

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO

### U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

### PROGETTO DEFINITIVO

## RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO

### IDROLOGIA E IDRAULICA

### STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE - RELAZIONE

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS2S 00 D 09 RG ID0002 001 D

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Aut. Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	E. Frank	ottobre 2017	F. Cabas	ottobre 2017	P. Carlesimo	ottobre 2017	ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dott. Ing. Angelo Vigozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma N° A20783 2018
B	Consegna al CSSLPP	E. Frank	gennaio 2018	F. Cabas	gennaio 2018	P. Carlesimo	gennaio 2018	
C	Recepimento Prescrizioni CSSLPP	E. Frank	luglio 2018	F. Cabas	luglio 2018	P. Carlesimo	luglio 2018	
D	Revisione per CdS	C. Cesali	ottobre 2018	F. Cabas	ottobre 2018	P. Carlesimo	ottobre 2018	

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
1.1	OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO .....	7
1.2	METODOLOGIA DI LAVORO .....	7
1.3	NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO .....	10
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO .....</b>	<b>15</b>
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'INTERVENTO .....	15
2.2	AREE DI PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA.....	17
2.3	CARATTERISTICHE AMBIENTALI E PAESISTICHE DELLA REGIONE FLUVIALE .....	22
2.4	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA INTERESSATI DAL PROGETTO .....	22
2.4.1	Assetto e parametri geomorfologici dei bacini .....	22
2.4.2	Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo .....	27
2.4.3	Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame .....	28
2.5	INDICE DI DINAMICA MORFOLOGICA (IDM).....	29
2.5.1	Metodo IDRAIM.....	29
2.5.2	Applicazione ai casi di studio.....	33
2.6	APPORTO DI SEDIMENTI AI TRATTI DI STUDIO.....	35
2.6.1	Considerazioni generali per la modellazione a fondo mobile .....	35
2.6.1.1	<i>Andamento delle portate liquide (di medio periodo).....</i>	<i>37</i>
<b>3</b>	<b>VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO .....</b>	<b>39</b>
3.1	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO .....	39
3.1.1	La teoria di Shields per il moto incipiente .....	39
3.1.2	L'equazione di Exner .....	42
3.1.3	Accoppiamento acqua-sedimenti .....	44
3.1.4	Scelta della Formula di Trasporto solido per i casi in esame.....	46
3.2	MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE .....	52
3.2.1	HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti .....	52
3.2.1.1	<i>Cenni generali.....</i>	<i>52</i>
3.2.1.2	<i>Funzionamento del programma.....</i>	<i>53</i>

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

3.2.2	Schematizzazione idraulica adottata .....	55
3.2.2.1	<i>Geometria dei modelli</i> .....	55
3.2.2.2	<i>Scabrezza idraulica</i> .....	56
3.2.2.3	<i>Condizioni al contorno</i> .....	56
3.2.2.4	<i>Limiti del fondo erodibile</i> .....	58
3.2.2.5	<i>Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo</i> .....	59
3.2.2.6	<i>Formula di trasporto solido</i> .....	59
3.2.2.7	<i>Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo</i> .....	60
3.2.2.8	<i>Granulometria del fondo alveo</i> .....	60
3.3	MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO .....	61
3.3.1	Tendenza all'erosione e alla deposizione.....	61
<b>4</b>	<b>VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DELL'OPERA IN PROGETTO A FENOMENI DI COLATE DETRITICHE .....</b>	<b>71</b>
4.1	ASSETTO DEI VERSANTI E PROPENSIONE AL DISSESTO .....	72
4.2	STIMA DEI VOLUMI POTENZIALMENTE MOBILITABILI DAI VERSANTI .....	82
4.2.1	Metodologia generale.....	82
4.2.1.1	<i>Impluvi sui versanti di Calatabiano</i> .....	85
4.2.1.2	<i>Vallone Motta</i> .....	88
4.3	SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DI COLATE DETRITICHE .....	89
4.3.1	Modello matematico.....	89
4.3.2	Determinazione dei parametri geometrici e fisico-meccanici ed implementazione del modello di calcolo .....	93
4.3.3	Risultati delle simulazioni.....	97
4.3.3.1	<i>Scenario "ante operam"</i> .....	97
4.3.3.2	<i>Scenario "di progetto"</i> .....	101
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>105</b>
5.1	ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO.....	105
5.2	INTERVENTI DI MITIGAZIONE PER FENOMENI DI COLATE DETRITICHE.....	108
<b>6</b>	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....</b>	<b>109</b>

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1 – Procedura di analisi: flow chart. ....	9
Figura 2-1 - Inquadramento geografico della zona in esame. ....	16
Figura 2-2: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito.....	27
Figura 2-3 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM. ....	31
Figura 2-4: estratto degli Annali idrologici per il Fiume Alcantara.....	37
Figura 2-5: andamento della portate medie mensili per il Torrente Fiumedinisi .....	38
Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d’acqua.....	39
Figura 3-2: Diagramma di Shields .....	41
Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo .....	43
Figura 3-4: esempio dell’inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale.....	58
Figura 3-5: esempio dell’inserimento della massima profondità erodibile .....	59
Figura 3-6: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo .....	60
Figura 3-7: Torrente Minissale – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione) .....	63
Figura 3-8: Fiume Alcantara – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione).....	64
Figura 3-9: Torrente Letojanni – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione) .....	65
Figura 3-10: Torrente Fondaco – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione) .....	66
Figura 3-11: Fiumara D’Agrò – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione) .....	67
Figura 3-12: Torrente Fiumedinisi – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione).....	68
Figura 3-13: Torrente Ali – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione).....	69
Figura 3-14: Torrente Itala – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione).....	70
Figura 4-1: Vulnerabilità a fenomeni di colate detritiche - Flow chart.....	71
Figura 4-2: Area critica 1 - impluvi di Calatabiano. ....	73
Figura 4-3: Area critica 2 - Vallone Sant’Antonio (loc. Taormina).....	73
Figura 4-4: Area Critica 3 – Torrente Boschetto (loc. Fondaco Parrino).....	74
Figura 4-5: Area Critica 4 - Vallone Motta (loc. Giampilieri).....	74

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE</b> <b>RELAZIONE</b>	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Figura 4-6: Area conoide vs area bacino: valori caratteristici dei sistemi bacino-conoide interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico .....	77
Figura 4-7: Pendenza conoide vs area bacino: valori caratteristici di sistemi bacino-conoide interessati da trasporto di materiale detritico.....	78
Figura 4-8: Pendenza conoide vs indice di Melton (DeSccally & Owens, 2004).....	80
Figura 4-9: Stralcio della Carta della Pericolosità e del Rischio Geomorfologico del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (2005, aggiornamento 2017 – 095 Area tra F. Simeto e F. Alcantara) – località Calatabiano. ....	81
Figura 4-10: Foto del sopralluogo.....	81
Figura 4-11: Stralcio della Carta dei Dissesti redatta dal Dipartimento Regionale della Protezione Civile – Servizio Rischi Idrogeologici e Ambientali, relativa agli eventi del 2009.....	82
Figura 4-12 – Metodo volumetrico: determinazione dell’ond di colata detritica (debrisgramma). ....	84
Figura 4-13: Impluvi a Calatabiano – ubicazione del sondaggio S11.....	94
Figura 4-14: Impluvi a Calatabiano – stratigrafia del sondaggio S11.....	95
Figura 4-15: Aree di distacco simulate: Vallone Motta (a sinistra) e Calatabiano (a destra).....	96
Figura 4-16: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “ante operam” – inviluppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo r.avafllow. ....	97
Figura 4-17: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “ante operam” – aree di deposizione e spessori del materiale finali, su CTR. ....	98
Figura 4-18: Impluvi di Calatabiano, scenario “ante operam” – inviluppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo r.avafllow. ....	99
Figura 4-19: Impluvi di Calatabiano, scenario “ante operam” - inviluppo delle altezze massime di materiale, su CTR.....	99
Figura 4-20: Impluvi di Calatabiano, scenario “ante operam” – inviluppo delle altezze massime di materiale, su CTR, con sovrapposizione delle opere in progetto. ....	100
Figura 4-21: Scenario “di progetto” – implementazione degli interventi proposti a Giampilieri (sinistra) e a Calatabiano (destra) in r.avafllow, mediante modifica del DTM. ....	101
Figura 4-22: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “di progetto” – inviluppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo r.avafllow. ....	102
Figura 4-23: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “post operam” – aree di deposizione e spessori del materiale finali, su CTR. ....	102
Figura 4-24: Impluvi di Calatabiano, scenario “di progetto” – inviluppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo r.avafllow. ....	103
Figura 4-25: Impluvi di Calatabiano, scenario “di progetto” - aree di deposizione e spessori del materiale finali, su CTR. ....	104

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1 – Pericolosità del fenomeno franoso (fonte: P.A.I. Regione Sicilia) .....	18
Tabella 2-2 – Classi di pericolosità (fonte: P.A.I. Regione Sicilia) .....	18
Tabella 2-3 – Caratteristiche morfometriche dei bacini di interesse .....	26
Tabella 2-4: Caratteristiche granulometriche dei corsi d’acqua in esame.....	29
Tabella 2-5 – Lista degli indicatori per la valutazione dell’IDM .....	34
Tabella 2-6 – Indice e Classe di Dinamica Morfologica dei corsi d’acqua oggetto di studio. L’applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Sicilia dagli Enti preposti.....	34
Tabella 2-7: Portate medie mensili calcolate con il metodo della portata indice .....	38
Tabella 3-1: limiti di applicabilità delle formule di trasporto solido.....	47
Tabella 3-2: valori di scabrezza adottati per i corsi d’acqua di studio .....	56
Tabella 3-3: valori di portata media mensile simulati .....	56
Tabella 3-4: Stima della tendenza evolutiva .....	61
Tabella 4-1: Caratteristiche morfometriche dei sistemi “bacino-conoide” degli impluvi di Calatabiano .....	75
Tabella 4-2: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del Vallone Sant’Antonio..	75
Tabella 4-3: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del Torrente Boschetto .....	75
Tabella 4-4: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del Vallone Motta.....	76
Tabella 4-5: formule empiriche per la stima della portata al colmo di una colata detritica. ....	83
Tabella 4-6: Impluvi di Calatabiano: valutazione del volume di materiale potenzialmente mobilitabile. ....	85
Tabella 4-7: Vallone Motta: valutazione del volume di materiale potenzialmente mobilitabile. ....	88
Tabella 4-8: r.avaflow - principali parametri di input. ....	90
Tabella 4-9: r.avaflow - parametri fisico-meccanici e reologici. ....	91
Tabella 4-10: r.avaflow – principali outputs. ....	93
Tabella 5-1 – Valori dell’indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata .....	106
Tabella 5-2 – Valori dell’indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata .....	106
Tabella 5-3: Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata per i corsi d’acqua in esame.....	107

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO

La presente Relazione riferisce in merito alle analisi di geomorfologia fluviale, relative ai corsi d'acqua interessati dal Progetto Definitivo del raddoppio della tratta ferroviaria "Giampileri-Fiumefreddo". Lo studio geomorfologico viene condotto con l'obiettivo di valutare le tendenze evolutive dei corsi d'acqua, in termini di possibili naturali variazioni morfologiche dell'alveo che evidenzino erosioni o deposizioni diffuse con mobilitazione dei sedimenti e conseguente possibile rischio di interrimento delle opere di attraversamento. La deposizione del materiale d'alveo, trasportato dalla corrente idrica, viene infatti presa in considerazione per il dimensionamento delle nuove opere di attraversamento, in quanto la luce libera di sottotrave può ridursi appunto a causa dell'interrimento. Tuttavia i sedimenti naturalmente depositi dalla corrente idrica possono essere rimobilizzati dalle piene, per cui l'analisi del trasporto solido fluviale ha l'obiettivo di indicare appunto la tendenza evolutiva, secondo adeguati scenari di andamento delle portate di magra e di piena, al fine di programmare le conseguenti attività di manutenzione, finalizzate al monitoraggio della dinamica morfologica del corso d'acqua.

### 1.2 METODOLOGIA DI LAVORO

La procedura implementata per valutare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua si compone operativamente delle seguenti fasi:

- Caratterizzazione geomorfologica del corso d'acqua
  - Valutazione degli apporti di sedimenti per fenomeni gravitativi all'interno del bacino idrografico di interesse mediante sopralluoghi e l'analisi degli studi (se disponibili) condotti dagli enti proposti alla tutela e salvaguardia del territorio (ad es. cartografia P.A.I., Carta dei Dissesti,.....), secondo quanto previsto dal manuale di progettazione e dalle linee guida di RFI.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 8 di 110

- Approfondimenti specifici sui fenomeni dei versanti: qualora, dall’analisi finalizzata alla valutazione dell’apporto di sedimenti, si riscontrasse la possibilità di fenomeni di flussi idrici iperconcentrati o colate detritiche, viene condotta una specifica analisi di propensione al dissesto e valutazione dell’estensione del fenomeno.
- Applicazione della metodologia IDRAIM (Ispra, 2016) per la definizione dell’Indice di dinamica morfologica – IDM, sulla base del rilevamento *in situ* delle caratteristiche di erodibilità, artificialità (opere di protezione/difesa sponde/alveo), variabilità morfologica (larghezza alveo, altimetria), nonché delle analisi granulometriche di campioni di materiale prelevati in alveo.
- Caratterizzazione idraulica del corso d’acqua
  - Sviluppo di modelli idraulici «a fondo mobile» (HEC RAS), secondo scenari di andamento delle portate medie mensili, ai fini dell’individuazione dei tratti di alveo soggetti a fenomeni erosione e/o deposizione, nelle situazioni ante-operam e post-operam, in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.
  - Simulazioni di scenari relativi a portate corrispondenti a tempi di ritorno elevati, laddove necessario (ad es. in presenza di zone soggette a deposizione immediatamente a monte dell’intervento), per una più dettagliata valutazione della possibilità di interrimento delle opere previste.
- Analisi dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione geomorfologica e idraulica
  - Verifica e/o dimensionamento delle opere di attraversamento: se soggette ad erosione, si procede alla definizione di opportune opere di sistemazione idraulica; se soggette a deposizione, si procede con la verifica dell’officiosità idraulica dell’opera di attraversamento prevista, con riferimento alla normativa vigente in materia di franco idraulico (minimo) di sicurezza.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

- Nuove iterazioni di progettazione per le opere a (forte) rischio di interrimento con conseguente significativa riduzione del franco idraulico, al di sotto del valore minimo previsto dalla normativa vigente.
- Definizione del ‘*livello di attenzione per interventi di manutenzione*’ (LAm) finalizzato al mantenimento dei franchi idraulici di progetto e programmazione delle attività manutentive (frequenza delle ispezioni,.....), sulla base dei risultati IDRAIM e HECRAS
- Definizione degli eventuali interventi di mitigazione in seguito ai risultati dell’analisi di propensione al dissesto dei versanti

Di seguito, la “*flow chart*” riepilogativa della procedura sopra descritta.

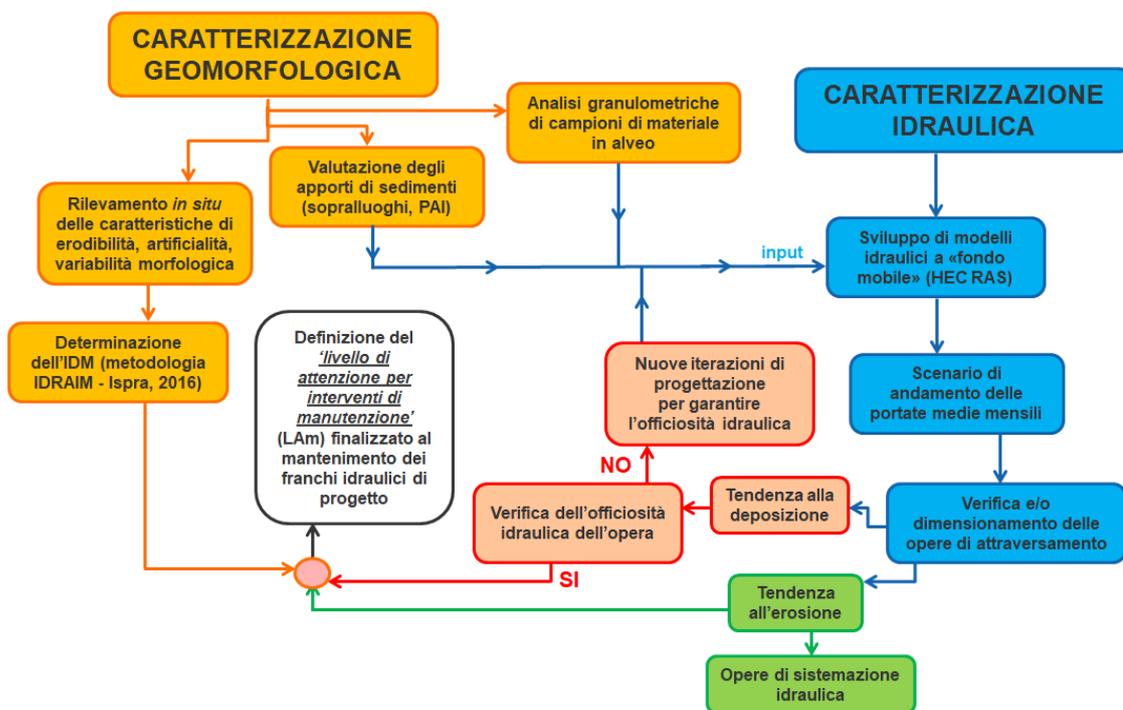


Figura 1-1 – Procedura di analisi: *flow chart*.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

### 1.3 NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Ai fini del presente studio sono stati consultati i seguenti piani e documentazione di riferimento:

- Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia;
- Piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico della Sicilia;
- Piano di gestione dei sedimenti;
- Competenze del Genio Civile;
- Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d’acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

#### **Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia.**

La Regione Siciliana – Assessorato Territorio e Ambiente, dopo il Piano Straordinario per l’Assetto Idrogeologico, approvato con decreto del 4 luglio 2000, si è dotata del Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico (P.A.I.); con il P.A.I. viene effettuata la perimetrazione delle aree a pericolosità e a rischio geomorfologico, idraulico e di erosione costiera. Tutto ciò al fine di pervenire ad una puntuale definizione dei livelli di rischio e fornire criteri e indirizzi indispensabili per l’adozione di norme di prevenzione e per la realizzazione di interventi volti a mitigare od eliminare il rischio.

Per quanto riguarda i dissesti geomorfologici, la metodologia utilizzata, dai redattori del Piano, per la loro individuazione e perimetrazione si è basata sul raffronto tra i risultati dell’analisi delle fonti di informazione (raccolta dati), dell’analisi aerofotogrammetrica e dei sopralluoghi, i quali, assieme a studi approfonditi concentrati nelle situazioni di rischio maggiore, hanno consentito di colmare via via le lacune sostanziali presenti nei dati iniziali.

La determinazione della tipologia delle frane è stata effettuata tenendo in considerazione la velocità di accadimento del fenomeno, ovvero la rapidità di evoluzione del processo di rottura, secondo la seguente classificazione:

- T1: deformazioni gravitative profonde in roccia, creep, espansione laterale, colate lente;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE</b>	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 11 di 110

- T2:frane complesse, scorrimenti e colamenti in roccia, detrito e terra;
- T3:scivolamenti rapidi in roccia, detrito e terra, crolli, colate rapide di fango.

Alle tipologie di fenomeni franosi classiche (colate, scorrimenti, crolli, movimenti gravitativi superficiali o profondi) si è scelto di aggiungere quei fenomeni repentini che si esplicano in corrispondenza di profondi processi di erosione idrica e che determinano una condizione di asportazione dei suoli e di rocce incoerenti, o che possono provocare il crollo di rocce coerenti per scalzamento al piede di sottostanti terreni erosivi. Si è osservato, infatti, che tali fenomeni interessano direttamente le pendici di molti centri abitati della Sicilia ubicati sulle alture; l'erosione, in questi casi, provoca una lenta ma inesorabile asportazione dei terreni di sottofondazione, determinando un rischio per le abitazioni ubicate lungo i cigli delle pendici. L'identificazione di questi processi può individuare aree critiche soggette a processi erosivi estesi che, spesso, degenerano in dissesti franosi veri e propri. Tra le forme di erosione idrica sono stati considerati soprattutto i fenomeni di asportazione del suolo e di rocce incoerenti derivanti dall'erosione in rivoli e fossi ed i conseguenti scalzamenti al piede di versanti più o meno estesi. I calanchi sono stati considerati a parte mentre tutte le altre forme di dissesto, quali l'erosione a solchi, il rotolio di pietrame lungo pendii poco vegetati, lo scalzamento al piede nei tratti esterni ai meandri torrentizi e fluviali e le rapide asportazioni per ruscellamento diffuso in terreni argillosi, sono state indicate in cartografia con un unico simbolo, comprese nella voce "dissesti dovuti ad erosione accelerata" ed inseriti nella tipologia T1, in quanto fenomeni a pericolosità variabile, ma potenzialmente bassa.

I fenomeni così censiti sono stati riportati nella "Carta dei dissesti" del P.A.I. i cui shapefile, disponibili sul Geoportale Cartografico della Regione Sicilia ([www.sitr.regione.sicilia.it](http://www.sitr.regione.sicilia.it)) sono stati utilizzati per la redazione della cartografia geomorfologica del presente studio.

Il P.A.I. perviene, inoltre, alla valutazione della Pericolosità e del Rischio, la cui metodologia di valutazione è stata riferita alla definizione di rischio data dal D.P.C.M. 29/9/98 (Atto di indirizzo e coordinamento), cui si rimanda per completezza. Secondo tale definizione il rischio è il risultato del prodotto di tre fattori:

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

- pericolosità probabilità di accadimento dell'evento calamitoso;
- valore degli elementi a rischio (intesi come persone, beni localizzati, patrimonio ambientale);
- vulnerabilità degli elementi a rischio (che dipende sia dalla loro capacità di sopportare le sollecitazioni esercitate dall'evento, sia dall'intensità dell'evento stesso)

Le elaborazioni effettuate durante la redazione del P.A.I. hanno prodotto la “Carta della Pericolosità e del Rischio geomorfologico” i cui risultati sono stati tenuti in debita considerazione ai fini del presente studio.

Infine, si riporta di seguito l'elenco dei bacini contenenti aree a pericolosità geomorfologica intercettati dal tracciato ferroviario in progetto, con il relativo codice di bacino PAI:

- Vallone Minissale (095)
- Fiume Alcantara (096)
- Torrente Letojanni (097)
- Torrente Fondaco (097)
- Fiumara D'agro' (098)
- Torrente Fiumedinisi (101)
- Torrente Ali' (102)
- Torrente Itala (102)
- Torrente Giampilieri (102)

#### **Piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico della Sicilia**

Il Progetto di Piano di Gestione del Rischio Alluvioni della Sicilia - Assessorato del territorio e dell'ambiente-, elaborato sulla base delle mappe della pericolosità e del rischio idraulico in attuazione della Direttiva 2007/60/CE, è stato adottato dalla Giunta Regionale di Governo, con deliberazione n. 326 del 23 dicembre 2015.

Le informazioni che si possono ricavare da tale Piano, ai fini del presente studio, riguardano essenzialmente la descrizione dei bacini idrografici intercettati dal tracciato ferroviario della rete, in buona parte già riportate nel P.A.I.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 13 di 110

### **Piano di gestione dei sedimenti**

Allo stato attuale la Regione Sicilia non si è dotata, in attuazione alla Direttiva per la gestione dei sedimenti, approvata nell'aprile 2006, di un Piano generale di gestione dei sedimenti per i corsi d'acqua regionali.

Ai fini del presente studio si farà, quindi, riferimento alla normativa di settore in materia di terre e rocce da scavo.

### **Competenze del Genio Civile inerenti alla realizzazione di opere che interferiscono con i corsi d'acqua**

Il Genio Civile ha, tra le altre competenze, la funzione di esprimere:

- pareri ed autorizzazioni in materia di assetto idrogeologico del territorio;
- pareri tecnici su opere pubbliche relative a strade, ferrovie, aeroporti, opere marittime, bonifiche, acquedotti, fognature, impianti di depurazione e potabilizzazione, discariche, consolidamento di centri abitati, scuole, ospedali ed edifici pubblici in genere;
- rilascio concessioni per attraversamenti e occupazioni del demanio fluviale;
- pareri tecnici ed autorizzazioni su opere idrauliche;

### **Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)**

Il sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua, denominato IDRAIM, è stato realizzato con l'obiettivo di sviluppare una metodologia complessiva di analisi e di supporto alla gestione dei processi geomorfologici nei corsi d'acqua, tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità e di sicurezza, ai sensi della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE (Water Framework Directive o WFD) e della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (Floods Directive o FD). Il metodo sviluppato intende costituire una procedura sistematica e strutturata su come affrontare i vari aspetti geomorfologici, a integrazione di altre componenti (quali, ad es., gli aspetti idraulici ed ecologici), per poter giungere a fornire il supporto scientifico e conoscitivo per una gestione integrata dei corsi d'acqua.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Seppure costruito su basi scientifiche solide, è da tener presente che si tratta di una metodologia applicativa, tale da poter essere utilizzabile da parte degli enti responsabili dell'implementazione delle Direttive e dei piani di gestione e della gestione dei corsi d'acqua.

Uno degli obiettivi di tale metodologia è la definizione dell'Indice di Qualità Morfologica (IQM) e dell'Indice di Dinamica Morfologica (IDM) il quali rappresentano uno strumento per valutare lo scostamento rispetto a condizioni indisturbate del corso d'acqua che rappresentano le condizioni di riferimento. Nella definizione delle condizioni di riferimento si tiene conto della traiettoria di evoluzione del corso d'acqua, dei requisiti richiesti dalla WFD e del contesto specifico dei corsi d'acqua italiani, i quali sono stati interessati da fattori antropici per un lungo periodo di tempo. In accordo con la WFD, lo stato di riferimento deve corrispondere a condizioni "indisturbate", caratterizzate da assenza o impatti antropici molto limitati. Conseguentemente, le condizioni di riferimento sono definite in maniera tale da misurare lo scostamento rispetto a condizioni geomorfologiche indisturbate o solo lievemente disturbate.

Le condizioni di riferimento per un dato tratto sono definite considerando tre componenti, vale a dire:

- funzionalità geomorfologica (forme e processi del corso d'acqua);
- artificialità;
- variazioni morfologiche (instabilità).

Riguardo la prima componente, le condizioni di riferimento sono date dalla forma e dai processi che sono attesi per la tipologia morfologica esaminata. Per l'artificialità, la condizione di riferimento è data da assenza o presenza molto ridotta di interventi antropici (regolazione delle portate liquide e solide, strutture idrauliche e attività di gestione). Se esistono elementi antropici, essi dovrebbero produrre effetti trascurabili sulla morfologia dell'alveo e sui processi. Riguardo alla terza componente, un alveo deve essere stabile o in "equilibrio dinamico", vale a dire che non si sono verificate importanti variazioni morfologiche dovute a fattori antropici nel corso del "recente" passato (ovvero negli ultimi 100 anni circa). Riassumendo, le condizioni di riferimento consistono in un tratto di corso d'acqua in equilibrio dinamico, dove il fiume svolge quei processi geomorfologici che sono

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

attesi per una specifica tipologia, e dove l'artificialità è assente o non altera significativamente la dinamica del corso d'acqua a scala di bacino e di tratto.

Nell'ambito del presente studio, è stata applicata, in modo semplificato e in via preliminare, la metodologia per la determinazione dell'IDM (Indice di Dinamica Morfologica).

## 2 CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

### 2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'INTERVENTO

La tratta ferroviaria Giampilieri – Fiumefreddo, compresa nella linea Catania – Messina, si estende per oltre 42 km lungo la costa ionica della provincia di Messina (Figura 1).

Il percorso ferroviario attraversa in gran parte in galleria la zona costiera, partendo da una quota di 57.98 m s.m.m. alla Fermata di Fiumefreddo per giungere ai 16.25 m s.m.m. della Fermata di Giampilieri.

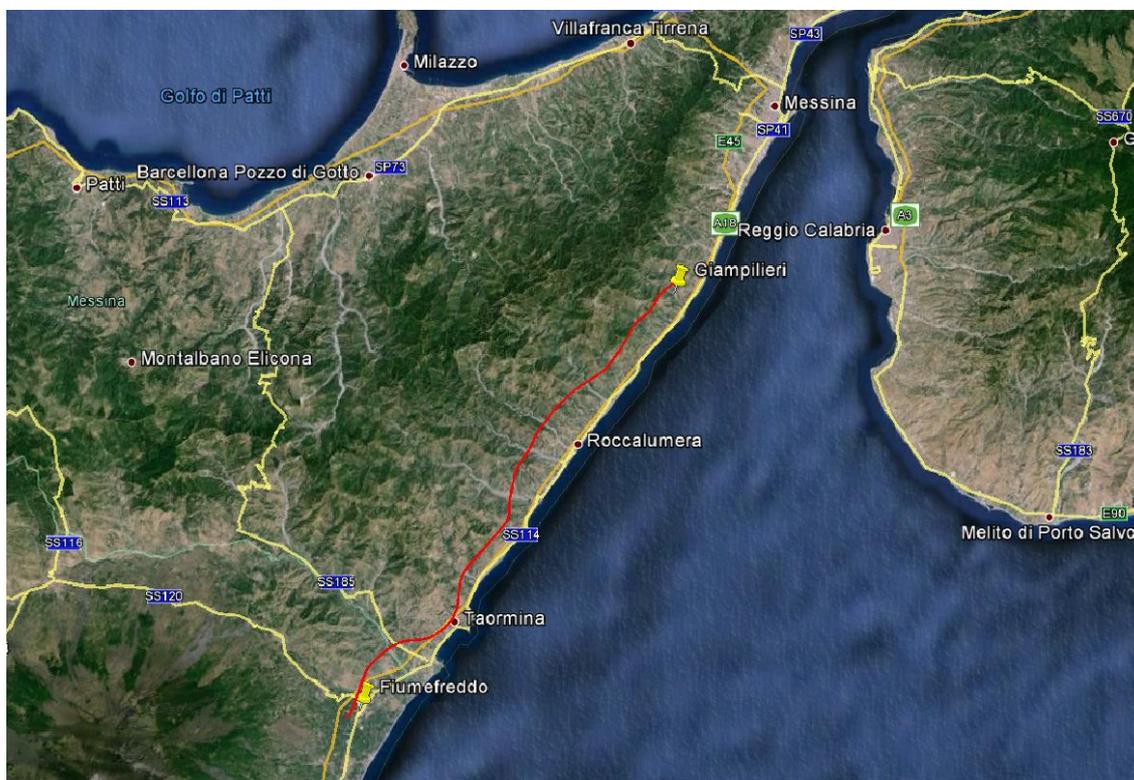
Nel suo tragitto, la tratta Giampilieri – Fiumefreddo interseca i tratti terminali di una serie di burroni, burroncelli, torrenti, scoli e rivi. Le principali infrastrutture di trasporto sono l'autostrada A18 Catania – Messina e la Strada Statale n° 114 i cui tracciati risultano essere in sostanziale affiancamento all'intera tratta ferroviaria.

Il progetto è suddiviso in due lotti:

- Lotto 01 tra la progressiva km 0+000 e la km 13+843, compresa tra l'attuale stazione di Fiumefreddo e l'interconnessione di Letojanni;
- Lotto 02 tra la progressiva km 13+843 e la km 42+263, ovvero tra l'interconnessione di Letojanni e la stazione di Giampilieri.

La presente relazione è relativa a tutti gli attraversamenti ricadenti all'interno dei due lotti.

I bacini idrografici interessati dall'intervento ricadono nell'area che si estende tra il Torrente Minissale e il Torrente Giampilieri, nel sistema montuoso dei Peloritani, lungo il quale si sviluppa lo spartiacque fra il versante tirrenico e quello pertinente al Mar Ionio.



**Figura 2-1 - Inquadramento geografico della zona in esame.**

Questo sistema montuoso, costituito da falde di ricoprimento in cui prevalgono i terreni cristallini, si distingue nel panorama orografico regionale in quanto il paesaggio è caratterizzato da una morfologia molto aspra. In linea generale possono essere delineate tre fasce altimetriche orientate all'incirca NE-SW, di cui una pianeggiante, una seconda a carattere collinare ed una terza decisamente montuosa. La prima fascia si colloca a pochi metri sul livello del mare e con ampiezza molto variabile lungo lo sviluppo delle coste. In corrispondenza degli sbocchi dei numerosi corsi d'acqua si osservano generalmente ampie spianate a debole pendenza verso il mare, dovute agli alvei sovralluvionati che sfumano gradatamente verso il litorale. La fascia intermedia collinare, compresa dai 20 m s.l.m. a circa 650 m s.l.m., presenta moderati dislivelli che localmente si accentuano in relazione alle condizioni litologiche e strutturali. Nel complesso la morfologia risulta articolata in funzione dello sviluppo del reticolo idrografico sui terreni sedimentari più erodibili. La fascia situata alle quote più elevate è caratterizzata da una morfologia aspra e accidentata. I rilievi, costituiti

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

da rocce cristalline, lungo il crinale della catena superano i 1.000 m e sono solcati da valli sempre strette e a fianchi ripidi, con profilo breve e pendenza accentuata.

I reticoli idrografici si presentano ben articolati nei tratti montani dove una serie di rami fluviali secondari, ad andamento contorto di breve lunghezza ed a notevole pendenza, hanno inciso il territorio formando una serie di valli strette ed incassate. La maggior parte di questi bacini presenta un'estensione superiore ai 10 km<sup>2</sup> cosicché, nonostante le elevate pendenze delle aste principali, i tempi di corrivazione risultano quasi sempre superiori ad un'ora. L'andamento dei corsi d'acqua principali nella parte valliva è sostanzialmente rettilineo, di lunghezza piuttosto breve, che non supera i 9 km, e mediamente è di 4÷5 km. Il regime idrologico è marcatamente torrentizio, tipico delle "Fiumare", con deflussi superficiali scarsi o assenti nel periodo primavera-estate e consistenti nei mesi autunnali e invernali.

## 2.2 AREE DI PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA

L'individuazione dei dissesti geomorfologici presenti nell'area di intervento ricavata a partire dai dati presenti nella "Carta dei dissesti" del P.A.I, integrati, ove necessario, da quelli presenti nella "Carta geomorfologica" redatta da Italferr nell'ambito della Progettazione Definitiva in oggetto, ha evidenziato che a livello generale i fenomeni rilevanti sono i seguenti:

- crollo;
- colata rapida;
- sprofondamento;
- frana complessa;
- colata lenta;
- area a franosità diffusa;
- soliflusso;
- calanco;
- dissesti dovuti ad erosione accelerata.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Il P.A.I. per ciascuno di questi fenomeni associa un grado di pericolosità che viene determinato sulla base di:

- magnitudo del fenomeno atteso, intesa come “severità, meccanica e geometrica del fenomeno potenzialmente distruttivo;
- stato di attività che fornisce una valutazione di tipo temporale e quindi della propensione; la presenza di interventi di sistemazione comportano una diminuzione del valore della pericolosità.

L’incrocio di questi aspetti determina la pericolosità del fenomeno franoso (Tabella 2-1) e conseguenti classi di pericolosità (Tabella 2-2).

Stato di Attività	Magnitudo			
	M1	M2	M3	M4
Stabilizzata naturalmente o artificialmente	P0	P0	P0	P1
Quiescente	P0	P1	P1	P2
Inattiva	P1	P1	P2	P3
Attiva o riattivata	P1	P2	P3	P4

**Tabella 2-1 – Pericolosità del fenomeno franoso (fonte: P.A.I. Regione Sicilia)**

<b>P0</b>	Pericolosità bassa
<b>P1</b>	Pericolosità moderata
<b>P2</b>	Pericolosità media
<b>P3</b>	Pericolosità elevata
<b>P4</b>	Pericolosità molto elevata

**Tabella 2-2 – Classi di pericolosità (fonte: P.A.I. Regione Sicilia)**

L’area oggetto del presente studio geomorfologico, in relazione alla complessa evoluzione geologica subita, risulta fortemente influenzata dal locale assetto stratigrafico-strutturale delle

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

unità affioranti, oltre che dai fenomeni di modellamento superficiale che l'hanno interessata durante il Quaternario e dalle importanti variazioni eustatiche succedutesi nel tempo.

L'evoluzione morfologica del territorio ed i principali elementi geomorfologici rilevati, pertanto, sono direttamente connessi al deflusso delle acque correnti superficiali ed ai fenomeni gravitativi e/o erosivi agenti lungo i versanti. Ad essi si aggiungono, inoltre, locali elementi di origine strutturale e marina, nonché forme e depositi connessi con l'attività antropica.

Di seguito vengono descritti i principali elementi geomorfologici presenti nell'area con particolare riferimento ai fenomeni che interagiscono direttamente con l'alveo dei corsi d'acqua interessati dalle opere da realizzarsi. I corsi d'acqua interessati sono:

- A. Vallone Minissale
- B. Fiume Alcantara
- C. Torrente Letojanni
- D. Torrente Fondaco
- E. Fiumara D'Agro'
- F. Torrente Fiumedinisi
- G. Torrente Ali'
- H. Torrente Itala
- I. Torrente Giampilieri

Gli elementi descritti sono stati riportati negli elaborati che costituiscono la "Carta geomorfologica" del presente progetto (1 Lotto e 2 Lotto).

Per quanto riguarda le forme, processi e depositi dovuti alle acque correnti superficiali, nell'intera area esaminata le forme di accumulo connesse al deflusso idrico superficiale derivano, essenzialmente, dai processi deposizionali dei principali sistemi fluviali presenti. In corrispondenza di tali elementi, infatti, i meccanismi deposizionali risultano preponderanti sugli altri processi morfologici e conferiscono quindi, a tutto il territorio, una morfologia sub-

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE</b> <b>RELAZIONE</b>	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 20 di 110

pianeggiante e piuttosto regolare, caratterizzata da diverse superfici terrazzate e aree impluviali poco accentuate.

I depositi alluvionali si distribuiscono generalmente su superfici sub-pianeggianti blandamente ondulate, spesso strutturate secondo diversi ordini di terrazzi posti a differenti quote sui fondovalle attuali. Tali depositi presentano una granulometria piuttosto grossolana, ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa, anche se mostrano al loro interno vistose variazioni sedimentologiche e tessiturali dovute alle frequenti intercalazioni sabbioso-limose. Allo sbocco delle principali aste torrentizie nelle aree di fondovalle, si rinvengono inoltre, frequenti conoidi alluvionali, di estensione ed importanza variabile. Verso la costa, questi sistemi deposizionali sono riferiti a due differenti cicli sedimentari e risultano interdigitati, almeno localmente, ai depositi marini recenti e attuali.

In corrispondenza dei principali corsi d'acqua, e secondariamente lungo gli alvei dei loro affluenti maggiori, si rinvengono vistose scarpate di genesi fluviale e zone di erosione laterale delle sponde. Gli alvei secondari mostrano, in generale, una marcata tendenza all'approfondimento, mentre gli alvei più importanti sono caratterizzati da prevalenti meccanismi deposizionali. Ulteriori scarpate fluviali, ormai inattive e fortemente degradate, sono presenti in corrispondenza dei margini esterni dei terrazzi alluvionali più estesi, posti a quote variabili dal fondovalle attuale.

Lungo i versanti e in corrispondenza delle parti alte dei bacini imbriferi, si rinvengono inoltre diffusi fenomeni erosivi sia areali che lineari, connessi al deflusso non regimato delle acque correnti superficiali. Tali fenomeni generano, ovviamente, forme caratteristiche quali solchi di erosione concentrata e vallecicole a V o a fondo concavo, particolarmente evidenti nei settori di affioramento di litotipi a dominante pelitica o metapelitica.

Per quel che riguarda i fenomeni franosi e/o gravitativi di versante, nell'attuale contesto morfo-climatico, essi rappresentano uno dei principali fattori morfoevolutivi dell'area, in quanto direttamente influenti sul modellamento dei rilievi e sull'evoluzione morfologica generale dell'interno territorio in esame. L'area di studio è caratterizzata, infatti, da un elevato numero di movimenti di versante (deformazioni gravitative e frane s.s.) originatisi dall'azione

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE</b>	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 21 di 110

congiunta di vari fattori quali elementi tettonici, caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, dinamica delle acque superficiali e sotterranee e attuale utilizzo del territorio. In un tale contesto geologico-strutturale, pertanto, le fenomenologie di dissesto seguono canali e orientazioni preferenziali dettate, in massima parte, dalla tettonica e dai fenomeni erosivi connessi al deflusso delle acque correnti superficiali.

I settori di affioramento dei depositi silicoclastici sono caratterizzati, in generale, da un discreto numero di movimenti franosi, essenzialmente riconducibili a colamenti e frane complesse in terra (sensu Varnes 1978). Lo stato è generalmente attivo o quiescente, mentre la distribuzione di attività è per lo più retrogressiva o multidirezionale, raramente costante. Le velocità dei fenomeni sono mediamente piuttosto basse, mentre le superfici di rottura si attestano, nella maggioranza dei casi, a profondità comprese tra 2 e 6 m circa dal p.c..

Spesso, in corrispondenza delle aree impluviali più estese o lungo solchi di erosione più importanti, si rinvencono intere porzioni di versante interessate da movimenti gravitativi superficiali, che nel complesso vanno a costituire veri e propri bacini di frana. Le scarpate morfologiche impostate sulle porzioni arenacee e conglomeratiche di tali successioni, invece, sono contraddistinte da locali crolli e scivolamenti in roccia con dimensioni generalmente inferiori a 1 m<sup>3</sup>. Infine, in associazione ai movimenti franosi s.s., sono presenti estesi fenomeni di deformazione viscosa delle coltri (creep e/o soliflusso) che interessano per lo più le coltri di copertura e le porzioni più superficiali ed alterate del substrato geologico dell'area.

Nelle aree di affioramento dei termini metamorfici e calcareo-dolomitici, invece, sono presenti diffusi fenomeni di dissesto riconducibili a crolli e scivolamenti in roccia (sensu Varnes 1978), essenzialmente distribuiti in corrispondenza delle scarpate morfologiche più acclivi ed estese. Tali fenomeni, generalmente attivi, presentano dimensioni variabili da pochi decimetri a diversi m<sup>3</sup> e velocità sempre molto elevate. Localmente, nelle zone in cui si verifica la sovrapposizione tra litologie a comportamento differente, tali fenomeni possono dar luogo a vere e proprie colate di detrito, generalmente di modesta dimensione.

Ai margini delle principali aree impluviali, i termini metamorfici e calcareo-dolomitici sono interessati da scivolamenti, colamenti e frane complesse in roccia e detrito (sensu Varnes

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 22 di 110

1978), spesso di notevole estensione. Lo stato è variabile dall'attivo all'inattivo, mentre la distribuzione di attività è per lo più costante, e solo raramente retrogressiva o multidirezionale. Le velocità dei fenomeni sono mediamente piuttosto elevate, mentre le superfici di rottura risultano estremamente variabili in relazione al locale assetto geologico-strutturale. Infine, anche in questo caso, in associazione ai movimenti franosi s.s. si rinvengono fenomeni di deformazione viscosa delle coltri (creep e/o soliflusso) prevalentemente in corrispondenza delle coltri di alterazione del substrato metamorfico.

Infine per quanto riguarda la pericolosità morfologica dei fenomeni appena sopra descritti, si evidenzia che, nei bacini oggetto di studio ed interessati dalla realizzazione delle opere, i fenomeni presentano una pericolosità che varia dalla classe P1 (Vallone Minissale a valle di Ponte Boria) a P3-P4 (Torrente Fiumedinisi, Torrente Itala e Torrente Giampilieri), passando per una prevalenza di classe P2 nei restanti bacini (Alcantara, Letojanni, Fondaco Parrino, D'Agrò).

### **2.3 CARATTERISTICHE AMBIENTALI E PAESISTICHE DELLA REGIONE FLUVIALE**

Per quel che riguarda gli aspetti ambientali e paesistici, essi non sono rilevanti ai fini del presente studio. Si rimanda allo Studio di Impatto Ambientale per la valutazione di tali aspetti.

### **2.4 ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA INTERESSATI DAL PROGETTO**

#### **2.4.1 Assetto e parametri geomorfologici dei bacini**

Il reticolo idrografico dei corsi d'acqua oggetto di studio, ovvero Vallone Minissale, Fiume Alcantara, Torrente Letojanni, Torrente Fondaco, Fiumara D'Agrò, Torrente Fiumedinisi, Torrente Alì, Torrente Itala e Torrente Giampilieri, mostra caratteristiche tipiche delle aree di recente sollevamento, con presenza di corsi d'acqua a regime torrentizio denominati "fiumare" (Carbone et al., 2007). Le incisioni fluviali presentano un andamento pressoché rettilineo e all'incirca ortogonale alla linea di costa, thalweg ad elevata pendenza per gran parte del loro sviluppo, alvei stretti e incassati tra alte pareti rocciose nei tratti montani, che

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

diventano ampi e sovralluvionati nei tratti terminali (Catalano et al., 2003; Carbone et al., 2007; Catalano, 2009).

Per tutti i corsi d'acqua in esame, il reticolo idrografico presenta uno sviluppo piuttosto articolato ed un pattern sub-dendritico o sub-angolato, che segue le principali direttrici tettoniche dell'area. La struttura della rete idrografica, pertanto, risulta fortemente condizionata sia dalla natura litologica del substrato che dagli elementi strutturali che lo hanno interessato.

I bacini imbriferi presentano generalmente un'estensione piuttosto limitata (inferiore ai 50 km<sup>2</sup>), fatta eccezione per i bacini del Torrente Minissale, il cui affluente principale è il Vallone Minissale, il fiume Alcantara e la Fiumara d'Agrò; inoltre per quanto riguarda la loro forma essi sono caratterizzati da una ampiezza maggiore nella loro parte medio-alta e minore in quella terminale.

I deflussi sono modesti o mancano del tutto per diversi mesi dell'anno in cui le precipitazioni sono scarse o assenti, mentre sono decisamente consistenti per brevi periodi della stagione piovosa, durante i quali si possono verificare forti piene in concomitanza con eventi meteorici intensi e concentrati (Regione Sicilia, 2005; Carbone et al., 2007; Branca et al., 2009). Tali deflussi in alveo sono alimentati, inoltre, dalle acque di un gran numero di manifestazioni sorgentizie localizzate a differenti quote lungo i versanti che bordano i bacini (Carbone et al. 2007; Catalano, 2009). Il contributo delle suddette emergenze risulta più o meno significativo in relazione alla portata delle singole manifestazioni ed alla loro variabilità nel tempo.

L'idrografia dei corsi d'acqua in esame è definita quindi da numerose incisioni torrentizie a andamento generalmente ortogonale alla dorsale peloritana, defluenti prevalentemente in direzione NW-SE. Gli alvei presentano profili trasversali piuttosto acclivi, caratterizzati da strette valli a V e da gradini morfologici connessi alla forte incisione verticale subita in epoca recente per via dell'accentuato sollevamento regionale. I fondovalle risultano pertanto estremamente ristretti e spesso caratterizzati da meandri incassati. I reticoli idrografici sono ben gerarchizzati nelle aree di testata dei bacini, mentre presentano forti anomalie nelle aree

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

di valle soggette a recente emersione o nelle zone interessate da elementi tettonici di una certa rilevanza (Carbone et al. 2007).

Tipologia e granulometria delle coltri alluvionali indicano un trasporto ad alta energia nei periodi di piena, come dimostrato dall'organizzazione a canali anastomizzati delle principali incisioni, in particolare presentano accentuate caratteristiche di questo tipo le aree di fondovalle del Torrente Giampilieri, del Torrente Itala, del Torrente Alì e, soprattutto del Torrente Fiumedinisi (Foto 1). La rottura di pendenza fra le valli minori e i fondovalle principali dà localmente luogo a coni detritici e conoidi alluvionali a volte coalescenti e talora molto estesi arealmente (Regione Sicilia 2005; Carbone et al. 2007; Catalano, 2009).

Nei settori più meridionali dell'area, i corsi d'acqua (Vallone Minissale e Fiume Alcantara) che si sviluppano sui prodotti vulcanici riferibili all'attività eruttiva recente del M. Etna sono caratterizzati da brusche variazioni di direzione degli alvei si registrano, frequentemente, in corrispondenza dell'intersezione con i principali lineamenti strutturali. Il carattere tipicamente torrentizio, caratterizzato da deflusso breve e direttamente connesso con l'entità delle precipitazioni, è da mettere in relazione alla notevole permeabilità della successione vulcanica, che causa una rapida infiltrazione delle acque meteoriche limitandone il deflusso superficiale (Ferrara, 1993; Branca et al., 2009).

In particolare è opportuno evidenziare che il paleo-reticolo di drenaggio del Fiume Alcantara risulta costituito da un'asse principale, sviluppato in direzione E-W e NW-SE, e da una serie di assi secondari che formano un reticolo a spina di pesce (Catalano, 2009).

La copertura della paleo-valle è costituita da un spessa successione di colate laviche, cui si intercalano potenti corpi sedimentari di tipo alluvionale, detritico e lacustre.



**Foto 1 – Vista panoramica dell’alveo del Torrente Fiumedinisi e dalla sua foce, riprese da località Costone Landro.**

La graduale crescita del fianco settentrionale del Vulcano Ellittico ha causato lo spostamento verso Nord del paleo-asse di drenaggio del Fiume Alcantara, con conseguente tracimazione dello stesso corso d’acqua nel bacino idrografico adiacente. Intorno al 3000 a.C. la valle è stata invasa da un’imponente colata lavica che ha sconvolto il profilo di equilibrio del Fiume Alcantara, accentuando l’azione erosiva dello stesso e portando alla formazione di profonde incisioni nelle colate laviche presenti (Branca et al. 2009; Catalano et al. 2009).

Infine si riportano nella Tabella 2-3 i principali parametri morfologici di corsi d’acqua oggetto del presente studio morfologico.

Tabella 2-3 – Caratteristiche morfometriche dei bacini di interesse

Bacino Idrografico	Sezione di calcolo	Dimensioni planimetriche				Altimetria				Indici di forma del bacino					
		Area del Bacino idrografico [km <sup>2</sup> ]	Perimetro del contorno del bacino [km]	Lunghezza nota principale [km]	Lunghezza reticolare idrografico [km]	Quota massima del bacino [m s.l.m.]	Quota media del bacino [m s.l.m.]	Quota della sezione di chiusura [m s.l.m.]	Pendenza media del bacino [m/m]	Pendenza media della sezione di chiusura [m/m]	Rapporto di circolarità $R_c = (4 \cdot pA) / p^2$	Rapporto di uniformità $R_u = P \cdot \Delta i / pA^{0.5}$	Fattore di forma $R_f = A/L^2$	Rapporto di allungamento $R_a = 2A^{0.5} / (L \cdot p)$	Densità di drenaggio [km <sup>-1</sup> ]
T. M. Inissale - Valone Fuglirimo	A - Val. Fuglirimo	52,180	75,06	29,40	94,56	3316,25	1038,35	60,04	0,21730	0,08750	0,1790	2,3637	0,0951	0,3484	1,1506
Fiume Alcantara	B - F. Alcantara	548,600	179,54	63,73	109,75	3274,00	910,45	30,43	0,33810	0,01840	0,2139	2,1623	0,1351	0,4153	0,2001
Torrente Letojanni	C - T. Letojanni	21,080	28,86	9,88	30,62	1004,49	583,80	19,99	0,54130	0,07520	0,3180	1,7732	0,2160	0,5251	1,4526
Torrente Fondaco-Parrino	D - T. Fondaco	6,460	17,59	7,16	8,93	677,29	427,82	31,08	0,55070	0,06883	0,2623	1,9525	0,1260	0,4911	1,3824
Fiumara D'Agri	E - Fiumara d'Agro	78,600	60,60	23,09	50,19	1374,92	582,98	26,92	0,48630	0,05019	0,2690	1,9282	0,1474	0,4339	0,6385
Torrente Fiumefreddi	F - T. Fiumefreddi	48,700	46,91	16,72	52,64	1253,34	681,60	28,00	0,68400	0,04810	0,2781	1,8063	0,1742	0,4716	1,0809
Torrente A li	G - T. A li	8,870	19,64	7,71	18,29	1203,77	545,40	25,52	0,61830	0,10800	0,2890	1,8608	0,1492	0,4365	2,0620
Torrente Italia	H - T. Bob	10,580	19,25	7,51	13,33	1251,56	532,66	12,58	0,63040	0,12360	0,3589	1,6693	0,1876	0,4894	1,2919
Torrente Giampileri	I - T. Giampileri	9,7800	21,40	9,36	20,59	1095,52	500,00	5,61	0,63000	0,09000	0,2684	1,9304	0,1116	0,3775	2,1053

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS2S	00	D 09 RG	ID 00 02 001	D	27 di 110

#### 2.4.2 Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo

L'individuazione del punto di prelievo del materiale d'alveo rappresenta un'attività di fondamentale importanza per la caratterizzazione dei fenomeni di geomorfologia fluviale che si intende studiare, in quanto la granulometria dei sedimenti presenti nell'alveo e sulle sponde può essere talmente varia e articolata da dover richiedere, per una rappresentazione completa, più punti di prelievo lungo una stessa sezione. Ovviamente le caratteristiche granulometriche cambiano anche lungo lo sviluppo longitudinale del corso d'acqua, per cui devono opportunamente essere scelte le sezioni di indagine, al fine di rappresentare la variabilità longitudinale del materiale d'alveo, che è la caratteristica maggiormente rappresentativa dei fenomeni che si vogliono studiare in questa sede e che viene anche preliminarmente verificata durante i sopralluoghi tecnici propedeutici all'individuazione dei punti di prelievo. La seguente figura rappresenta la distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito (barra longitudinale).

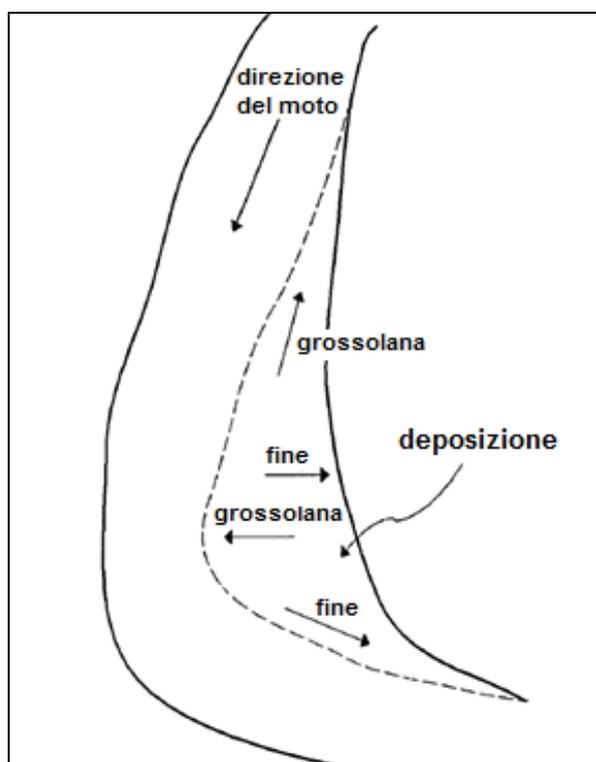


Figura 2-2: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

I fenomeni di trasporto solido presi in considerazione vengono indagati, tra l'altro, con una schematizzazione di calcolo idraulico, descritta nel successivo paragrafo0 nella quale le sezioni vengono considerate omogenee dal punto di vista granulometrico (nessuna variabilità trasversale della granulometria), di conseguenza, poiché il campione di materiale d'alveo deve essere rappresentativo di ciò che può essere movimentato anche dalle basse portate, si possono individuare le seguenti condizioni per la scelta del punto di prelievo.

- Esame visivo della sezione:
  - Sedimenti depositi a valle di ostacoli naturali in alveo (es.: grandi massi o vegetazione, oppure strutture)
  - Deposito rappresentativo della variabilità trasversale della sezione
  - Deposito rappresentativo di ciò che si può movimentare con le piene ordinarie
  - Punto prossimo all'alveo bagnato, ma situato all'asciutto
- Modalità di prelievo:
  - Traguardare il punto con un oggetto riconoscibile (es. picchetto bianco/rosso o simile)
  - Ripresa fotografica del punto di prelievo:
    - Foto dall'alto
    - Foto del transetto
    - Foto del punto guardando verso valle
  - Scartare eventuali ciottoli di dimensioni maggiori di 10 cm
    - Foto dall'alto
  - Prelevare con pala a mano almeno 2Kg di materiale da collocare in sacchetto da campionamento
  - Classificare il campione in base al codice dell'individuazione del transetto

### **2.4.3 Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame**

I campioni prelevati secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.4.2 sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione delle curve granulometriche, riportate nel

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

documento RS2S00D09SHID0002001B Schede di rilevamento geomorfologico e sintetizzate nella seguente Tabella 2-4, in cui è riportato il diametro caratteristico  $D_{50}$  per ogni punto di prelievo. Complessivamente i corsi d'acqua indagati sono caratterizzati da materiali appartenenti alle classi granulometriche delle sabbie grossolane / ghiaie fini.

**Tabella 2-4: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame**

Corso d'acqua	Codice punto di prelievo	$D_{50}$ (mm)
Minissale	FOG01	3
	FOG02	1,2
Alcantara	ALC01	1,5
Letojanni	LET01	6
	LET02	3,2
	LET03	5
Fondaco Parrino	PAR01	4
	PAR02	6
Fiumara d'Agrò	DAG01	0,022
Fiumedinisi (Nizza di Sicilia)	NIZ01	10
	NIZ02	10,3
	NIZ03	3,5
Ali	ALI01	4
Itala	ITA01	10,2
	ITA02	4,5
	ITA03	7

## 2.5 INDICE DI DINAMICA MORFOLOGICA (IDM)

### 2.5.1 Metodo IDRAIM

Il “Sistema di valutazione **id**romorfologica, **analisi** e **monitoraggio** dei corsi d'acqua”, denominato IDRAIM, costituisce un quadro metodologico complessivo di analisi, valutazione post-monitoraggio e di definizione delle misure di mitigazione degli impatti ai fini della

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 30 di 110

pianificazione integrata prevista dalle Direttive 2000/60/CE (Acque) e 2007/60/CE (Alluvioni).

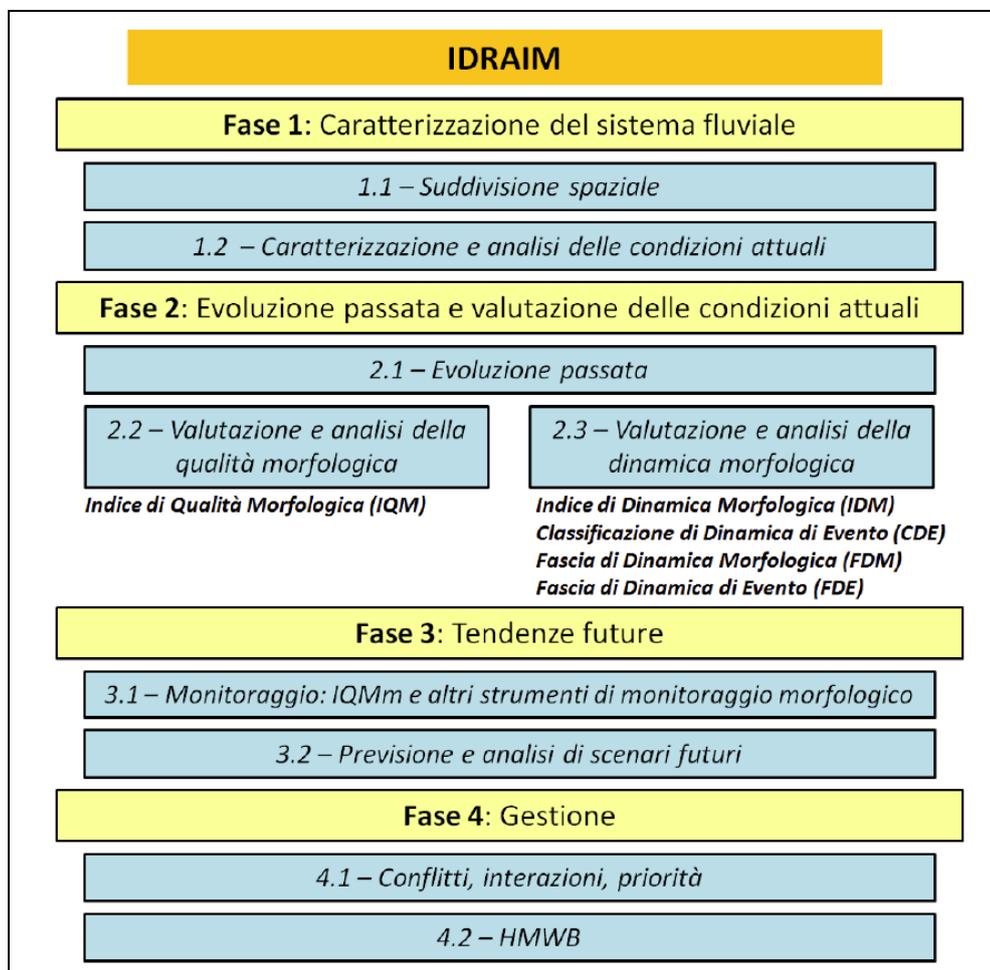
La metodologia IDRAIM prende in considerazione i processi legati alle variazioni del fondo alveo, alla mobilità laterale, alla presenza di opere e a tutte quelle componenti che vanno a determinare la dinamica morfologica di un fiume. Tali valutazioni, opportunamente integrate con le metodologie tradizionalmente impiegate per le analisi idrauliche, forniscono un quadro completo e dettagliato degli elementi che caratterizzano un corso d'acqua.

Il metodo IDRAIM tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità ambientale e di mitigazione dei rischi legati ai processi di dinamica fluviale, si pone quindi come sistema a supporto della gestione dei corsi d'acqua e dei processi geomorfologici.

La struttura complessiva del metodo IDRAIM si articola in 4 fasi che possono essere riassunte come riportato in Figura 2-3. Si sottolinea che si tratta di uno strumento metodologico flessibile a seconda delle finalità per le quali viene impiegato, in cui ogni componente può essere affrontata per livelli di approfondimento crescenti, tenendo conto degli obiettivi e delle esigenze specifiche.

I metodi utilizzati per la valutazione della qualità e della **dinamica morfologica** presentano un'analogia e coerente impostazione. Essi possono essere utilizzati insieme o anche separatamente, secondo l'esigenza di analizzare entrambi gli aspetti o uno solo di essi. Infine, i due aspetti di qualità morfologica e pericolosità da dinamica morfologica sono tenuti concettualmente separati, ma una delle finalità del metodo è di fare emergere le conflittualità e individuare le possibili azioni per tenere conto dei diversi obiettivi.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D



**Figura 2-3 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.**

Nell’ambito del presente studio è stata applicata, in via preliminare, la procedura per la valutazione dell’Indice di Dinamica Morfologica (IDM) basata sulle seguenti componenti:

- 1) **Morfologia e processi:** riguarda le caratteristiche dell’alveo, del fondo, delle sponde, i processi e le tendenze attuali (localizzate e distribuite) manifestate ad una scala temporale degli ultimi 10 – 15 anni.
- 2) **Artificialità:** considera nel dettaglio le opere che maggiormente condizionano i processi di dinamica morfologica.
- 3) **Variazioni morfologiche.** si basano sull’analisi delle variazioni avvenute negli ultimi decenni, le quali condizionano la propensione o meno ai vari tipi di pericolosità.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

La valutazione complessiva viene effettuata attraverso l'ausilio di apposite schede di valutazione, per mezzo delle quali si effettua un'analisi attraverso l'impiego integrato di immagini telerilevate e rilevamenti sul terreno. Le schede si basano sull'utilizzo di una serie di indicatori, per ognuno dei quali sono fornite una serie di possibili risposte (in numero variabile). Gli indicatori sono basati su una o più variabili quantitative o qualitative: in genere si tratta della percentuale rispetto alla lunghezza totale del tratto lungo la quale si osservano determinate caratteristiche o processi.

Ogni componente viene valutata attraverso una serie di indicatori, che sono:

- **Indicatori di morfologia e processi.** Essi partono da aspetti di carattere generale (tipologia d'alveo, materiale che costituisce le sponde ed il fondo); successivamente si prendono in esame i processi di arretramento delle sponde; infine si vanno ad esaminare le tendenze (alla scala degli ultimi 10 – 15 anni) di tipo distribuito della larghezza e del fondo. Alcuni indicatori di morfologia e processi includono l'esame degli elementi di artificialità, considerati ad esempio tra i tipi di materiale costituenti il fondo e le sponde.
- **Indicatori di artificialità.** Essi prendono in esame in maniera più specifica gli elementi artificiali, analizzandoli dal punto di vista dei loro potenziali effetti sui processi (es. difese di sponda come impedimento dei processi di arretramento delle sponde). Si precisa che il metodo non prevede una valutazione puntuale sullo stato delle opere: quando esse sono presenti all'interno o nelle immediate vicinanze dell'alveo attuale, in assenza di informazioni a riguardo, esse vengono assunte come interferenti con la dinamica morfologica. Esse vengono invece escluse qualora si accerti che non esplicano più la loro funzione di protezione delle sponde o del fondo.
- **Indicatori di variazioni morfologiche.** Le variazioni morfologiche durante gli ultimi decenni sono valutate come indicatori di instabilità, pertanto di dinamica morfologica. Tale instabilità infatti può ancora manifestarsi, con la possibilità che, durante eventi di piena di una certa intensità, possano verificarsi delle modifiche morfologiche verso precedenti configurazioni (ad es., rimodellamento di superfici abbandonate per restringimento dell'alveo). **Nel caso specifico, trattandosi di una applicazione**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

**semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori di tale componente si è basata su quanto osservato in campo e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.**

Ogni indicatore viene attribuito, a seconda dei suoi effetti prevalenti, ad una delle due componenti che costituiscono la dinamica morfologica: (1) dinamica verticale; (2) dinamica laterale. La dinamica verticale riguarda tutti gli aspetti connessi con la dinamica morfologica del fondo (erodibilità del fondo, processi di fondo localizzati, tendenze altimetriche, opere di rivestimento o consolidamento, ecc.). La dinamica laterale è invece relativa a tutti gli aspetti connessi con l'arretramento delle sponde e le variazioni di larghezza (erodibilità delle sponde, tendenze di larghezza, difese di sponda, ecc.).

### **2.5.2 Applicazione ai casi di studio**

Come riportato al paragrafo precedente, la valutazione dell'Indice di Dinamica Morfologica si basa sulla valutazione della morfologia e processi in alveo e nelle sponde, dell'artificialità e delle variazioni morfologiche; ognuna di queste componenti viene valutata attraverso indicatori riportati in Tabella 2-5.

Il metodo è stato applicato, in via preliminare e semplificata, ai corsi d'acqua interessati dalla realizzazione della opere di attraversamento della tratta ferroviaria in progetto: Vallone Minissale, Fiume Alcantara, Torrente Letojanni, Torrente Fondaco, Fiumara D'Agro', Torrente Fiumedinisi, Torrente Ali', Torrente Itala.

Si precisa che nei casi di studio trattati in questo ambito, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori della componente "variazioni morfologiche" si è basata su quanto osservato in campo e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

**Tabella 2-5 – Lista degli indicatori per la valutazione dell’IDM**

SIGLA	INDICATORE
<i>Morfologia e Processi</i>	
M1	Tipologia d’alveo
M2	Erodibilità delle sponde
M3	Erodibilità del fondo
M4	Processi di arretramento delle sponde
M5	Tendenze di larghezza
M6	Tendenze altimetriche
<i>Artificialità</i>	
A1	Difese di sponda
A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo
<i>Variazioni morfologiche</i>	
V1	Variazione della configurazione morfologica
V2	Variazioni di larghezza
V3	Variazioni altimetriche

Il risultato dell’applicazione viene riportato in Tabella 2-6, precisando che l’applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Sicilia dagli Enti preposti (ARPA).

**Tabella 2-6 – Indice e Classe di Dinamica Morfologica dei corsi d’acqua oggetto di studio. L’applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Sicilia dagli Enti preposti.**

Denominazione corso d’acqua	Lunghezza tratto [m]	Indice di Dinamica Morfologica (IDM)	Classe di Dinamica Morfologica				
			Molto bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
Vallone Minissale	1908	0.44					
Fiume Alcantara	9271	0.7					
Torrente Letojanni	1152	0.48					
Torrente Fondaco-Parrino	1012	0.65					
Fiumara D’Agrò	2400	0.56					
Torrente Fiumedinisi	1351	0.68					
Torrente Ali	1058	0.5					
Torrente Itala	723	0.57					

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 2.6 APPORTO DI SEDIMENTI AI TRATTI DI STUDIO

### 2.6.1 Considerazioni generali per la modellazione a fondo mobile

Sulla base delle analisi condotte ed illustrate nei capitoli precedenti è possibile correlare, seppur in maniera qualitativa, le dinamiche di versante e del corso d'acqua (IDM semplificato) con le litologie presenti in ciascun bacino, al fine di determinare la capacità di trasporto solido di ciascun corso d'acqua oggetto di studio.

#### Vallone Minissale

È caratterizzato da una dinamica morfologica media e all'interno del suo bacino, costituito per buona parte da rocce vulcaniche, non sono presenti particolari situazione di dissesto.

Si può, quindi, ritenere che NON vi sia particolare apporto di sedimento al tratto di studio.

#### Fiume Alcantara

È caratterizzato da una dinamica morfologica elevata, dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino, nel versante posto in sinistra idrografica, è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo.

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

#### Torrente Letojanni

È caratterizzato da una dinamica morfologica media dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo.

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

#### Torrente Fondaco-Parrino

È caratterizzato da una dinamica morfologica **elevata** dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 36 di 110

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

#### **Fiumarà d'Agrò**

È caratterizzato da una dinamica morfologica media dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo che risulta sovralluvionato.

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

#### **Torrente Fiumedinisi**

È caratterizzato da una dinamica morfologica **elevata** dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo che risulta sovralluvionato.

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

#### **Torrente Ali**

È caratterizzato da una dinamica morfologica media dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo che risulta sovralluvionato.

Si può ritenere che NON vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

#### **Torrente Itala**

È caratterizzato da una dinamica morfologica media dovuta a presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti diffusi che contribuiscono, in parte, all'apporto di materiale solido in alveo che risulta sovralluvionato.

Si può ritenere che NON vi sia apporto di sedimento al tratto di studio.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

### 2.6.1.1 Andamento delle portate liquide (di medio periodo)

La valutazione del trasporto solido di un corso d'acqua richiede particolare attenzione anche nella scelta dei valori di portata liquida da studiare, ai quali associare la corrispondente portata solida.

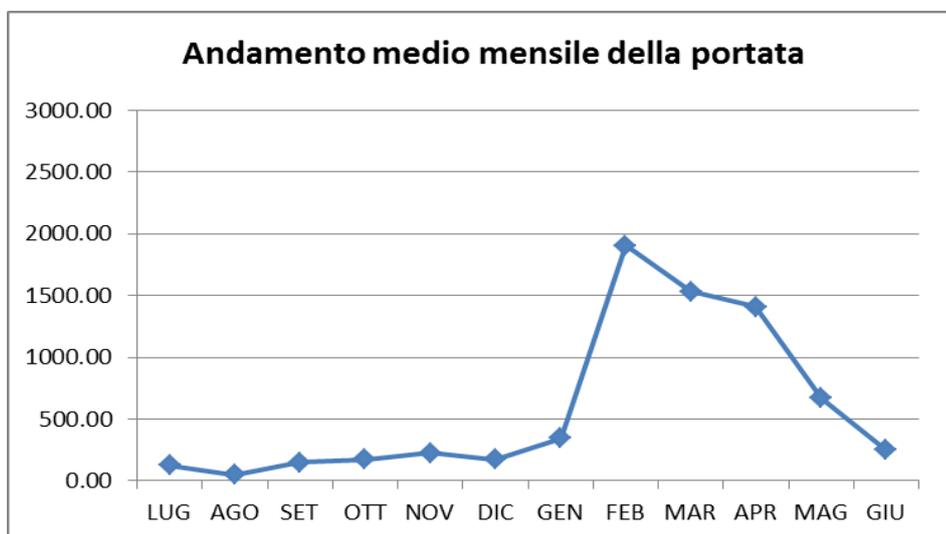
Durante gli eventi di piena vi è sempre una fase di formazione dell'idrogramma, in cui la portata cresce abbastanza rapidamente fino al valore al colmo, tuttavia nei modelli a fondo mobile bisogna considerare che vi sarà trasporto di sedimenti già dall'inizio della fase di crescita dell'idrogramma, con conseguente riassortimento della granulometria rispetto alle condizioni in cui i campioni sono stati prelevati (generalmente durante i periodi di magra, per rispettare le condizioni indicate nel precedente paragrafo 0).

Risulta quindi più opportuno, prima di simulare il trasporto solido al passaggio di un onda di piena, studiare il comportamento del fiume per le basse portate. Nel presente studio si è scelto di determinare le portate medie mensili per i corsi d'acqua di interesse. Allo scopo sono stati consultati gli annali idrologici e le altre fonti di dati disponibili (in particolare il Piano di Tutela delle Acque), da cui sono state ricavate le portate medie mensili solo di alcuni bacini, quindi si è proceduto alla determinazione della portata indice, rapportata cioè all'area del bacino.

Di seguito si mostrano i dati utilizzati ed i risultati ottenuti.

ELEMENTI CARATTERISTICI PER IL PERIODO 1934-42; 1949-58; 1962-63; 1976; 1978; 1986-92; 1994													
Q max (mc/s) .....	1100,00	314,26	161,00	647,00	101,00	51,85	16,20	6,71	6,48	64,20	1100,00	288,00	285,00
Q media (mc/s) .....	7,70	13,68	16,53	14,85	8,26	4,74	2,56	1,86	1,55	2,46	8,06	9,33	9,02
Q minima (mc/s) .....	0,05	1,03	2,04	1,48	1,25	0,50	0,18	0,10	0,05	0,05	0,15	0,35	0,61
Q media (l/s.kmq) .....	13,51	24,01	29,00	26,05	14,49	8,31	4,50	3,26	2,72	4,32	14,15	16,36	15,83
Deflusso (mm) .....	426,2	64,3	70,7	69,8	37,6	22,3	11,7	8,7	7,3	11,2	37,9	42,4	42,4
Afflusso (mm) .....	986,9	157,2	98,6	113,6	59,3	51,7	22,8	13,0	20,3	57,5	130,8	141,8	120,3
Coeff. di deflusso .....	0,43	0,41	0,72	0,61	0,63	0,43	0,51	0,67	0,36	0,19	0,29	0,30	0,35

Figura 2-4: estratto degli Annali idrologici per il Fiume Alcantara



**Figura 2-5: andamento della portate medie mensili per il Torrente Fiumedinisi**

**Tabella 2-7: Portate medie mensili calcolate con il metodo della portata indice**

Corso d'acqua	Area del Bacino (km <sup>2</sup> )	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)
Minissale	82,20	1,15
Alcantara	550,00	7,70
Letojanni	21,10	0,30
Fondaco	6,50	0,09
Fiumara d'Agrò	78,60	1,10
Fiumedinisi	49,00	0,69
Ali	8,90	0,12
Itala	10,60	0,15

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

### 3 VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO

#### 3.1 MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO

##### 3.1.1 La teoria di Shields per il moto incipiente

La prima interpretazione del fenomeno di inizio del trasporto al fondo, comunemente noto come *moto incipiente* o condizione critica per il fondo, si deve a Shields (1936), che individuò la relazione tra il valore della tensione al contorno  $\tau_0$  che pone in movimento il materiale di fondo di densità  $\rho_s$  e diametro  $d_s$  e le proprietà del fluido,  $\mu$  e  $\rho$ . Nella formulazione più semplice tale relazione si deduce come segue.

In alveo rettangolare molto largo il raggio idraulico si confonde con la profondità  $h$  e la tensione al fondo  $\tau_0$  si può esprimere come

$$\tau_0 = \rho g h j \quad 3.1$$

Con riferimento alla Figura 3-1, in condizioni critiche la resistenza al moto,  $R$ , dei granuli di diametro  $d_s$  e peso specifico  $\gamma_s$  uguaglia la forza di trascinamento al fondo all'inizio del trasporto,  $A$ .

$$R \propto (\gamma_s - \gamma) d_s^3 \quad 3.2$$

$$A \propto C_R \tau_{cr} d_s^2 \quad 3.3$$

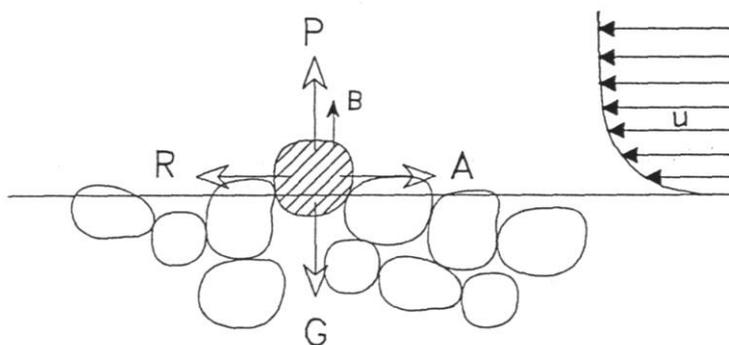


Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Il coefficiente  $C_R$  è funzione, a parità di forma dei sedimenti, del numero di Reynolds del sedimento, costruito con le grandezze caratteristiche del moto attorno al granulo:

- la velocità di attrito  $u_* = \sqrt{\tau_o / \rho}$
- il diametro del granulo  $d_s$
- la viscosità cinematica del fluido  $\nu = \mu / \rho$

ossia dal numero

$$Re_* = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad 3.4$$

Si ha in definitiva

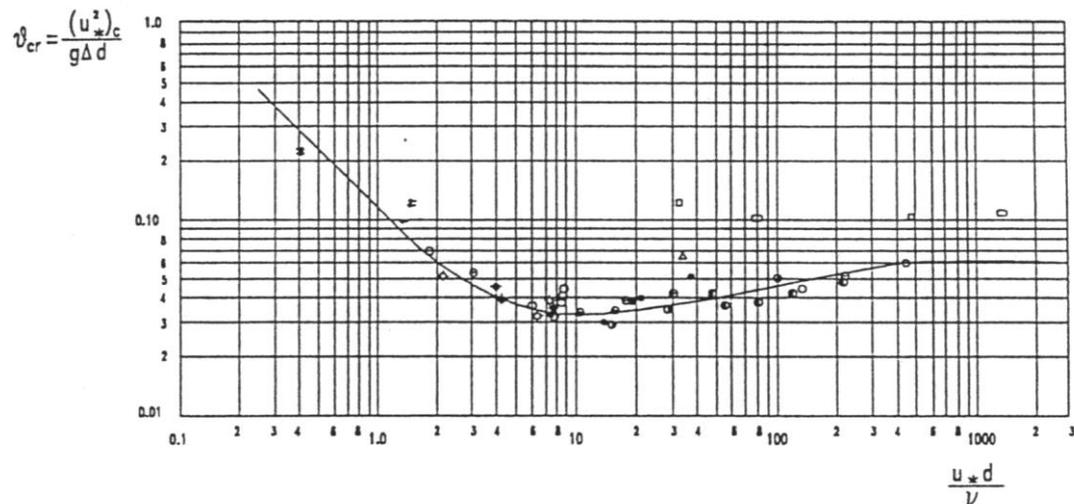
$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d_s} = f\left(\frac{u_* d_s}{\nu}\right) \quad 3.5$$

Il primo membro della (3.5), indicato spesso anche come  $\theta_{cr}$ , prende il nome di *parametro di stabilità* o di *mobilità di Shields*

$$\theta_{cr} = \frac{u_*^2}{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d} = \frac{u_*^2}{g \Delta d} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d} \quad 3.6$$

Avendo indicato con  $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  la densità relativa del grano immerso.

La dipendenza funzionale da  $Re_*$  di  $\theta_{cr}$  è rappresentata dalla *curva di Shields*.



**Figura 3-2: Diagramma di Shields**

Questa curva separa la zona di mobilità delle particelle da quelle di immobilità: per i punti che giacciono sotto la curva, il moto dell'acqua non è in grado di provocare il moto delle particelle ( $\theta \leq \theta_{cr}$ ), i punti che giacciono al di sopra della curva rappresentano invece condizioni di movimento dei sedimenti.

La curva che rappresenta il movimento incipiente delle particelle ( $\theta = \theta_{cr}$ ) può essere divisa in tre parti:

- una prima parte che nel diagramma bilogarithmico ( $Re_* \leq 2$ ) è rappresentata da un segmento di retta;
- una seconda parte ( $2 \leq Re_* \leq 200$ ) ad andamento curvilineo con un valore di minimo relativo;
- una terza zona ( $Re_* \geq 200$ ) nuovamente ad andamento rettilineo.

Il primo tratto è descritto da un'equazione del tipo:

$$\frac{(u_*)_{cr}^2}{g \Delta d} \propto \left[ \frac{(u_*)_{cr} d}{\nu} \right]^{-1} = \frac{\nu}{(u_*)_{cr} d} \quad 3.7$$

cioè:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$(u_{*cr})^3 \propto g \Delta \nu \quad 3.8$$

Da questa equazione si vede che, nel primo tratto, la velocità critica delle particelle è indipendente dal diametro delle particelle stesse, mentre dipende dalla viscosità del fluido.

Nel tratto intermedio la condizione di mobilità dipende sia dalla dimensione del grano sia dalla viscosità del fluido. In questo tratto inoltre la curva presenta il suo valore minimo

$$(\theta_{cr})_{\min} \approx 0.03 \div 0.04 \text{ per } \frac{u_* d}{\nu} \approx 8 \div 10.$$

Nel terzo tratto, il parametro di mobilità assume valori pressoché costanti:

$$\theta_{cr} = \frac{(u_{*cr})^2}{g \Delta d} \approx 0.047 \quad 3.9$$

con 0.047 valore proposto da Zeller. In questo caso le condizioni di mobilità del grano sono indipendenti dalla viscosità del fluido; il regime è simile a quello del moto turbolento in corrispondenza di una parete idraulicamente scabra.

### 3.1.2 L'equazione di Exner

L'equazione di bilancio di massa dei sedimenti si ottiene considerando come volume di controllo un tronco infinitesimo di corrente  $dx$  largo  $B$  ed imponendo che la variazione nel tempo della sua massa di materiale solido sia pari alla differenza tra la portata solida entrante e quella uscente.

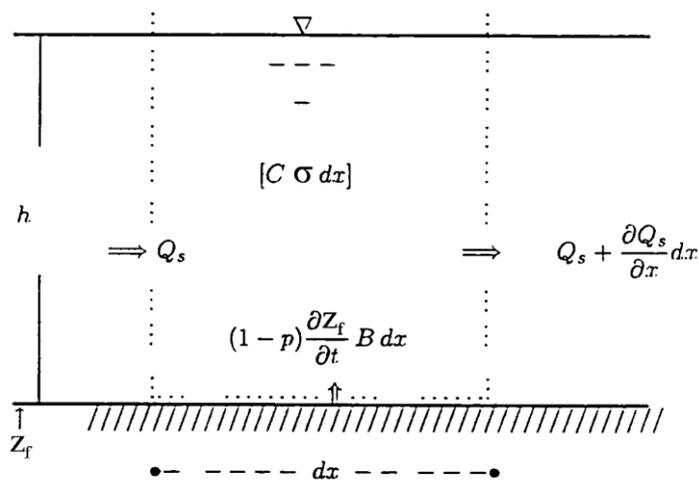
Applicando il bilancio della massa dei sedimenti si ottiene:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial C \sigma}{\partial t} = -(1-p) \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.10$$

dove  $p$  (compreso tra 0 ed 1) è la porosità del materiale d'alveo, cioè la frazione del volume dei sedimenti riempita dall'acqua;  $C = \frac{\int_A c d\sigma}{\sigma}$  è la concentrazione di volume

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS2S	00	D 09 RG	ID 00 02 001	D	43 di 110

mediata sulla sezione trasversale  $\sigma$  ( $c$  è la concentrazione locale);  $Q_s = \int_A u c d\sigma$  è la portata solida;  $z_f$  è la quota del fondo rispetto ad un piano di riferimento.



**Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo**

Introducendo il *coefficiente di ragguaglio delle concentrazioni*  $\left( \alpha_c = \frac{\sigma \int_{\sigma} c u d\sigma}{\int_{\sigma} u d\sigma \int_{\sigma} c d\sigma} \right)$ , la portata solida può essere espressa in funzione della concentrazione dei sedimenti:

$$Q_s = \alpha_c U \sigma C \tag{3.11}$$

Inoltre il termine  $1-p$ , relativo alla porosità del materiale, viene spesso inglobato nella portata solida. L'equazione 3.10 diventa:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q_s}{\alpha_c U} \right) = - \frac{\partial z_f}{\partial t} B \tag{3.12}$$

Il secondo termine a primo membro solitamente è trascurabile rispetto al primo: questa ipotesi è tanto più vera quanto maggiore è la portata solida di fondo rispetto a quella in sospensione.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = - \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.13$$

La 3.13 è nota come *equazione di Exner*. Essa è di facile interpretazione fisica:

quando $\frac{\partial Q_s}{\partial x} > 0$	⇒	la portata solida aumenta		
	⇒	l'alveo è in erosione	⇒	$\frac{\partial z_f}{\partial t} < 0$
quando $\frac{\partial Q_s}{\partial x} < 0$	⇒	la portata solida diminuisce		
	⇒	l'alveo è in deposito	⇒	$\frac{\partial z_f}{\partial t} > 0$

### 3.1.3 Accoppiamento acqua-sedimenti

In condizioni di moto vario la portata solida  $Q_s$  varia nello spazio e nel tempo, quindi nello stesso alveo si possono avere sia zone di sedimentazione sia di erosione.

Utilizzando uno schema monodimensionale, ipotizzando che i grani siano tutti della stessa grandezza e supponendo che le variazioni spaziali delle grandezze considerate siano graduali, si può ottenere un modello che descrive l'evoluzione della corrente e del fondo.

Le variabili dipendenti da considerare sono tre:

- la velocità o la portata;
- il tirante idrico;
- la quota del fondo.

Quindi si ha bisogno di tre equazioni:

- conservazione della massa;
- bilancio della quantità di moto;

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

- bilancio della portata di materiale solido trasportata sul fondo.

Le equazioni da considerare sono quindi la 3.13 e le equazioni del moto dell'acqua (equazioni di de Saint Venant):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad 3.14$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{\sigma} \right) + g \sigma \frac{\partial}{\partial x} (h + z_f) = -g \sigma j \quad 3.15$$

dove  $Q$  è la portata liquida,  $h$  il tirante idrico ed  $j$  la cadente della linea dell'energia.

Tenendo conto che l'area  $\sigma$  e la larghezza  $B$  possono essere espresse in funzione del tirante idrico, il sistema delle tre equazioni contiene ancora le seguenti variabili indipendenti:  $Q_s$ ,  $C$ ,  $Q$ ,  $h$ ,  $z_f$ ,  $j$ .

Per poter essere risolto, il sistema necessita quindi, oltre che delle condizioni iniziali e al contorno, di altre tre equazioni che sono fornite dall'ipotesi di condizioni di equilibrio locale:

- La cadente della linea dell'energia viene calcolata come se localmente valesse la formula di Chezy per il moto uniforme:

$$j = \frac{U^2}{\chi^2 \mathfrak{R}} \quad 3.16$$

- La portata solida viene calcolata come se localmente essa fosse pari alla capacità di trasporto e quindi attraverso un'opportuna formula di trasporto solido:

$$Q_s = f_s(U, h, u_*, d, \dots) \quad 3.17$$

- La stessa ipotesi viene fatta per quanto riguarda la concentrazione  $C$  del materiale:

$$C = f_s(U, h, u_*, d, \dots) \quad 3.18$$

Nell'ipotesi semplificativa che la sezione sia di forma rettangolare larga, le equazioni (trascurando il secondo termine nell'equazione 3.15) divengono:

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} = 0 \quad 3.19$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z_f}{\partial x} = -g j \quad 3.20$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial z_f}{\partial t} = 0 \quad 3.21$$

dove  $q_s = Q_s/B$  è la portata solida per unità di larghezza.

Questo modello è valido per sedimenti omogenei. Se il sedimento è assortito si può sempre utilizzare la 3.21 ponendo però  $q_s = \sum_{i=1}^{N_d} f_i q_i$ , dove  $f_i$  rappresenta la frazione, di diametro  $d_i$ , della quantità totale di portata solida in volume trasportata, e le  $q_i$  sono espresse da un'equazione di trasporto solido per materiale uniforme.

### 3.1.4 Scelta della Formula di Trasporto solido per i casi in esame

Il trasporto solido viene valutato in base alla portata solida, espressa ad esempio in kg/s, in termini di quantità di sedimenti movimentati in funzione della corrispondente portata liquida. Le formule che forniscono il valore di portata solida sono di tipo parametrico e, a partire dalla teoria di Shields sul moto incipiente, mettono in relazione le caratteristiche granulometriche con quelle idrodinamiche. Le varie formule disponibili in letteratura sono state sviluppate a partire da esperienze in laboratorio ed in situ, quindi hanno dei limiti di applicabilità in dipendenza dei risultati ricavati dai vari autori. Il codice di calcolo a fondo mobile utilizzato in questa sede, il cui impiego è descritto nel successivo paragrafo 0, consente di scegliere tra alcune delle più note formule, che vengono di seguito presentate. I limiti di applicabilità di ciascuna formula sono sintetizzati nella Tabella 3-1, di conseguenza, noti i diametri caratteristici dei corsi d'acqua oggetto di studio e le relative grandezze idrodinamiche, è possibile scegliere la formula più adatta per ognuno di essi. I diametri caratteristici sono ricavabili dalle curve granulometriche, riportate nell'elaborato RS2S00D09SHID0002001B

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Schede di rilevamento geomorfologico, mentre le grandezze idrodinamiche sono dedotte degli stessi modelli idraulici impiegati a fondo fisso.

**Tabella 3-1: limiti di applicabilità delle formule di trasporto solido**

Autore	$d_{50}$ [mm]	pendenza fondo	Froude	Rapporto tra larghezza e tirante $B/h$	Tirante idrico $h$ [m]
Meyer-Peter e Muller trasporto di fondo	0.4 ÷ 30	$4 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-2}$			0.01 ÷ 1.2
Toffaletti trasporto totale	0.062 ÷ 16				> 3
Ackers-White trasporto totale	0.04 ÷ 4.9		< 0.8		< 0.4
	0.1 ÷ 68		< 0.8	9 ÷ 60	
Yang trasporto di fondo	0.137 ÷ 1.35				0.022 ÷ 0.86

### Formula di Meyer-Peter e Müller (1948)

La formula trovata da Meyer-Peter e Müller nel 1948 è la seguente:

$$q_s = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left\{ \frac{(Q_B/Q)(K_B/K_G)^{3/2} h j - 0.047[(\gamma_s - \gamma)/\gamma]d}{(0.25/\gamma)(\gamma/g)^{1/3}} \right\} \frac{1}{\rho_s}$$

con:

$$K_B = \frac{u}{h^{2/3} \sqrt{j}} \quad \text{e} \quad K_G = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

Nel caso di sedimenti ben assortiti, Meyer-Peter e Müller suggerirono di utilizzare un singolo diametro per caratterizzare il campione:  $\sum_i d_i P_i / 100 \approx d_{50}$  con  $P_i$  frazione in peso della  $i$ -esima classe granulometrica  $d_i$ .

Nell'equazione sono presenti due fattori di riduzione,  $Q_B/Q$  e  $K_B/K_G$ ; il primo serve per tenere conto del fatto che solo una parte ( $Q_B$ ) della portata totale ( $Q$ ) agisce sul fondo ed è quindi responsabile del movimento del trasporto di fondo; il secondo per tenere conto della

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 48 di 110

presenza della resistenza di formiche riduce lo sforzo di taglio che è disponibile per il trasporto di fondo. Meyer-Peter e Müller assunsero che  $Q_B/Q=1$  per i letti dei fiumi piatti e che  $K_B/K_G=1$  per i canali larghi. Nel caso di dati di laboratorio, si può porre  $Q_B/Q=1-h/B$  con B larghezza del canale. Il diametro nella formula è in m.

### Formula di Toffaleti (1968)

Il metodo di Toffaleti è basato sui concetti di Einstein con tre differenze:

- la distribuzione della velocità sulla verticale è ottenuta da un'espressione diversa da quella usata da Einstein;
- alcuni dei fattori correttivi di Einstein sono modificati e combinati;
- lo spessore della zona di trasporto di fondo è cambiata rispetto a quella di Einstein (due diametri).

Questa formula calcola il trasporto totale.

Toffaleti espresse il parametro di Einstein  $\Psi$  (intensità della corrente) come:

$$\Psi = \frac{T A}{U^2} 10^4 d$$

con  $T$  (dimensioni  $[L/T^2]$ ) parametro che include le costanti e quelle componenti della forza di taglio che sono funzioni della temperatura dell'acqua,  $A$  fattore di correzione adimensionale per sostituire i fattori di correzione di Einstein per i sedimenti non omogenei,  $U$   $[L/T]$  è la velocità media della corrente e  $d$   $[L]$  è il diametro dei granuli.

Egli divise l'altezza della corrente in tre zone:

- la zona inferiore dove la profondità della corrente è minore di  $\mathfrak{R}/11.24$  (con  $\mathfrak{R}$  raggio idraulico);
- la zona intermedia con profondità compresa tra  $\mathfrak{R}/2.5$  e  $\mathfrak{R}/11.25$ ;
- la zona superiore dove la profondità è inferiore a  $\mathfrak{R}/2.5$ .

Toffaleti inoltre stabilì che  $L_F$  o trasporto del nucleo espresso in U.S. tons/giorno per 1 piede di larghezza nella zona inferiore (assumendo che il fondo sia composto interamente da una sola granulometria di sabbia), può essere rappresentato da:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$L_F = \frac{0.06}{\left(\frac{TA}{U^2}\right)^{5/3} \left(\frac{d}{0.00058}\right)^{5/3}}$$

che per la sabbia molto fine ( $d < 1$  mm) diventa:

$$L_F = \frac{1.905}{\left(\frac{TA}{U^2}\right)^{5/3}}$$

La distribuzione della concentrazione dei sedimenti è espressa da:

$$C_y = C_a \left(\frac{y}{\mathfrak{R}}\right)^z$$

nella quale  $C_y$  è la concentrazione dei sedimenti alla quota  $y$  dal fondo e  $C_a$  è la concentrazione alla quota  $a$ .

Per la zona centrale:

$$z = \frac{U w_s}{C_z j \mathfrak{R}}$$

nella quale  $w_s$  è la velocità di sedimentazione della particella in piedi/s e  $C_z$  è un fattore correttivo per la temperatura che vale  $260.67 - 0.667T$  (con  $T$  in °F). L'esponente  $z$  della distribuzione della concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore ed in quella superiore sono, rispettivamente, 0.756 e 1.5 volte quello della zona centrale.

Dopo aver determinato  $L_F$  e la distribuzione della concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore, si può procedere col determinare la concentrazione al bordo superiore di questa zona, poi calcolare la distribuzione ed il trasporto totale dei sedimenti nella zona centrale ed infine ottenere il trasporto totale di sedimenti nella zona superiore. La somma del trasporto totale di sedimenti nelle tre zone è il trasporto totale riferito all'intera altezza della sezione.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

### Formula di Ackers-White (1973)

Ackers e White postularono che solo una parte dello sforzo di taglio agente sul letto del fiume causa il movimento dei sedimenti grossolani, mentre nel caso di quelli fini predomina il trasporto in sospensione per il quale l'intero sforzo di taglio causa il movimento.

Questa formula valuta il trasporto totale, considerato come la somma del trasporto di fondo e di quello in sospensione.

La portata solida in volume  $q_s$  ha come unità di misura il  $m^3/(m\ s)$ , ed esprime il volume del sedimento trasportato per ogni secondo per l'unità di larghezza dell'alveo.

La formula è la seguente:

$$q_s = G_{gr} g u \left( \frac{u}{u_*} \right)^n d_{gr}$$

con  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g h i}$  velocità di attrito e con i parametri adimensionali  $G_{gr}$  (trasporto dei

sedimenti),  $F_{gr}$  (mobilità delle particelle) e  $d_{gr}$  (granulometria):

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{[g d (\gamma_s - 1)]^{1/2}} \left[ \frac{u}{5.66 \log(10 D/d)} \right]^{(1-n)}$$

$$d_{gr} = d [g (\gamma_s - 1) / \nu^2]^{1/3}$$

I quattro parametri  $n$ ,  $A$ ,  $m$  e  $C$  sono stati ricavati in base agli esperimenti:

per  $1 \leq d_{gr} \leq 60$

per  $d_{gr} > 60$

$n = 1 - 0.5 \log d_{gr}$

$n = 0.0$

$A = \left( \frac{0.23}{d_{gr}^{1/2}} \right) + 0.14$

$A = 0.170$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$m = \left( \frac{9.66}{d_{gr}} \right) + 1.34$$

$$m = 1.50$$

$$C = 10^{[2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53]}$$

$$C = 0.025$$

Nella formula  $d$  è espresso in metri.

### Formula di Yang (1973)

Questa formula considera il fiume come una macchina: il lavoro necessario per mantenere il trasporto dei sedimenti è pari al prodotto della forza per la velocità.

Il trasporto di fondo è dato da:

$$\rho_s \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) q_f \tan \alpha = \omega e_f$$

con  $\tan \alpha$  coefficiente di attrito dinamico,  $q_f$  trasporto di fondo pari alla massa per la velocità della particella sul fondo,  $e_f$  efficienza della potenza (approssimativamente 0.15) e  $\omega = \tau_0 u$  potenza della corrente.

Il trasporto in sospensione è dato da:

$$\rho_s \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) q_{ss} \frac{w_s}{u_s} = \omega e_s (1 - e_f)$$

con  $q_s$  trasporto in sospensione pari alla massa per la velocità della particella in sospensione, che può approssimarsi con quella della corrente  $u$ ,  $w_s$  velocità di sedimentazione,  $e_s$  efficienza della potenza pari a 0.015 ed il rapporto  $w_s/u_s$  equivalente al coefficiente di attrito dinamico.

Il trasporto totale in  $[m^3/(m s)]$  è dato dalla somma dei due termini precedenti:

$$q_s = q_f + q_{ss} = \omega \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left( \frac{e_f}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{u_s}{w_s} \right) \frac{1}{\rho_s}$$

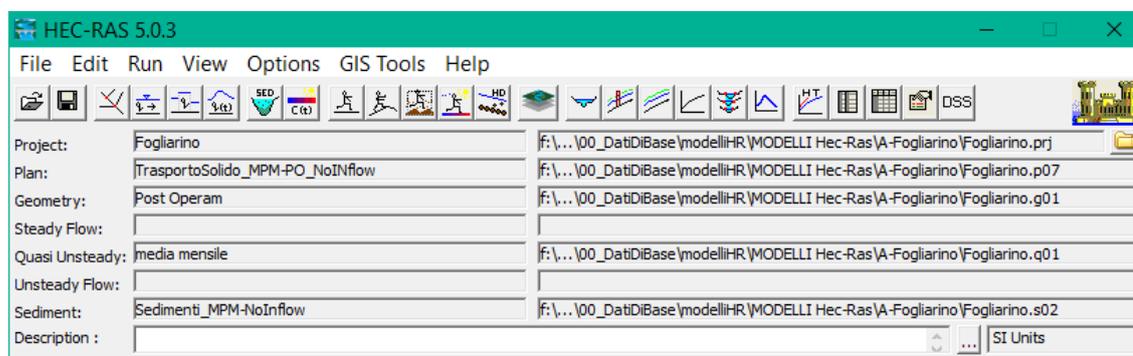
 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 3.2 MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE

### 3.2.1 HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti

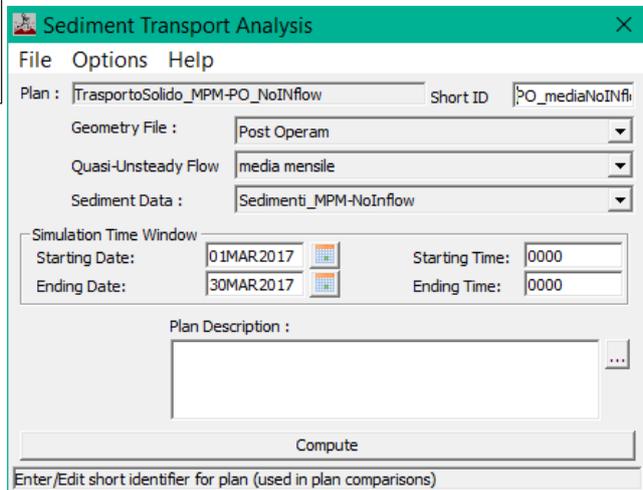
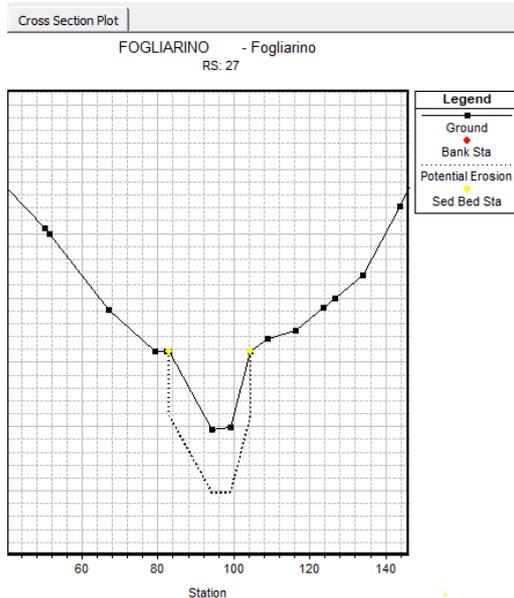
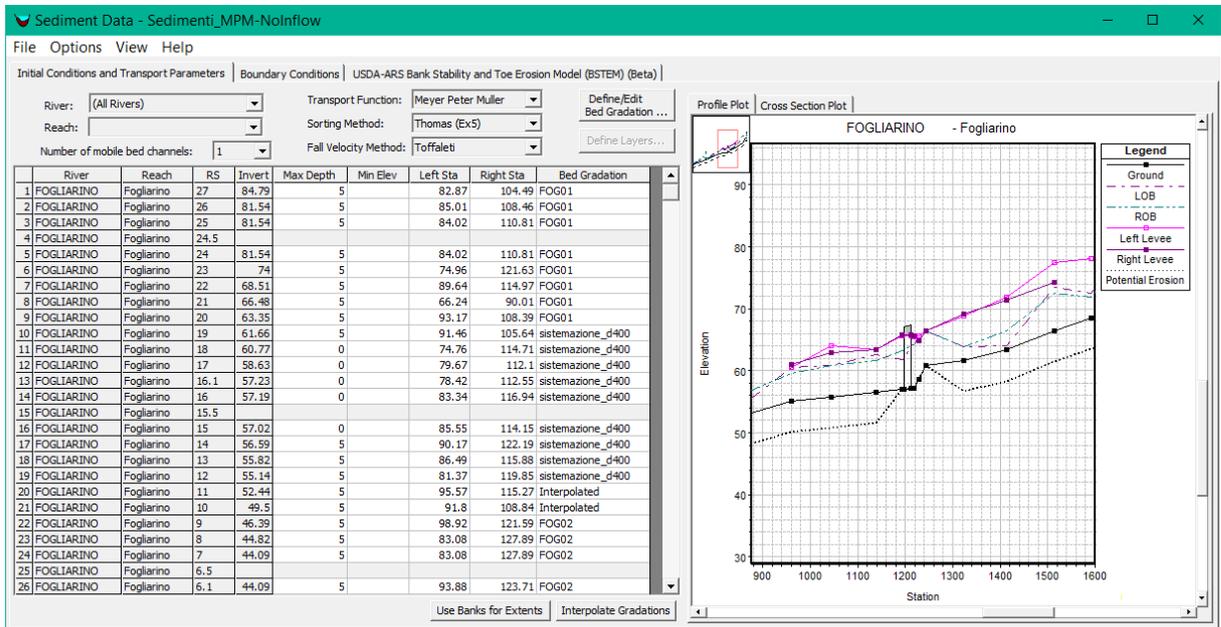
#### 3.2.1.1 *Cenni generali*

HEC-RAS<sup>1</sup> è un noto codice di calcolo per il moto di correnti idriche in simulazione monodimensionale di una rete di canali naturali e/o artificiali, messo a punto dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito Americano. La versione 4.0.x del codice ha incluso la possibilità di svolgere analisi sul trasporto di sedimenti, basate sulla metodologia già in uso nel vecchio codice HEC-6<sup>2</sup> e disponibili anche nella versione 5.0.3 del settembre 2016 utilizzata nel presente studio.



<sup>1</sup> HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, US Army Corps of Engineers

<sup>2</sup> HEC-6 “Scour and deposition in Rivers and Reservoirs” (HEC 1991)



### 3.2.1.2 Funzionamento del programma

Il modulo per il trasporto dei sedimenti è stato creato per simulare e predire i cambiamenti nei profili dei fiumi derivanti dall'erosione e/o dalla deposizione.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 54 di 110

L'idrogramma viene suddiviso in una serie di moti stazionari di portate e durate variabili. Per ogni passo è calcolato il profilo della superficie dell'acqua e da questo si ricava la pendenza piezometrica, la velocità, la profondità in ogni sezione. Da questi viene poi calcolato, per ogni sezione e per ogni classe granulometrica, il trasporto potenziale di sedimenti, che combinato con la durata della corrente, permette di ricavare il trasporto dei sedimenti associato ad ogni portata.

Il trasporto dei sedimenti è calcolato per ogni portata e per ogni classe granulometrica in questo modo:

- calcolo del trasporto potenziale per ogni classe granulometrica presente nel letto del fiume come se essa costituisse la totalità dei sedimenti presenti;
- il trasporto potenziale così ottenuto, viene poi moltiplicato per la frazione di quella stessa classe realmente presente in quel passo temporale; in questo modo si determina la capacità di trasporto per questa granulometria.

Le percentuali delle diverse classi granulometriche presenti sul fondo, possono cambiare significativamente durante il passo temporale; quindi si utilizzano delle iterazioni per poter prendere in considerazione questi cambiamenti; il numero delle iterazioni all'interno del passo temporale può essere fissato dall'utilizzatore.

L'equazione di continuità dei sedimenti deve essere applicata su un volume di controllo, che va da metà della distanza fra la sezione a monte di quella attuale a metà della distanza da quella a valle. La larghezza di questo volume di controllo generalmente coincide con quella del letto mobile, e la sua profondità va dalla superficie libera fino al terreno non erodibile (strato di roccia).

Il programma utilizza come equazione di continuità quella di Exner:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + B_0 \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad 3.1$$

con  $Q_s$  portata media dei sedimenti (in  $m^3/s$ ) durante l'intervallo  $\Delta t$ .

Questa equazione può essere espressa in termini di differenze finite:

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$\frac{Q_{sd} - Q_{su}}{0.5(L'_d - L_d)} + \frac{B_{0p}(Y'_{sp} - Y_{sp})}{\Delta t} = 0 \quad 3.2$$

con:

$B_{0p}$	larghezza del letto mobile al punto P;
$Q_{su}$	carichi di sedimenti alla sezione di monte;
$Q_{sd}$	carichi di sedimenti alla sezione di valle;
$L_u$	lunghezza del tratto di monte tra le sezioni;
$L_d$	lunghezza del tratto di valle tra le sezioni;
$Y_{sp}$	profondità dei sedimenti all'inizio dello step nel punto P;
$Y'_{sp}$	profondità dei sedimenti alla fine dello step nel punto P;
$\Delta t$	Passo temporale

Si rimanda al manuale ed alla documentazione di riferimento di HEC-RAS per una trattazione completa delle assunzioni teoriche circa il calcolo numerico del trasporto di sedimenti.

### 3.2.2 Schematizzazione idraulica adottata

#### 3.2.2.1 Geometria dei modelli

La geometria dei modelli di calcolo a fondo mobile è la stessa di quelli a fondo a fisso, che sono stati costruiti a partire dai rilievi topografici appositamente eseguiti per il Progetto in esame. Per ogni corso d'acqua interessato dagli attraversamenti ferroviari in progetto è stato implementato un modello idraulico monodimensionale, i cui dettagli sono riportati nell'elaborato RS2S01D78RIID0002001B Relazione idraulica opere maggiori. Ricordiamo che la geometria del modello di calcolo è costituita dalle sezioni trasversali, dalle opere eventualmente presenti e dalle caratteristiche idrauliche delle sezioni stesse. L'ubicazione delle sezioni di studio è riportata anche nelle tavole RS2S01D09G4ID0002002B, RS2S01D09G4ID0002005B, RS2S01D09G4ID0002006B, RS2S01D09G4ID0002007B e RS2S01D09G4ID0002008B.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

### 3.2.2.2 Scabrezza idraulica

I valori di scabrezza adottati per i vari corsi d'acqua sono riportati nella seguente tabella.

**Tabella 3-2: valori di scabrezza adottati per i corsi d'acqua di studio**

Corso d'acqua	golena sinistra	canale principale	golena destra
Minissale	0,090	0,070	0,090
Alcantara	0,045	0,045	0,045
Letojanni	0,070	0,040	0,070
Fondaco	0,065	0,030	0,065
D'Agro	0,050	0,033	0,050
Fiumedinisi	0,045	0,033	0,045
Alì	0,070	0,040	0,070
Itala	0,070	0,040	0,070

### 3.2.2.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno nel modello a fondo mobile riguardano sia la componente acqua, sia quella sedimenti e sono sinteticamente descritte di seguito.

#### **Portate simulate**

Le portate simulate per la valutazione delle tendenze evolutive dell'alveo sono quelle medie mensili, ricavate come illustrato nel precedente paragrafo 0 e riportate nella seguente Tabella 3-3. Nel codice di calcolo il valore di portata costante della durata complessiva di 30 giorni (720 ore) è stato suddiviso in 720 intervalli di durata pari a 24 ore ognuno, suddivisi a loro volta in incrementi computazionali di durata pari a 1 ora.

**Tabella 3-3: valori di portata media mensile simulati**

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)
Minissale	1,15
Alcantara	7,70

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)
Letojanni	0,30
Fondaco	0,09
Fiumara d'Agrò	1,10
Fiumedinisi	0,69
Ali	0,12
Itala	0,15

### Livello idrico di valle

Il livello idrico di valle deve essere assegnato per ogni intervallo temporale con cui viene discretizzato l'idrogramma di calcolo e può essere calcolato dal programma assegnando la scala di deflusso della sezione di valle. Nel caso di portata costante per tutta la durata della simulazione, è sufficiente fornire un unico valore di livello idrico, che è stato valutato a partire dai risultati dei modelli a fondo fisso.

### Carico solido entrante

La condizione al contorno relativa ai sedimenti riguarda l'apporto di materiale solido al tratto di studio. Nel caso in esame, in base alle informazioni ricavate dalla caratterizzazione geomorfologica dei bacini, è stato possibile valutare in via preliminare se il carico entrante da monte nel modello di calcolo è significativo ai fini delle valutazioni sulla tendenza evolutiva. Se la sezione di monte del modello è sufficientemente lontana dal tratto di interesse<sup>3</sup>, si può anche assumere un carico entrante nullo, in modo che siano proprio le prime sezioni di monte a costituire un serbatoio di sedimenti per il modello a fondo mobile. Qualora, però, ci si trovi in condizioni di forte apporto solido dai versanti (in caso di fenomeni franosi attivi, ad esempio), è necessario stimare tale apporto ed introdurlo come condizione al contorno. In alternativa, è anche possibile estrarre dai risultati del codice di calcolo il carico solido uscente

<sup>3</sup> La valutazione della tendenza evolutiva riguarda principalmente, in questa sede, il tratto interessato dall'attraversamento in progetto.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

dalla sezione di valle e inserirlo come carico entrante in una successiva simulazione. Questa procedura richiede di simulare più valori di portata.

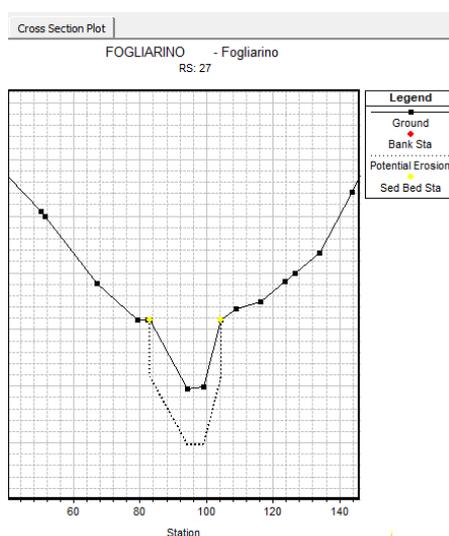
Il codice di calcolo è anche in grado di determinare automaticamente il carico di equilibrio, che corrisponde alla capacità di trasporto per quella sezione in ogni passo temporale e per ogni classe granulometrica. In via cautelativa è stata adottata, per i casi in esame, la condizione di carico di equilibrio, tranne che per il Vallone Minissale, il Torrente Ali ed il Torrente Itala, per i quali l'analisi di caratterizzazione geomorfologica ha portato a valutare non significativo l'apporto di sedimenti da monte.

#### 3.2.2.4 Limiti del fondo erodibile

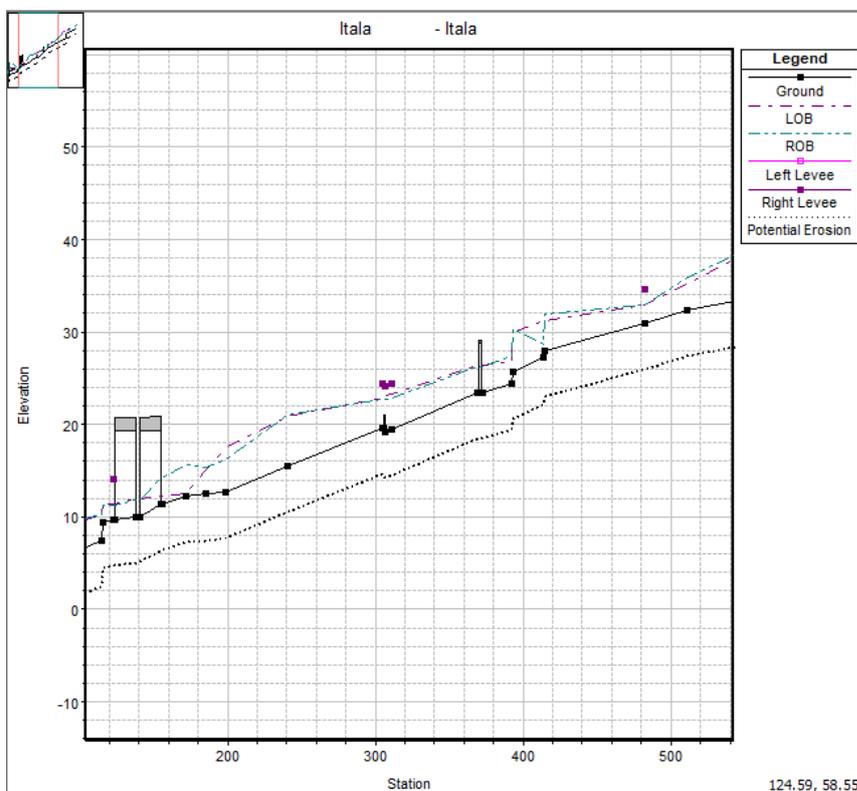
La caratteristica principale del modello a fondo mobile è proprio rappresentata dai limiti della porzione erodibile delle sezioni. È possibile indicare le coordinate dei nodi di ogni sezione che possono essere alzati o abbassati in funzione dell'erosione o della deposizione calcolata, nonché la massima profondità di erosione.

Nei casi in esame sono state individuate in via preliminare le seguenti condizioni:

- limiti del fondo mobile in ogni sezione coincidenti con i limiti del canale principale;
- massima profondità di erosione pari a 5 m.



**Figura 3-4: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale**



**Figura 3-5: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile**

### 3.2.2.5 Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo

La morfologia dei corsi d'acqua in esame può essere tale da giustificare una mobilità del fondo alveo uniforme lungo la verticale, il che corrisponde all'opzione di default del codice di calcolo che non prevede erosione né deposizione al di fuori dei limiti del fondo mobile. Tuttavia è possibile selezionare l'opzione corrispondente alla *deposizione al di fuori del fondo mobile*, qualora siano da attendersi livelli idrici superiori alla quota dei limiti del fondo erodibile.

### 3.2.2.6 Formula di trasporto solido

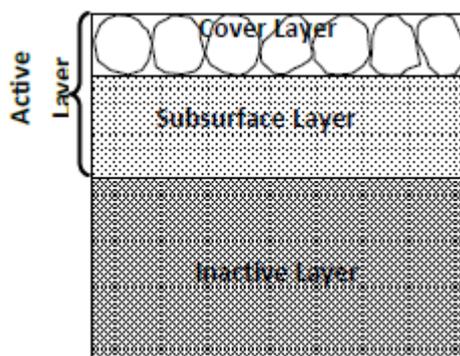
La scelta della formula di trasporto solido da adottare per i casi in esame, condotta secondo quanto indicato nel precedente paragrafo 3.1.4, ha portato ad individuare quella di Meyer-Peter e Muller come la più adatta in base alle granulometrie rilevate.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

### 3.2.2.7 Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo

Le formule di trasporto solido calcolano il trasporto potenziale senza considerare la reale disponibilità di materiale solido movimentabile, la quale dipende dalle caratteristiche granulometriche che influenzano il fenomeno del rimescolamento del fondo con conseguente possibile corazzamento dello stesso (*armoring*).

Il codice di calcolo consente quindi di selezionare l'opzione più adatta per rappresentare questo fenomeno e nei casi in esame è stata adottata in prima approssimazione quella di default, che corrisponde al cosiddetto metodo “Exner 5” in cui si considera un modello di fondo alveo a tre strati in cui si forma uno strato corazzato che limita lo scambio di materiale dagli altri due strati.



**Figura 3-6: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo**

### 3.2.2.8 Granulometria del fondo alveo

La granulometria dei sedimenti di cui è costituito il fondo alveo viene rappresentata con la curva granulometrica dei campioni prelevati secondo i criteri riportati nel precedente paragrafo 2.4.2. Poiché nel codice di calcolo è possibile associare una sola curva granulometrica per ogni sezione, la scelta del punto di prelievo è di fondamentale importanza affinché esso sia rappresentativo dell'intera variabilità granulometrica osservata, tenendo anche conto che lo studio condotto in questa sede volge l'attenzione ai fenomeni di medio

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

periodo, quindi i campioni devono essere rappresentativi di ciò che si può mobilitare durante tali eventi.

L'ubicazione dei punti di prelievo è riportata nelle Tavole RS2S01D09G4ID0002002B, RS2S01D09G4ID0002005B, RS2S01D09G4ID0002006B, RS2S01D09G4ID0002007B e RS2S01D09G4ID0002008B e le relative curve granulometriche sono state associate alle corrispondenti sezioni; il codice di calcolo determina poi un andamento lineare della granulometria tra una sezione e l'altra.

### 3.3 MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO

#### 3.3.1 Tendenza all'erosione e alla deposizione

Le modalità evolutive dell'alveo, per i corsi d'acqua in esame in questa sede, vengono sinteticamente valutate in base alla possibile tendenza all'erosione o alla deposizione, stimata a sua volta mediante l'applicazione dei modelli idraulici a fondo mobile implementati per i corsi d'acqua in esame in questa sede.

I risultati delle simulazioni, condotte come descritto nel precedente paragrafo 0, sono riportati nelle figure seguenti, che rappresentano il profilo del fondo alveo al termine del periodo di simulazione (30 giorni a portata costante, pari alla portata media mensile caratteristica di ciascun corso d'acqua), in confronto con il profilo di fondo alveo ad inizio simulazione. La seguente Tabella 3-4 riporta in sintesi le condizioni di simulazione ed i risultati ottenuti in termini di tendenza all'erosione o alla deposizione.

**Tabella 3-4: Stima della tendenza evolutiva**

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva
Minissale	1,15	Carico entrante nullo	deposizione
Alcantara	7,70	Carico di equilibrio	stabile
Letojanni	0,30	Carico di equilibrio	erosione

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Portata media mensile (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Apporto di sedimenti</b>	<b>Tendenza evolutiva</b>
Fondaco	0,09	Carico di equilibrio	erosione
Fiumara d'Agrò	1,10	Carico di equilibrio	stabile
Fiumedinisi	0,69	Carico di equilibrio	deposizione
Ali	0,12	Carico entrante nullo	stabile
Itala	0,15	Carico entrante nullo	deposizione

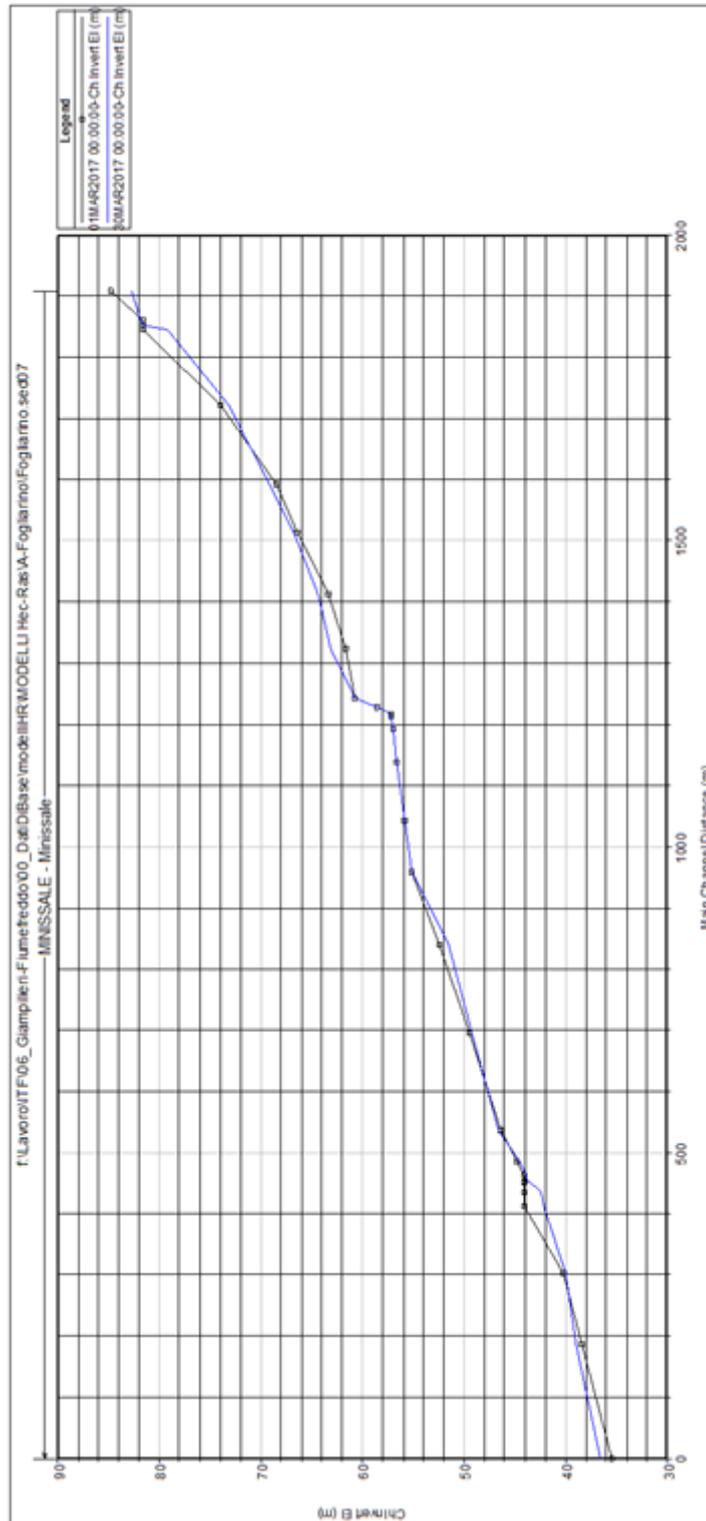
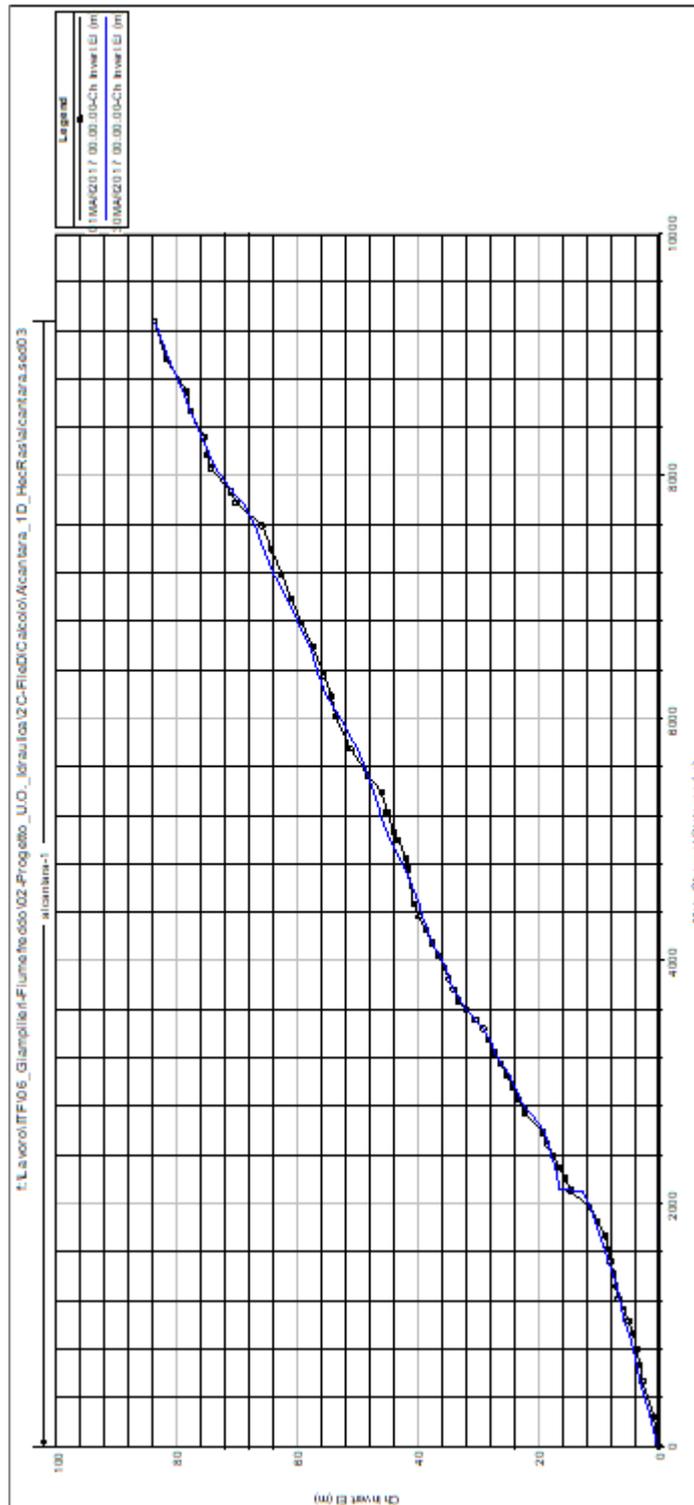


Figura 3-7: Torrente Minissale – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)



**Figura 3-8: Fiume Alcantara – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)**

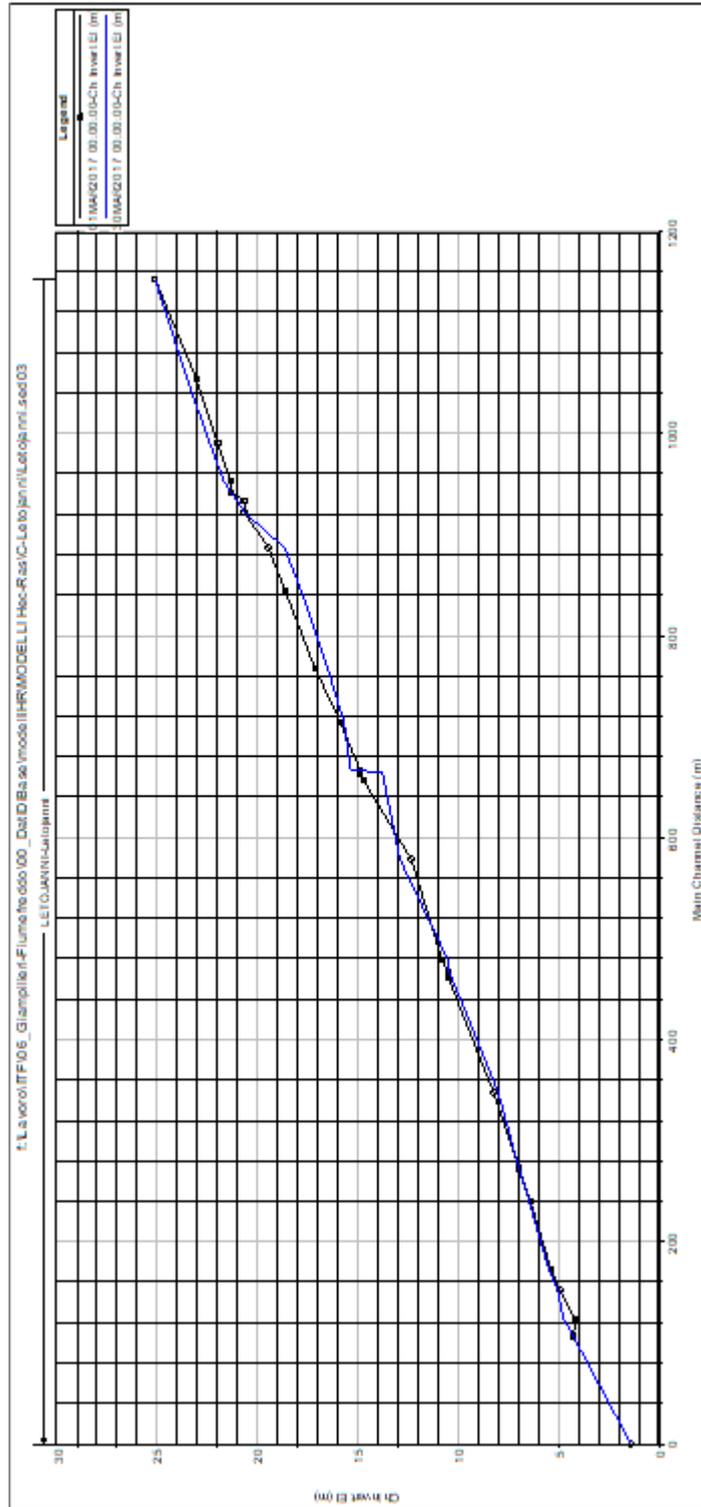


Figura 3-9: Torrente Letojanni – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

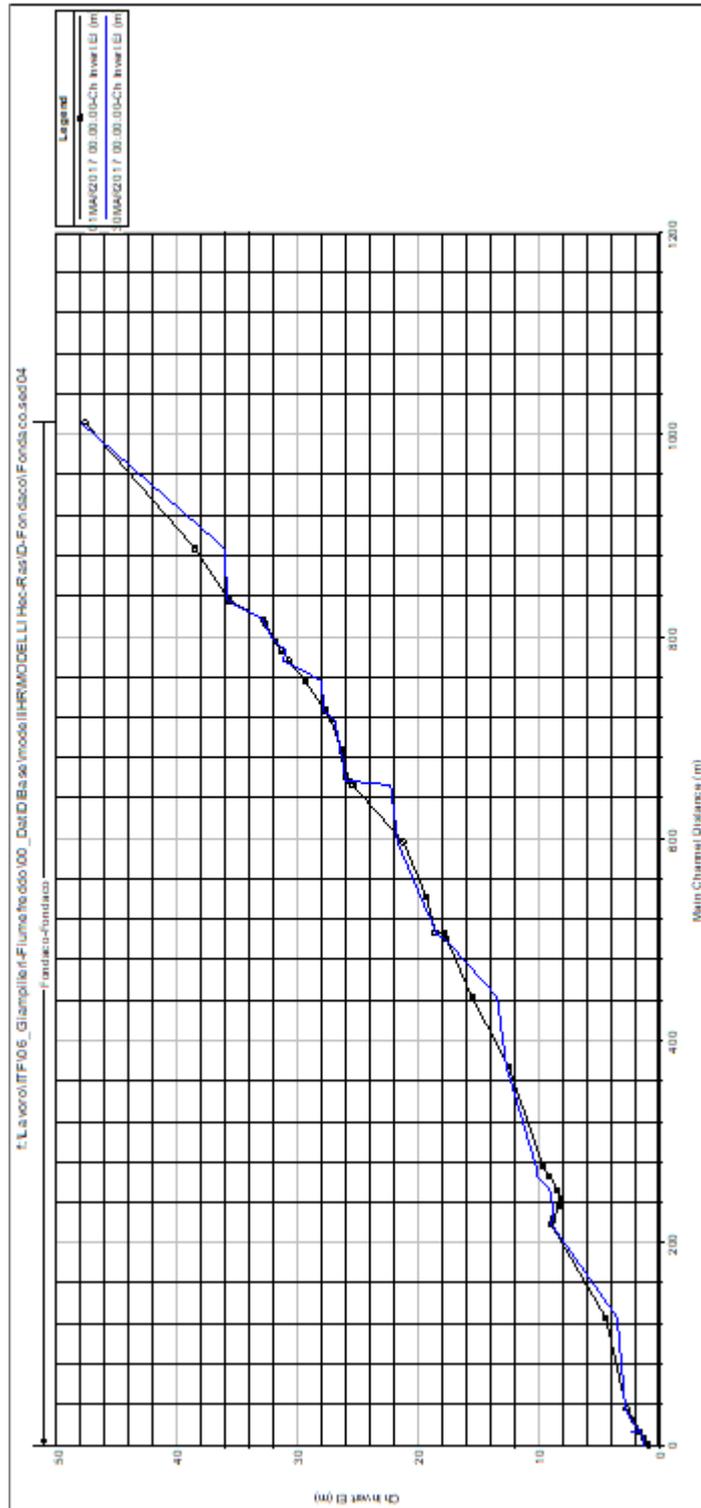


Figura 3-10: Torrente Fondaco – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

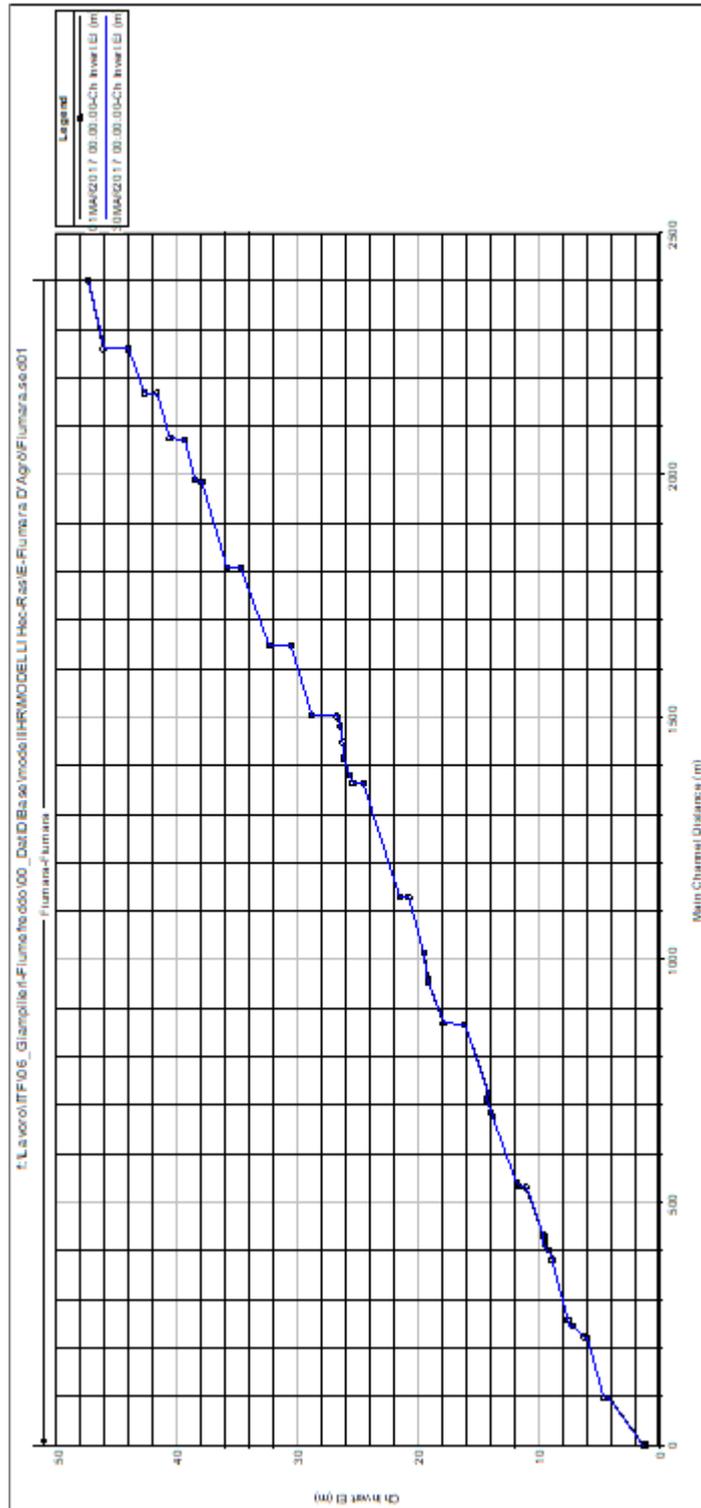


Figura 3-11: Fiumara D'Agrò – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)



Figura 3-12: Torrente Fiumedinisi – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

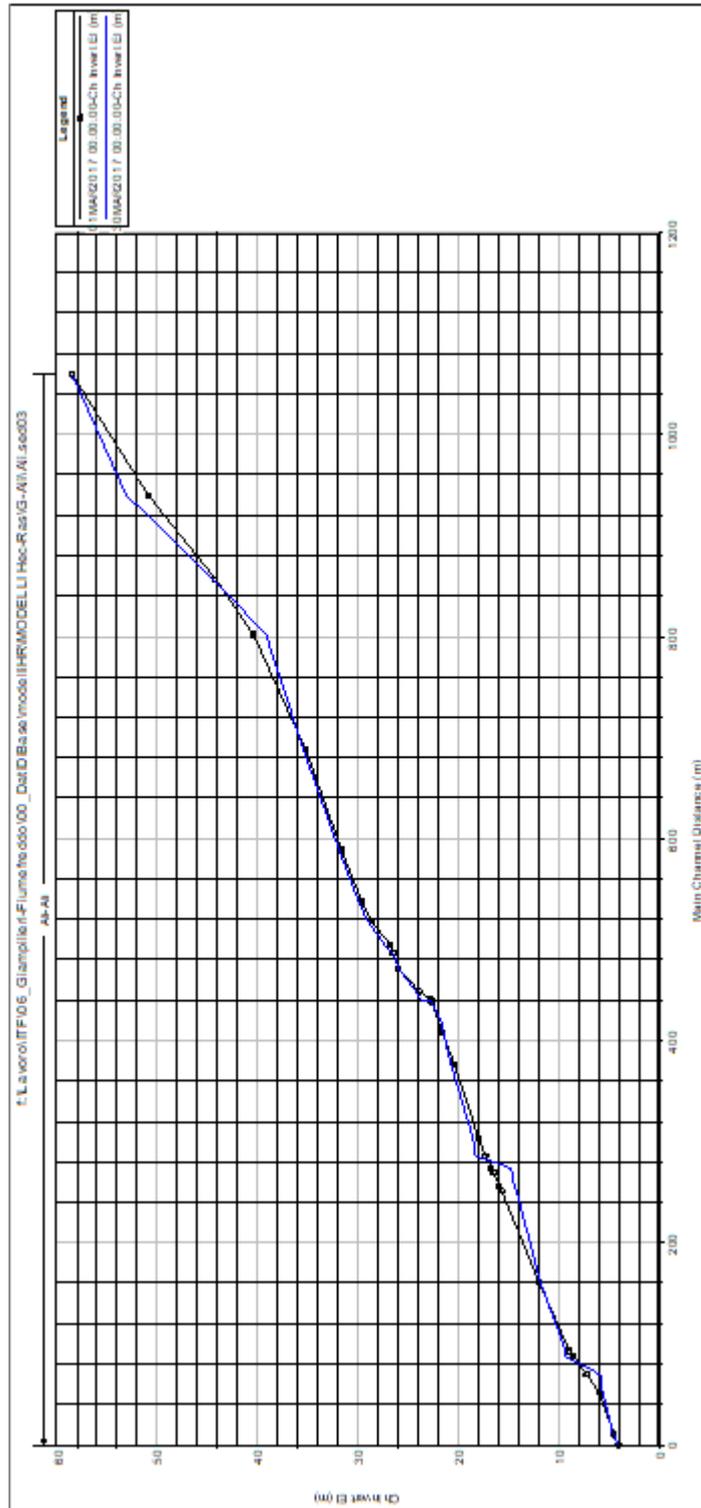


Figura 3-13: Torrente Ali – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

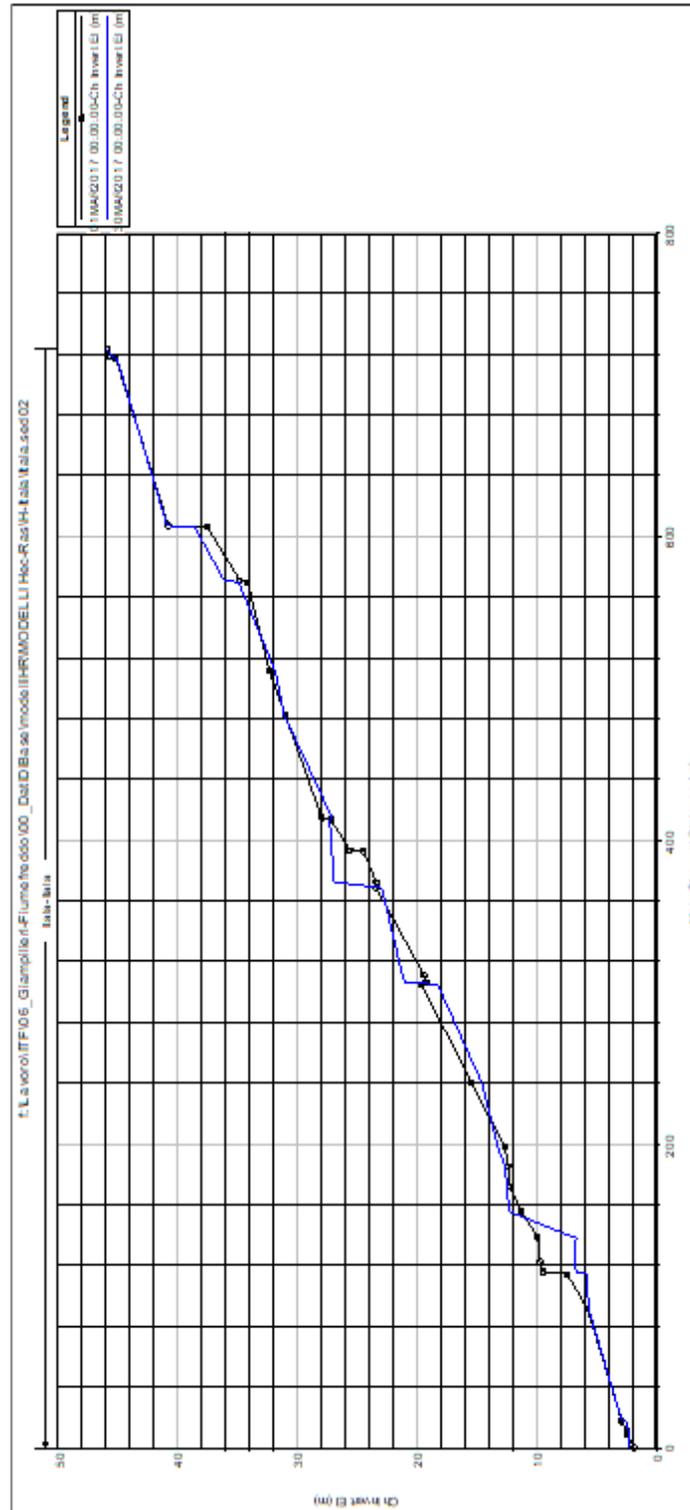


Figura 3-14: Torrente Itala – profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 4 VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DELL'OPERA IN PROGETTO A FENOMENI DI COLATE DETRITICHE

Il presente capitolo riguarda la valutazione della vulnerabilità dell'opera in progetto a fenomeni di colate detritiche. Le analisi sono state condotte con l'obiettivo di individuare le aree maggiormente suscettibili a tali fenomeni, rivolgendo particolare attenzione ai cosiddetti sistemi “*bacino-conoide*” interferenti con le opere in progetto. La metodologia adottata per l'individuazione di tali aree si articola nelle seguenti fasi (Figura 4-1):

1. Consultazione delle mappe di pericolosità geomorfologica e dei dissesti, sviluppate nell'ambito della redazione di Piani di Assetto Idrogeologico (PAI)
2. Analisi delle caratteristiche morfometriche dei sistemi “*bacino-conoide*” interferenti con le opere in progetto, sulla base di formulazioni e abachi riportati in letteratura
3. Sopralluoghi
4. Individuazione dei sistemi “*bacino-conoide*” potenzialmente suscettibili a fenomeni di colate detritiche
5. Valutazione dei volumi mobilitabili
6. Analisi della propagazione di colate detritiche e valutazione dell'interferenza con le opere in progetto, finalizzate alla definizione di eventuali interventi di difesa



Figura 4-1: Vulnerabilità a fenomeni di colate detritiche - Flow chart

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

#### 4.1 ASSETTO DEI VERSANTI E PROPENSIONE AL DISSESTO

L'analisi dell'assetto geomorfologico dei bacini dei corsi d'acqua oggetto di studio mostra che, per alcuni di essi, i dissesti presenti sui versanti possono essere associati a fenomeni caratterizzati da flussi idrici iperconcentrati e/o *debris-flows*, che potrebbero a loro volta interessare le opere in progetto.

In generale, anche laddove non si siano già verificati eventi in passato, la valutazione del possibile innesco di flussi detritici può essere condotta, in via speditiva, in base agli approcci disponibili nella letteratura tecnica che prevedono l'applicazione di opportune relazioni tra alcuni parametri morfometrici, che caratterizzano i sistemi “*bacino-conoide*” interferenti con le zone di intervento.

A partire dalle informazioni riportate negli elaborati specialistici RS2S01D69G5GE0001001C, RS2S01D69G5GE0003001D, RS2S01D69G6GE0001002D, RS2S02D69G5GE0001004C, RS2S02D69G5GE0003004C, RS2S02D69G6GE0001001C e riscontrate nei sopralluoghi, nonché nel documento “*Evento del 1° ottobre 2009 - Carta dei Dissesti*” redatto dal Dipartimento Regionale della Protezione Civile – Servizio Rischi Idrogeologici e Ambientali riportante “*gli scivolamenti planari di materiale evolventi a colata*” che hanno devastato Giampilieri e Scaletta Zanclea nel 2009, sono state individuate le zone di intervento in cui è necessario procedere con approfondimenti ed analisi della propensione al dissesto. In particolare, sono presi in esame i sistemi “*bacino-conoide*”, caratterizzati da “*canaloni con scariche di detrito o in erosione*”, degli impluvi di Calatabiano, del Vallone S. Antonio (loc. Taormina), del Torrente Boschetto (loc. Fondaco Parrino) e del Vallone Motta (loc. Giampilieri) (Figura 4-2, Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5).

I parametri morfometrici di tali sistemi, valutati mediante elaborazioni geostatistiche in ambiente GIS del rilievo Lidar (risoluzione 2x2 m) fornito dalla Regione Siciliana (<http://map.sitr.regione.sicilia.it/ArcGIS/services>), sono riportati nelle tabelle seguenti.

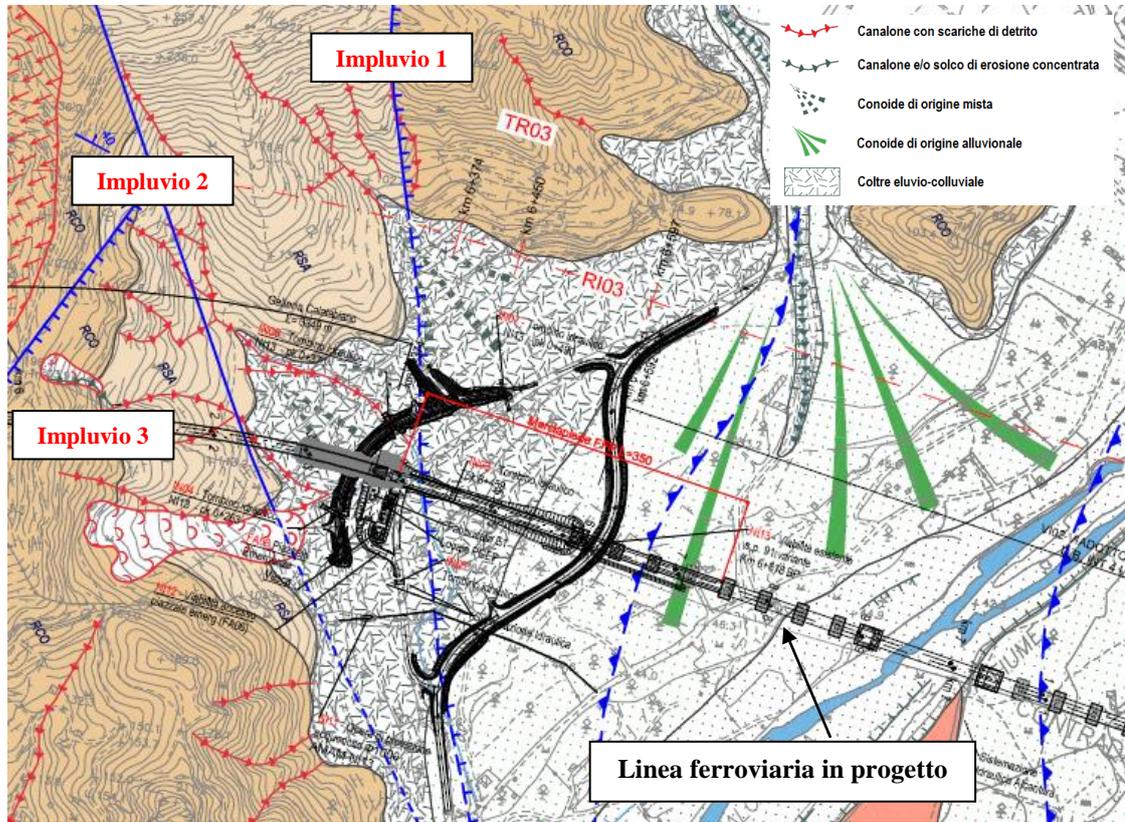


Figura 4-2: Area critica 1 - impluvi di Calatabiano.

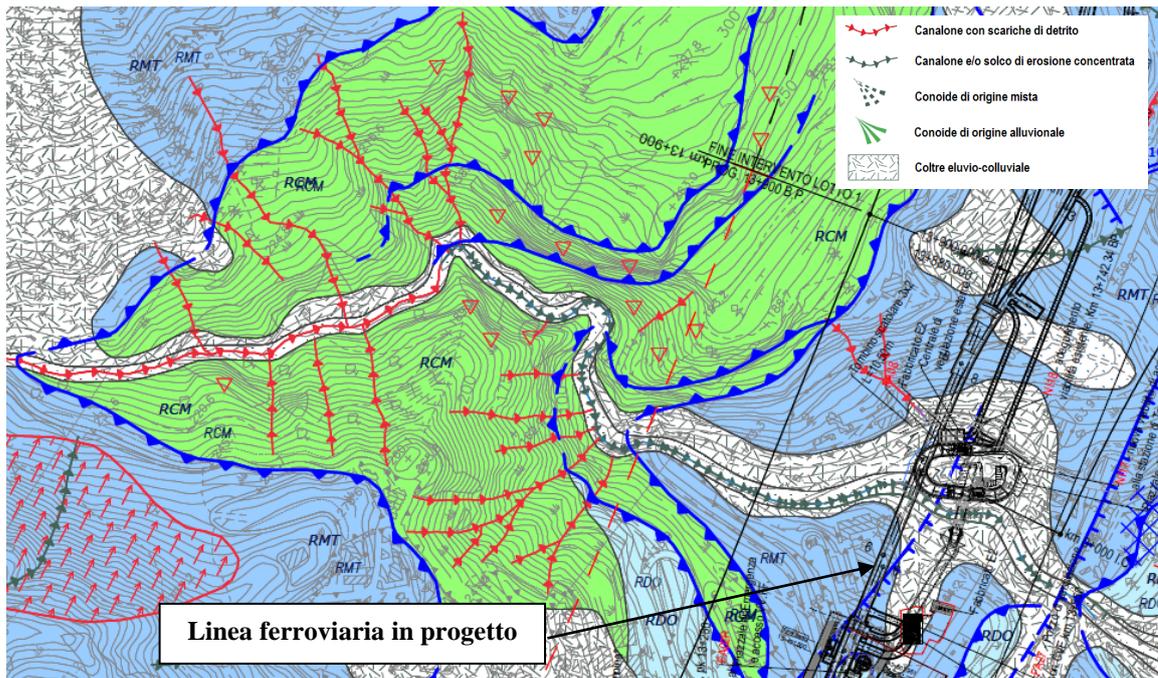
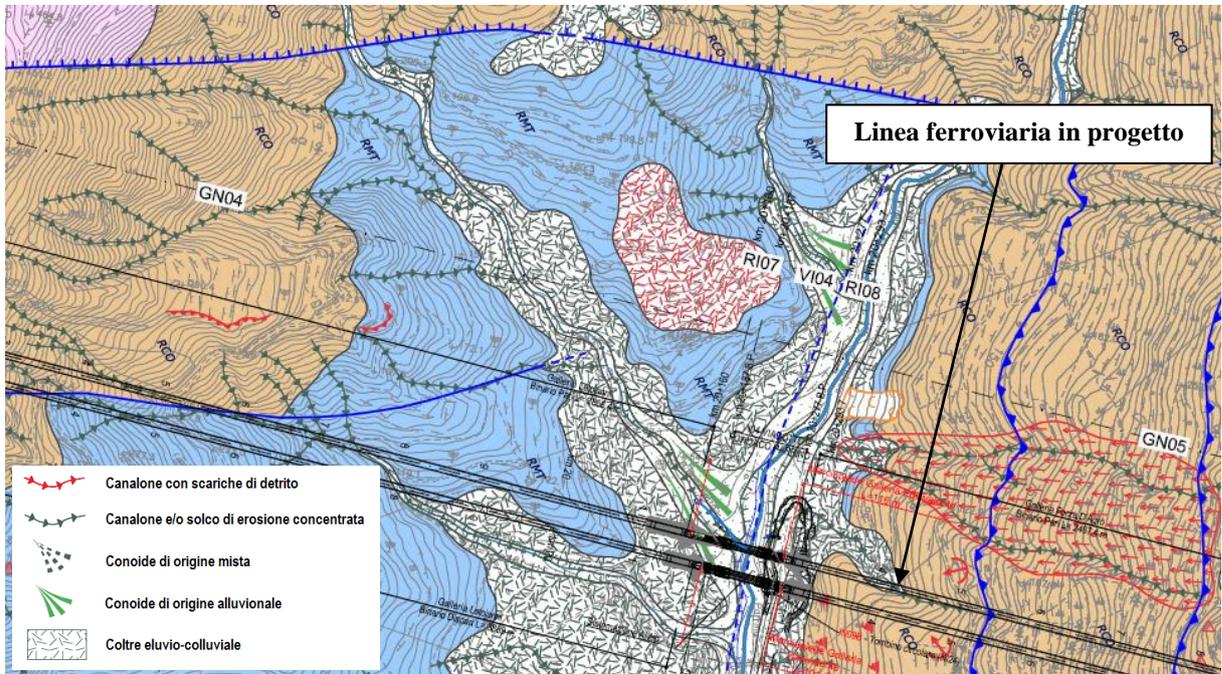
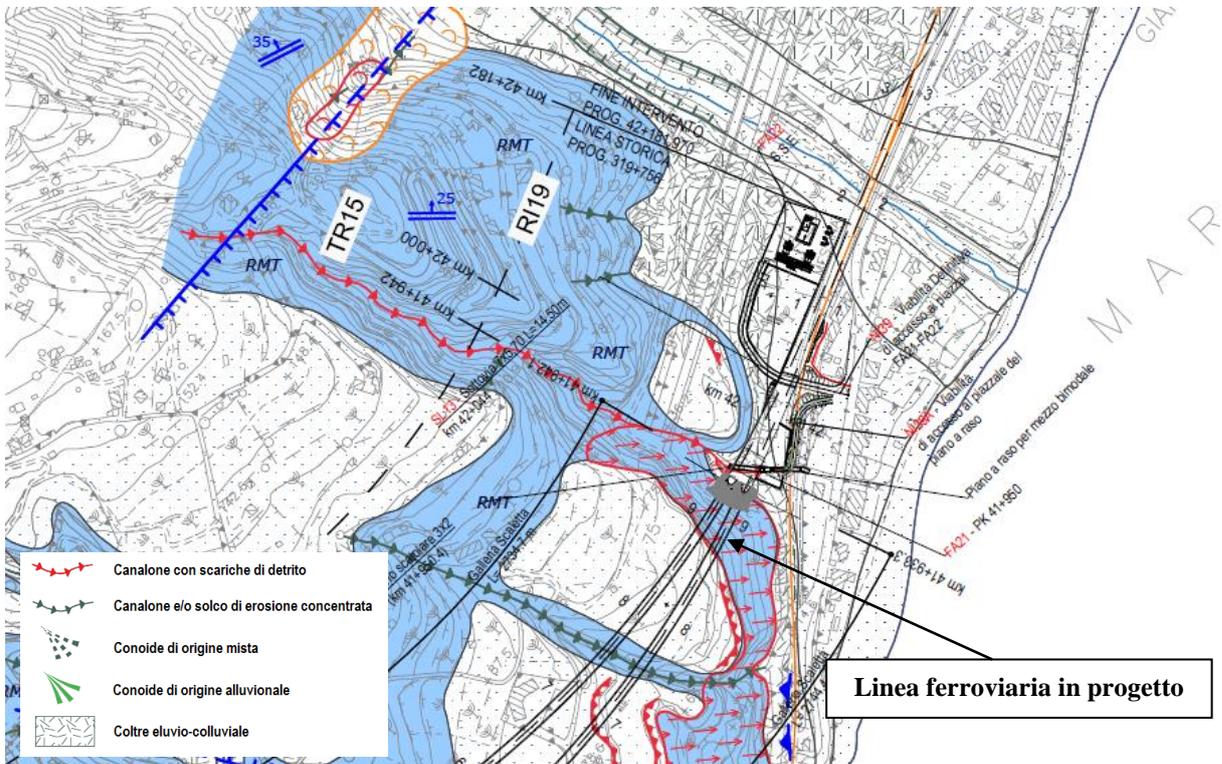


Figura 4-3: Area critica 2 - Vallone Sant'Antonio (loc. Taormina).



**Figura 4-4: Area Critica 3 – Torrente Boschetto (loc. Fondaco Parrino)**



**Figura 4-5: Area Critica 4 - Vallone Motta (loc. Giampilieri).**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

**Tabella 4-1: Caratteristiche morfometriche dei sistemi “bacino-conoide” degli impluvi di Calatabiano**

DATI (Impluvio 1)		DATI (Impluvio 2)		DATI (Impluvio 3)	
Area (kmq)	0.115	Area (kmq)	0.0945	Area (kmq)	0.0849
Lunghezza asta (km)	0.9	Lunghezza asta (km)	0.53	Lunghezza asta (km)	0.295
Quota massima (m slm)	250	Quota massima (m slm)	277	Quota massima (m slm)	233
Quota minima (m slm)	61	Quota minima (m slm)	64	Quota minima (m slm)	70
Quota media (m slm)	114.6	Quota media (m slm)	152.4	Quota media (m slm)	141.9
Pendenza media bacino (°)	19	Pendenza media bacino (°)	24.5	Pendenza media bacino (°)	26.1
Area conoide (kmq)	0.02375	Area conoide (kmq)	0.014	Area conoide (kmq)	0.0064
Pendenza media conoide (m/m)	0.105	Pendenza media conoide (m/m)	0.176	Pendenza media conoide (m/m)	0.283
Pendenza media conoide (°)	6	Pendenza media conoide (°)	10	Pendenza media conoide (°)	15.8
Pendenza media conoide (%)	10.5	Pendenza media conoide (%)	17.6	Pendenza media conoide (%)	0.6
Indice di Melton	0.557	Indice di Melton	0.693	Indice di Melton	0.559

**Tabella 4-2: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del Vallone Sant’Antonio**

Area (kmq)	1.81
Lunghezza asta (km)	3.46
Quota massima (m slm)	881.16
Quota minima (m slm)	33.72
Quota media (m slm)	390.2
Pendenza media bacino (°)	34.22
Area conoide (kmq)	0.04025
Pendenza media conoide (m/m)	0.249
Pendenza media conoide (°)	14.00
Pendenza media conoide (%)	24.9
Indice di Melton	0.630

**Tabella 4-3: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del Torrente Boschetto**

Area (kmq)	0.701
Lunghezza asta (km)	1.91
Quota massima (m slm)	583.84
Quota minima (m slm)	31.12
Quota media (m slm)	329.75
Pendenza media bacino (°)	33.82
Area conoide (kmq)	0.0111
Pendenza media conoide (m/m)	0.231
Pendenza media conoide (°)	13.00
Pendenza media conoide (%)	23.1
Indice di Melton	0.660

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

**Tabella 4-4: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del Vallone Motta**

<b>Area (kmq)</b>	0.14
<b>Lunghezza asta (km)</b>	1.12
<b>Quota massima (m slm)</b>	310.84
<b>Quota minima (m slm)</b>	9.88
<b>Quota media (m slm)</b>	139.16
<b>Pendenza media bacino (°)</b>	16.70
<b>Area conoide (kmq)</b>	0.00263
<b>Pendenza media conoide (m/m)</b>	0.213
<b>Pendenza media conoide (°)</b>	12.00
<b>Pendenza media conoide (%)</b>	21.3
<b>Indice di Melton</b>	0.804

Lo studio morfometrico dei sistemi “bacino-conoide” sopra elencati può essere condotto analizzando innanzitutto la correlazione tra i parametri *area* del conoide e *area* del bacino, *pendenza* del conoide e *area* del bacino. Quella maggiormente diffusa in letteratura è la correlazione di Bull (1964), il quale propose l’equazione:

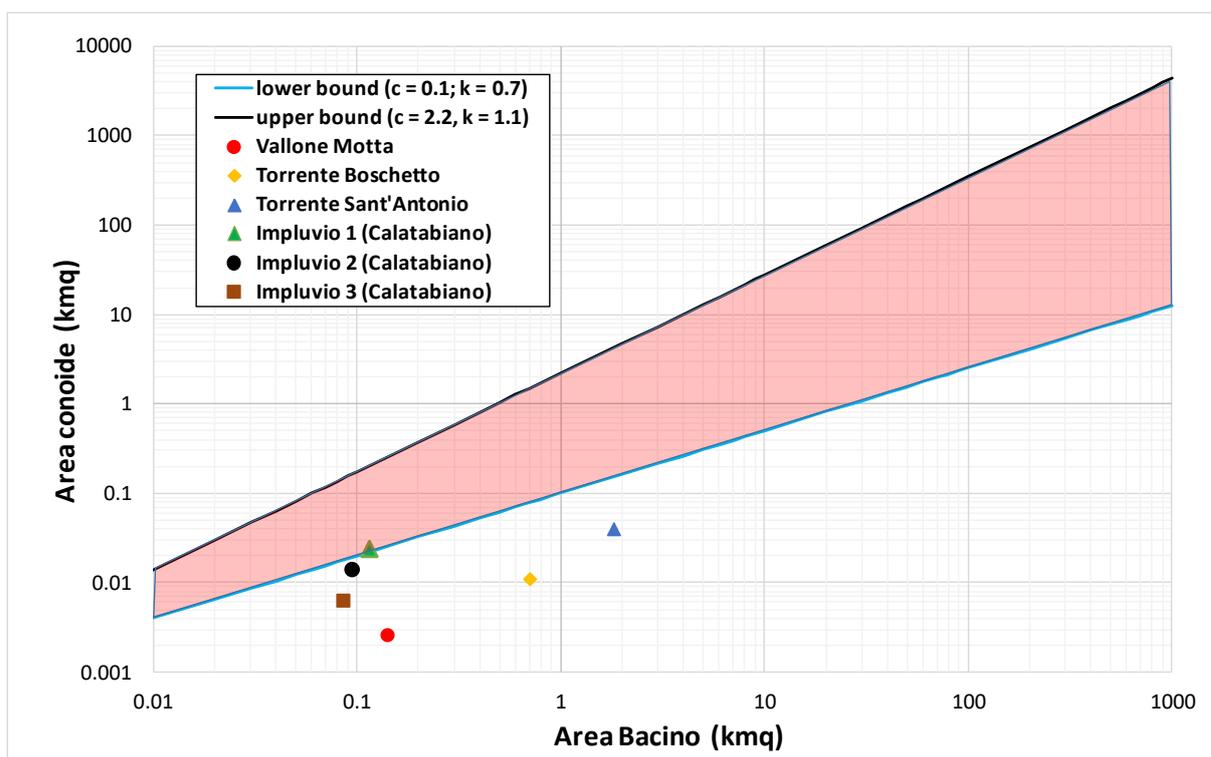
$$Af = c \cdot Ab^k \quad (4.1)$$

in cui  $Af$  è l’area del conoide ( $\text{km}^2$ ),  $Ab$  quella del bacino ( $\text{km}^2$ ),  $c$  e  $k$  sono coefficienti empirici.

Il coefficiente  $c$ , varia tra 0,1 e 2,2 (Harvey, 1997) e tiene conto dell’ubicazione geografica; dipende da fattori locali come l’erodibilità della roccia, l’attività tettonica, la quantità di detrito immagazzinato nel bacino, la velocità di subsidenza e l’entità delle precipitazioni. Il coefficiente  $k$  indica la variazione dell’area del conoide al variare di quella del bacino. Esso varia mediamente tra 0,7 e 1,1 (Harvey, 1997) e dipende dal contesto morfoclimatico in cui si evolve il sistema *bacino-conoide* (valori inferiori a 0,60 nei climi umidi; superiori a 0,88 nei climi aridi e intermedi nei climi sub-umidi o polari, Guzzetti *et al.*, 1997).

Nella figura seguente, sulla base del range di variabilità dei coefficienti empirici  $c$  e  $k$ , è evidenziato il campo dei valori di  $Af$  e  $Ab$  caratteristici di sistemi *bacino-conoide* interessati

da fenomeni di trasporto di materiale detritico verso valle. Si riportano su tale grafico (Figura 4-6) i valori di  $A_f$  e  $A_b$  relativi ai sistemi *bacino-conoide* in esame: i punti corrispondenti agli impluvii 1 e 2 di Calatabiano ricadono rispettivamente sul e in prossimità del “*lower bound*”.



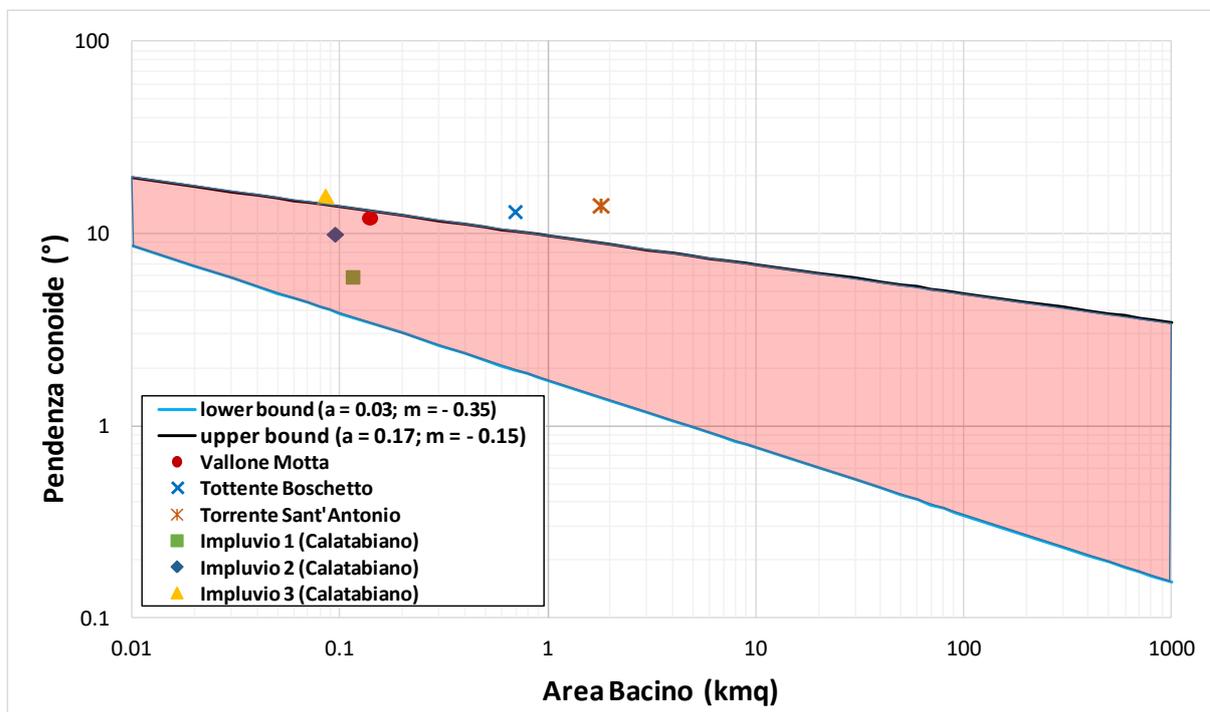
**Figura 4-6: Area conoide vs area bacino: valori caratteristici dei sistemi *bacino-conoide* interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico**

La seconda relazione morfometrica ampiamente investigata in letteratura è quella tra la pendenza del conoide e l'area del bacino (Drew, 1873; Melton, 1965; Hooke, 1968). Nel 1873, Drew fu il primo a osservare che i conoidi caratterizzati da pendenze minori sono alimentati da un bacino più ampio di quelli con pendenza maggiore; nel 1962 Bull propose la relazione:

$$S_f = a \cdot A_b^m \quad (4.2)$$

in cui  $S_f$  è la pendenza del conoide (in gradi),  $A_b$  l'area del bacino ( $\text{km}^2$ );  $a$  è un coefficiente sperimentale che assume valori compresi tra 0,03 e 0,17 (Harvey, 1997);  $m$  rappresenta la

variazione della pendenza del conoide con l'aumento dell'area del bacino; in genere varia tra -0,35 e -0,15 (Harvey, 1997). La relazione riflette la maggiore capacità di immagazzinare sedimenti da parte dei bacini più grandi. Inoltre, con l'aumento del rapporto ( $Ab/Sf$ ) diminuisce il valore della pendenza in quanto la deposizione si verifica in punti più distali. Anche per questa relazione, sulla base del range di variabilità dei coefficienti empirici  $a$  e  $m$ , è stato ricavato il campo dei valori di  $Sf$  e  $Ab$  caratteristici di sistemi *bacino-conoide* interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico (Figura 4-7). Riportando su tale grafico i valori di  $Sf$  e  $Ab$  relativi ai sistemi *bacino-conoide* in esame si osserva che i punti corrispondenti agli impluvi 1 e 2 di Calatabiano e al Vallone Motta ricadono all'interno del campo dei valori caratteristici, mentre il punto corrispondente all'impluvio 3 di Calatabiano ricade sull'*upper bound*.



**Figura 4-7: Pendenza conoide vs area bacino: valori caratteristici di sistemi *bacino-conoide* interessati da trasporto di materiale detritico**

Per definire la tipologia di trasporto che caratterizza un sistema *bacino-conoide*, è possibile ricorrere all'indice di Melton, valutabile tramite la seguente formulazione (Melton, 1965):

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$$R = (Ab^{-0.5}) \cdot (Q_{b,max} - Q_{b,min}) \quad (4.3)$$

in cui  $Q_{b,max}$  e  $Q_{b,min}$ , rappresentano rispettivamente la quota massima e minima del bacino. Tale indice è correlato alla pendenza  $Sf$  del conoide tramite la relazione:

$$S = q \cdot R^n \quad (4.4)$$

dove  $q$  e  $n$  sono parametri dimensionali determinati sperimentalmente.

In letteratura (Marchi *et al.*, 1993; De Scally & Owens, 2004; Santangelo, 2006) sono disponibili anche grafici/abachi che mettono in relazione *l'indice di Melton* con la pendenza del conoide, i quali vengono costruiti per determinare i valori soglia delle due variabili per le diverse tipologie di trasporto.

Si consideri l'abaco proposto da DeScally & Owens (2004), elaborato sulla base dell'analisi di un numeroso dataset relativo a conoidi alluvionali e/o legati a fenomeni di *debris flows*. In particolare sono evidenziati diversi settori, di cui il primo, caratterizzato da pendenze medie del conoide minori di  $7.5^\circ$  e valori dell'indice di Melton minori di 0.75, è costituito solo da sistemi con trasporto prevalente da "*fluvial flows*"; il secondo presenta invece un trasporto da "*debris flows*" con valori della pendenza del conoide maggiori di  $7.5^\circ$  e dell'indice di Melton maggiori di 0.75. Per pendenze inferiori a  $7.5^\circ$  e indici di Melton maggiori di 0,75 si rinviene una zona di coesistenza delle due tipologie ("*fluvial and debris flows*"), all'interno del quale risulta abbastanza incerta la definizione del tipo di trasporto.

Per i valori dell'indice di Melton ( $R$ ) dei sistemi "*bacino-conoide*" in esame, si rimanda alle tabelle precedenti.

Collocando i valori di  $R$  e  $Sf$  sull'abaco di DeScally & Owens (2004) (Figura 4-8), soltanto il Vallone Motta ricade nel settore dei sistemi *bacino-conoide* potenzialmente suscettibili a fenomeni di *debris flows*; i rimanenti sistemi (ad eccezione dell'impluvio 1 di Calatabiano che ricade nel settore dei "*fluvial flows*") ricadono in un campo di valori che si discostano dal *trend generale*.

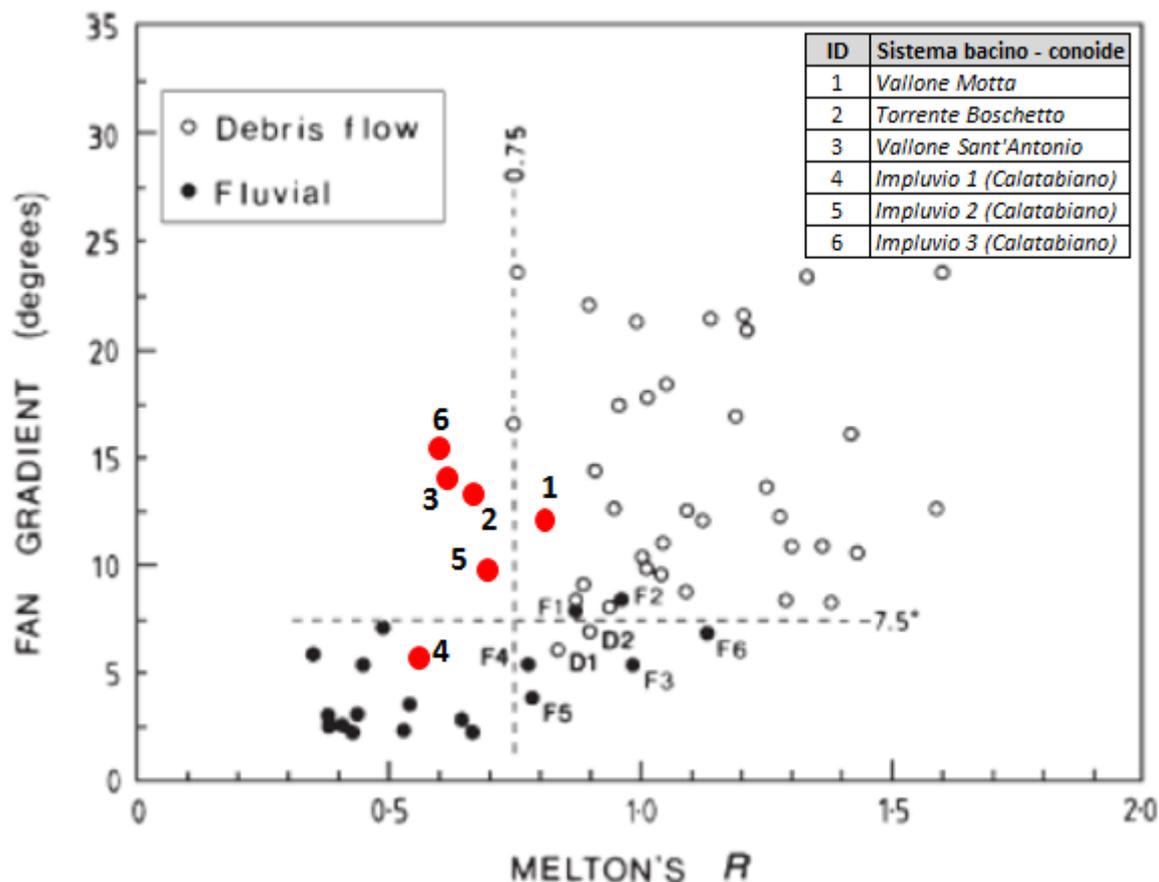


Figura 4-8: Pendenza conoide vs indice di Melton (DeSclally & Owens, 2004).

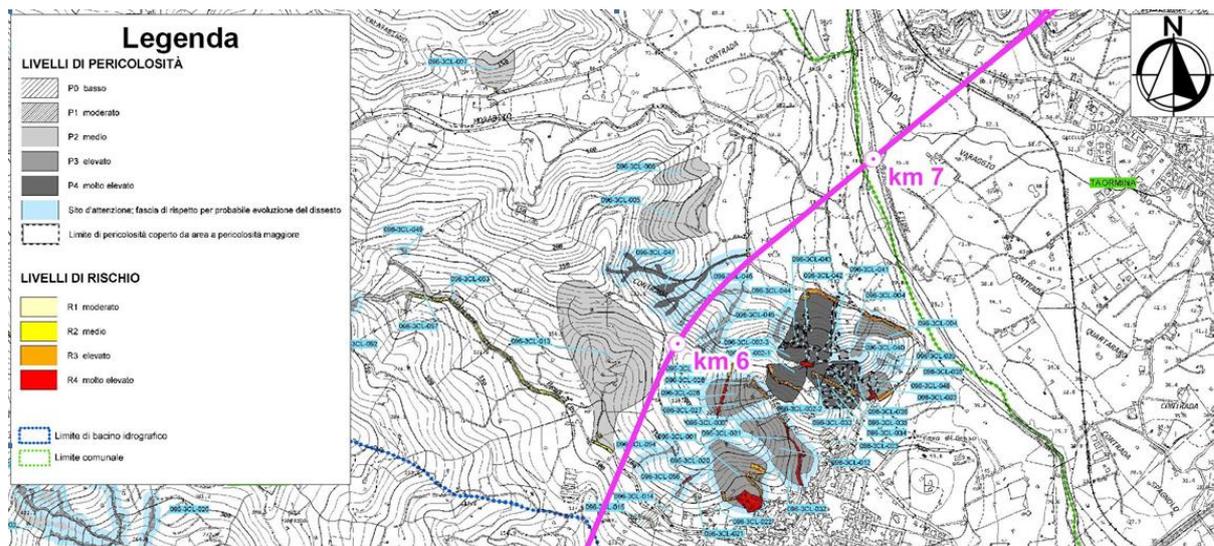
In conclusione, sulla base delle valutazioni sopra illustrate, si ritiene che i sistemi *bacino-conoide* degli impluvi di Calatabiano e del Vallone Motta possano essere caratterizzati da meccanismi di trasporto di materiale detritico proveniente da *movimenti di versante*, tali da poter interessare le opere in progetto.

I risultati ottenuti confermano anche quanto *i)* ossevato in sito durante i sopralluoghi, *ii)* riportato nei documenti del PAI e del Dipartimento della Protezione Civile – Servizio Rischi Idrogeologici e Ambientali della Regione Siciliana.

In particolare, con riferimento alla *Carta della Pericolosità e del Rischio Geomorfologico del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Sicilia* (2005, aggiornamento 2017 – 095 Area tra F. Simeto e F. Alcantara), in corrispondenza degli impluvi di Calatabiano

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

è indicato un livello di pericolosità “*molto elevato*” ed “*elevato*” e la maggior parte della superficie dei bacini degli impluvi 2 e 3 ricade in “*Sito di attenzione: fascia di rispetto per probabile evoluzione del dissesto*” (Figura 4-9).



**Figura 4-9: Stralcio della Carta della Pericolosità e del Rischio Geomorfologico del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (2005, aggiornamento 2017 – 095 Area tra F. Simeto e F. Alcantara) – località Calatabiano.**

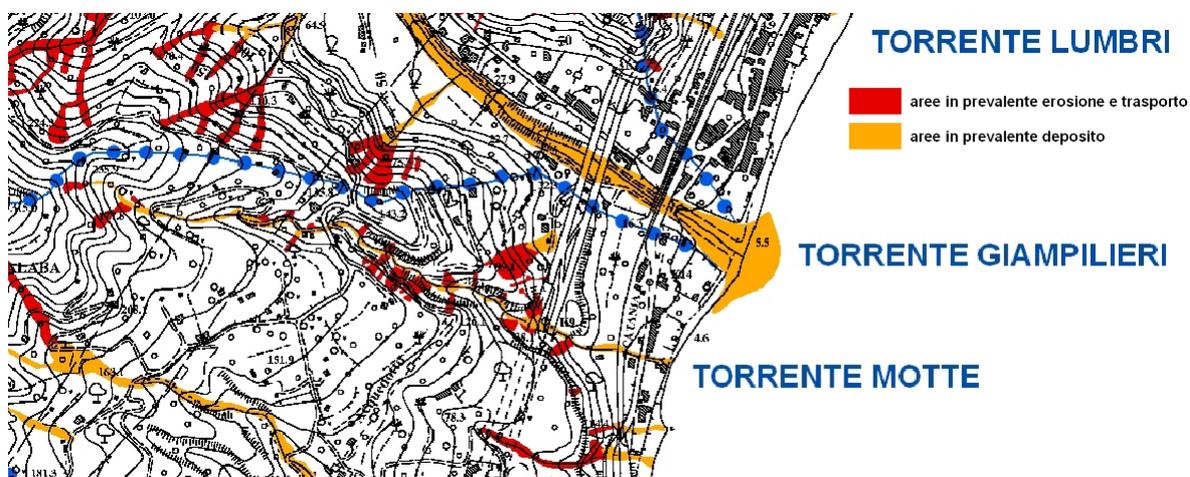
Evidenze di propensione al dissesto e di trasporto di materiale verso valle sono state riscontrate/osservate anche durante i sopralluoghi effettuati: nello specifico, accumuli/depositi di materiale detritico e opere provvisorie di regimazione delle acque, lungo gli impluvi, totalmente “*interrite*”, in breve tempo (Figura 4-10)



**Figura 4-10: Foto del sopralluogo.**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Come riportato nel documento “*Evento del 1° ottobre 2009 - Carta dei Dissesti*” redatto dal Dipartimento Regionale della Protezione Civile – Servizio Rischi Idrogeologici e Ambientali, anche il Vallone Motta è stato interessato da movimenti di versante evolventi in colate rapide (Figura 4-11), con trasporto di materiale detritico a valle, in corrispondenza dell’autostrada A18 e dell’area in cui è prevista la realizzazione dello imbocco della Galleria “*Scaletta*” (GN10) in progetto.



**Figura 4-11: Stralcio della *Carta dei Dissesti* redatta dal Dipartimento Regionale della Protezione Civile – Servizio Rischi Idrogeologici e Ambientali, relativa agli eventi del 2009.**

Per le due aree, Calatabiano e Vallone Motta, potenzialmente critiche, si rendono pertanto necessari ulteriori approfondimenti. E’ stato quindi valutato il volume solido potenzialmente mobilitabile ai fini delle analisi di propagazione di potenziali colate detritiche nei sistemi “*bacino-conoide*” sopra individuati, descritte nei paragrafi successivi.

## **4.2 STIMA DEI VOLUMI POTENZIALMENTE MOBILITABILI DAI VERSANTI**

### **4.2.1 Metodologia generale**

Per i sistemi “*bacino-conoide*” suscettibili a fenomeni di “*debris flows*”, il volume di materiale potenzialmente mobilitabile può essere stimato tramite formulazioni empiriche disponibili in letteratura, che si basano su alcuni parametri morfometrici relativi alle

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

caratteristiche sia del bacino sia del conoide, ossia indice di Melton, pendenza, area, lunghezza, così come determinati nel precedente paragrafo.

Per bacini di modesta estensione (come quelli in esame, Calatabiano e Vallone Motta), è possibile ricorrere alle relazioni proposte da Marchi e Tecca (1996) e da Bottino et al. (1996), che (nel caso specifico) sono riportate anche nel documento dell'Ufficio del Commissario delegato ex O.P.C.M. 10 ottobre 2009.

- **Marchi e Tecca (1996)**

$$V = 70000 \cdot A$$

con  $A$  = superficie del bacino in  $\text{km}^2$ ), valida per bacini con  $0.1 < A < 20 \text{ km}^2$ .

- **Bottino et al. (1996)**

$$V = 21241 \cdot A^{0.28}$$

valida per bacini con  $A < 0.40 \text{ km}^2$ .

Determinato il volume complessivo (solido + liquido) della “potenziale” colata detritica, per quantificare i singoli volumi solido e liquido si può procedere con la determinazione del cosiddetto “*debrisgramma*” o onda di colata detritica, mediante il metodo volumetrico (D’Agostino, 2013).

In particolare, si procede con il calcolo della portata di picco della colata ricorrendo a formule empiriche (Tabella 4-5), in funzione di un’unica variabile (nota), cioè il volume totale dell’evento ( $V$ ).

Formula	Autore
$Q_d=0.0188 \cdot V^{0.79}$	Mizuyama et al (1992)
$Q_d=0.00558 \cdot V^{0.831}$	Jitousono et al (1996)
$Q_d=0.0163 \cdot V^{0.64}$	Costa (1988)

**Tabella 4-5: formule empiriche per la stima della portata al colmo di una colata detritica.**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Successivamente dalla portata al picco del *debris flow* viene derivata la portata liquida. In questo modo è possibile costruire un idrogramma semplificato in cui si assume che l'onda di piena abbia una forma triangolare.

La concentrazione volumetrica  $C_v$  viene fatta variare, secondo intervalli temporali costanti, da un valore minimo di 0.2 (soglia in cui si passa da trasporto solido di fondo a trasporto iperconcentrato) ad un valore massimo rappresentativo della colata detritica (0.5 – 0.65).

Si ottiene quindi un debrisgramma semplificato che però a differenza dell'idrogramma non ha una forma triangolare; è quindi necessario inserire un fattore di non linearità  $k$ , (generalmente pari a 1.5), derivante dalla relazione tra  $C_v$  e  $1/(1-C_v)$  che appunto non è lineare (D'Agostino, 2013).

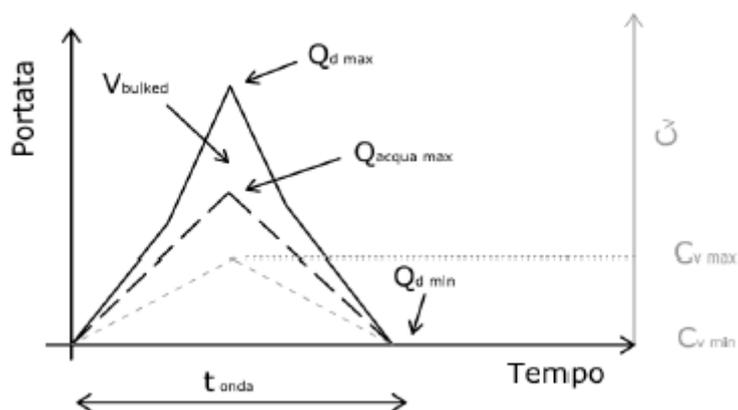


Figura 4-12 – Metodo volumetrico: determinazione dell'onda di colata detritica (debrisgramma).

Con riferimento allo schema di Figura 4-12, integrando l'area sottesa dal debrisgramma non lineare si ottiene la seguente equazione:

$$V_{bulk} = \frac{(Q_{d \max} - Q_{d \min})}{k} t_{onda} = \left[ \frac{Q_{acqua \max}}{(1 - C_{v \max})} - \frac{Q_{acqua \min}}{(1 - C_{v \min})} \right] \frac{t_{onda}}{k}$$

con

$$V_{bulk} = (1.2 \div 1.3) V_{debris}$$

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

$V_{bulked}$  = volume solido-liquido complessivo (generalmente incrementato di un fattore 1,2 – 1,3 rispetto al valore  $V$  ottenuto tramite l'applicazione di formule empiriche);  $V_{debris} = V$ ;  $Q_{d,max}$  = portata massima del debris flow, espressa in  $m^3/s$ ;  $Q_{d,min}$  = portata minima del debris, espressa in  $m^3/s$ ;  $Q_{acqua,max}$  = portata massima di acqua per l'evento di piena, espressa in  $m^3/s$ ;  $Q_{acqua,min}$  = portata minima di acqua;  $k$  = coefficiente di forma dell'onda "Bulked";  $t_{onda}$  = tempo che assume l'evento (i.e. tempo di corrivazione), espresso in secondi;  $C_{v,max}$  = concentrazione massima della colata (0.5-0.65);  $C_{v,min}$  = concentrazione minima della colata, generalmente assunta pari a 0.2.

Gli unici dati conosciuti di questa equazione sono il volume dell'evento, la portata liquida massima e la portata liquida minima (che si assume pari a  $0.1 m^3/s$ ). Quindi dall'equazione precedente si ricava il tempo di durata dell'onda e successivamente si può calcolare la portata al picco del debris flow mediante la seguente equazione:

$$Q_{d\ max} = \frac{V_{bulked} \ k}{t_{onda}}$$

#### 4.2.1.1 Impluvi sui versanti di Calatabiano

Di seguito, si riportano i risultati ottenuti applicando le relazioni proposte da Marchi e Tecca (1996) e da Bottino et al. (1996) per la stima del volume potenzialmente mobilitabile.

	<b><i>Impluvio 1</i></b>	<b><i>Impluvio 2</i></b>	<b><i>Impluvio 3</i></b>
<b><i>Relazione</i></b>	<b><i>V (mc)</i></b>	<b><i>V (mc)</i></b>	<b><i>V (mc)</i></b>
<b><i>Marchi e Tecca (1996)</i></b>	8050.0	6615.0	5943.0
<b><i>Bottino et al. (1996)</i></b>	11592	10972	10648

**Tabella 4-6: Impluvi di Calatabiano: valutazione del volume di materiale potenzialmente mobilitabile.**

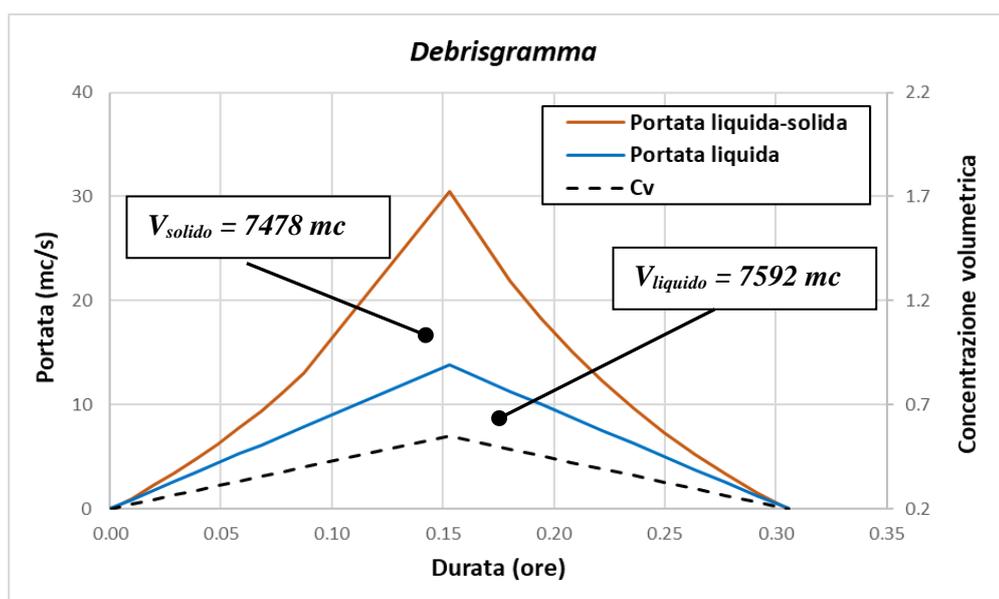
In via cautelativa, sono stati considerati i valori di volume forniti dalla relazione di Bottino et al. (1996).

Per la determinazione del debrisgramma e quindi dei volumi solido e liquido da considerare nelle simulazioni della propagazione di colate detritiche (descritte in seguito), si è fatto riferimento ad una portata liquida al colmo corrispondente ad un tempo di ritorno maggiore o uguale a 200 anni (per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato specialistico RS2S00D78RIID0001001C) ed ad una portata al colmo della colata pari al massimo valore ottenuto dall'applicazione delle formule empiriche riportate in Tabella 4-5.

Di seguito, i risultati per i tre impluvi in esame.

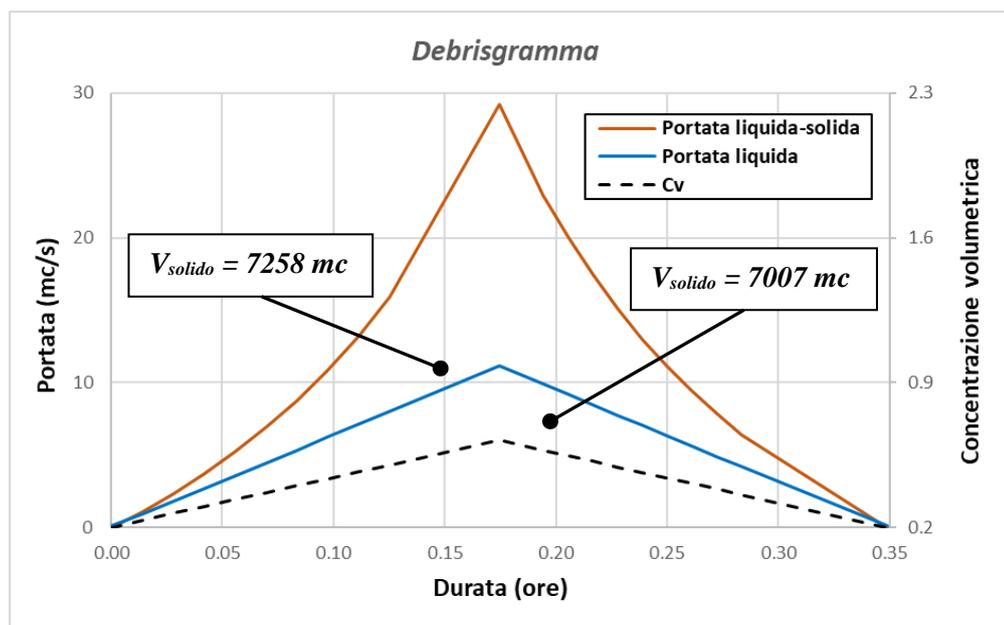
### Impluvio 1

$Q_d$ (mc/s) (Mizuyama et al. 1992)	30.54
$Q_{200}$ (mc/s)	13.80
$Q_{min}$ (mc/s)	0.1
$C_{v,max}$	0.55
$V_{bulkcd}$ (mc)	15070
$t_{onda}$ (s)	1100.3
$Q_{d,max}$ (mc/s)	30.54
$Q_{d,min}$ (mc/s)	0



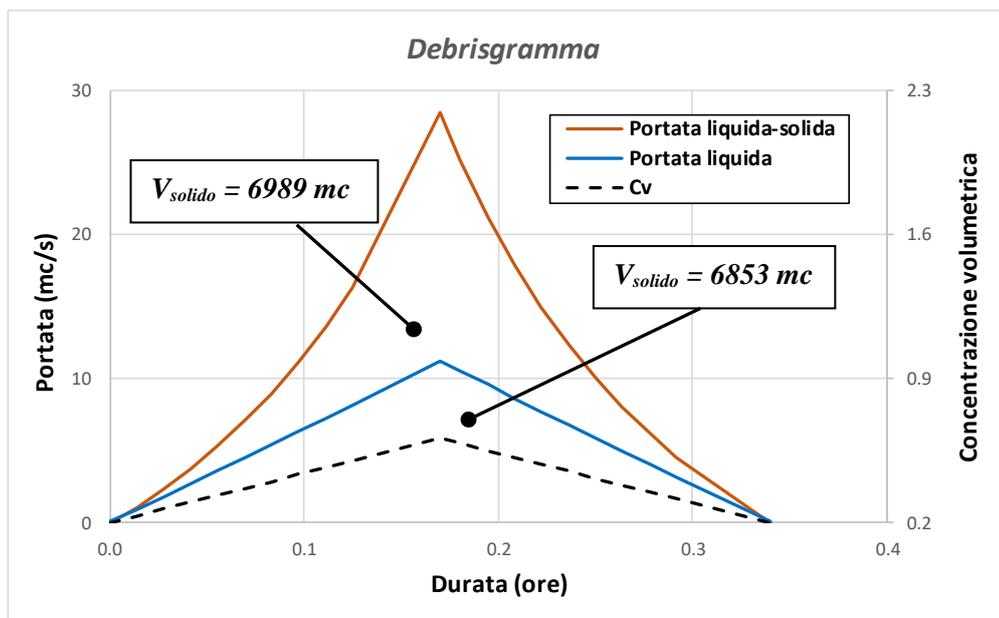
### Impluvio 2

$Q_d$ (mc/s) (Mizuyama et al. 1992)	29.24
$Q_{200}$ (mc/s)	11.16
$Q_{min}$ (mc/s)	0.1
$C_{v,max}$	0.62
$V_{bulked}$ (mc)	14264
$t_{onda}$ (s)	1255.8
$Q_{d,max}$ (mc/s)	29.24
$Q_{d,min}$ (mc/s)	0



### Impluvio 3

$Q_d$ (mc/s) (Mizuyama et al. 1992)	28.56
$Q_{200}$ (mc/s)	11.19
$Q_{min}$ (mc/s)	0.1
$C_{v,max}$	0.61
$V_{bulked}$ (mc)	13842
$t_{onda}$ (s)	1225.3
$Q_{d,max}$ (mc/s)	28.56
$Q_{d,min}$ (mc/s)	0



#### 4.2.1.2 Vallone Motta

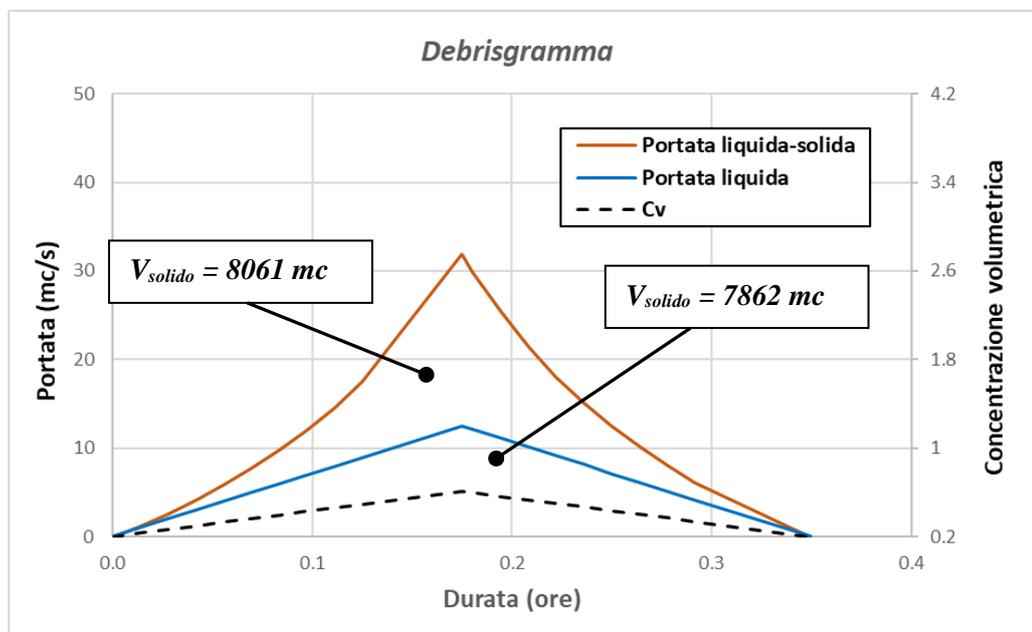
Applicando le relazioni proposte da Marchi e Tecca (1996) e da Bottino et al. (1996), si ottengono i seguenti valori del volume potenzialmente mobilitabile:

Relazione	V (mc)
Marchi e Tecca (1996)	9800.0
Bottino et al. (1996)	12249

**Tabella 4-7: Vallone Motta: valutazione del volume di materiale potenzialmente mobilitabile.**

Per quanto concerne la determinazione dei volumi solido e liquido, si procede come per il caso precedente.

$Q_d$ (mc/s) (Mizuyama et al. 1992)	31.90
$Q_{200}$ (mc/s)	12.49
$Q_{min}$ (mc/s)	0.1
$C_{v,max}$	0.61
$V_{bulkcd}$ (mc)	15923
$t_{onda}$ (s)	1259.1
$Q_{d,max}$ (mc/s)	31.90
$Q_{d,min}$ (mc/s)	0



### 4.3 SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DI COLATE DETRITICHE

#### 4.3.1 Modello matematico

Per la valutazione della vulnerabilità delle opere in progetto è stato sviluppato un modello bidimensionale di propagazione di potenziali colate detritiche nei sistemi “*bacino-conoide*” precedentemente individuati, teso alla determinazione delle aree di deposizione, sia nella configurazione attuale che *post operam*.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

In particolare, è stato impiegato il software *r.avaflow*, sviluppato da Mergili et al. (2012). Tale codice di calcolo numerico simula la propagazione di flussi di masse granulari/detritiche da una o più aree di distacco individuate su una topografia di base fino a quando (i) tutto il materiale si è depositato; (ii) tutto il materiale ha lasciato l'area di interesse; (iii) non viene raggiunto il tempo massimo di simulazione stabilito dall'utente.

I principali parametri di input di *r.avaflow* sono riepilogati nella tabella seguente.

Parameter	Symbol	Unit	Format
Input			
Initial elevation of basal surface	$Z_0$	m	Raster map
s, f release heights	$H_{0,s}, H_{0,f}$	m, m	Raster maps
Total release height, s concentration of release mass	$H_0, \alpha_{s0}$	m, –	Raster map, value
s, f entrainable heights	$H_{Emax,s}, H_{Emax,f}$	m,m	Raster maps
Entrainable total height, s concentration of entrainable mass	$H_{Emax}, \alpha_{s,Emax}$	m, –	Raster map, value
$n_C$ hydrograph tables: s and f flow heights and velocities at defined points of time (see Fig. 2)	$H_{p,s}, v_{p,s}, H_{p,f}, v_{p,f}$	m, $m s^{-1}$ , m, $m s^{-1}$	Tables
$n_D$ sets of centre coordinates, length, and aspect of hydrograph	–	m, degree	Sets of 4 values
Flow parameters (see Table 2)	–	–	Set of 14 values
Entrainment coefficient (see Table 2)	$C_E$	$kg^{-1}$	Value
Time interval for output, max. time after which simulation terminates	$\Delta t_{out}, t_{term}$	s, s	Set of 2 values
Threshold flow height for visualization and validation	$H_t$	m	Value
Observed impact area, observed deposition area	OIA, ODA	–, –	Raster maps
Vertex coordinates of flow path	–	m	Even number of $\geq 4$ values

**Tabella 4-8: r.avaflow - principali parametri di input.**

In sostanza, *r.avaflow* richiede come input (i) un modello digitale del terreno che rappresenta l'elevazione della superficie di base (nelle aree di distacco la superficie del terreno al di sotto della massa instabile) nella configurazione *ante operam*, ovvero prima dell'evento; (ii) mappe raster della distribuzione spaziale delle altezze o degli spessori dei volumi solido e liquido o degli idrogrammi e (iii) un set di parametri computazionali, fisico-meccanici e legati a possibili fenomeni di erosione/deposito (Tabella 4-9) durante la propagazione (coefficienti empirici i cui valori possono essere assegnati direttamente oppure sottoforma di mappe raster di distribuzione) .

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Symbol	Parameter	Unit
$\rho_S$	Solid material density (grain density)	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_F$	Fluid material density	$\text{kg m}^{-3}$
$\varphi$	Internal friction angle	Degree
$\delta$	Basal friction angle <sup>a</sup>	Degree
$C_{VM}$	Virtual mass	–
$v_T$	Terminal velocity	$\text{m s}^{-1}$
$P$	Parameter for combination of solid- and fluid-like contributions to drag resistance	–
$Re_p$	Particle Reynolds number	–
$J$	Exponent for drag (1 = linear, 2 = quadratic)	–
$N_R$	Quasi-Reynolds number	–
$N_{RA}$	Mobility number	–
$\chi$	Viscous shearing coefficient for fluid	–
$\xi$	Solid concentration distribution with depth	–
$C_{AD}$	Ambient drag coefficient <sup>b</sup>	–
$C_E$	Entrainment coefficient <sup>a</sup>	$\text{kg}^{-1}$

**Tabella 4-9: r.avaflow - parametri fisico-meccanici e reologici.**

Invece degli spessori o delle altezze rappresentanti i volumi solido e liquido, è possibile anche definire le altezze (o gli spessori) totali, unitamente alla concentrazione solida. Ciò dipende dal modello reologico, di propagazione, scelto dall'utente.

In *r.avaflow* vi è la possibilità di scegliere tra i seguenti due modelli: *Voellmy-Salm* e *Pudasaini*. Il primo si basa sulla legge reologica di *Voellmy*, secondo il quale la resistenza al taglio in corrispondenza della superficie di scorrimento è dipendente dal quadrato della velocità di propagazione, attraverso un parametro/coefficiente detto “*di turbolenza*”. Sviluppato per lo studio della propagazione di valanghe di neve, trova applicazione anche nella simulazione di colate detritiche, a condizione che il parametro di *turbolenza* assuma certi valori.

Il modello di *Pudasaini* prevede, per il materiale solido, l'implementazione del modello costitutivo di Mohr-Coulomb (*rigido-plastico*); il fluido è invece modellato come un fluido viscoso Non-Newtoniano. Il trasferimento della quantità di moto all'interfaccia include la resistenza viscosa, l'eventuale “*galleggiamento*” e la massa virtuale indotta dalla relativa accelerazione tra le fasi solida e fluida.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Il codice di calcolo si basa sulla risoluzione delle classiche equazioni della meccanica del “continuo”:

- Conservazione delle masse solida e fluida

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \mathbf{u}_s) = 0,$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \mathbf{u}_f) = 0.$$

con  $\mathbf{u}_s = (u_s, v_s, w_s)$  e  $\mathbf{u}_f = (u_f, v_f, w_f)$  vettori velocità delle fasi solida e fluida, rispettivamente, e  $\alpha_s = (\alpha_s, \alpha_s, \alpha_s)$  frazione solida

- Conservazione della quantità di moto per le fasi solida e fluida

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s \otimes \mathbf{u}_s) = \alpha_s \rho_s \mathbf{f} - \nabla \cdot \alpha_s \mathbf{T}_s + p \nabla \alpha_s + \mathbf{M}_s$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \otimes \mathbf{u}_f) = \alpha_f \rho_f \mathbf{f} - \alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \alpha_f \boldsymbol{\tau}_f + \mathbf{M}_f$$

con  $\mathbf{f}$  = forza peso;  $-\mathbf{T}_s$  = tensori degli sforzi (Cauchy) della fase solida;  $\mathbf{T}_f = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}_f$  = tensore degli sforzi (Cauchy) della fase fluida;  $\mathbf{M}$  = azione di contatto all’interfaccia “solido-fluido” ( $\mathbf{M} = \mathbf{M}_s + \mathbf{M}_f = 0$ );  $p\Delta\alpha_s$  = termine che tiene conto della forza di galleggiamento;  $p$  = pressione del fluido (Pudasaini, 2012).

I principali outputs di *r.avaflow* consistono in mappe raster riportanti gli spessori o le altezze del materiale solido, del fluido e totali del flusso granulare, pressione ed energia cinetica, e le modifiche della topografia di base (rilevante nel caso di modellazione di fenomeni di erosione e deposizione).

Tutte le mappe raster sono prodotte per ogni passo temporale (definito dall’utente) e per il valore massimo di ogni grandezza del tempo di uscita per tutti i passaggi temporali.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Parameter	Symbol	Unit	Format
Maximum flow height, kinetic energy, and pressure (each for s, f, t)	$H_{Max}, T_{Max}, P_{Max}$	m, J, Pa	Raster maps
Flow height, flow kinetic energy, and flow pressure at each output time step $t_{out}$ (each for s, f, t)	$H_{tout}, T_{tout}, P_{tout}$	m, J, Pa	Raster maps
Flow velocities in $x$ and $y$ direction, and in absolute values (each for s, f)	$v_x, v_y, v$	$m s^{-1}$	Raster maps
Change of basal topography (s, f, t)	$H_C$	m	Raster maps
Impact indicator index, deposition indicator index	III, DII	–, –	Raster maps
$n_D$ – $n_C$ output hydrograph tables: flow heights, velocities, and discharges at defined points of time (s, f)	$H_p, v_p, Q$	m, $m s^{-1}$ , $m^3 s^{-1}$	Tables

**Tabella 4-10: r.avaflow – principali outputs.**

#### 4.3.2 Determinazione dei parametri geometrici e fisico-meccanici ed implementazione del modello di calcolo

Si riportano sinteticamente i valori dei volumi “*solido*” e “*fluido*” (principali dati di input di *r.avaflow*) per i sistemi “*bacino-conoide*” di Calatabiano e del Vallone Motta (loc. Giampilieri), determinati nel capitolo precedente.

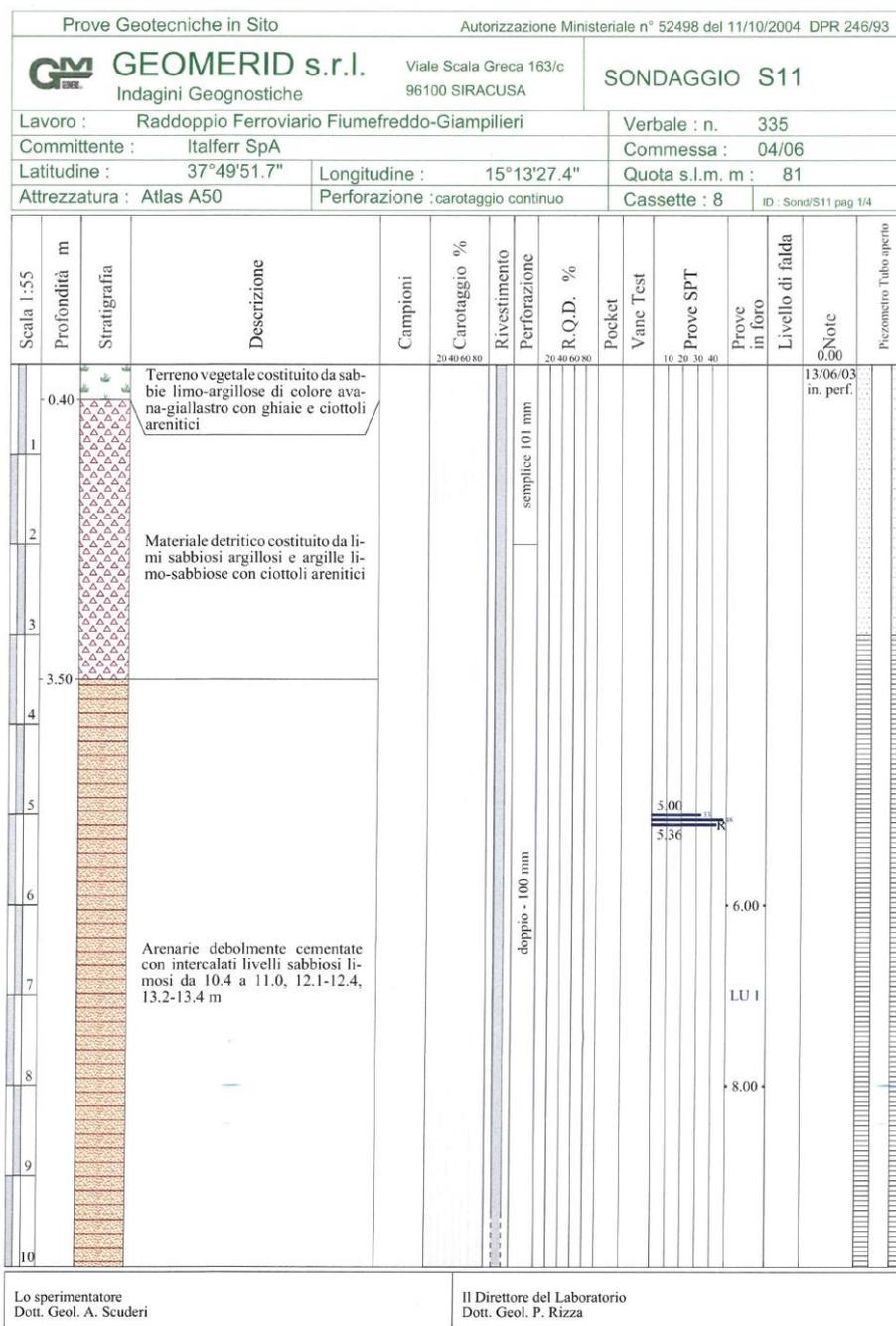
<i>Bacino</i>	<i>Volume solido (mc)</i>	<i>Volume liquido (mc)</i>	<i>Volume totale (mc)</i>
<i>Impluvio 1 (Calatabiano)</i>	7592	7478	15070
<i>Impluvio 2 (Calatabiano)</i>	7007	7258	14264
<i>Impluvio 3 (Calatabiano)</i>	6853	6989	13842
<i>Vallone Motta</i>	7862	8061	15923

Gli spessori delle coltre detritiche presenti nei bacini in esame (potezialmente instabili) sono stati dedotti dalle informazioni riportate nell’elaborato specialistico RS2S01D69RGGE0001001C e dai sondaggi effettuati, laddove disponibili.

In particolare, relativamente al bacino del Vallone Motta, con riferimento agli eventi già verificatesi nel 2009 e ai sopralluoghi effettuati, lo spessore delle coltre detritiche (su substrato roccioso) è stato stimato circa pari a 1 m. L’ipotetica zona di distacco è stata collocata, in relazione alla morfologia dei versanti, nella parte iniziale del bacino (già interessata da dissesti nel 2009, Figura 4-11).

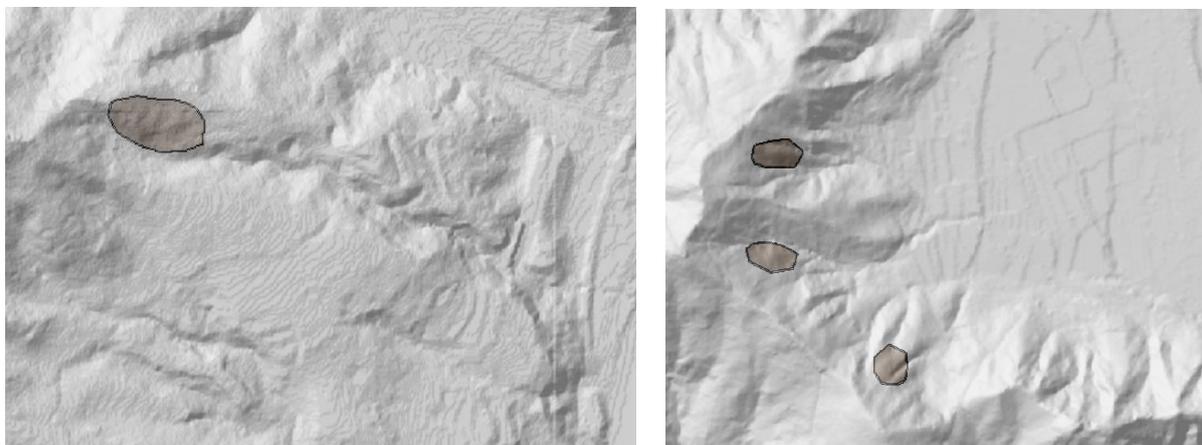


mappe raster riportanti la distribuzione delle altezze di “*solido*” e “*fluid*”. Possibili fenomeni di erosione dei canali di scorrimento durante la propagazione non sono stati simulati.



**Figura 4-14: Impluvi a Calatabiano – stratigrafia del sondaggio S11.**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS2S	00	D 09 RG	ID 00 02 001	D	96 di 110



**Figura 4-15: Aree di distacco simulate: Vallone Motta (a sinistra) e Calatabiano (a destra).**

Per quanto concerne la stima dei parametri “*angolo di attrito interno,  $\delta$* ” e “*angolo di attrito alla base,  $\varphi$* ”, per il Vallone Motta, in località Giampilieri, si è fatto riferimento allo studio “*A comparative assessment of two different debris flow propagation approaches – blind simulations on a real debris flow event*”, condotto da Stancanelli e Foti (2015) dell’Università di Catania, in cui sono stati analizzati gli eventi verificatesi a Scaletta Zanclea e Giampilieri nel 2009. In tale studio sono forniti i valori di angolo di attrito interno ( $\delta = 38^\circ$ ) e alla base ( $\varphi = 21^\circ$ ), caratteristici dei materiali che costituiscono i versanti della zona. In via cautelativa, nelle simulazioni condotte nel presente studio, descritte nel successivo paragrafo, sono stati assunti i valori  $\delta = 30^\circ$  e  $\varphi = 20^\circ$ .

Relativamente agli impluvi di Calatabiano, si è fatto invece riferimento al sondaggio di (Figura 4-14). I materiali potenzialmente coinvolti nel fenomeno di colata (ossia la coltre detritica superficiale in scorrimento su un banco di “*arenarie debolmente cementate con intercalati livelli sabbiosi limosi*”) appartengono alla stessa formazione geologica e sono caratterizzati dalla presenza di limi sabbiosi argillosi.

Per tali materiali si è ritenuto ragionevole assumere, sulla base anche dei valori riportati nella letteratura tecnica, angoli di attrito tipici di un limo argilloso, trascurando cautelativamente la componente sabbiosa; in particolare, è stato imposto  $\delta = \varphi = 26^\circ$ .

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Valutati i principali parametri di input, si è proceduto alle simulazioni numeriche in *r.avaflow*; è stato applicato il modello di Pudasaini (2012) e ai parametri computazionali sono stati assegnati i seguenti valori: *minimum flow depth* = 0.001 m; *terminal velocity* = 0.1 m/s; *maximum time step length* = 0.01; *CFL criterion* = 0.25; *time at which to stop simulation* = dedotto dalla durata del debrisgramma corrispondente.

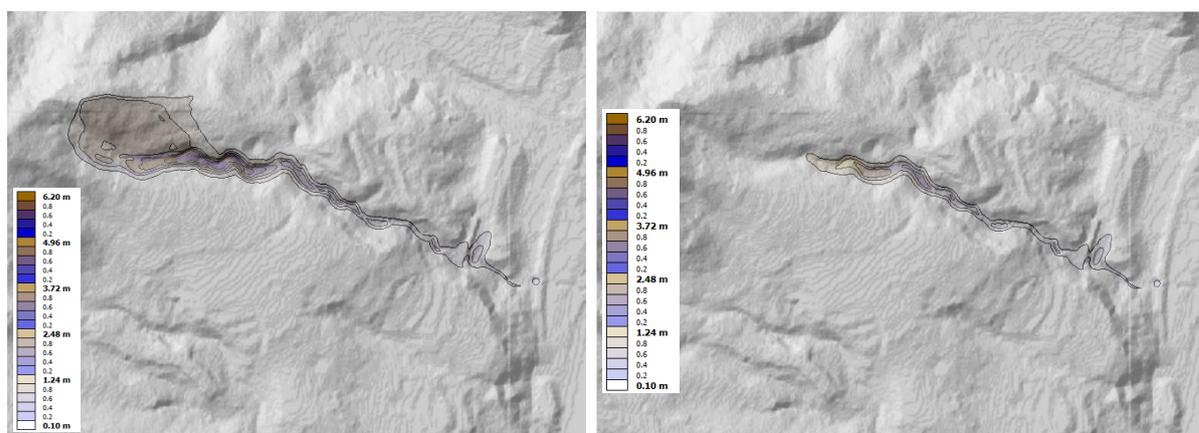
### 4.3.3 Risultati delle simulazioni

Le simulazioni della propagazione di “*potenziali*” colate detritiche, con “*contenuto di acqua*” corrispondente all’evento meteorico duecentennale, sono state condotte sia per lo scenario “*ante operam*” che per la configurazione “*di progetto*”, relativamente ai bacini di Calatabiano e del Vallone Motta.

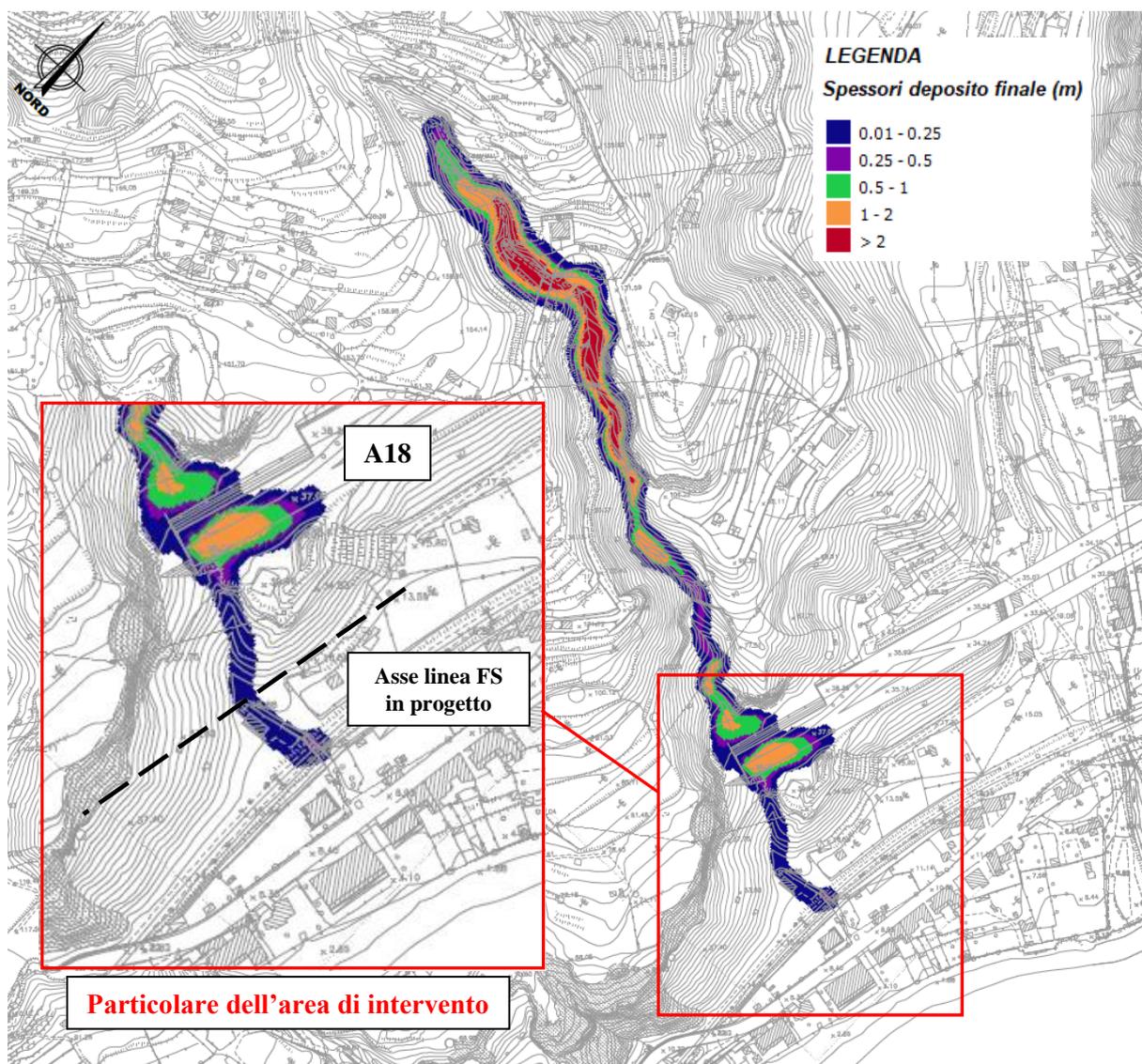
#### 4.3.3.1 Scenario “*ante operam*”

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni numeriche in termini di aree di deposizione e spessori (totali, fluido + solido) finali e di “*inviluppo*” delle altezze (totali) massime.

#### Vallone Motta – loc. Giampilieri



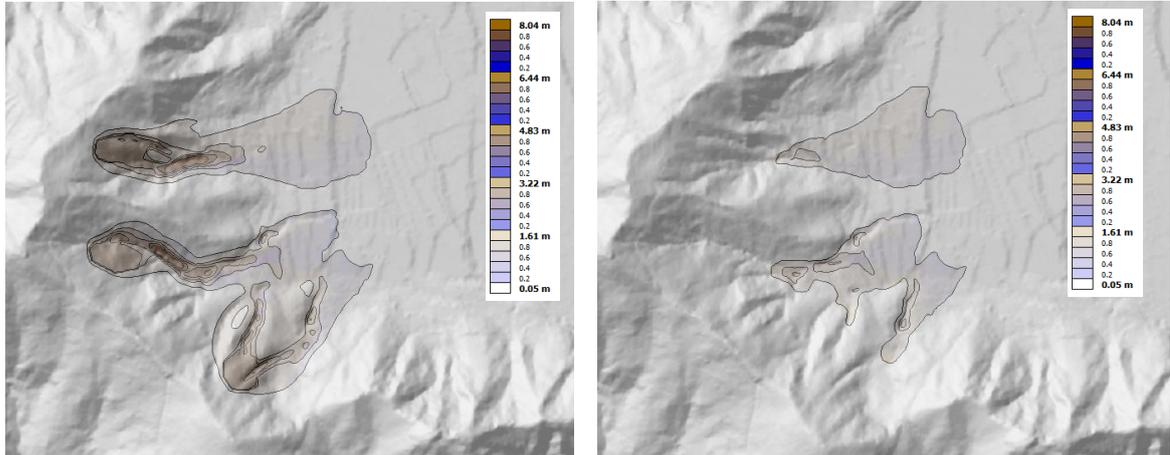
**Figura 4-16: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “*ante operam*” – involuppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo *r.avaflow*.**



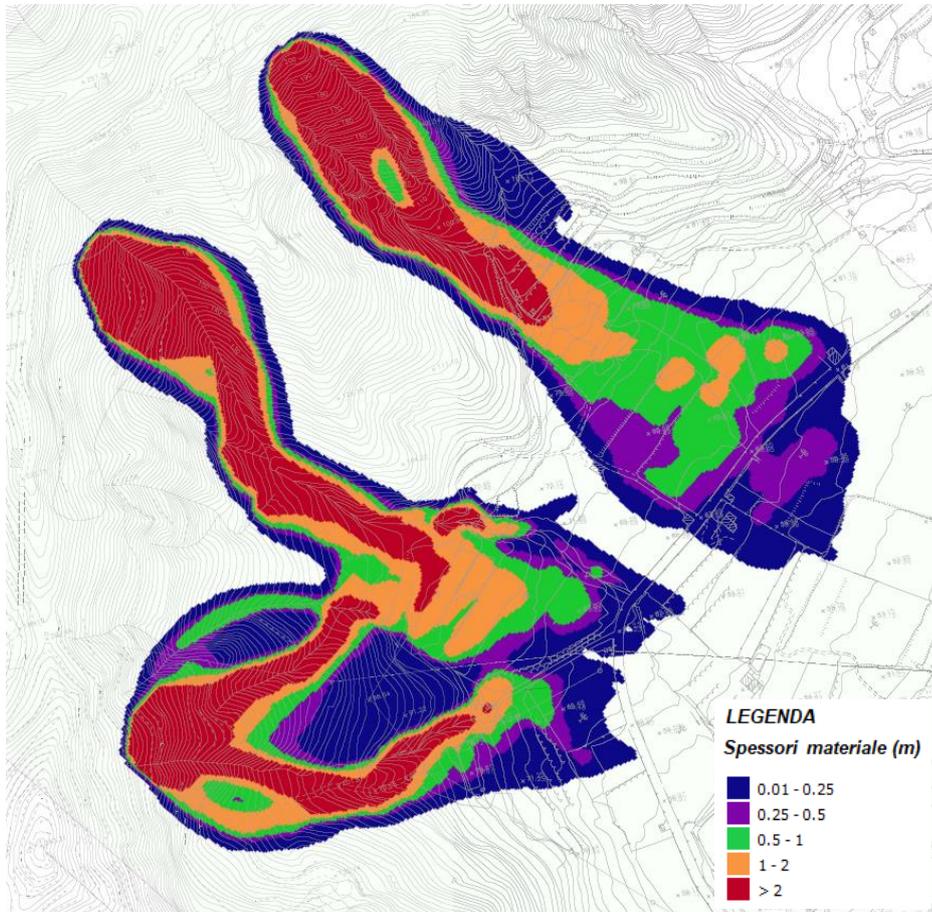
**Figura 4-17: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “ante operam” – aree di deposizione e spessori del materiale finali, su CTR.**

I risultati ottenuti evidenziano la possibile interferenza (anche se modesta, con spessori del materiale depositato/accumulato < 0.25 m) del percorso di propagazione della colata detritica con la linea FS in progetto.

Impluvi di Calatabiano

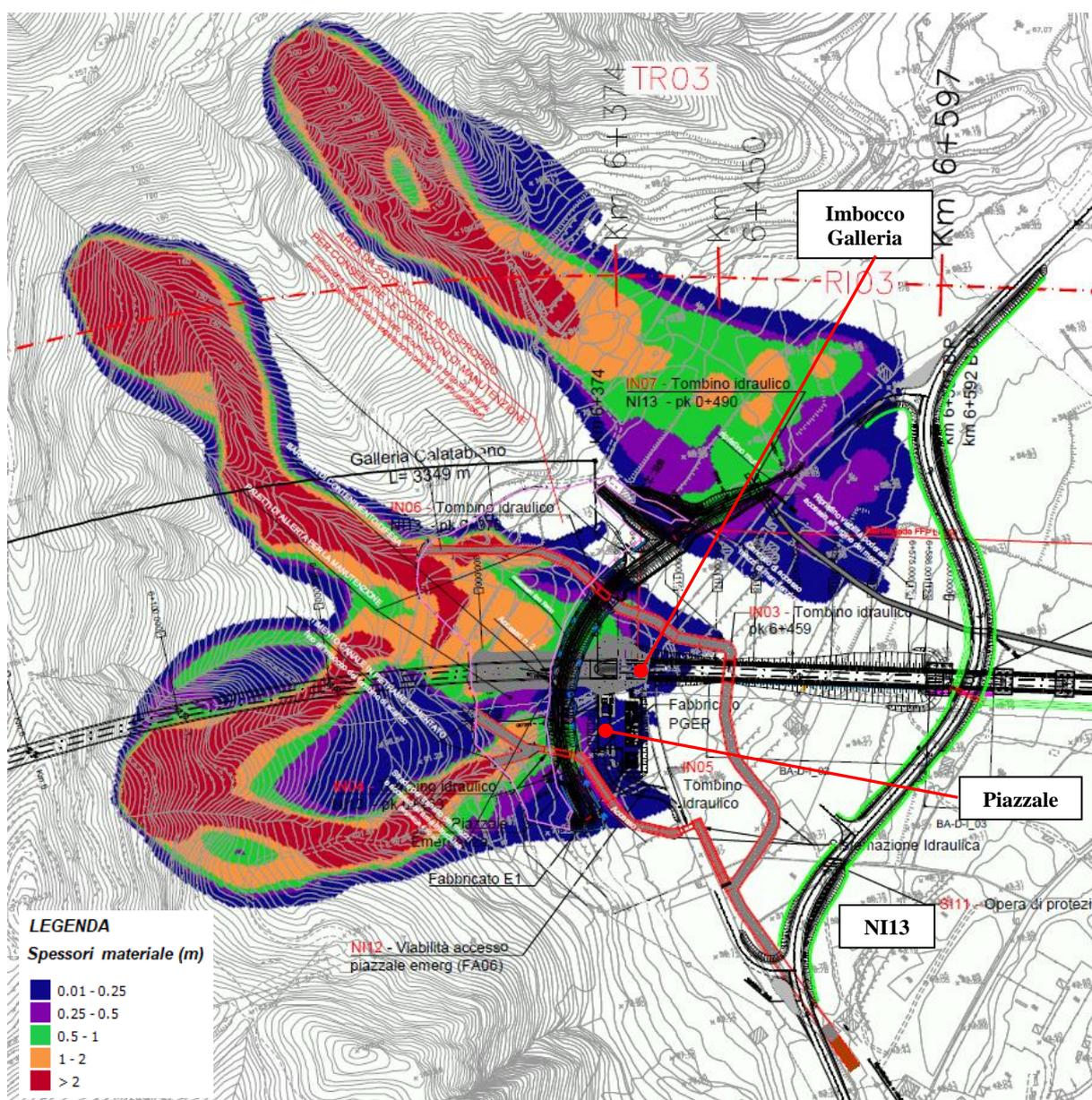


**Figura 4-18: Impluvi di Calatabiano, scenario “ante operam” – involuppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo *r.avaflow*.**



**Figura 4-19: Impluvi di Calatabiano, scenario “ante operam” - involuppo delle altezze massime di materiale, su CTR.**

Sovrapponendo le opere in progetto con le aree di deposizione riportate nella figura precedente, anche in questo caso, i percorsi di propagazione delle “potenziali” colate detritiche interferiscono con le opere in progetto (imbocco della Galleria di Calatabiano, piazzale annesso).



**Figura 4-20: Impluvi di Calatabiano, scenario “ante operam” – inviluppo delle altezze massime di materiale, su CTR, con sovrapposizione delle opere in progetto.**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b>					
	<b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS2S	00	D 09 RG	ID 00 02 001	D	101 di 110

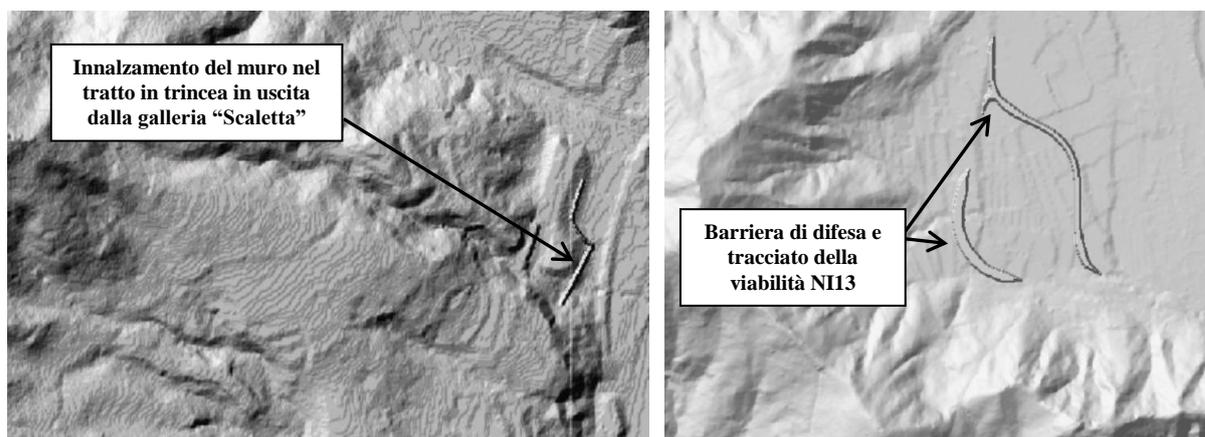
#### 4.3.3.2 Scenario “di progetto”

I risultati ottenuti nelle simulazioni numeriche dello scenario “*ante operam*” hanno evidenziato l’interferenza dei percorsi di propagazione di potenziali colate detritiche con alcune opere in progetto.

Per la risoluzione di tali criticità sono stati proposti i seguenti interventi:

1. innalzamento del muro/paratia nel tratto in “*trincea*” in uscita dalla galleria “Scaletta”;
2. realizzazione di una barriera a difesa dell’imbocco della galleria di Calatabiano e del piazzale annesso.

Sono state quindi effettuate le simulazioni dello scenario “*di progetto*”, includendo gli interventi proposti, al fine di verificarne l’efficacia e fornire indicazioni di carattere progettuale per il loro dimensionamento. In particolare, le opere indicate sono state implementate nel software *r.avafLOW* modificando opportunamente il modello digitale del terreno in ambiente GIS.



**Figura 4-21: Scenario “di progetto” – implementazione degli interventi proposti a Giampilieri (sinistra) e a Calatabiano (destra) in *r.avafLOW*, mediante modifica del DTM.**

Di seguito i risultati in termini di aree di deposizione e spessori (totali, fluido + solido) finali e di “*inviluppo*” delle altezze (totali) massime.

Vallone Motta – loc. Giampilieri

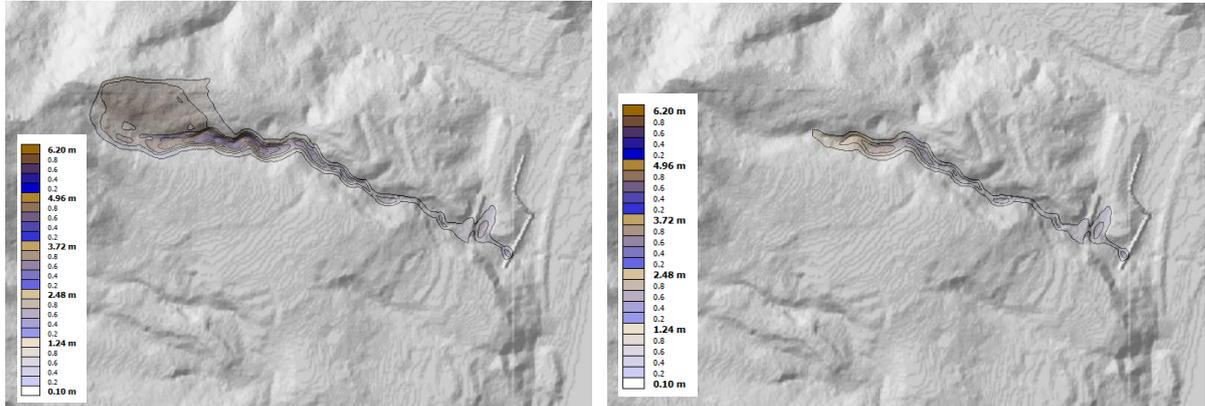


Figura 4-22: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “di progetto” – involucro delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo *r.avaflow*.

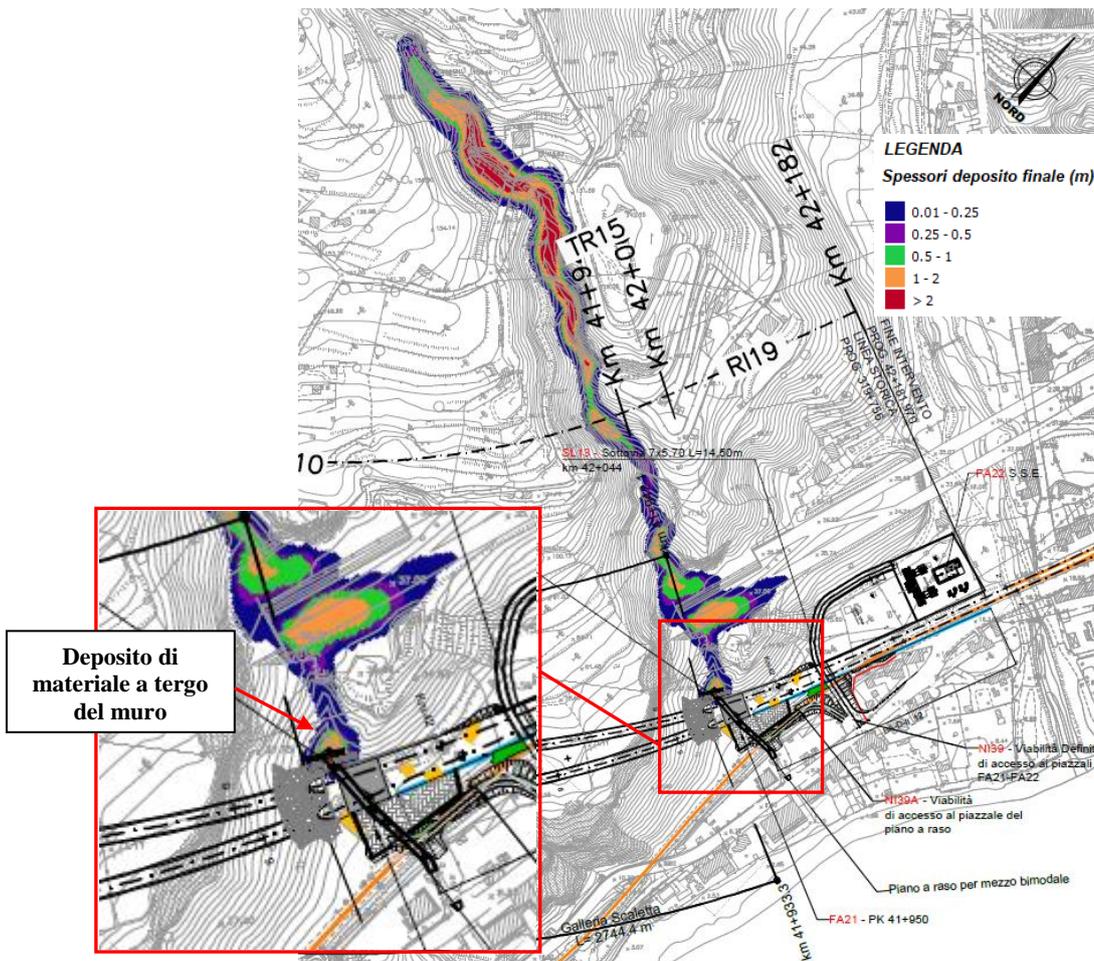
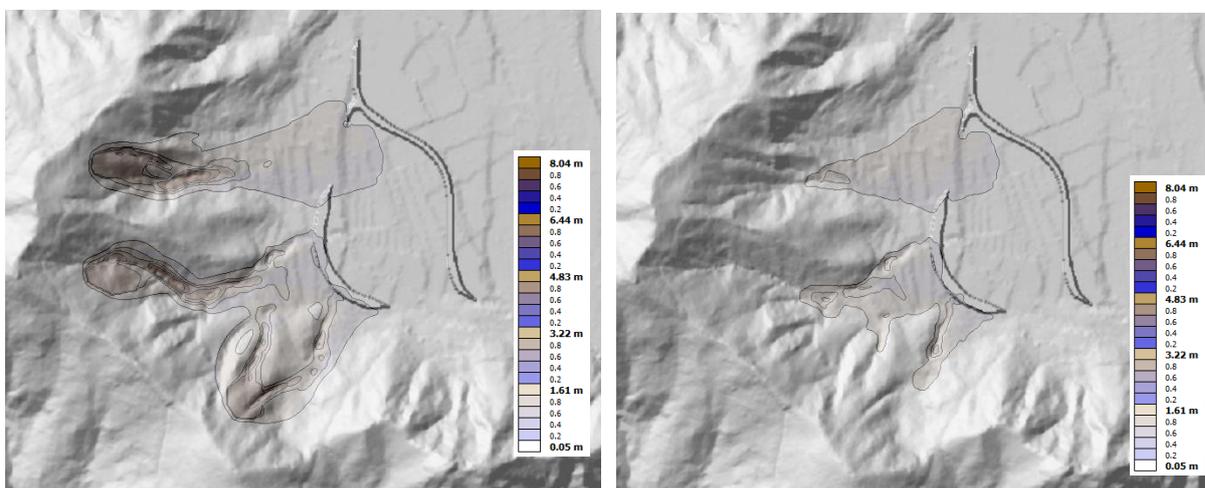


Figura 4-23: Vallone Motta (loc. Giampilieri), scenario “post operam” – aree di deposizione e spessori del materiale finali, su CTR.

L'innalzamento del muro simulato consente di evitare che la linea FS in progetto sia invasa da materiale detritico (anche se in modeste quantità, come già osservato nelle simulazioni “*ante operam*”). In particolare, il materiale si accumula a tergo del muro con spessori di circa 2 metri; quindi l'altezza finale, di progetto, del muro non dovrà essere inferiore a 2,50 metri.

Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati specialistici.

### Impluvi di Calatabiano



**Figura 4-24: Impluvi di Calatabiano, scenario “di progetto” – inviluppo delle altezze massime totali (a sinistra) e aree di deposizione finale (a destra), da codice di calcolo *r.avaflow*.**

Nel “nuovo” scenario “*di progetto*”, la barriera di difesa impedisce che il materiale solido raggiunga il piazzale e l'imbocco della galleria. Il materiale si accumula a tergo della barriera con spessori di 2,3 – 2,5 metri circa, in corrispondenza degli impluvi, in particolare dei tombini previsti per garantirne la continuità idraulica. La barriera dunque in tali punti non dovrà avere un'altezza inferiore a 3 m dal p.c.. Muri di contenimento/difesa (di larghezza pari a 30 m) dall'impatto di colate detritiche dovranno inoltre essere realizzati in corrispondenza dei tombini. L'attuale strada provinciale, come nello scenario “*ante operam*”, risulta invasa dal materiale, con spessori modesti tra 0-25 cm. A progetto ultimato, con l'entrata in esercizio della NI13, tale viabilità diventerà una strada secondaria per l'accesso ai terreni agricoli limitrofi e all'area di deposizione a tergo della barriera di difesa, che dovrà essere sottoposta

alle ordinarie (e straordinarie) operazioni di manutenzione, ovvero di rimozione del materiale accumulato. Quindi i mezzi meccanici addetti alla manutenzione, in casi eccezionali, dovranno rimuovere anche il materiale lungo la strada per poter accedere all'area a tergo della barriera. Maggiori dettagli di carattere costruttivo sono riportati negli elaborati specislitici, ai quali si rimanda.

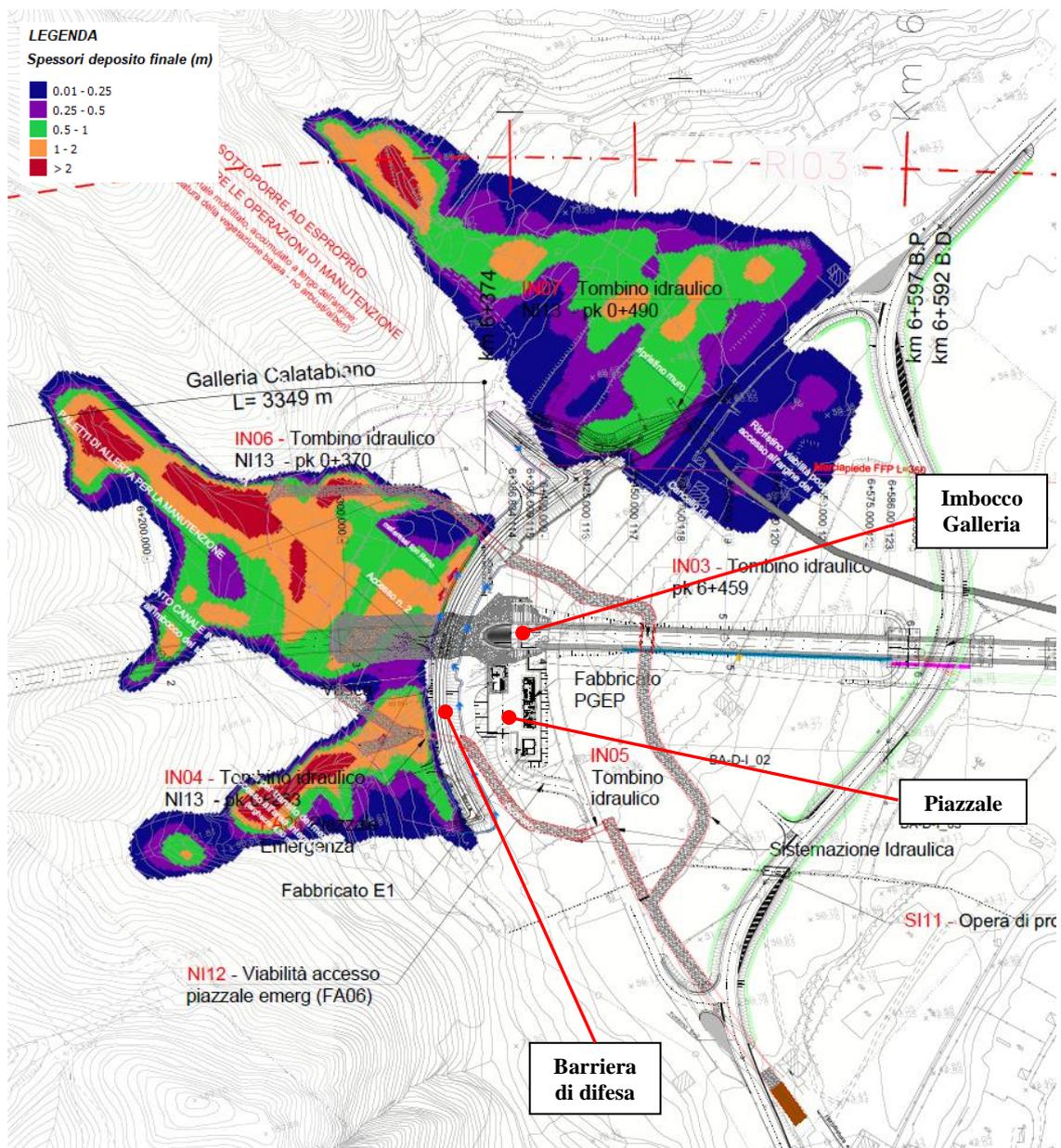


Figura 4-25: Impluvi di Calatabiano, scenario "di progetto" - aree di deposizione e spessori del materiale finali, su CTR.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 5 CONCLUSIONI

### 5.1 ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO

La valutazione della tendenza all'erosione o alla deposizione, oppure la condizione di stabilità dell'alveo, consente di analizzare il rapporto delle opere di attraversamento in progetto con le dinamiche fluviali studiate in questa sede.

Le simulazioni di calcolo idraulico a fondo mobile hanno consentito di simulare anche gli interventi di sistemazione idraulica connessi alle opere in progetto, rendendo possibile il confronto con la condizione ante operam, fornendo di conseguenza un'utilissima indicazione per verificare che le modalità evolutive dei corsi d'acqua di interesse non interferiscano con la sicurezza dell'opera e, al contempo, che gli interventi in progetto non alterino significativamente tali modalità, in modo da non causare problemi al territorio connessi con le dinamiche morfologiche.

L'insieme della valutazioni effettuate sulla dinamica morfologica dei corsi d'acqua (IDM) e le applicazioni modellistiche (HecRas) hanno quindi avuto come obiettivo principale quello di fornire una prima indicazione sul livello di attenzione che si dovrebbe applicare ai fini della manutenzione delle opere di attraversamento in progetto.

Incrociando i dati relativi all'Indice di Dinamica Morfologica con i risultati sulla tendenza evolutiva del corso d'acqua ricavata dalle applicazioni modellistiche è possibile definire **un probabile Livello di Attenzione per manutenzione programmata (LAm)**, così come riportato in Tabella 5-1.

Ad ogni valore di LAm è possibile associare una indicazione di “frequenza suggerita” per ispezioni manutentive (Tabella 5-2), finalizzate a:

- verifica del mantenimento della luce libera di progetto
- contestuale esame del bilancio di sedimenti, con gestione da concordare con gli Enti preposti (Regione, ARPA, Provincia, Comune e Genio Civile).

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

La frequenza suggerita per le ispezioni manutentive è basata sulla stagionalità delle portate simulate e sulla periodicità del ciclo idrologico da cui sono stati ricavati i valori medi mensili.

La sintesi di queste valutazioni è riportata negli elaborati che costituiscono la “Carta di sintesi dello studio geomorfologico” del presente progetto (1 Lotto e 2 Lotto).

**Tabella 5-1 – Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata**

IDM	Tendenza evolutiva (risultati modellazione HecRas)		
	<i>stabilità</i>	<i>erosione</i>	<i>deposizione</i>
<i>bassa</i>	LAm basso	LAm basso	LAm medio
<i>media</i>	LAm basso	LAm medio	LAm alto
<i>alta</i>	LAm medio	LAm alto	LAm alto

**Tabella 5-2 – Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata**

	<i>frequenza suggerita per le ispezioni manutentive</i>
LAm basso	ogni 2-3 anni
LAm medio	ogni 1,5-2 anni
LAm alto	ogni 6-9 mesi

Sulla base delle risultanze del presente studio, tutte le opere di attraversamento analizzate sono risultate idraulicamente verificate; in particolare, per i corsi d'acqua soggetti ad erosione, sono state dimensionate opportune opere di sistemazione idraulica per contrastare l'erosione, mentre per quelli soggetti a deposizione è stata verificata l'officiosità idraulica dell'opera, in relazione al rispetto dei franchi idraulici come da normativa vigente.

**Tabella 5-3: Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata per i corsi d'acqua in esame**

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
Minissale	1,15	Carico entrante nullo	deposizione	media	alto
Alcantara	7,70	Carico di equilibrio	stabile	elevata	medio
Letojanni	0,30	Carico di equilibrio	erosione	media	medio
Fondaco	0,09	Carico di equilibrio	erosione	elevata	alto
Fiumara d'Agrò	1,10	Carico di equilibrio	stabile	media	basso
Fiumedinisi	0,69	Carico di equilibrio	deposizione	elevata	alto
Ali	0,12	Carico entrante nullo	stabile	media	basso
Itala	0,15	Carico entrante nullo	deposizione	media	alto

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 5.2 INTERVENTI DI MITIGAZIONE PER FENOMENI DI COLATE DETRITICHE

Le analisi della propagazione di colate detritiche nei sistemi “*bacino-conoide*” identificati come potenzialmente suscettibili a fenomeni di colate detritiche, sulla base di analisi morfometriche speditive, sopralluoghi e consultazione dei Piani di Assetto Idrogeologici attualmente in vigore, hanno consentito l’individuazione di alcune criticità, risolte mediante la messa a punto di adeguati interventi di difesa. In particolare, i risultati ottenuti nelle simulazioni numeriche dello scenario “*ante operam*” hanno evidenziato l’interferenza dei percorsi di propagazione delle colate detritiche simulate con alcune opere in progetto, quali

- l’imbocco della Galleria “Scaletta”,
- l’imbocco della Galleria “Calatabiano” e il piazzale annesso

Per la risoluzione di tali criticità sono stati proposti i seguenti interventi:

1. innalzamento del muro/paratia nel tratto in “*trincea*” in uscita dalla galleria “Scaletta”;
2. realizzazione di una barriera a difesa dell’imbocco della galleria di Calatabiano e del piazzale annesso.

Le simulazioni dello scenario “*di progetto*” hanno consentito di verificare l’efficacia di tali interventi e di fornire indicazioni di carattere progettuale per il loro dimensionamento.

Un adeguato piano di manutenzione per la rimozione del materiale depositato/accumulato a tergo di tali opere dovrà essere predisposto al fine di garantirne la completa funzionalità durante ogni evento.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

## 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Armanini A. – *Sistemazione dei bacini idrografici*, Università degli Studi di Trento

Armanini A. – *Principi di Idraulica fluviale*, ed. BIOS

Branca S., Coltelli M., Groppelli G. & Pasquarè G. (2009) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 625 Acireale*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Brunner, Gary W. (2016), HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual

Brunner, Gary W. (2016), HEC-RAS, River Analysis System User's Manual

Bull W.B. (1964a). *Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno County, California*. United States Geological Professional Paper 352E,128.

Carbone S., Messina A. & Lentini F. (2007) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 601 Messina–Reggio Calabria*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Castiglioni G. B. – *Geomorfologia*, ed. UTET

Catalano S. (2009) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 613 Taormina*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Catalano S., De Guidi G. (2003) – *Late Quaternary uplift of northeastern Sicily: relation with the active normal faulting deformation*. Journal of Geodynamics, **36**, 445-467.

De Scally F.A. & Owens I.F. (2004). *Morphometric controls and Geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand*. Earth Surface Processes and Landforms, **29**,311– 322.

Drew F. (1873). *Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the Upper Indus Basin*: Geological Society of London Quarterly Journal, **29**, 441-471.

Garde R. J. – Ranga Raju K. G. – *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, ed. WILEY EASTERN LTD

Graf W. H. – *Fluvial Hydraulics* – LRH Lausanne

Graf W. H. – *Hydraulics of Sediment Transport*, ed. MCGRAW-HILL

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. (1999). *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. Geomorphology **31**, 181-216.

Harvey AM. (1997). *The role of alluvial fans in arid zone fluvial-systems*. In: Thomas D.S.G. (ed), *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*. Wiley & Sons: Chichester, 231–259.

HEC– *River Hydraulics*, USACE

HEC – *Sediment Transport Mechanics*, USACE

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b>					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE RELAZIONE	COMMESSA RS2S	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RG	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D

Hooke R. LeB. (1968). *Steady-state relationships of arid-region alluvial fans in closed basins*. American Journal of Science, **266**, 609-629.

Regione Sicilia (2005) – *Piano stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana* Assessorato Territorio e Ambiente, Dipartimento Territorio e Ambiente.

Ricci Lucchi F. – *Sedimentologia*, ed. CLUEB

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M. (2016): IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – ISPRA – Manuali e Linee Guida 131/2016. Roma

Ferrara V. (1993) – *Modificazioni indotte dallo sfruttamento delle acque sotterranee nell'equilibrio idrodinamico e idrochimico dell'acquifero vulcanico dell'Etna*. Memorie della Società Geologica Italiana, **47**, 619-630.

Marchi E. – Rubatta A. – *Meccanica dei fluidi*, ed. UTET

Marchi L., Pasuto A., Tecca P.R. (1993). *Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps*. Z. Geomorph. **4**, 447-458.

Melton M.A.(1965). *The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona*. *Journal of Geology*, **73**,1-38.

Mergili, M., Schratz, K., Ostermann, A., and Fellin, W. (2012). *Physically based modelling of granular flows with Open Source GIS*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 187–200, doi:10.5194/nhess-12-187-2012, 2012.

Moisello U. – *Idrologia tecnica*, ed. LA GOLIARDICA PAVESE

Pudasaini, S. P. (2012). *A general two-phase debris flow model*, J. Geophys. Res., 117, F03010, doi:10.1029/2011JF002186, 2012.

Varnes D.J. (1978) – *Slope movement types and processes*. Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington.