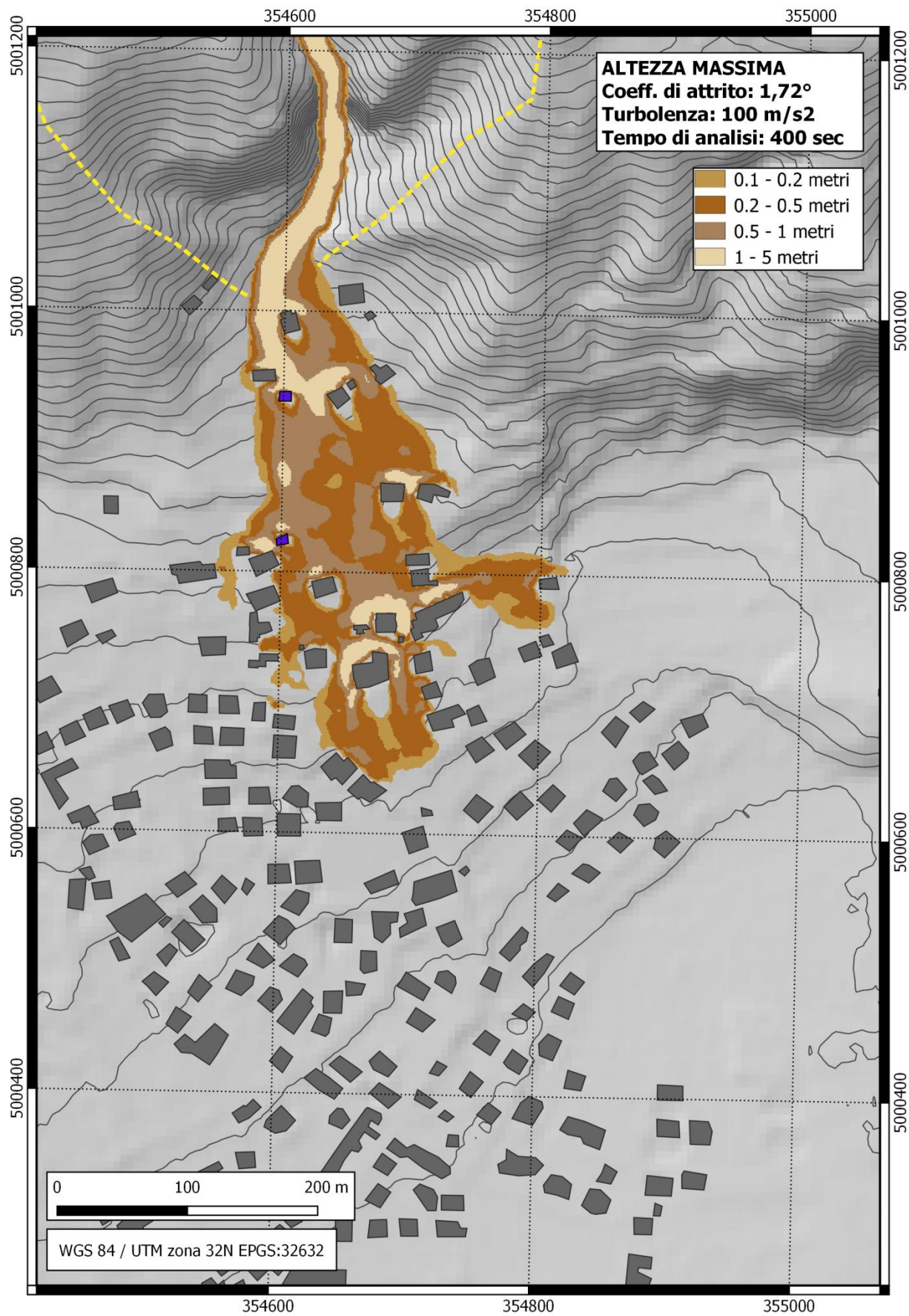
MODELLAZIONE NUMERICA DELL'EVENTO DI COLATA DETRITICA CON INNESCO CONCENTRATO E VARIAZIONE DEI PARAMETRI REOLOGICI DI VOELLMY

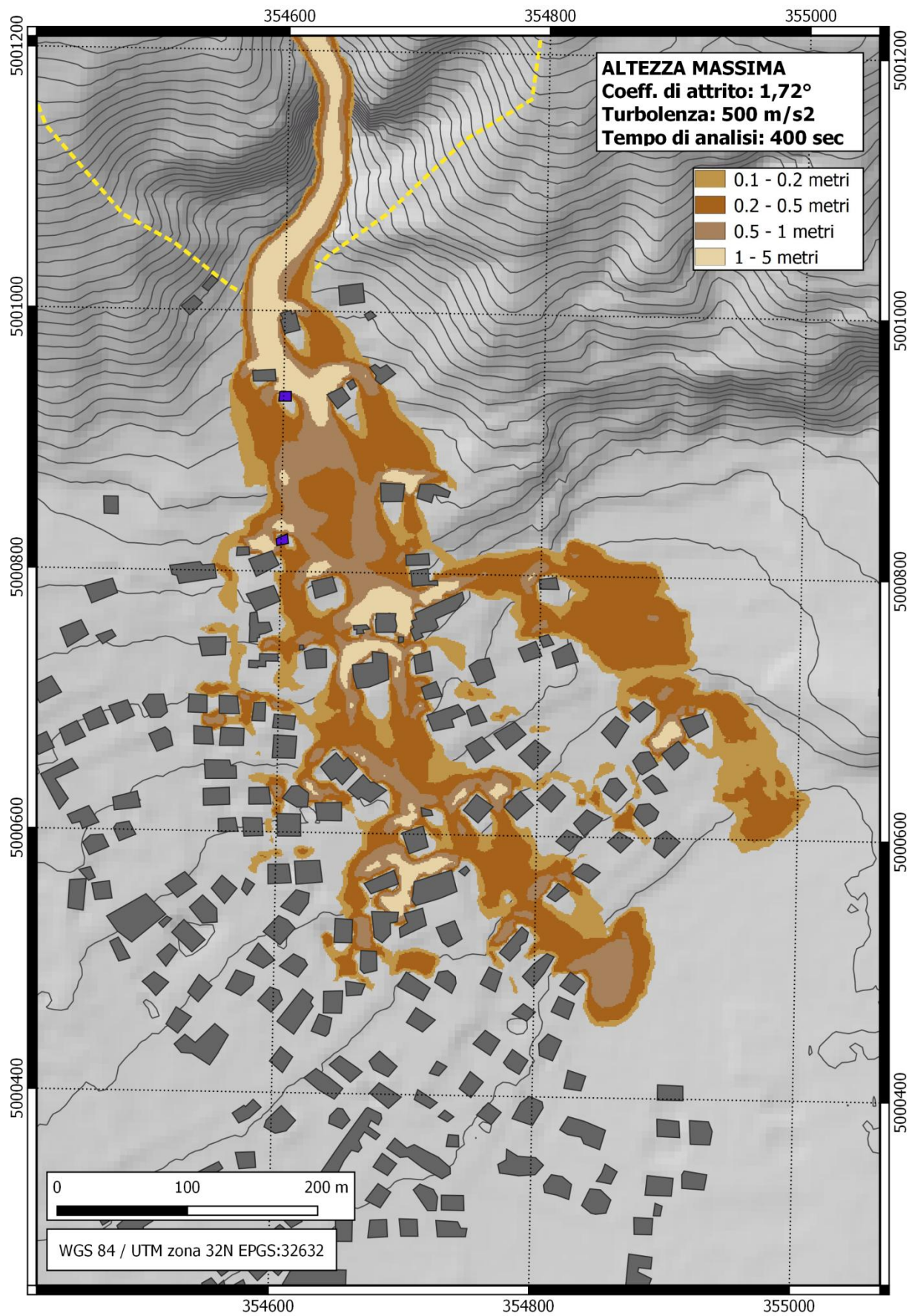
[Voellmy - Voellmy A. (1955), *On the destructive force of avalanches*, SLF, Davos, Switzerland, 190pp]

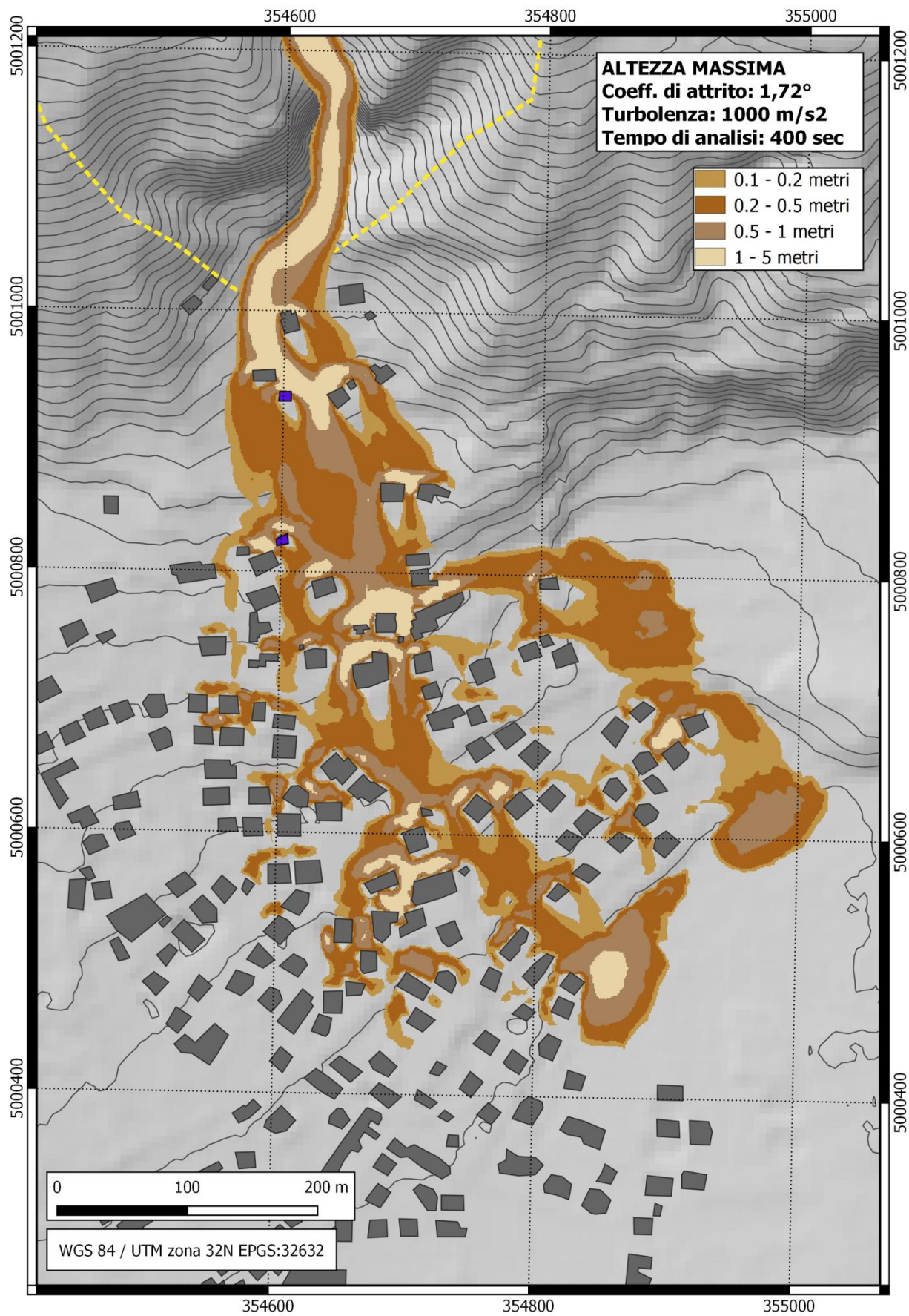
$$\text{Voellmy} \quad \tau = \rho g \left(h \cos \theta \tan \phi_a + \frac{v^2}{\xi} \right)$$

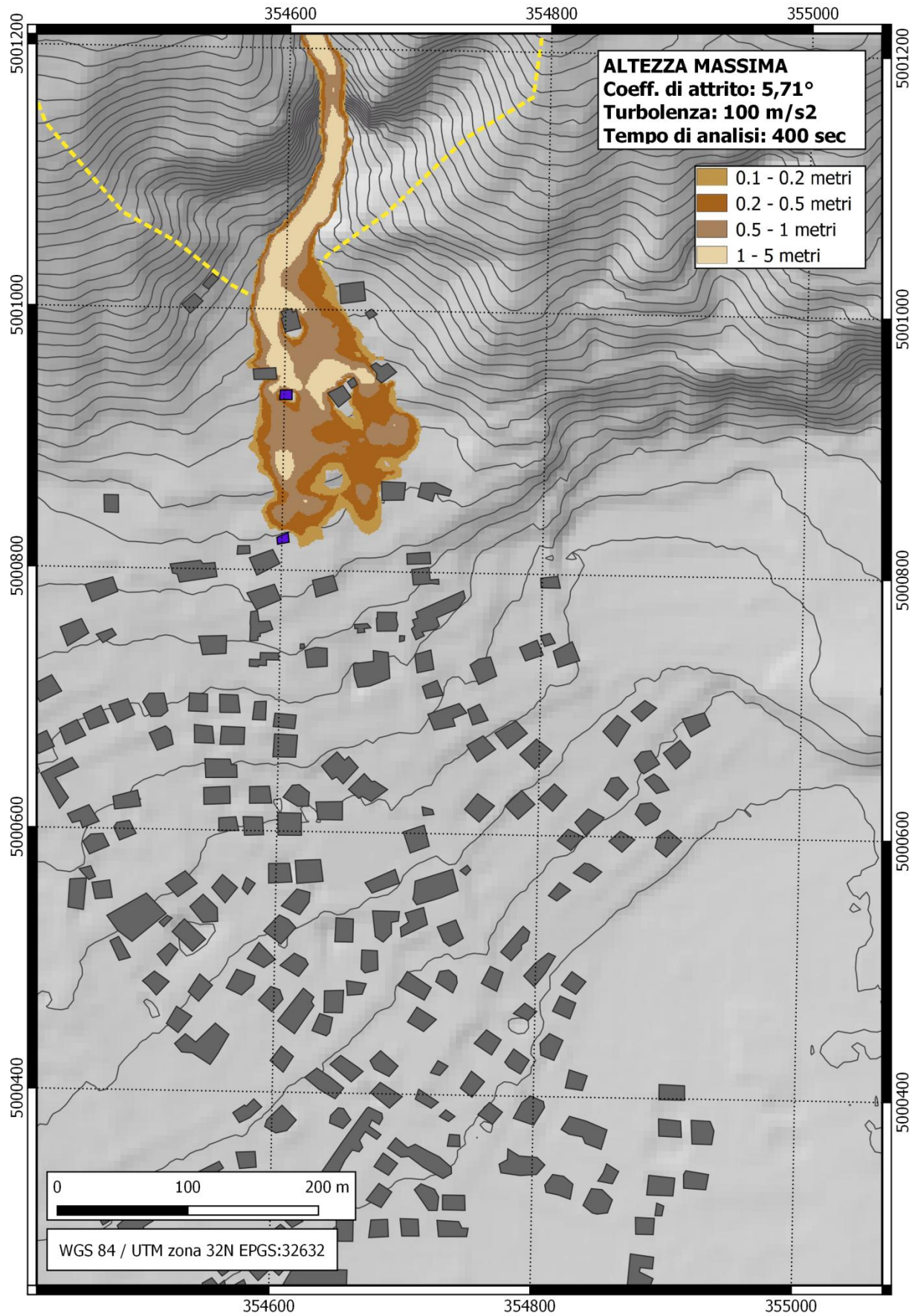
		Turbolenza [m/s ²]		
		100	500	1000
Coefficiente di attrito [°] Φ_a [°]	1.72	1-1	1-2	1-3
	5.71	2-1	2-2	2-3
	11.3	3-1	3-2	3-3

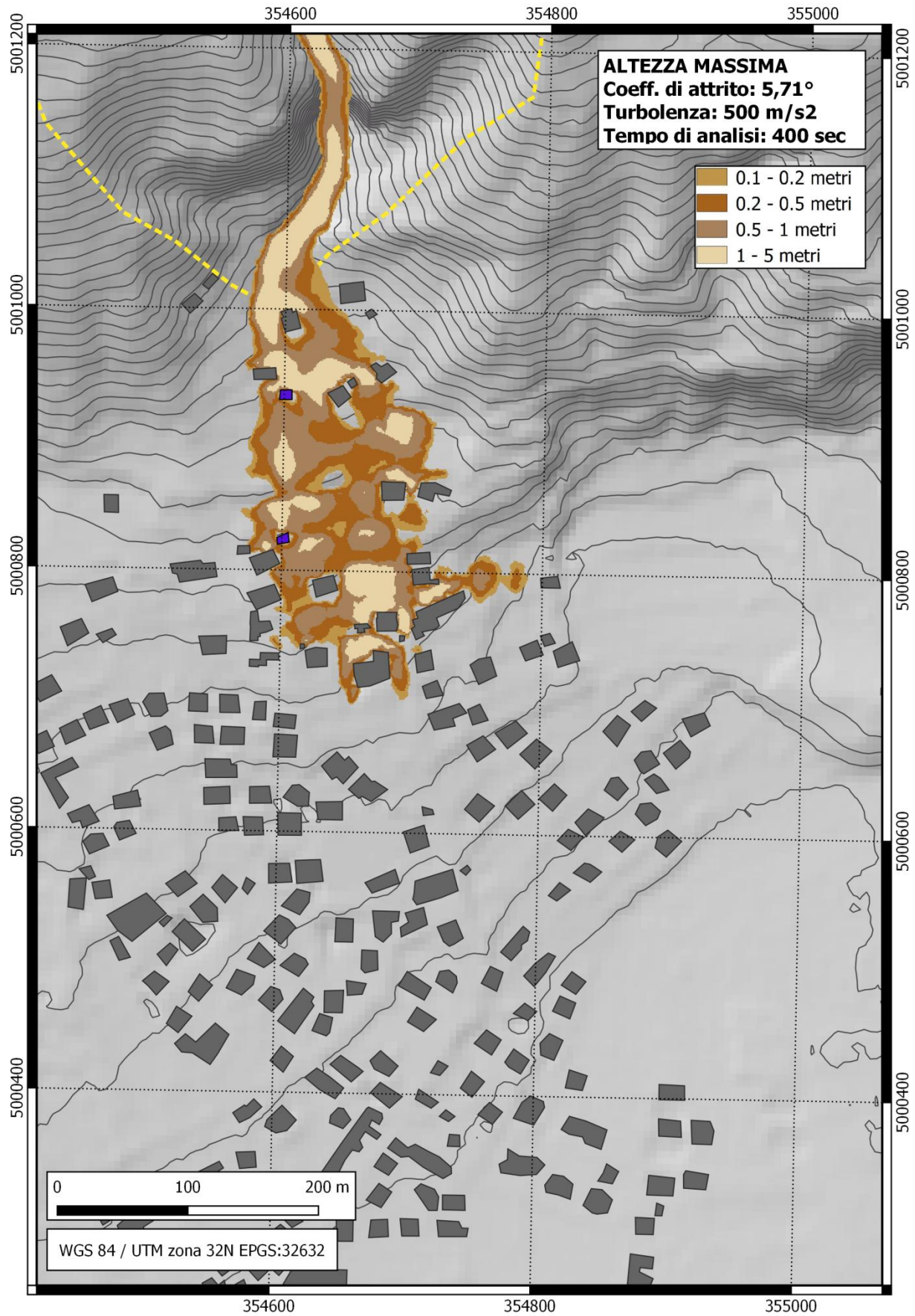
Vedere paragrafo 4.3 Simulazione dell'evento con RASH3D.

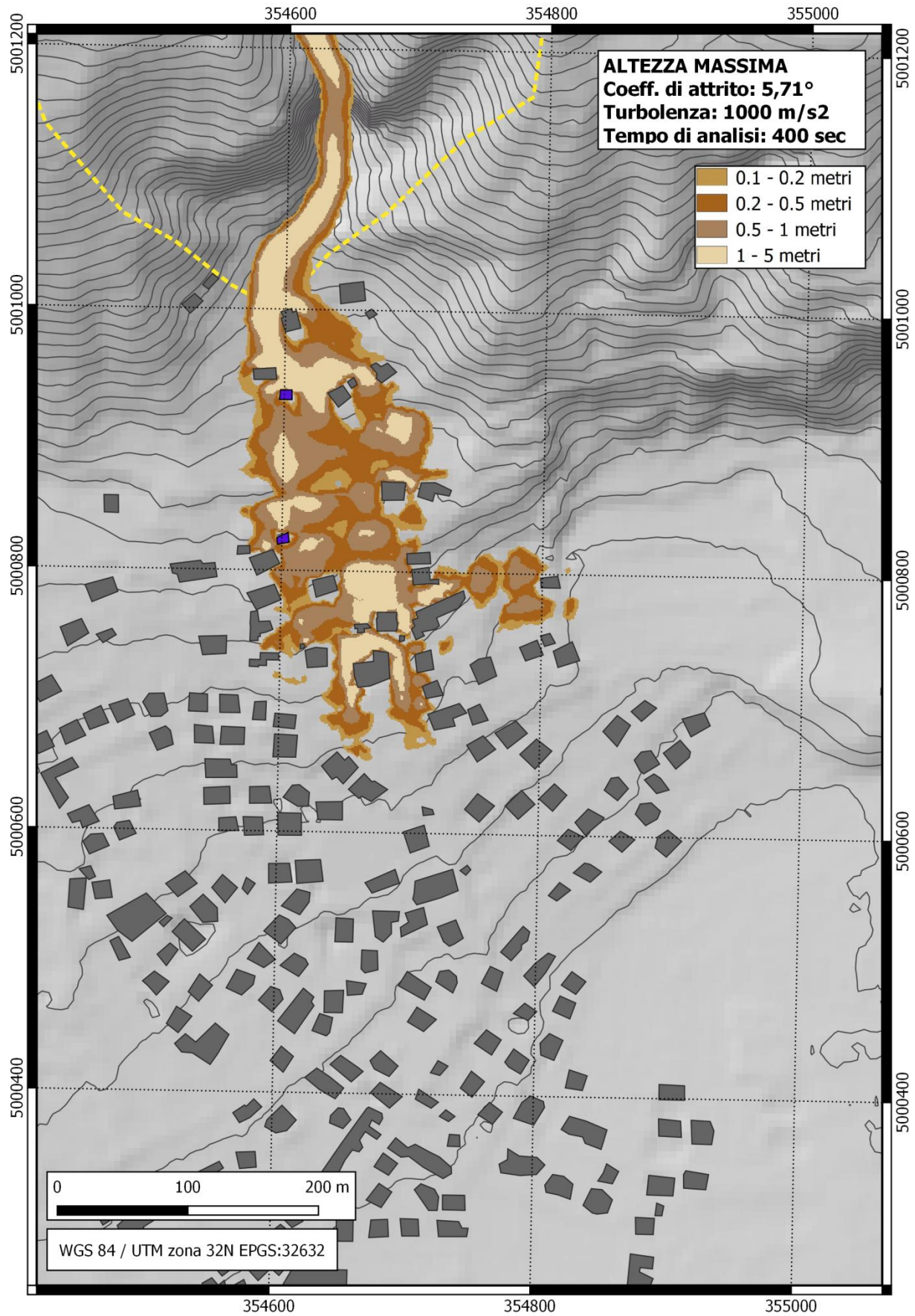


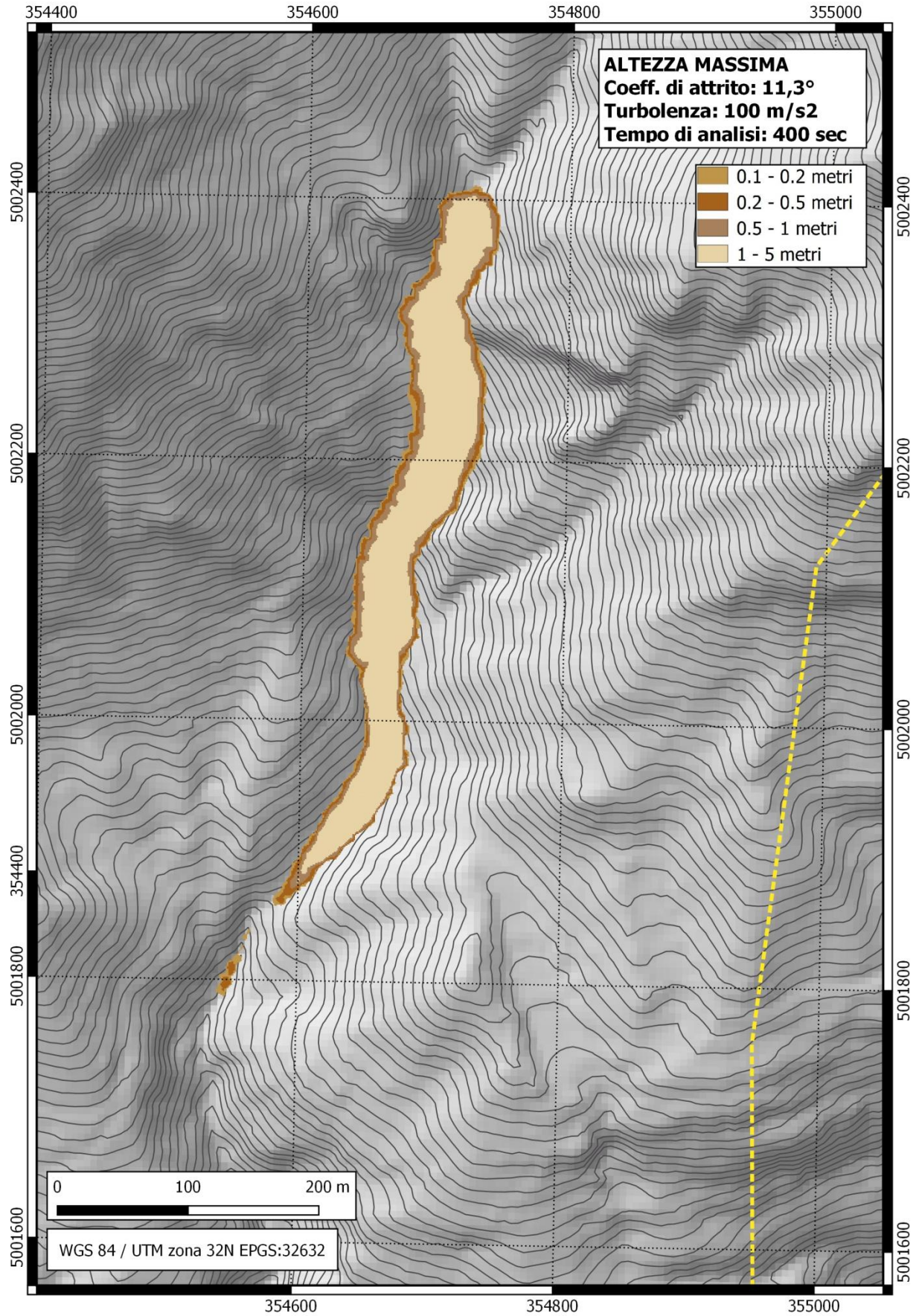


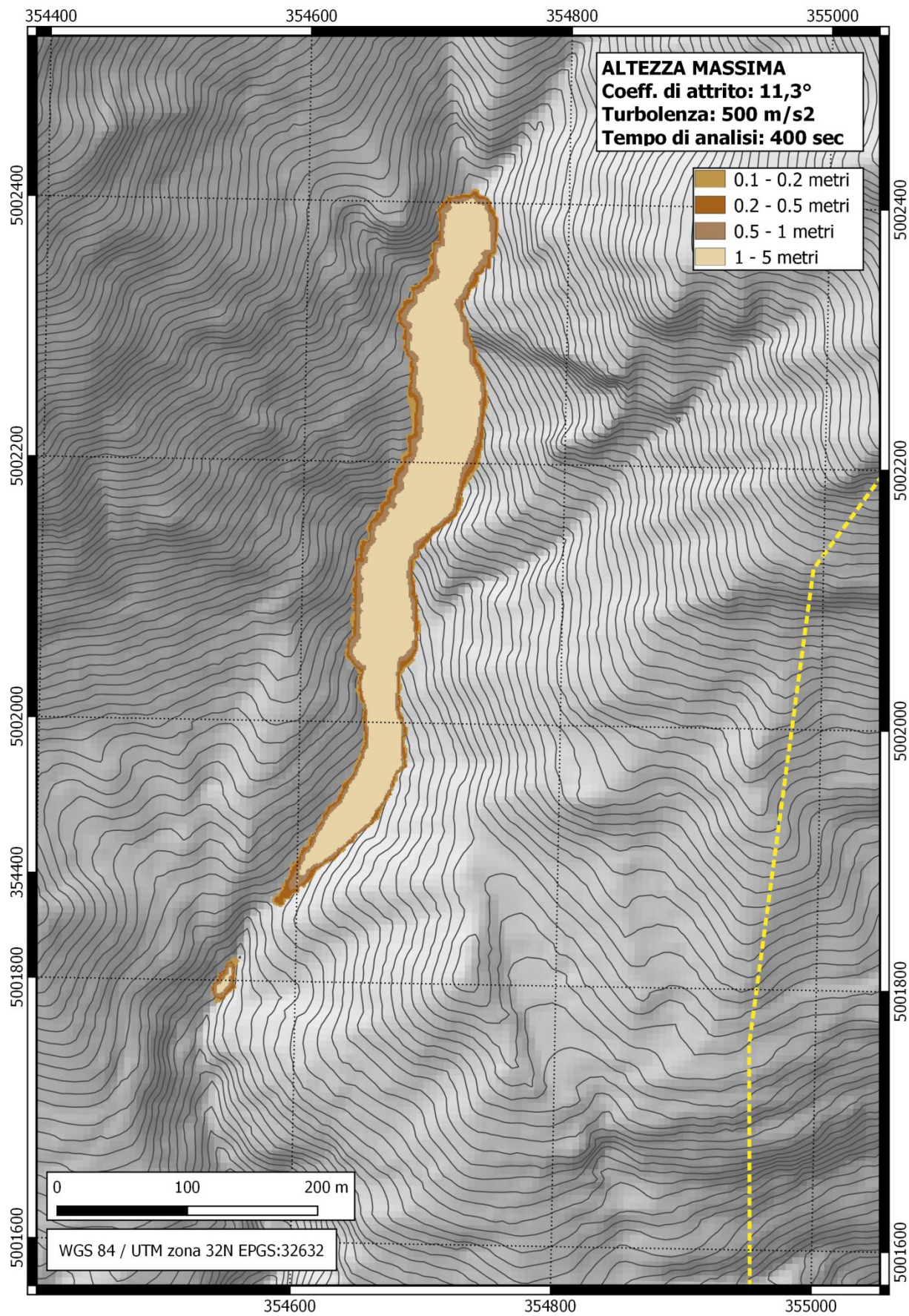


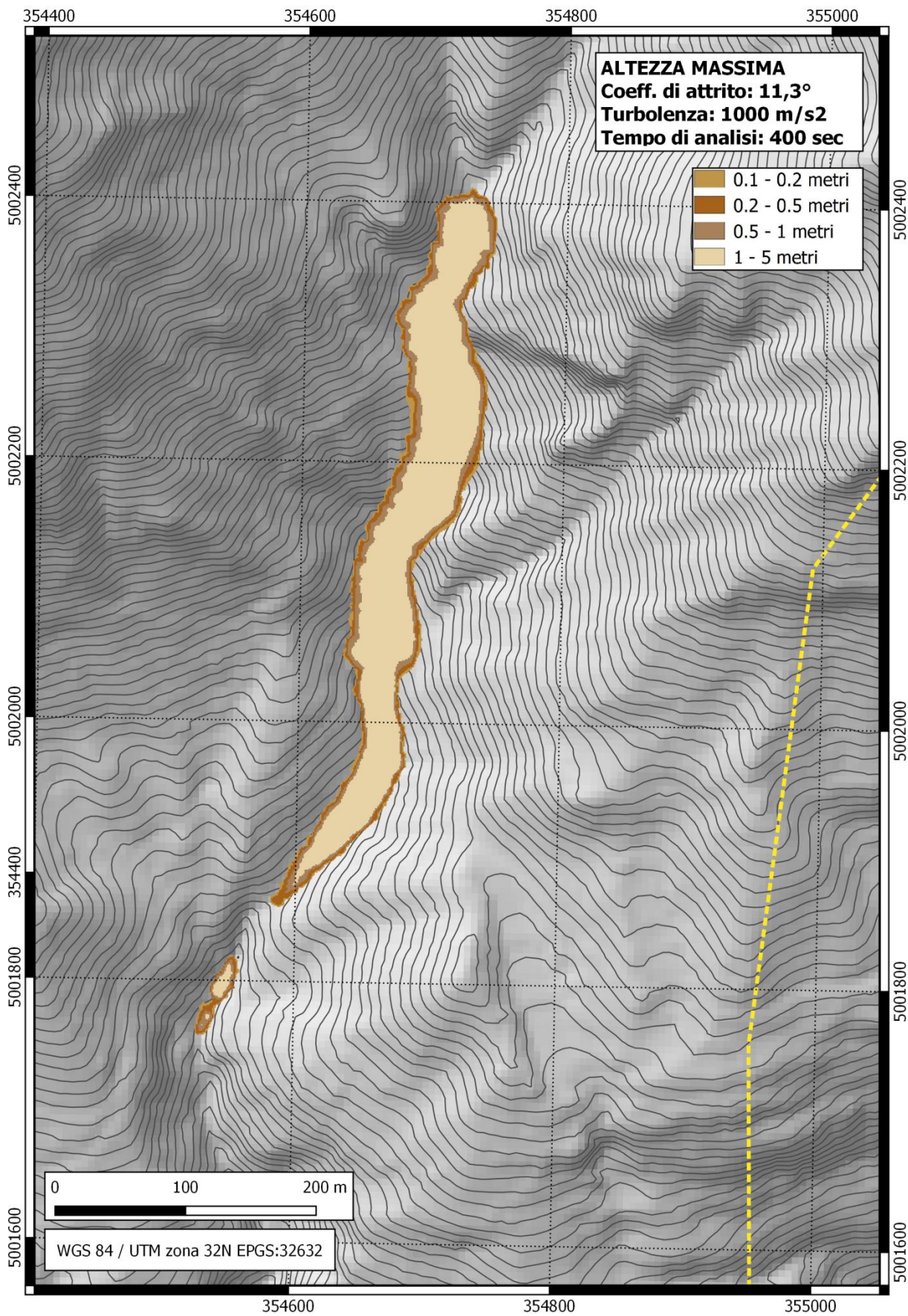






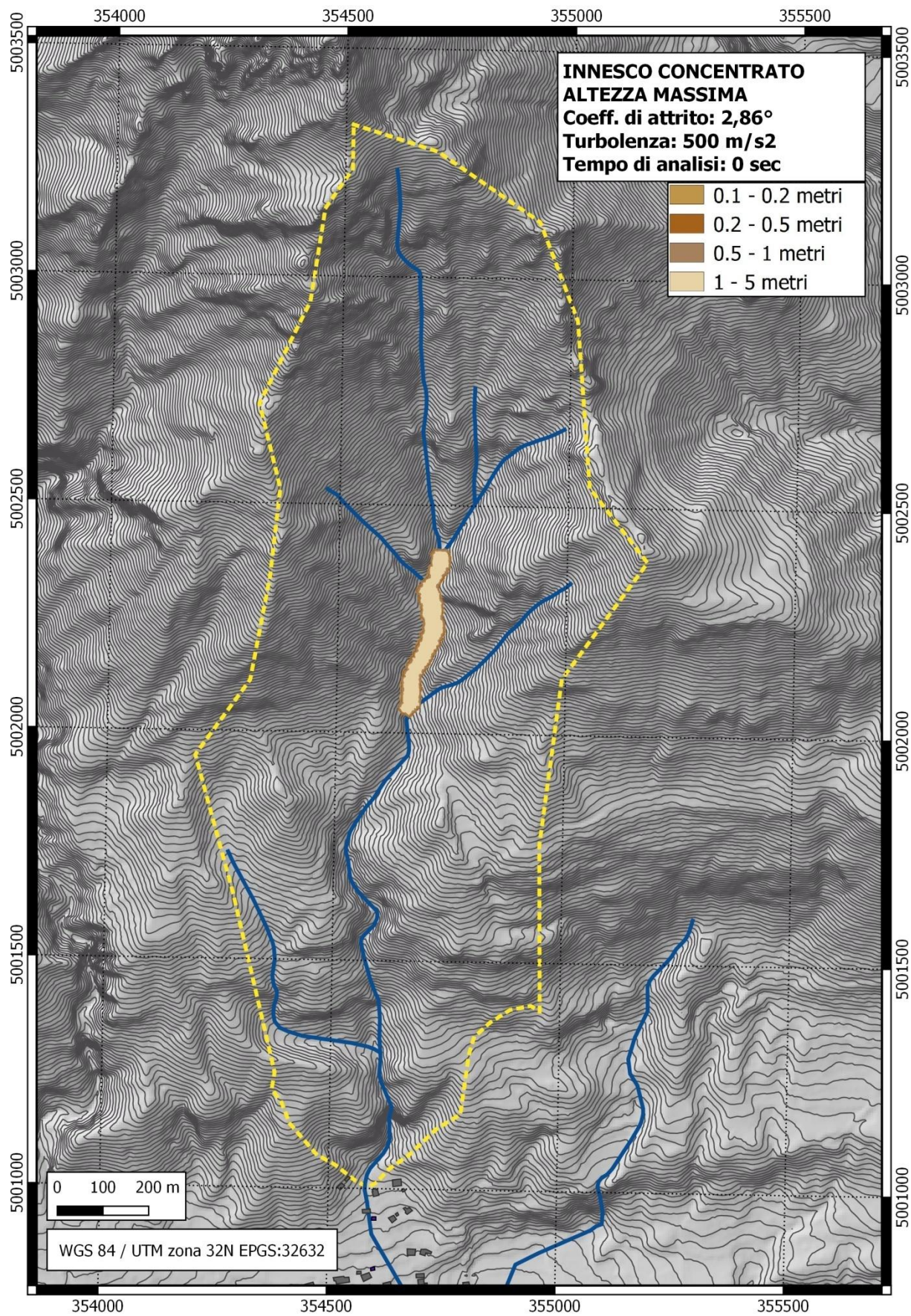


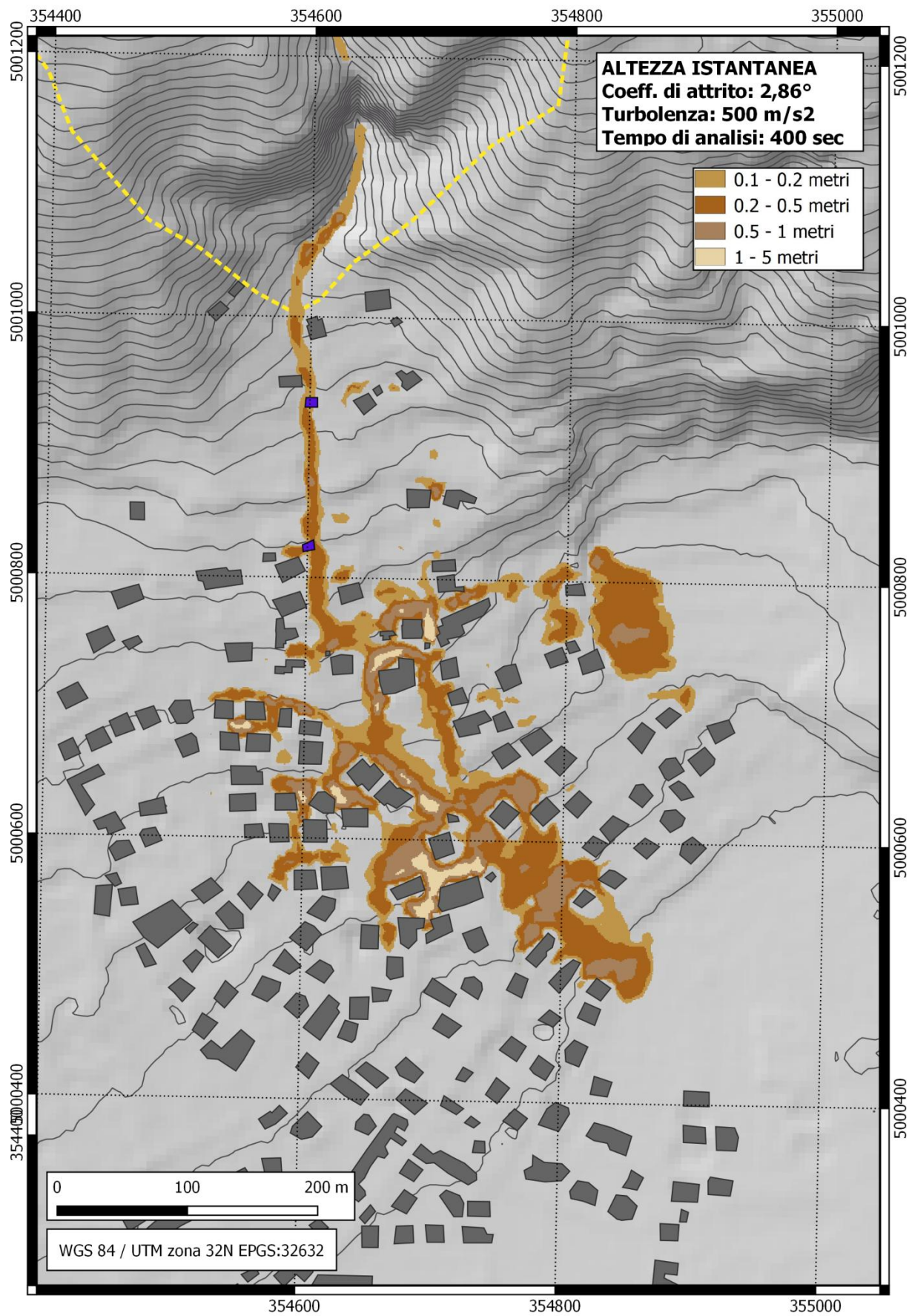


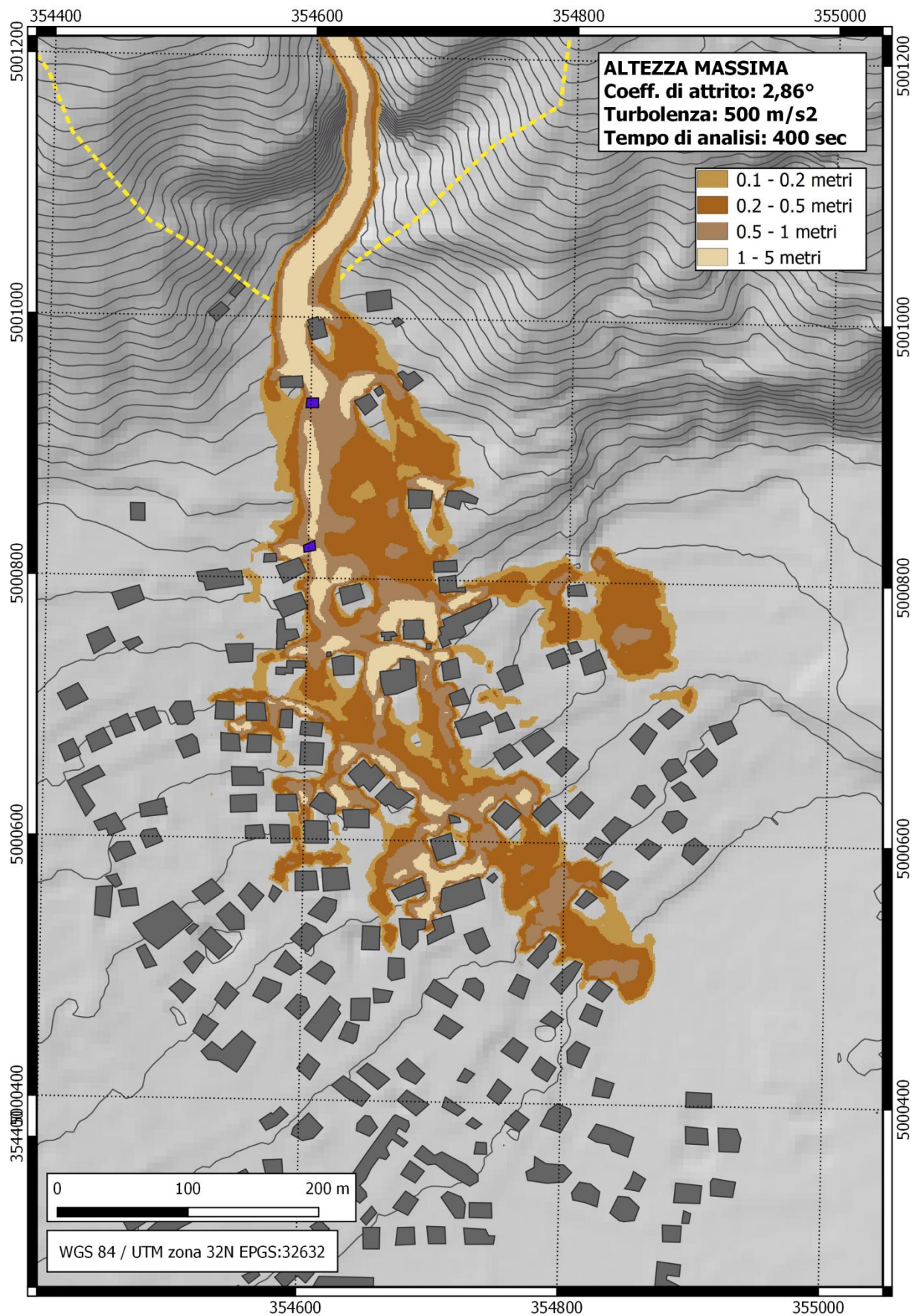


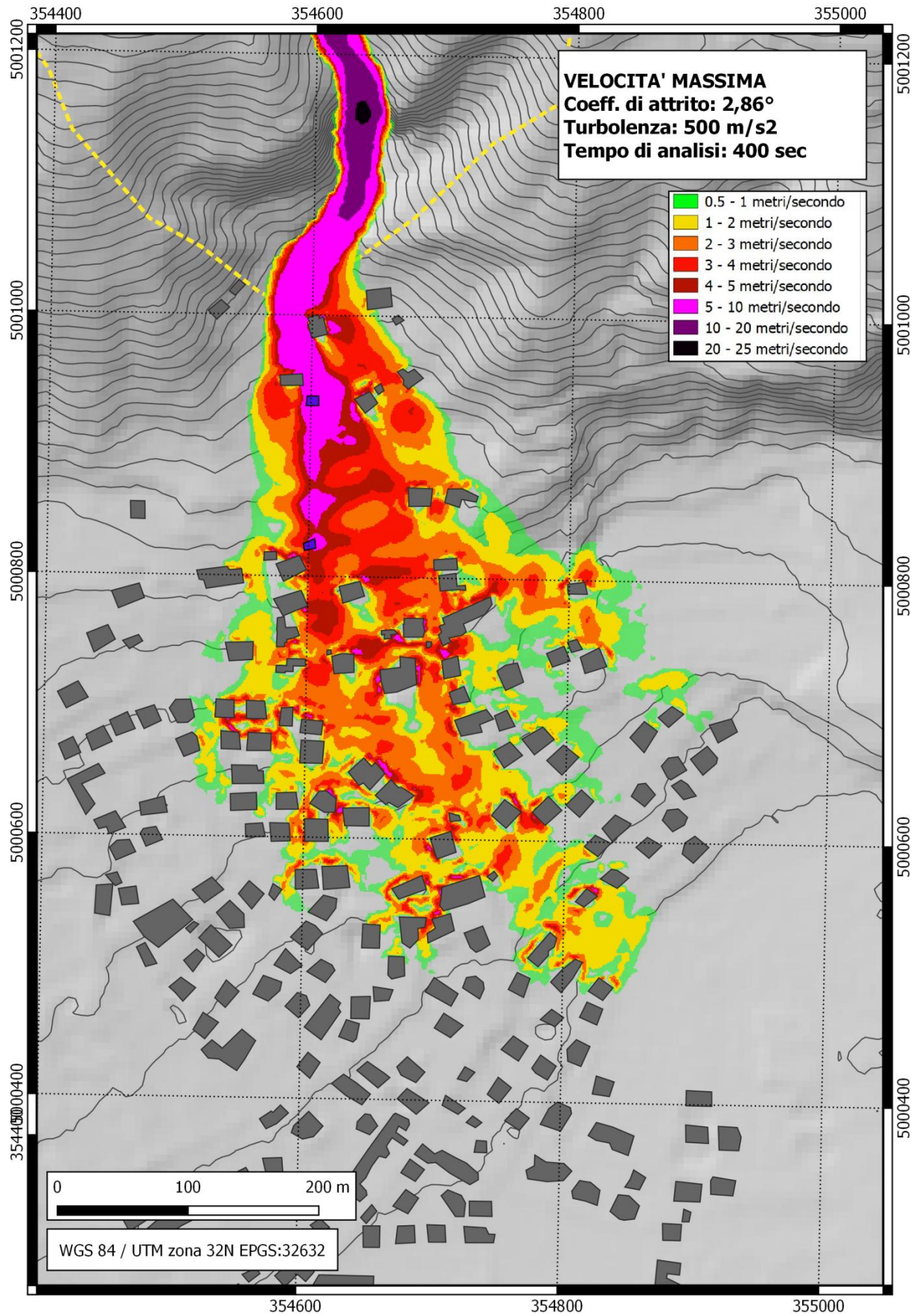
9.7 ALLEGATO 7 – MODELLAZIONE FINALE DELLA COLATA DETRITICA - MODELLO C_B_S - INNESCO CONCENTRATO

Si riporta il risultato finale della modellazione numerica che meglio rappresenta l'evento come discusso al paragrafo 4.5 Comparazione tra simulazione numerica e perimetrazione dell'evento.







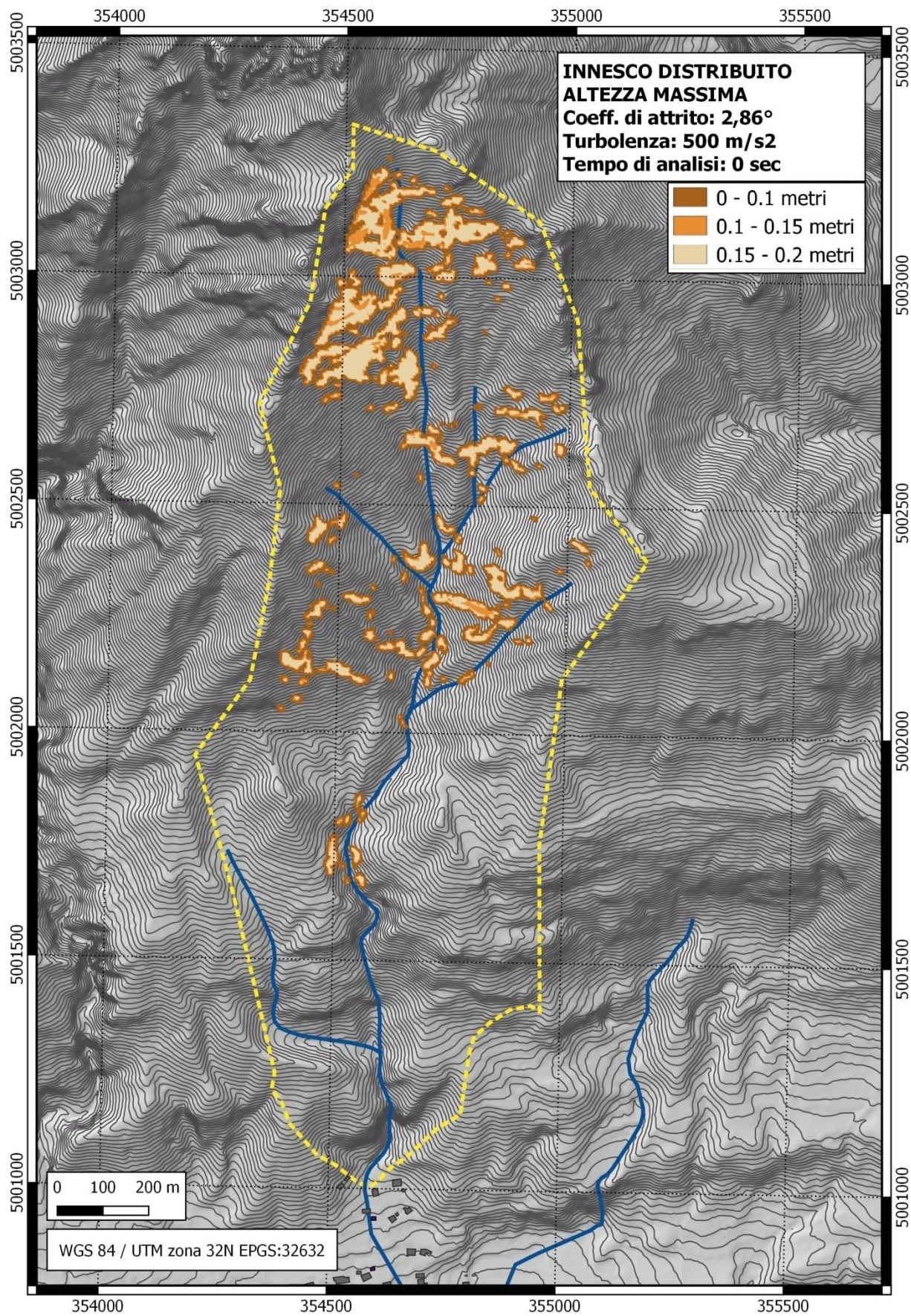


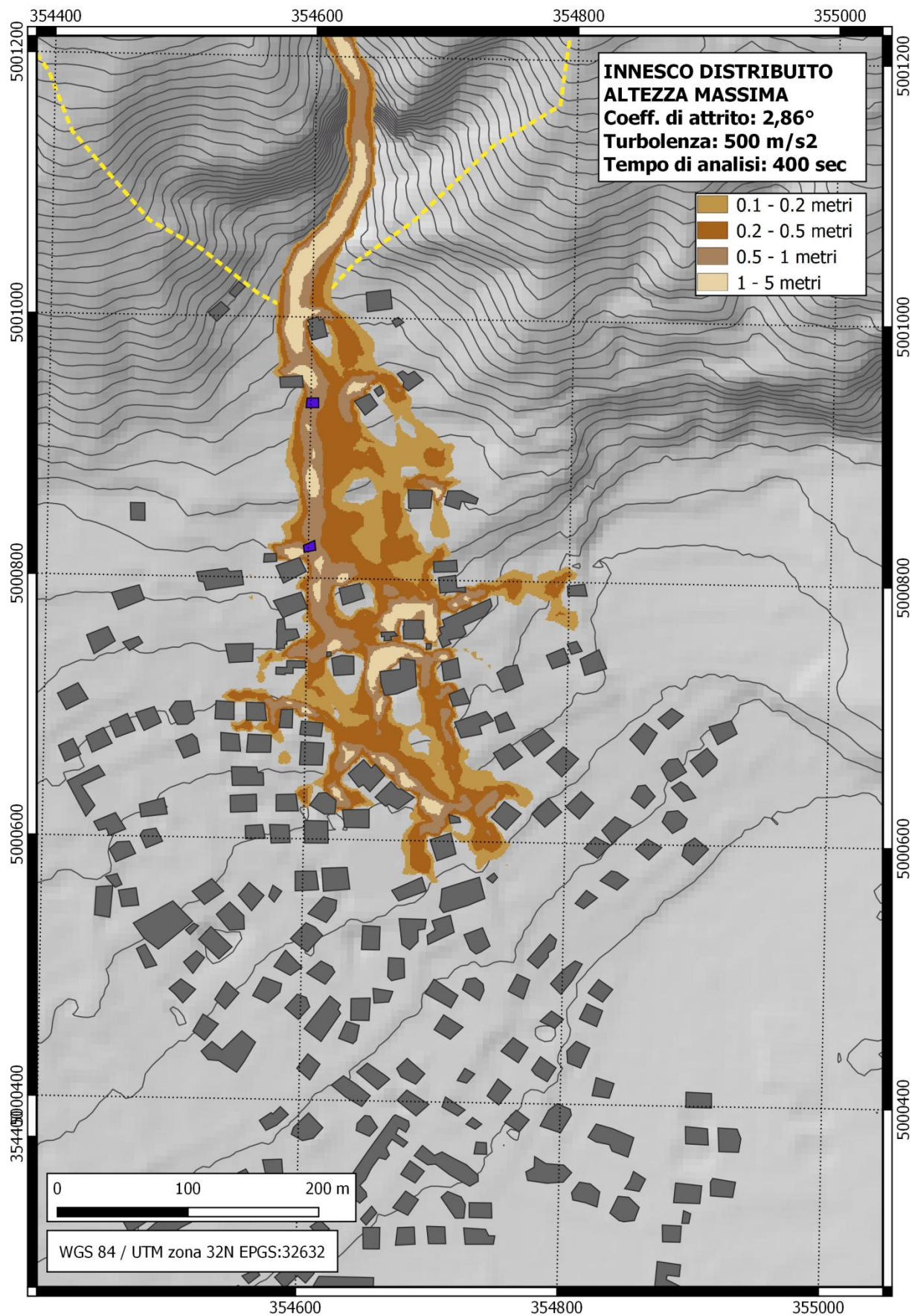
9.8 ALLEGATO 8 – MODELLAZIONE DELLA COLATA DETRITICA - MODELLO C_B_S - INNESCO DISTRIBUITO

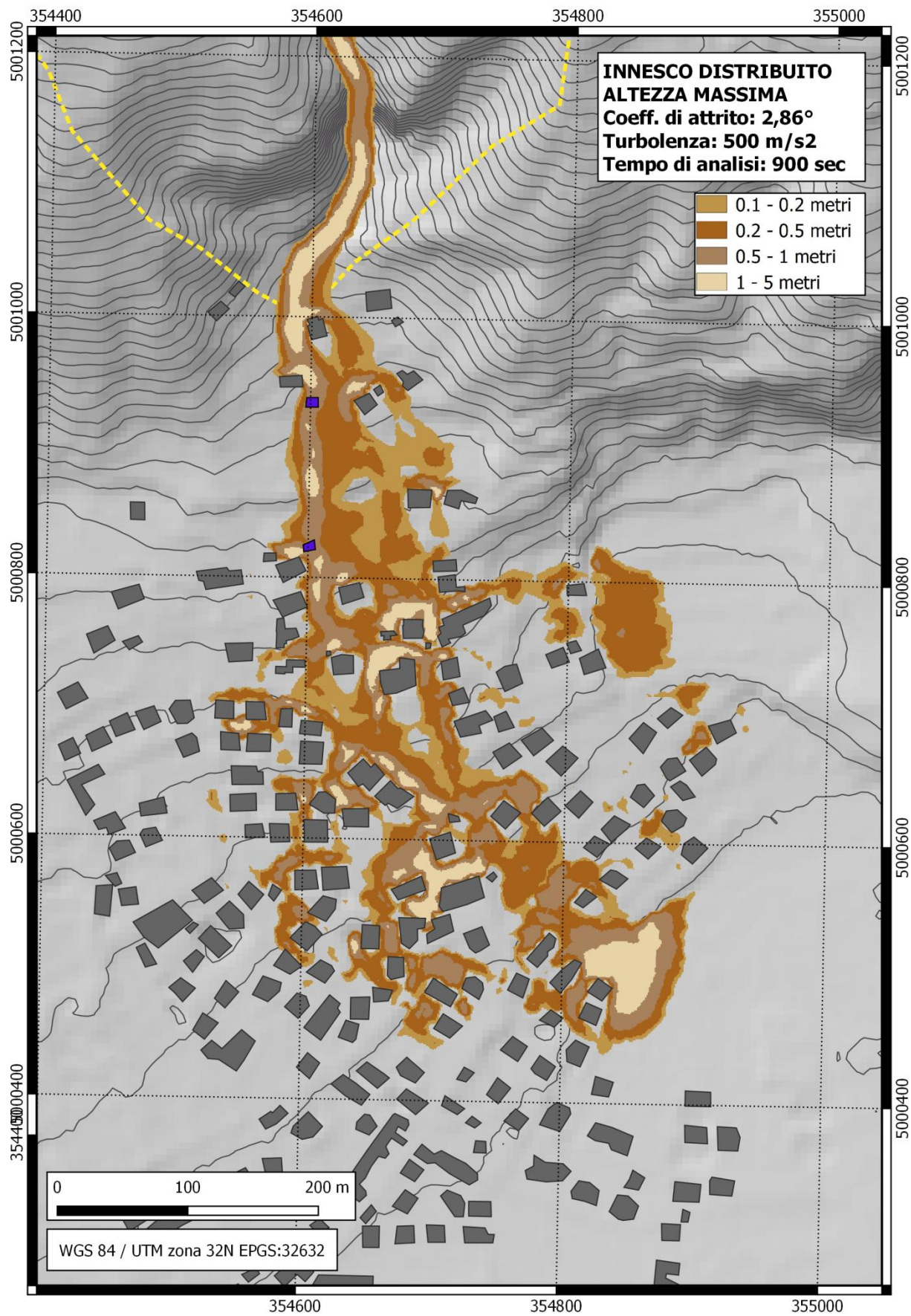
Si riporta il risultato finale della modellazione numerica con innesco distribuito come discusso al paragrafo 4.6 Comparazione tra innesco concentrato e distribuito.

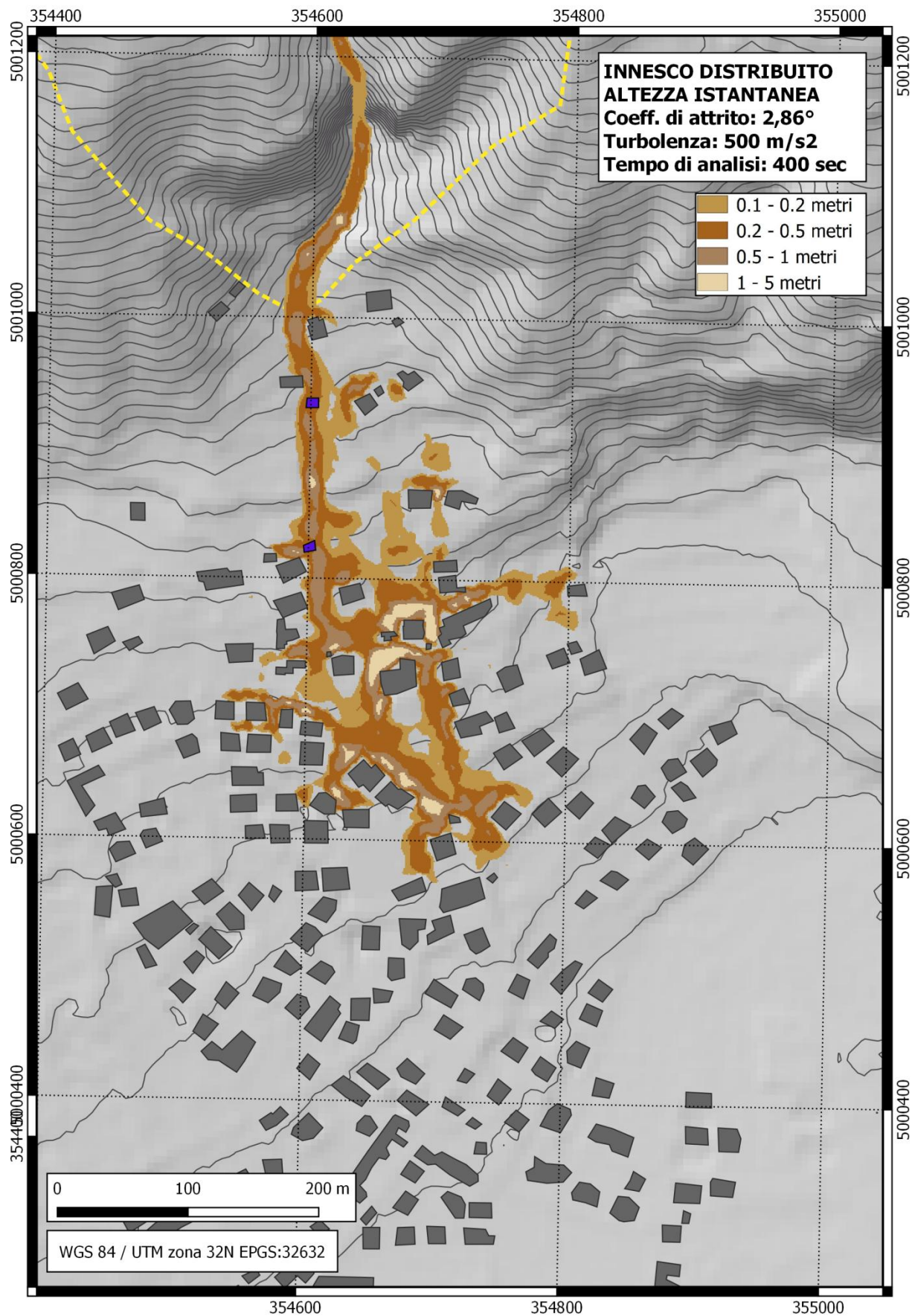
La simulazione è stata condotta al tempo di analisi di:

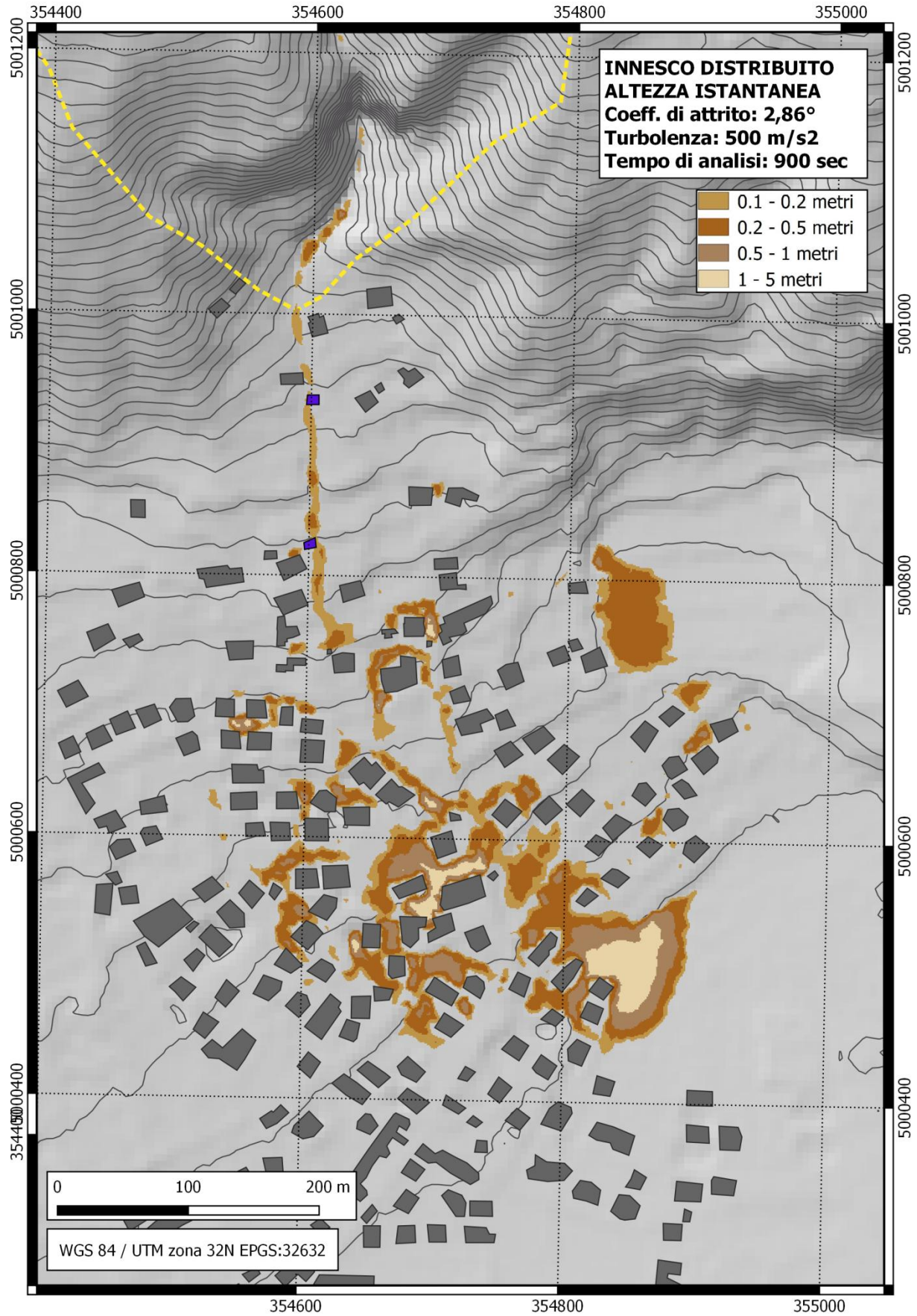
- 0 secondi
- 400 secondi
- 900 secondi

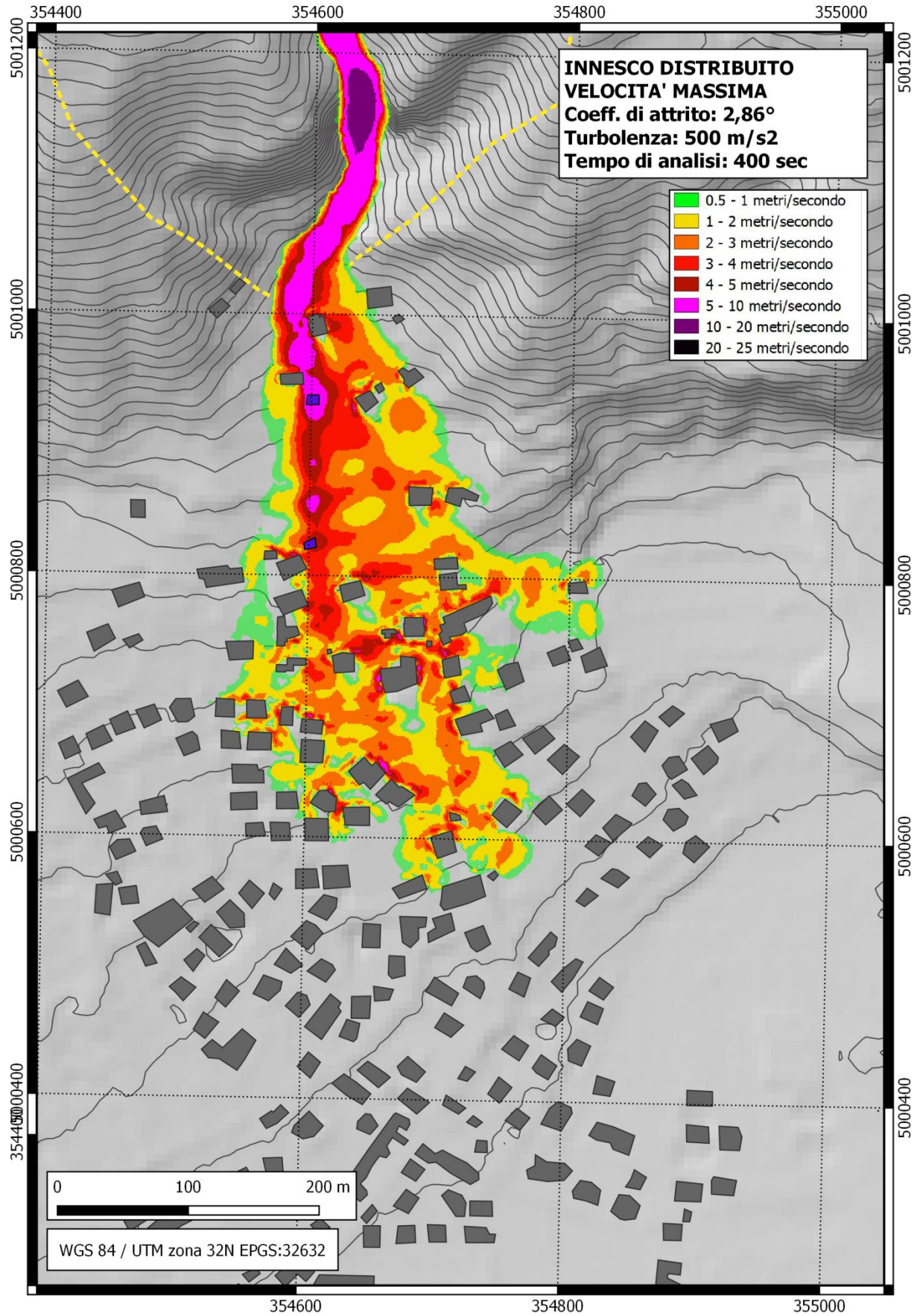


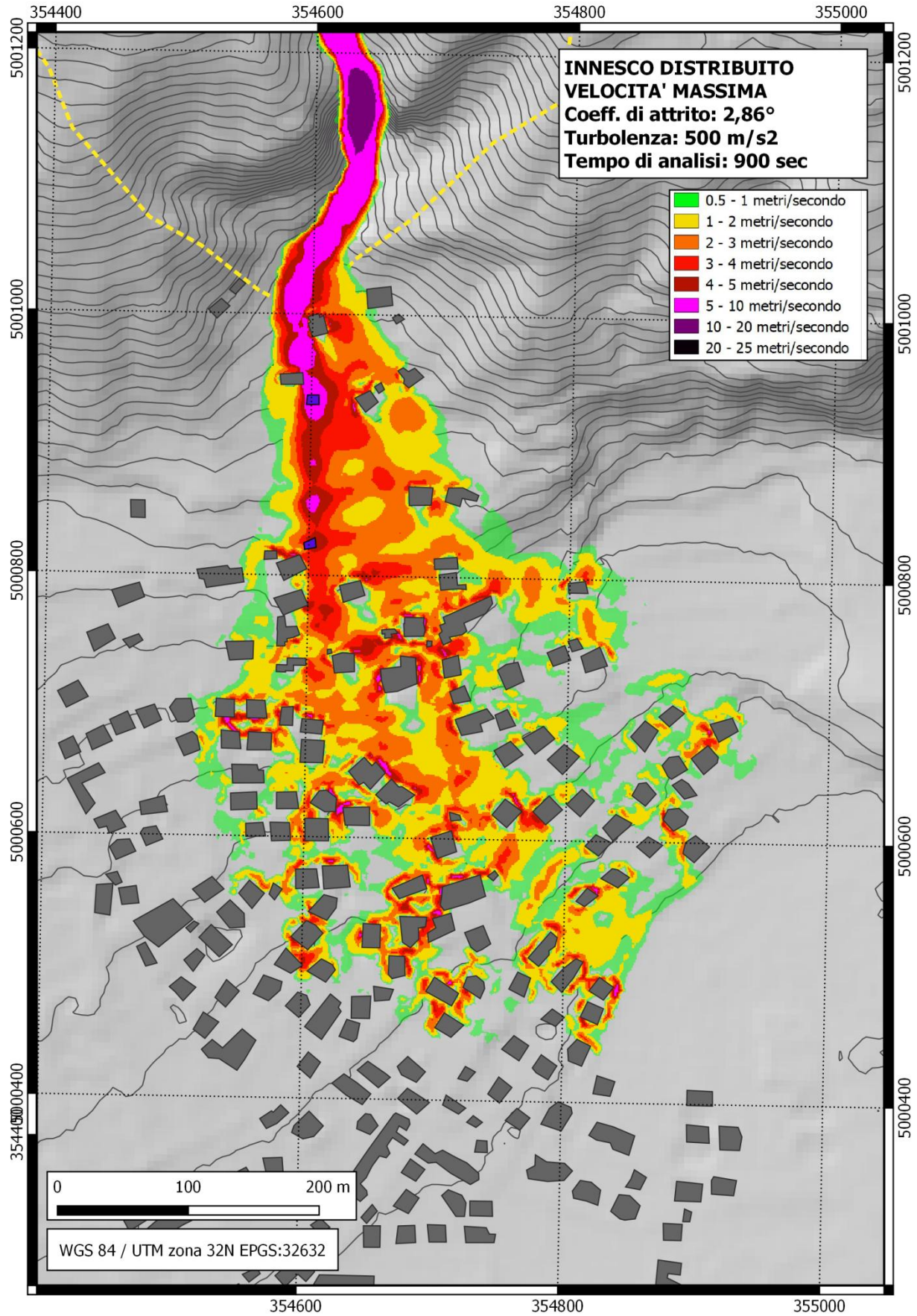








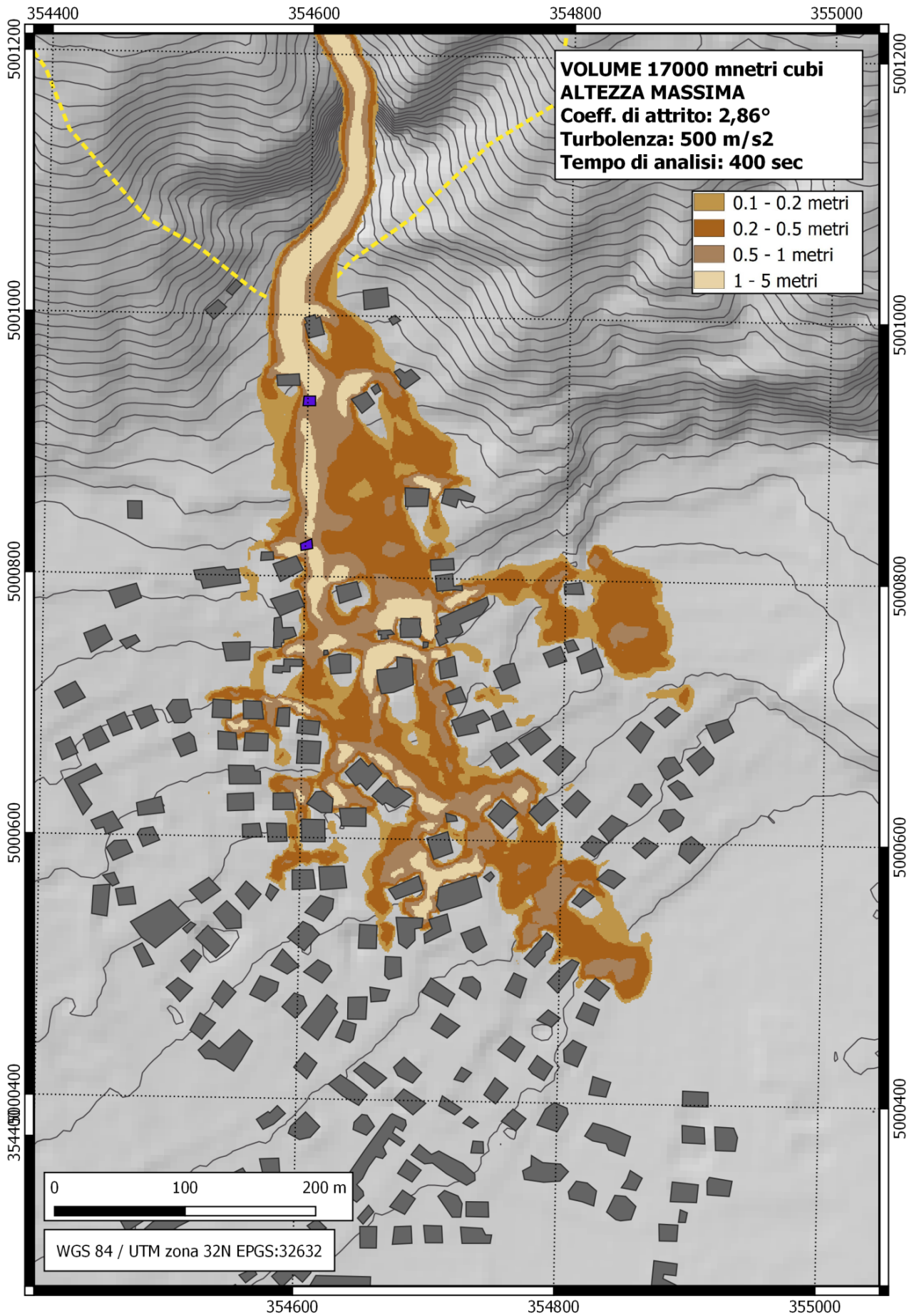


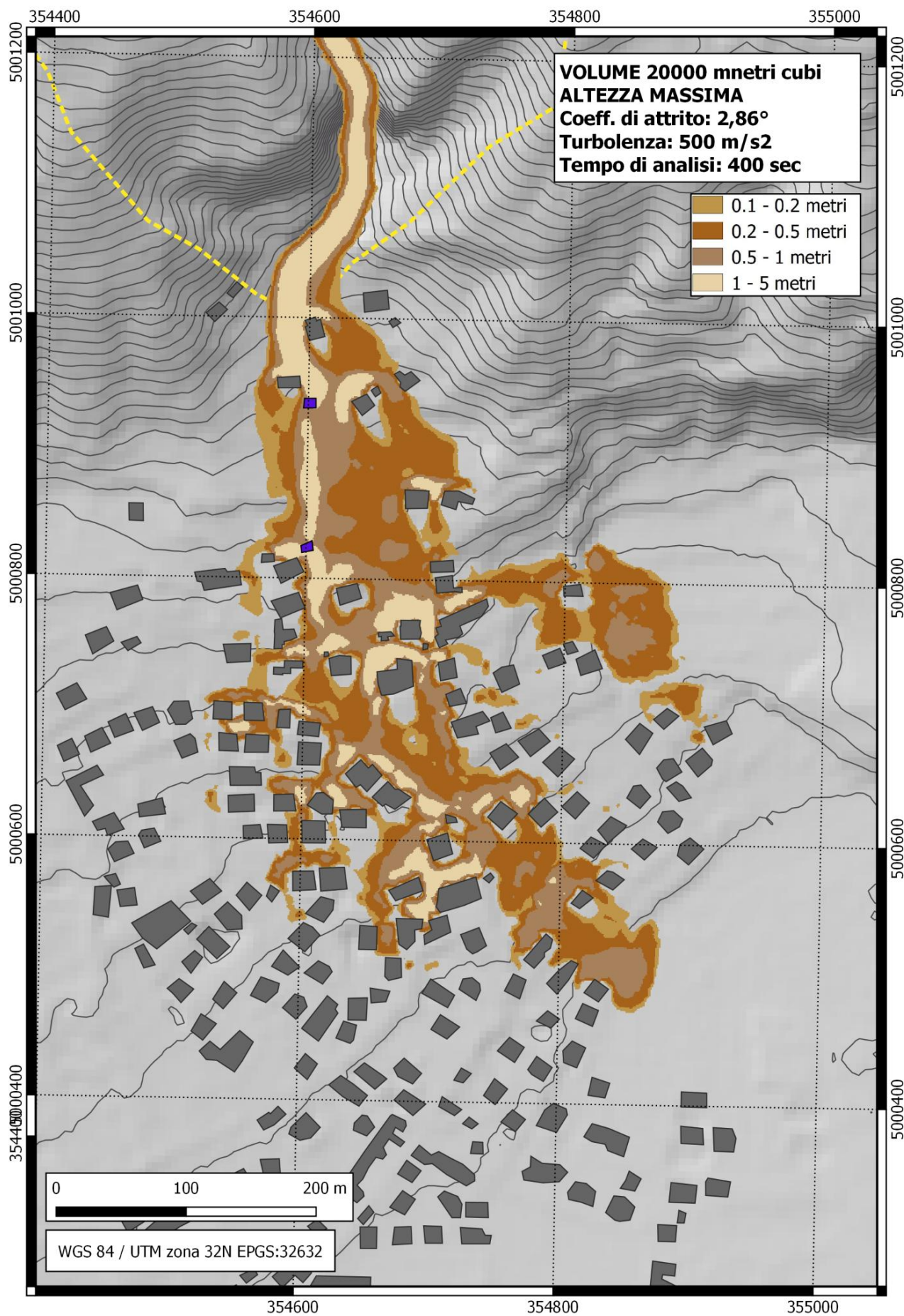


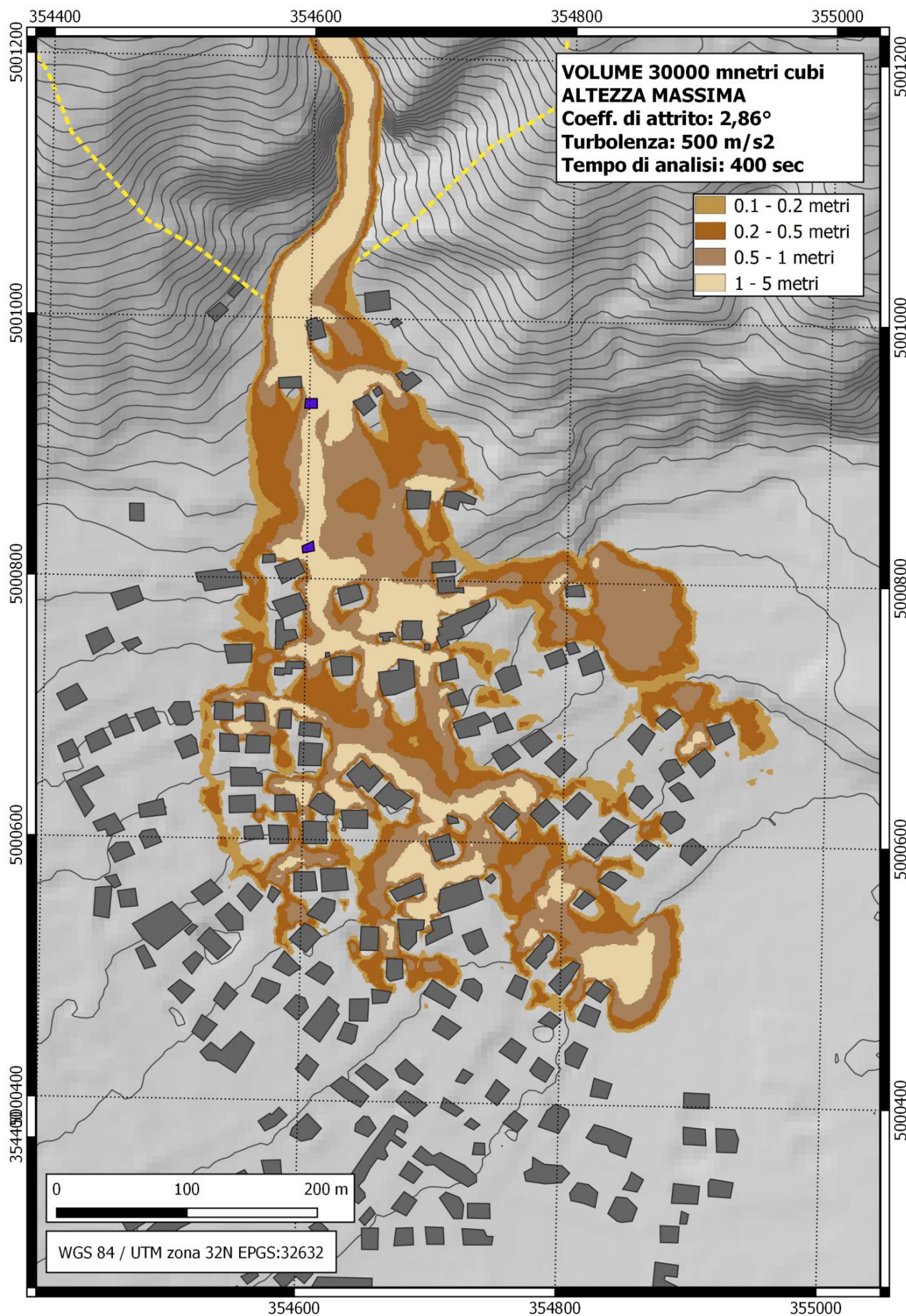
9.9 ALLEGATO 9 – ALTEZZE MASSIME DEL DEPOSITO IN FUNZIONE DEL VOLUME DI INNESCO– MODELLO C_B_C - INNESCO CONCENTRATO

Al paragrafo 4.7 Comparazione tra scenari con differenti volumi di massa mobilitata all'innesco viene studiato il risultato della simulazione con differenti volumi di innesco. Si riportano le altezze massime a 400 secondi per i tre volumi investigati:

- 17000 metri cubi
- 20000 metri cubi
- 30000 metri cubi







RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare le persone, gli Enti e i professionisti che a vario titolo hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi di laurea magistrale.

Ringrazio *Arpa Piemonte* per il materiale Gis e la bibliografia che mi sono stati forniti, e per tutte le informazioni messe a disposizione attraverso il portale Web. Ringrazio in modo particolare:

- dr. geol. Mauro Tararbra
- dr. geol. Davide Tiranti
- dr. Gabriele Nicolò

Ringrazio lo *Sportello Unico per l'Edilizia Privata del Comune di Bussoleno* per aver messo a disposizione il materiale d'archivio sulle costruzioni colpite dall'evento e per tutte le informazioni preziose trasmesse oralmente, fondamentali per ricostruire la storia della città. Ringrazio in modo particolare:

- dr.ssa Cristina Bugnone

Ringrazio la *Regione Piemonte* per le informazioni condivise, per il preziosissimo materiale fotografico e per tutte le informazioni messe a disposizione attraverso il portale Web. Ringrazio in modo particolare:

- dr. geol. Daniele Drago

Ringrazio lo *Studio Rosso Ingegneri Associati di Torino* per avermi accompagnato durante il sopralluogo nella “zona rossa” di Bussoleno fornendomi tutte le informazioni utili a comprendere l'evento e per il preziosissimo materiale fotografico e video. Ringrazio in modo particolare:

- dott. ing. Santo La Ferlita

Ringrazio *AIB Squadra Antincendi Boschivi sezione di Bussoleno* per avermi permesso di accedere alla “zona rossa” di Bussoleno, guidandomi lungo l'area alluvionata e fornendomi tutte le informazioni utili a comprendere l'evento. Ringrazio in modo particolare:

- sig. Antonucci Mario

Un sentito ringraziamento va alla prof.ssa ing. MARINA PIRULLI del Politecnico di Torino per avermi trasmesso la passione per l'ingegneria e la geotecnica, per i preziosi insegnamenti e per avermi guidato nella stesura di questa tesi.

Ringrazio infine tutti coloro che mi hanno sostenuto ed incoraggiato in questi anni e in modo speciale la mia famiglia, Matteo e Riccardo (insostituibili compagni di studio al Politecnico nonché grandissimi amici), Aldo e Luisella, Stefano e Gianluca, Mauro.