

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

ITINERARIO NAPOLI – BARI
RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA

STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI

Relazione

SCALA:

-

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

IF1W 00 D 09 RG ID0002 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato
A	EMISSIONE ESECUTIVA	A. Cappelli	Set.2018	F. Cabas	Set.2018	D. Aprea	Set.2018	A. Vizzari
B	EMISSIONE ESECUTIVA	A. Cappelli C. Cesàli	Dic.2018	F. Cabas	Dic.2018	D. Aprea	Dic.2018	Dott. Ing. Angelo Vizzari
								Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma N° A20783

File: IF1W00D09RGID0002001B.doc

n. Elab.: 397

INDICE

1.	INTRODUZIONE	5
1.1.	OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO	5
1.2.	METODOLOGIA DI LAVORO	5
1.3.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
1.4.	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	9
2.	CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO	9
2.1.	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'INTERVENTO	9
2.2.	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA.....	11
2.3.	CARATTERISTICHE AMBIENTALI E PAESISTICHE DELLA REGIONE FLUVIALE	12
2.4.	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI	12
2.4.1.	<i>Assetto del bacino</i>	<i>12</i>
2.4.2.	<i>Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo</i>	<i>14</i>
2.4.3.	<i>Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua minori.....</i>	<i>16</i>
2.4.4.	<i>Indice di Dinamica Morfologica (IDM).....</i>	<i>19</i>
2.5.	APPORTO DI SEDIMENTI AL TRATTO DI STUDIO	23
2.5.1.	<i>Considerazioni generali.....</i>	<i>23</i>
2.5.2.	<i>Il Torrente Acquara.....</i>	<i>23</i>
2.6.	ANDAMENTO DELLE PORTATE LIQUIDE (DI MEDIO PERIODO)	24
3.	VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO	25
3.1.	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO	25
3.1.1.	<i>La teoria di Shields per il moto incipiente</i>	<i>25</i>
3.1.2.	<i>L'equazione di Exner</i>	<i>28</i>
3.1.3.	<i>Accoppiamento acqua-sedimenti.....</i>	<i>30</i>

3.1.4. Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità.....	33
3.2. MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE	38
3.2.1. HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti	38
3.2.2. Schematizzazione idraulica adottata.....	42
3.3. MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO.....	48
3.3.1. Tendenza all'erosione e alla deposizione	48
4. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DELL'OPERA IN PROGETTO A FENOMENI DI COLATE DETRITICHE	53
4.1. ASSETTO DEI VERSANTI E PROPENSIONE AL DISSESTO.....	54
4.2. STIMA DEI VOLUMI POTENZIALMENTE MOBILITABILI DAI VERSANTI.....	60
4.2.1. Metodologia generale.....	60
4.2.2. Indagini in sito.....	62
4.2.3. Calcolo dei volumi solido e liquido.....	66
4.3. SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DI COLATE DETRITICHE	69
4.3.1. Modello matematico.....	69
4.3.2. Parametri geometrici e fisico-meccanici ed implementazione del modello di calcolo.....	72
4.3.3. Risultati delle simulazioni numeriche.....	74
5. CONCLUSIONI.....	80
5.1. ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO	80

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1: STRALCIO DELLA CARTA GEOMORFOLOGICA.....	10
FIGURA 2-2: STRALCIO DELLA CARTOGRAFIA DEL PSAI PUGLIA, PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA (IN BLU LE AREE IN CUI LA LINEA IN PROGETTO È ALLO SCOPERTO).....	11
FIGURA 2-3. LEGENDA DELLA CARTOGRAFIA DELLO PSAI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DELLA PUGLIA.....	11
FIGURA 2-4: INDIVIDUAZIONE DELL'AREA A FRANOSITÀ DIFFUSA POCHÉ CENTINAIA DI METRI A OVEST DELL'IMBOCCO LATO BARI DELLA GALLERIA "ORSARA".....	13
FIGURA 2-5: FRANA COMPLESSA IN TERRA E DETRITO A VALLE DELL'IMBOCCO SUD-OCCIDENTALE DELLA GALLERIA "ORSARA".....	14
FIGURA 2-6: DISTRIBUZIONE TEORICA DELLA GRANULOMETRIA DEI SEDIMENTI IN UNA FORMA DI DEPOSITO.....	15
FIGURA 2-7: CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE CR1 DEL TORRENTE ACQUARA.....	17
FIGURA 2-8: CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE CR2 SUL VERSANTE DI ORSARA PER L'INALVEAZIONE IN06.....	17
FIGURA 2-9: CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE CR3 SUL ORSO DEL BACINO B4.....	18
FIGURA 2-10: CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE CR4 SUL TORRENTE CANTALANOTTE.....	18
FIGURA 2-11 – SCHEMA GENERALE DELLA STRUTTURA DEL METODO IDRAIM.....	20
FIGURA 2-12: ESTRATTO DEGLI ANNALI IDROLOGICI PER IL TORRENTE CERVARO ALLA STAZIONE DI INCORONATA.....	24
FIGURA 3-1: SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UNA PARTICELLA SOLIDA AL FONDO DI UN CORSO D'ACQUA.....	26
FIGURA 3-2: DIAGRAMMA DI SHIELDS.....	27
FIGURA 3-3: BILANCIO DI MASSA DEI SEDIMENTI NEL VOLUME DI CONTROLLO.....	29
FIGURA 3-4: IDROGRAMMA DI PIENA DEL TORRENTE ACQUARA PER T = 10 ANNI.....	44
FIGURA 3-5: ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DEI LIMITI DEL FONDO MOBILE COINCIDENTI CON I LIMITI DEL CANALE PRINCIPALE.....	45
FIGURA 3-6: ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DELLA MASSIMA PROFONDITÀ ERODIBILE.....	46
FIGURA 3-7: SCHEMA DEL METODO DI MESCOLAMENTO DEL FONDO ALVEO.....	47
FIGURA 3-8: TORRENTE ACQUARA, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE A FONDO MOBILE).....	49
FIGURA 3-9: CORSO D'ACQUA BACINO B2 (IN06), PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE A FONDO MOBILE).....	50
FIGURA 3-10: CORSO D'ACQUA BACINO B4 (IN06), PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE A FONDO MOBILE).....	51
FIGURA 3-11: TORRENTE CANTALANOTTE, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE A FONDO MOBILE).....	52
FIGURA 4-1: VULNERABILITÀ A FENOMENI DI COLATE DETRITICHE - FLOW CHART.....	53
FIGURA 4-2: TORRENTE ACQUARA: CONOIDE ALLUVIONALE.....	54
FIGURA 4-3: TORRENTE ACQUARA: BACINO IDROGRAFICO E PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA.....	55
FIGURA 4-4: AREA CONOIDE VS AREA BACINO: VALORI CARATTERISTICI DI SISTEMI BACINO-CONOIDE INTERESSATI DA FENOMENI DI TRASPORTO DI MATERIALE DETRITICO.....	57
FIGURA 4-5: PENDENZA CONOIDE VS AREA BACINO: VALORI CARATTERISTICI DI SISTEMI BACINO-CONOIDE INTERESSATI DA TRASPORTO DI MATERIALE DETRITICO.....	58
FIGURA 4-6: PENDENZA CONOIDE VS INDICE DI MELTON PER I SISTEMI "BACINO-CONOIDE" CAMPANI (SCORPIO, 2011).....	59
FIGURA 4-7 – METODO VOLUMETRICO: DETERMINAZIONE DELL'OND DI COLATA DETRITICA (DEBRISGRAMMA).....	61
FIGURA 4-8 – SISTEMA "BACINO-CONOIDE" DEL T. ACQUARA: UBICAZIONE DELLE INDAGINI.....	63
FIGURA 4-9 – SONDAGGIO BO-PD-S27: STRATIGRAFIA.....	64
FIGURA 4-10 – SONDAGGIO BO-PD-S28: STRATIGRAFIA.....	65
FIGURA 4-11 – MATERIALE ALLA PROFONDITÀ 0 - 5 M: A) SONDAGGIO BO-PD-S27, B) SONDAGGIO BO-PD-S28.....	65
FIGURA 4-12 – SISTEMA "BACINO-CONOIDE" DEL T. ACQUARA: INDIVIDUAZIONE DI AREE POTENZIALMENTE INSTABILI.....	66
FIGURA 4-13 – TORRENTE ACQUARA: TIPOLOGIA DI IDROGRAMMA DI PIENA (FONTE: STUDIO ADBP).....	67
FIGURA 4-14 – SISTEMA BACINO-CONOIDE DEL T. ACQUARA: DEBRISGRAMMA PER $C_{V,MAX} = 0.5$	68
FIGURA 4-15 – SISTEMA BACINO-CONOIDE DEL T. ACQUARA: DEBRISGRAMMA PER $C_{V,MAX} = 0.65$	69
FIGURA 4-16: SISTEMA BACINO-CONOIDE DEL T. ACQUARA: AREE DI DISTACCO SIMULATE.....	73
FIGURA 4-17: SCENARIO 1: AREE DI DEPOSIZIONE FINALI (SOLIDO + LIQUIDO).....	75

FIGURA 4-18: SCENARIO 1: INVILUPPO DELLE ALTEZZE MASSIME (SOLIDO + LIQUIDO).....	76
FIGURA 4-19: SCENARIO 2: AREE DI DEPOSIZIONE FINALI (SOLIDO + LIQUIDO).....	77
FIGURA 4-20: SCENARIO 2: INVILUPPO DELLE ALTEZZE MASSIME (SOLIDO + LIQUIDO).....	78

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2-1: CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE DEI CORSI D'ACQUA IN ESAME	17
TABELLA 2-3 – LISTA DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL'IDM.....	22
TABELLA 2-4 – 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 PUGLIA DAGLI ENTI PREPOSTI.....	23
TABELLA 2-5: VALORI DI PORTATA MEDIA ADOTTATI	25
TABELLA 3-1: LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLE FORMULE DI TRASPORTO SOLIDO	33
TABELLA 3-2: VALORI DI SCABREZZA ADOTTATI	42
TABELLA 3-3: VALORI DI PORTATA MEDIA MENSILE SIMULATI	43
TABELLA 3-4: STIMA DELLA TENDENZA EVOLUTIVA.....	48
TABELLA 4-1: CARATTERISTICHE MORFOMETRICHE DEL SISTEMA “BACINO-CONOIDE” DEL T. ACQUARA	56
TABELLA 4-2: FORMULE EMPIRICHE PER LA STIMA DELLA PORTATA AL COLMO DI UNA COLATA DETRITICA.	61
TABELLA 4-3: R.AVAFLOW - PRINCIPALI PARAMETRI DI INPUT.	70
TABELLA 4-4: R.AVAFLOW - PARAMETRI FISICO-MECCANICI E REOLOGICI.	71
TABELLA 4-5: R.AVAFLOW – PRINCIPALI OUTPUTS.....	72
TABELLA 5-1 – VALORI DELL'INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA	80
TABELLA 5-2 – VALORI DELL'INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA	81
TABELLA 5-3: LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA PER I CORSI D'ACQUA IN ESAME	82

1. INTRODUZIONE

1.1. Obiettivi e contenuti dello Studio

La presente Relazione riferisce in merito all'analisi di geomorfologia fluviale relativa ai corsi d'acqua minori affluenti del Torrente Cervaro nella zona di Bovino, interessati dal Progetto Definitivo del raddoppio della tratta ferroviaria Bovino-Orsara. Lo studio geomorfologico viene condotto con l'obiettivo di valutare la tendenza evolutiva 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, 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 metodologia da seguire per valutare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua si può articolare, come svolto nell'ambito del presente studio, sulla combinazione di analisi quali-quantitative basate sui seguenti approcci:

- Caratterizzazione geomorfologica del bacino idrografico, con particolare attenzione ai processi legati alla dinamica fluviale, in particolare per valutare l'entità (anche qualitativamente) dell'apporto di sedimenti dai versanti e dai tratti di monte;
- Caratterizzazione del corso d'acqua di interesse, in base ai seguenti aspetti:
 - Granulometria del materiale d'alveo, con attenzione ai sedimenti movimentabili dalle piene;
 - Valutazione della portata media di riferimento per le analisi di trasporto solido;

- Individuazione delle caratteristiche di dinamica morfologica, secondo le specifiche della metodologia IDRAIM elaborata da ISPRA (Rinaldi et al., 2015), descritta nel seguito al paragrafo 2.5;
- Valutazione del trasporto solido mediante individuazione della formula parametrica di trasporto solido adatta al caso in esame e conseguente implementazione di un modello di calcolo idraulico a fondo mobile (per il presente studio si adotta il noto HEC-RAS versione 5.0.5, attivando l'opportuno modulo per l'analisi dei sedimenti); in particolare, i risultati del modello idraulico a fondo mobile consentono di verificare le opere di attraversamento secondo il seguente schema concettuale:
 - Tendenza all'erosione ⇒ progettazione di opere di protezione dall'erosione, dimensionate con il criterio di impedire lo scalzamento;
 - Tendenza alla deposizione ⇒ progettazione dell'opera di attraversamento in modo che sia garantita l'officiosità idraulica (franco di progetto maggiore del minimo richiesto dalla Normativa);

individuazione delle azioni necessarie al mantenimento del franco idraulico di progetto (interventi di manutenzione);
- Definizione del Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata (LAm), sulla base dei risultati ottenuti tramite la metodologia IDRAIM e la modellazione idraulica a fondo mobile (conclusioni riportate al paragrafo 5.1).

1.3. Normativa di riferimento

Ai fini del presente studio sono stati consultati i seguenti strumenti normativi:

- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Puglia;
- Piano di gestione dei sedimenti;
- Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 7 di 86

Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Puglia

La disamina delle Norme del P.S.A.I. è riportata nella Relazione geologica, idrogeologica, geomorfologica e sismica IF1W00D69RGGE0001001A e nella Relazione di compatibilità geomorfologica IF1W00D69RGGE0001002A.

Piano di gestione dei sedimenti

Allo stato attuale la Regione Puglia 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.

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.

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

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 8 di 86

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 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).

1.4. Documentazione di riferimento

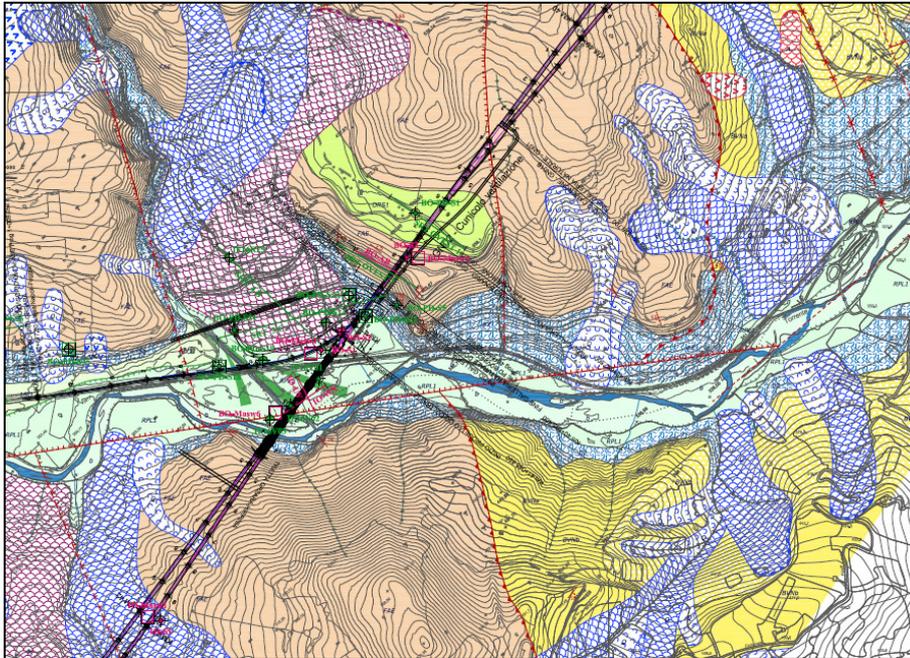
La documentazione di riferimento è la seguente:

Relazione geologica, idrogeologica, geomorfologica e sismica	IF1W00D69RGGE0001001A
Carta geologica-geomorfologica con elementi geostrutturali	IF1W00D69RGGE0001002A
Planimetrie sistemazione idraulica	IF1W00D29P7IN010A001A
	IF1W00D29P7IN010A002A
	IF1W00D29P7IN020A001A
	IF1W00D29P8IN050A001A
	IF1W00D29P8IN050A002A
IF1W00D29P8IN060A001A	
Carta di sintesi dello studio geomorfologico	IF1W00D09G4ID0002001A

2. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

2.1. Inquadramento territoriale dell'intervento

La seguente Figura 2-1 mostra uno stralcio della carta geomorfologica per i tratti allo scoperto (elaborati IF1W00D69G5GE0001001A e IF1W00D69G5GE0001002A).



Forme, processi e depositi gravitativi

Descrizione	Stato di attività		
	Attivo (A)	Quiescente (Q)	Stabilizzato (S)
Schivolamento rotazionale/traslattivo	nicchia		
	corpo		
Colamento lento	nicchia		
	corpo		
Complesso	nicchia		
	corpo		
Area a franosità diffusa	nicchia		
	corpo		

Forme e processi dovuti alle acque correnti superficiali

Descrizione	Stato di attività		
	Attivo	Quiescente	Inattivo
Orlo di scarpata di erosione fluviale o torrentizia			
Alveo con tendenza all'approfondimento			
Solco di erosione concentrata			
Conoide alluvionale			

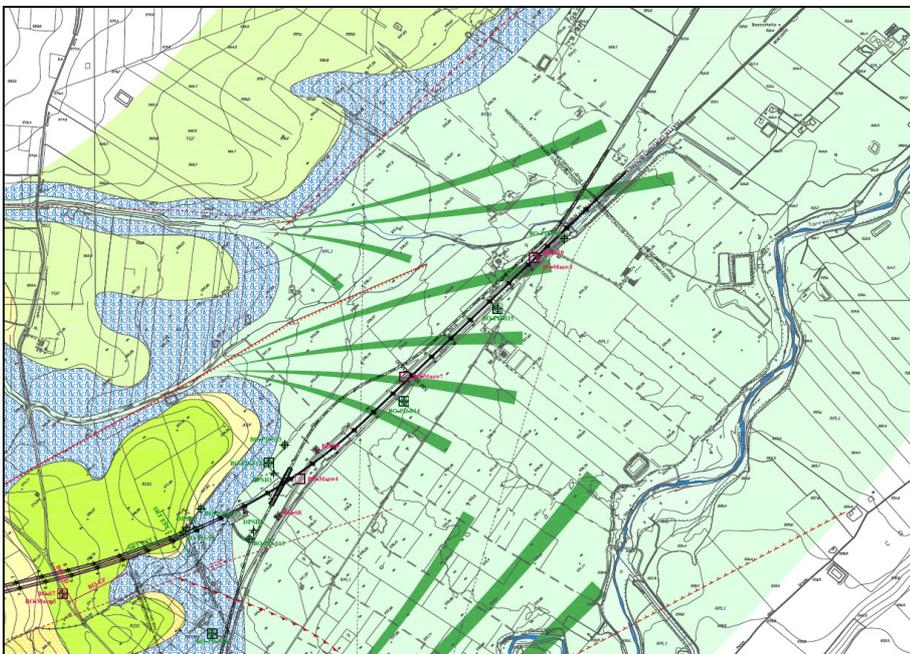


Figura 2-1: stralcio della carta geomorfologica

2.2. Aree a pericolosità geomorfologica

La seguente Figura 2-2 mostra lo stralcio della carta di Pericolosità geomorfologica del PSAI dell'AdB Puglia, da cui si può vedere in quali classi di pericolosità ricade il tracciato in progetto. Le aree indicate in blu sono quelle in cui la linea in progetto è allo scoperto.

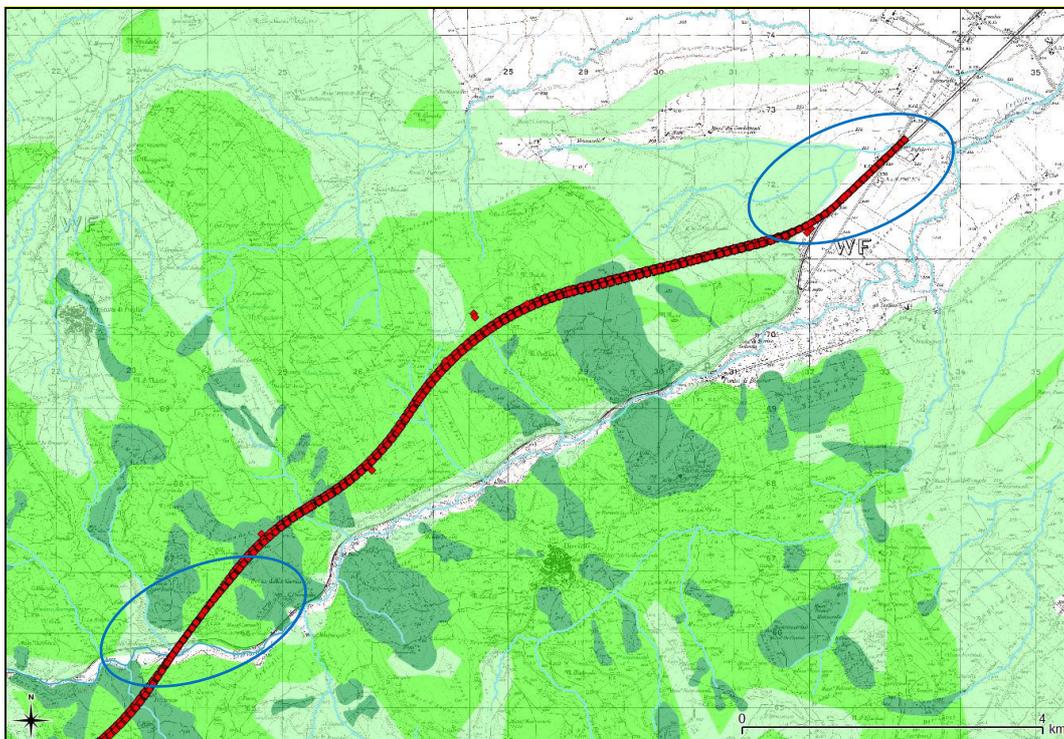


Figura 2-2: Stralcio della cartografia del PSAI Puglia, Pericolosità geomorfologica (in blu le aree in cui la linea in progetto è allo scoperto)

Pericolosità geomorfologica	
Classe di pericolosità	Descrizione
Media e bassa (PG1)	Aree a suscettibilità da frana bassa e media
Elevata (PG2)	Aree a suscettibilità da frana alta
Molto Elevata (PG3)	Aree a suscettibilità da frana molto alta

Figura 2-3. Legenda della cartografia dello PSAI dell'Autorità di Bacino della Puglia

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D’ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 12 di 86

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 minori

2.4.1. Assetto del bacino

L’assetto geomorfologico dei bacini dei corsi d’acqua minori interferenti con la linea ferroviaria in progetto è desunto dalla caratterizzazione geomorfologica effettuata per il progetto in esame, riportata nell’elaborato IF1W00D69RGGE0001001A di cui di seguito si riportano gli estratti significativi per lo scopo del presente documento.

Il versante in corrispondenza dell’imbocco nord-orientale della galleria “Orsara” è essenzialmente privo di fenomeni di dissesto, in quanto caratterizzato da un assetto sub-pianeggiante e dalla presenza di estese coperture alluvionali in appoggio sui termini pelitici delle Argille Subappennine. Poche centinaia di metri a Ovest dell’imbocco, tra la pk 32+500 e la pk 32+980 circa, invece, si rinviene una piccola zona di impluvio interessata dalla presenza di numerosi dissesti attivi ma di modeste dimensioni, che vanno a costituire un’area a franosità diffusa piuttosto estesa (Figura 2-4). I singoli fenomeni mostrano una distribuzione variabile dal costante al retrogressivo, anche se nel complesso l’area in dissesto risulta confinata ai settori centrali dell’area impluviale. I principali fattori predisponenti e/o scatenanti sono da ricercarsi nelle scadenti caratteristiche litotecniche dei terreni presenti e nella cattiva gestione delle acque correnti superficiali, che allo stato attuale non possiedono fossi di corrivazione tali da garantirne il corretto deflusso in direzione del fondovalle. Nel complesso i fenomeni presentano spessori piuttosto contenuti, tra i 3 ed i 10 m circa, e quindi in relazione alla notevole profondità e delle elevate coperture della galleria non presentano interferenze dirette con le opere in progetto.

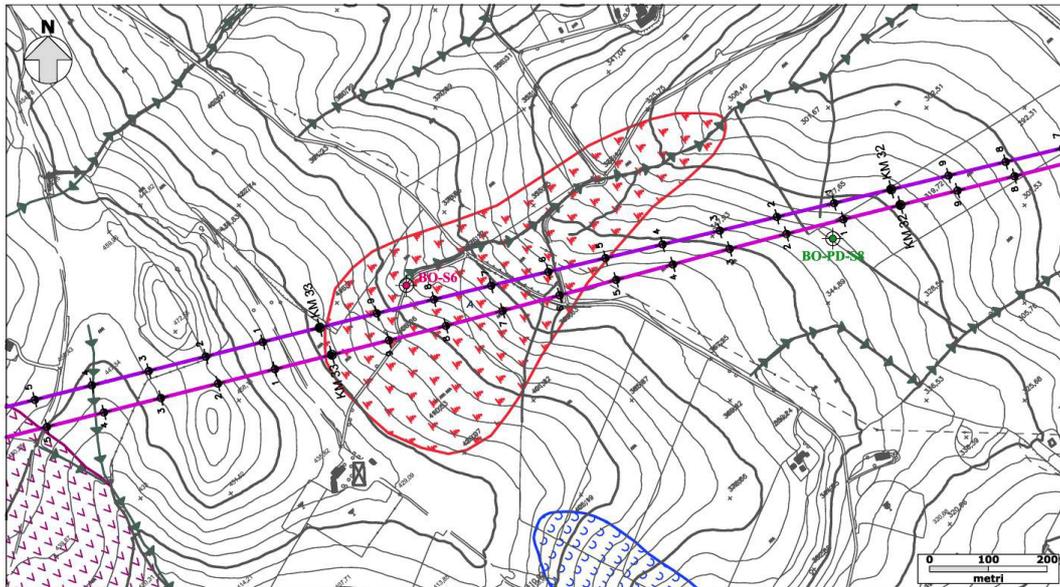


Figura 2-4: Individuazione dell'area a franosità diffusa poche centinaia di metri a Ovest dell'imbocco lato Bari della galleria "Orsara".

Il versante sud-orientale del rilievo di Monte Fedele, tra la pk 33+550 e la pk 34+100, è caratterizzato dalla presenza di un esteso scivolamento roto-traslativo in terra e detrito, impostato sui termini calcareo-marnosi e argilloso-marnosi del Flysch di Faeto e della Formazione di Monte Sidone. Il fenomeno risulta attualmente stabilizzato e localmente interessato da riattivazioni e/o movimenti franosi superficiali. Lo spessore delle masse interessate dal fenomeno è nell'ordine di diverse decine di metri, ma in relazione alle notevoli coperture presenti al di sopra della calotta (nell'ordine dei 200 metri) e alla relativa posizione del tracciato, il fenomeno non presenta interferenze dirette con le opere in progetto.

Il versante in corrispondenza dell'imbocco sud-occidentale della galleria "Orsara" è essenzialmente privo di fenomeni di dissesto, in quanto caratterizzato dalla presenza dei litotipi calcareo-marnosi del Flysch di Faeto. Solo a valle dell'imbocco, tra la pk 40+950 e la pk 41+100, in corrispondenza dei settori di fondovalle, il tracciato lambisce il piede di un'estesa frana complessa in terra e detrito, che si sviluppa tra la parte sommitale del rilievo di Monte Preisi e il fondovalle del Torrente Cervaro (Figura 2-5).

Tale fenomeno risulta attualmente stabilizzato e privo di riattivazioni recenti in corrispondenza del suo margine meridionale, così come osservato nel corso dei rilievi in campo, con assenza di evidenze morfologiche di movimenti in atto sia sul terreno, sia sulle infrastrutture interferite e sui manufatti presenti, e come al momento confermato dai primi dati strumentali del monitoraggio inclinometrico,

anche se occorre sottolineare che il periodo di osservazione (Aprile 2018 – Luglio 2018) non risulta ancora significativo.

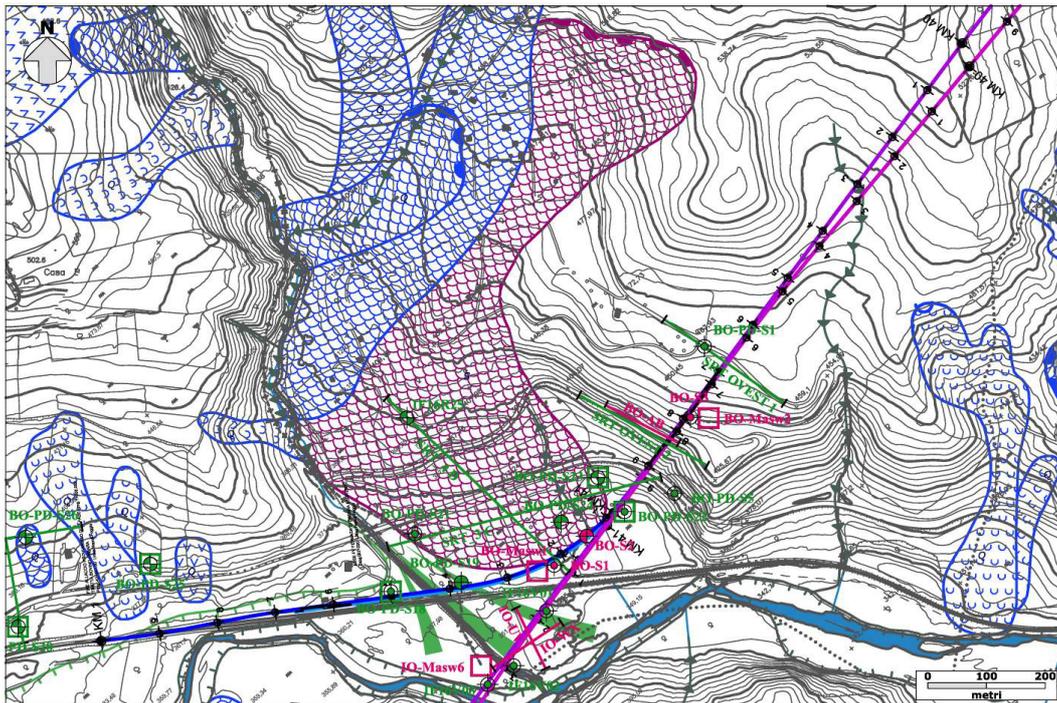


Figura 2-5: Frana complessa in terra e detrito a valle dell'imbocco sud-occidentale della galleria "Orsara".

Nel medesimo tratto, sia la linea principale sia il ramo di allaccio alla linea storica esistente, tra la pk 41+150 e la pk 41+400, intercettano un'area di conoide alluvionale quiescente ubicato allo sbocco del Torrente Acquara, tributario sinistro del Cervaro. Si osserva come l'area del conoide non risulti ricompresa tra le aree a rischio censite nella cartografia della "Pericolosità idraulica" del P.S.A.I. dell'A.d.B. Puglia.

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).

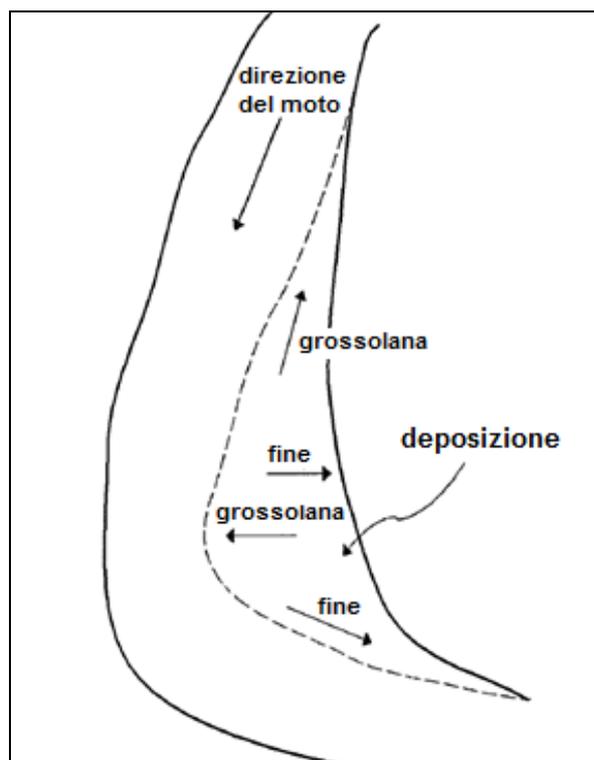


Figura 2-6: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

I fenomeni di trasporto solido presi in considerazione vengono indagati, tra l'altro, con una schematizzazione di calcolo idraulico, descritta nel successivo paragrafo, 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

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 16 di 86

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 minori

I campioni prelevati secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.4.2 sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione della curva granulometrica, riportata nelle seguenti figure e sintetizzate nella seguente Tabella 2-1, in cui è riportato il diametro caratteristico D_{50} . I corsi d'acqua indagati sono caratterizzati da materiale appartenente alla classe granulometrica delle ghiaie fini (T. Acquara) e delle sabbie limose.

Tabella 2-1: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame

Corso d'acqua	Codice punto di prelievo	D ₅₀ (mm)
Acquara	CR1	2
Versante di Orsara (Bacino B2)	CR2	0,05
Corso d'acqua B4	CR3	0,04
Cantalanotte	CR4	0,015

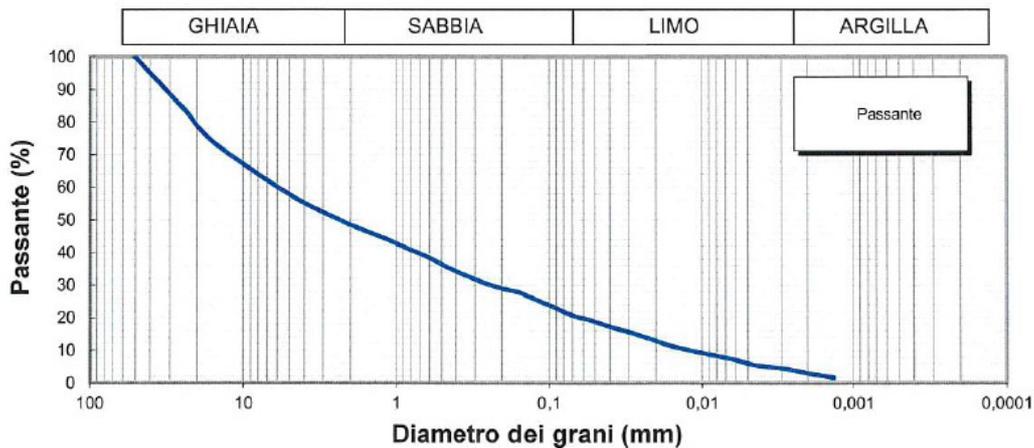


Figura 2-7: Curva granulometrica del campione CR1 del Torrente Acquara

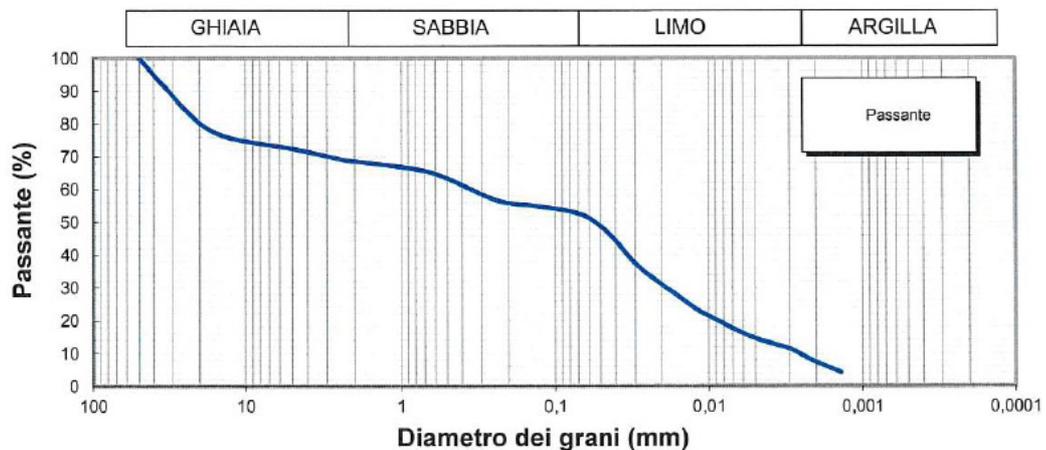


Figura 2-8: Curva granulometrica del campione CR2 sul versante di Orsara per l'inalveazione IN06

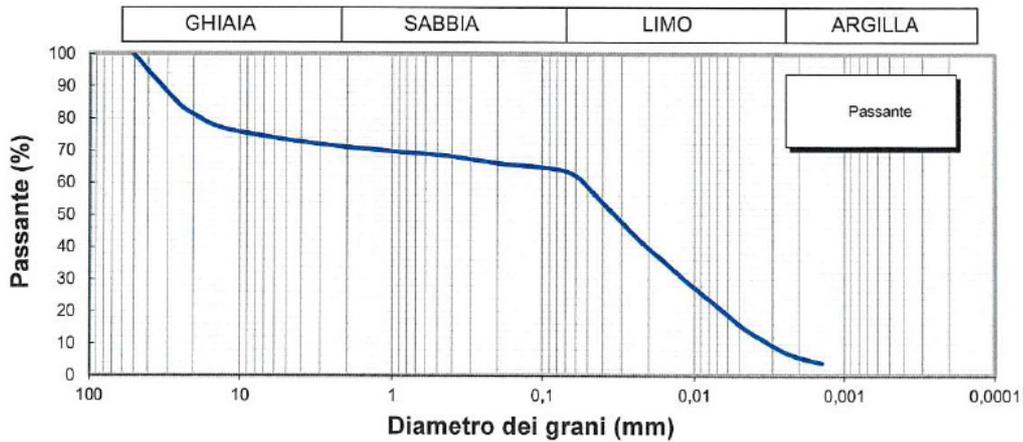


Figura 2-9: Curva granulometrica del campione CR3 sul orso del Bacino B4

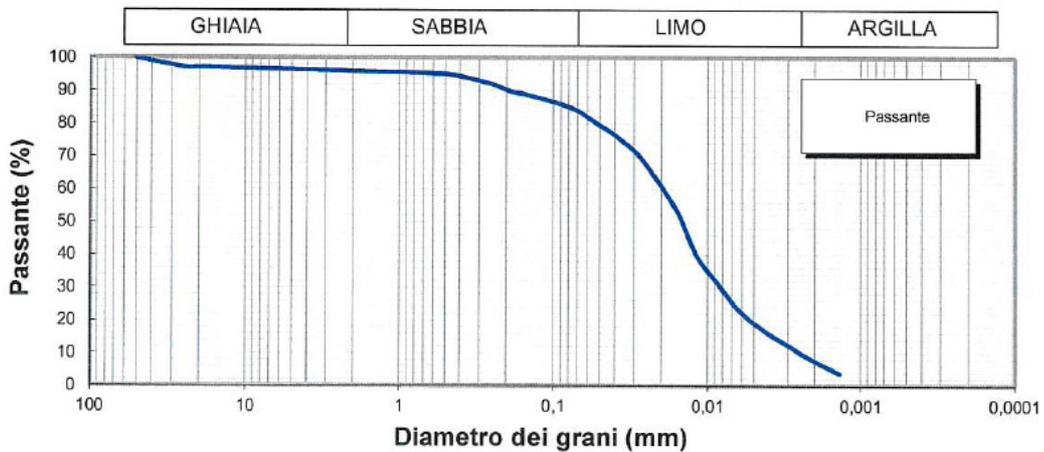


Figura 2-10: Curva granulometrica del campione CR4 sul Torrente Cantalanotte

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 19 di 86

2.4.4. *Indice di Dinamica Morfologica (IDM)*

2.4.4.1. Metodo IDRAIM

Il “Sistema di valutazione **idromorfologica**, **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 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 2-11. 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.

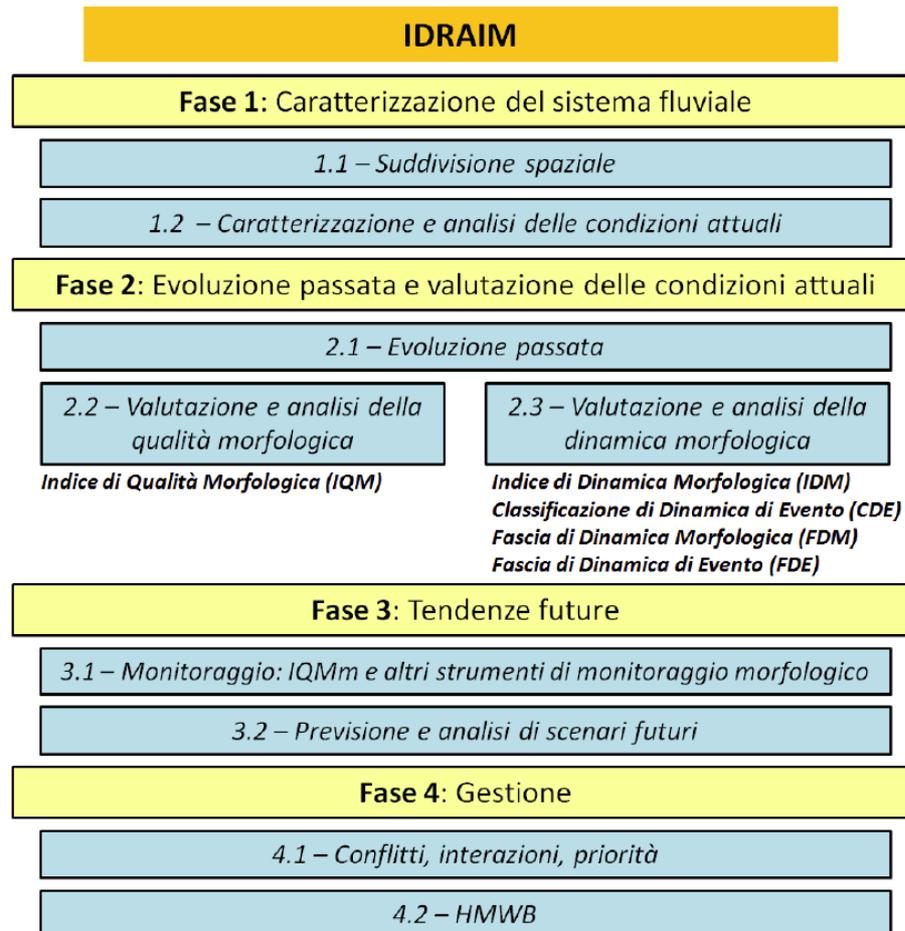


Figura 2-11 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.

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.

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:

- All. [1] **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.
- All. [2] **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.
- All. [3] **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 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.).

2.4.4.2. Applicazione al caso 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 2-2.

Si precisa che nel caso di studio trattato in questa sede, 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.

Tabella 2-2 – 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 2-3, precisando che l'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Puglia dagli Enti preposti (ARPA).

Tabella 2-3 – 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 Puglia dagli Enti preposti.

Denominazione corso d'acqua	Classe di Dinamica Morfologica				
	Molto bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
Torrente Acquara					
Versante di Orsara (Bacino B2)					
Corso d'acqua B4					
Cantalanotte					

2.5. Apporto di sedimenti al tratto di studio

2.5.1. Considerazioni generali

Sulla base delle analisi condotte ed illustrate nei paragrafi precedenti è possibile correlare, seppur in maniera qualitativa, le dinamiche di versante e del corso d'acqua (IDM semplificato) con le litologie presenti nel bacino, al fine di valutare la dinamica di trasporto solido dei corsi d'acqua oggetto di studio, come meglio descritto nel seguito al capitolo 3. Una valutazione particolare merita il Torrente Acquara, come riportato nel seguente paragrafo 2.5.2, in base a quanto osservato nel precedente paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** in merito alla propensione al dissesto.

2.5.2. Il Torrente Acquara

Il Torrente Acquara è caratterizzato da una dinamica morfologica media, dovuta alla presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte del tratto in esame. Il suo bacino è caratterizzato dalla presenza di dissesti, la cui natura contribuisce all'apporto di materiale solido in alveo.

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento al tratto di studio. La valutazione quantitativa dell'apporto solido è ricavata dalle analisi riportate nel successivo capitolo 4.

2.6. 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). 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 la portata media mensile. Allo scopo sono stati consultati gli annali idrologici, di cui di seguito è riportato un estratto, dai quali si è ricavato il valore massimo della portata media mensile per unità di area del bacino sotteso, nel periodo di funzionamento della stazione idrometrica di Incoronata, risalando opportunamente il valore sull'area del bacino dei corsi d'acqua oggetto di studio. La seguente Tabella 2-4 riporta i valori adottati.

10 - CERVARO AD INCORONATA (Mr)

Anno 2012

CARATTERISTICHE DELLA STAZIONE: a) Bacino di dominio 657 Km² (parte permeabile 24%); altitudine max 1106 m s.m.; media 379 m s.m.; zero idrometrico 50.643 m s.m.; distanza dalla foce 25 Km circa; inizio osservazioni I: 1924; Ir: 1932; inizio misure: 1928 - b) Altezza idrometrica max 6.09 m (19 dicembre 1968); minimo asciutto (vari); portata max 524.00 m³/s (17 gennaio 1957); minima 0.00 m³/s (vari).

ELEMENTI CARATTERISTICI PER L'ANNO 2012													
	ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Q max (m ³ /s)	34.36	-	34.36	14.26	5.84	1.25	0.74	-	-	0.83	0.29	3.08	10.24
Q media (m ³ /s)	1.49	-	5.06	3.72	2.07	0.92	0.11	-	-	0.31	0.29	0.50	4.94
Q minima (m ³ /s)	-	-	-	1.60	1.25	0.74	-	-	-	0.00	0.29	-	1.08
Q media (l/s Km ²)	2.3	-	7.7	5.7	3.1	1.4	0.2	-	-	0.5	0.4	0.8	7.5
Deflusso (mm)	71.3	-	19.3	15.2	8.1	3.7	0.4	-	-	1.2	1.2	2.0	20.1
Affl. Meteor. (mm)	666.8	36.5	81.9	46.9	69.1	32.9	2.2	58.3	9.1	76.8	54.8	121.7	76.6
Coeff. Deflusso	0.11	-	0.24	0.32	0.12	0.11	0.19	-	-	0.02	0.02	0.02	0.26
ELEMENTI CARATTERISTICI PER IL PERIODO: 1928÷39; 1941-42; 1946-47; 1949÷85; 1988÷92; 1994; 1996÷02 e 2011													
Q max (m ³ /s)	244.00	244.00	210.00	120.46	173.00	92.70	18.80	18.90	27.70	22.00	92.00	135.00	206.00
Q media (m ³ /s)	2.58	5.91	7.10	5.61	3.70	1.62	0.43	0.14	0.10	0.11	0.56	1.52	4.10
Q minima (m ³ /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q media (l/s Km ²)	3.9	9.0	10.8	8.5	5.6	2.5	0.6	0.2	0.1	0.2	0.8	2.3	6.2
Deflusso (mm)	122.6	24.1	26.3	22.9	14.6	6.6	1.7	0.6	0.4	0.4	2.3	6.0	16.7
Affl. Meteor. (mm)	669.5	68.9	61.1	59.3	60.7	47.6	35.9	26.9	33.8	47.3	66.7	81.8	79.5
Coeff. Deflusso	0.18	0.35	0.43	0.39	0.24	0.14	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03	0.07	0.21

Figura 2-12: estratto degli Annali idrologici per il Torrente Cervaro alla stazione di Incoronata

Tabella 2-4: Valori di portata media adottati

Corso d'acqua	Area del bacino (km ²)	Portata media (m ³ /s)
Acquara	4,77	0,050
Versante di Orsara (Bacino B2)	0,4	0,004
Corso d'acqua B5	0,8	0,008
Cantalante	7,5	0,080

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 τ_0 che pone in movimento il materiale di fondo di densità ρ_s e diametro d_s e le proprietà del fluido, μ e ρ . 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 τ_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 γ_s , uguaglia la forza di trascinamento al fondo all'inizio del trasporto, A .

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

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

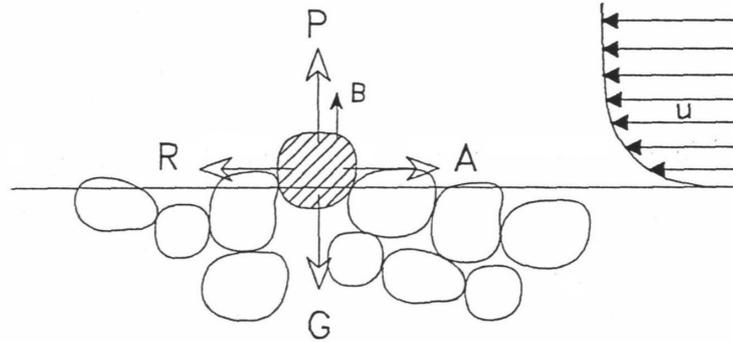


Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

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 $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$
- 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 θ_{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 θ_{cr} è rappresentata dalla *curva di Shields*.

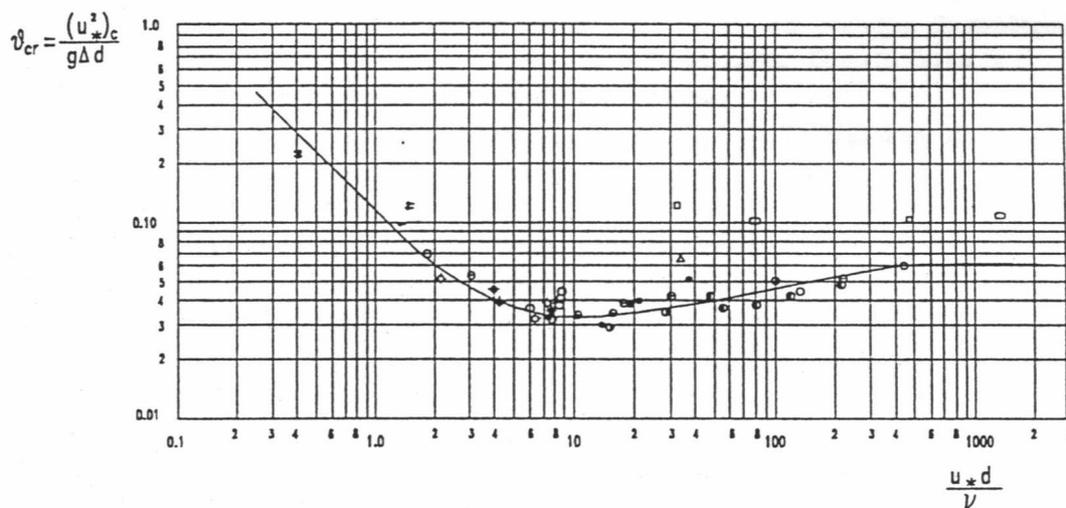


Figura 3-2: Diagramma di Shields

Questa curva separa la zona di mobilità delle particelle da quella 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:

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

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 $(\theta_{cr})_{\min} \approx 0.03 \div 0.04$ 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 mediata sulla sezione trasversale σ (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.

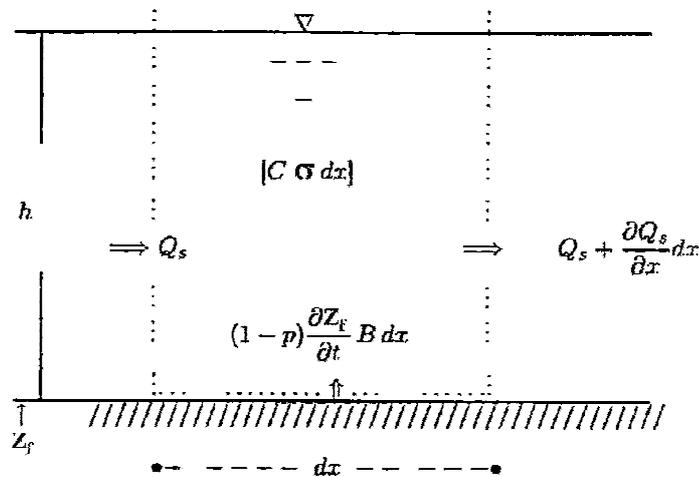


Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo

Introducendo il *coefficiente di ragguglio 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:

$$Q_s = \alpha_c U \sigma C \quad 3.11$$

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

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

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.

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

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

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

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;
- 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 e j la cadente della linea dell'energia.

Tenendo conto che l'area σ 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:

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

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

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

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

- o 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:

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

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

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

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. Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità

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, noto il diametro caratteristico del corso d'acqua oggetto di studio e le relative grandezze idrodinamiche, è possibile scegliere la formula più adatta. Il diametro caratteristico è ricavabile dalla curva granulometrica, riportate in FIGURA, mentre le grandezze idrodinamiche sono dedotte dal modello idraulico impiegato 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 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 Ψ (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 divide l'altezza della corrente in tre zone:

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

Toffaletti 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:

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

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

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

La distribuzione della concentrazione dei sedimenti è espressa da:

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

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.

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):

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

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

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

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

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

per $d_{gr} > 60$

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

$$n = 0.0$$

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

$$A = 0.170$$

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

$$m = 1.50$$

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

$$C = 0.025$$

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:

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

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-RAS¹ 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-6² e disponibili anche nella versione 5.0.5 del giugno 2018 utilizzata nel presente studio.

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

² HEC-6 “Scour and deposition in Rivers and Reservoirs” (HEC 1991)

HEC-RAS 5.0.3

File Edit Run View Options GIS Tools Help

Project: Fogliarino f:\...\00_DatiDiBase\modelliHR\MODELLI Hec-Ras\A-Fogliarino\Fogliarino.prj

Plan: TrasportoSolido_MPM_PO_NoInflow f:\...\00_DatiDiBase\modelliHR\MODELLI Hec-Ras\A-Fogliarino\Fogliarino.p07

Geometry: Post Operam f:\...\00_DatiDiBase\modelliHR\MODELLI Hec-Ras\A-Fogliarino\Fogliarino.g01

Steady Flow:

Quasi Unsteady: media mensile f:\...\00_DatiDiBase\modelliHR\MODELLI Hec-Ras\A-Fogliarino\Fogliarino.q01

Unsteady Flow:

Sediment: Sedimenti_MPM-NoInflow f:\...\00_DatiDiBase\modelliHR\MODELLI Hec-Ras\A-Fogliarino\Fogliarino.s02

Description :

SI Units

Sediment Data - Sedimenti_MPM-NoInflow

File Options View Help

Initial Conditions and Transport Parameters | Boundary Conditions | USDA-ARS Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) (Beta)

River: (All Rivers) Transport Function: Meyer Peter Muller Define/Edit Bed Gradation ...

Reach: Sorting Method: Thomas (Ex5) Define Layers ...

Number of mobile bed channels: 1 Fall Velocity Method: Toffaleti

River	Reach	RS	Invert	Max Depth	Min Elev	Left Sta	Right Sta	Bed Gradation
1	FOGLIARINO	Fogliarino	27	84.79	5	82.87	104.49	FOG01
2	FOGLIARINO	Fogliarino	26	81.54	5	85.01	108.46	FOG01
3	FOGLIARINO	Fogliarino	25	81.54	5	84.02	110.81	FOG01
4	FOGLIARINO	Fogliarino	24.5					
5	FOGLIARINO	Fogliarino	24	81.54	5	84.02	110.81	FOG01
6	FOGLIARINO	Fogliarino	23	74	5	74.96	121.63	FOG01
7	FOGLIARINO	Fogliarino	22	68.51	5	89.64	114.97	FOG01
8	FOGLIARINO	Fogliarino	21	66.48	5	66.24	90.01	FOG01
9	FOGLIARINO	Fogliarino	20	63.35	5	93.17	108.39	FOG01
10	FOGLIARINO	Fogliarino	19	61.66	5	91.46	105.64	sistemazione_d400
11	FOGLIARINO	Fogliarino	18	60.77	0	74.76	114.71	sistemazione_d400
12	FOGLIARINO	Fogliarino	17	58.63	0	79.67	112.1	sistemazione_d400
13	FOGLIARINO	Fogliarino	16.1	57.23	0	78.42	112.55	sistemazione_d400
14	FOGLIARINO	Fogliarino	16	57.19	0	83.34	116.94	sistemazione_d400
15	FOGLIARINO	Fogliarino	15.5					
16	FOGLIARINO	Fogliarino	15	57.02	0	85.55	114.15	sistemazione_d400
17	FOGLIARINO	Fogliarino	14	56.59	5	90.17	122.19	sistemazione_d400
18	FOGLIARINO	Fogliarino	13	55.82	5	86.49	115.88	sistemazione_d400
19	FOGLIARINO	Fogliarino	12	55.14	5	81.37	119.85	sistemazione_d400
20	FOGLIARINO	Fogliarino	11	52.44	5	95.57	115.27	Interpolated
21	FOGLIARINO	Fogliarino	10	49.5	5	91.8	108.84	Interpolated
22	FOGLIARINO	Fogliarino	9	46.39	5	98.92	121.59	FOG02
23	FOGLIARINO	Fogliarino	8	44.82	5	83.08	127.89	FOG02
24	FOGLIARINO	Fogliarino	7	44.09	5	83.08	127.89	FOG02
25	FOGLIARINO	Fogliarino	6.5					
26	FOGLIARINO	Fogliarino	6.1	44.09	5	93.88	123.71	FOG02

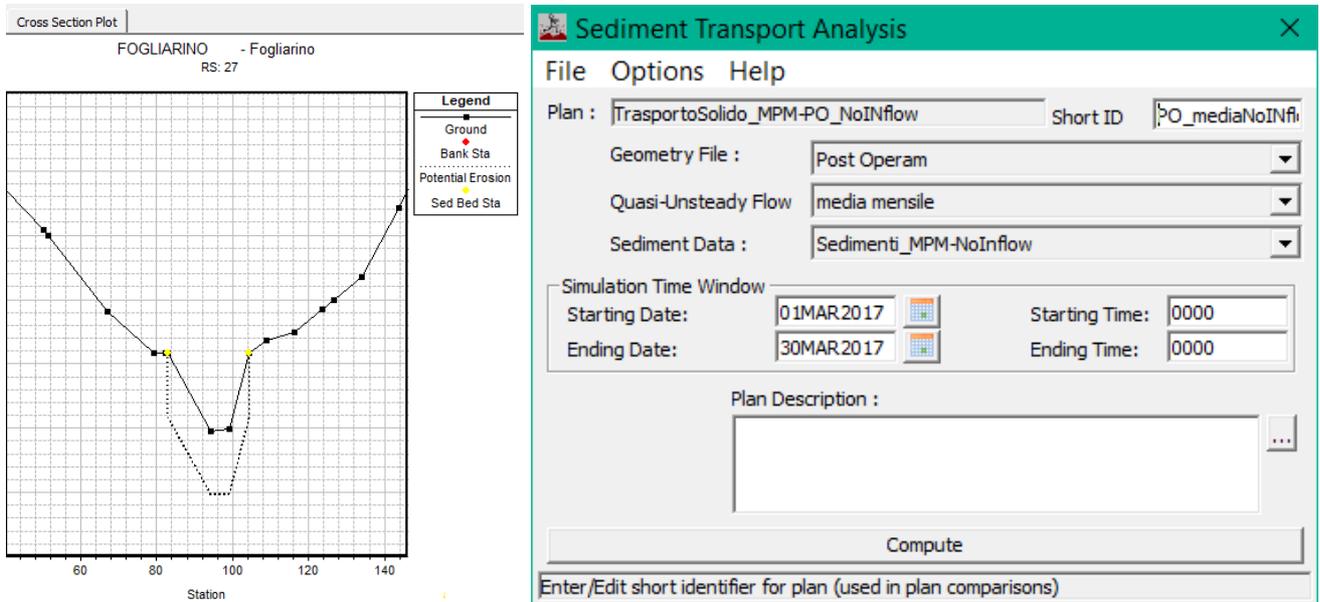
Profile Plot Cross Section Plot

FOGLIARINO - Fogliarino

Legend

- Ground
- LOB
- ROB
- Left Levee
- Right Levee
- Potential Erosion

Use Banks for Extents Interpolate Gradations



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.

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 Δt .

Questa equazione può essere espressa in termini di differenze finite:

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

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;
- Δt 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 del modello

La geometria del modello di calcolo a fondo mobile è costruita a partire dai rilievi topografici appositamente eseguiti per il Progetto in esame. 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 nella tavola IF1W00D09G4ID0002001A.

3.2.2.2. Scabrezza idraulica

I valori di scabrezza adottati sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 3-2: valori di scabrezza adottati

Corso d'acqua	golena sinistra	canale principale	golena destra
Acquara	0,050	0,030	0,050
IN06 (bacino B2)	0,040	0,030	0,040
Corso d'acqua bacino B4	0,035	0,040	0,035
Cantalanotte	0,050	0,040	0,050

La scabrezza idraulica può anche variare in base alla dinamica del trasporto solido, in quanto i sedimenti in movimento offrono una minore resistenza al moto dell'acqua (USACE-HEC, 1982). È quindi possibile far calcolare al codice di calcolo il valore della cosiddetta "scabrezza di grano", scegliendo tra le formulazioni proposte da Limerinos (1970), Brownlie (1983) e Van Rijn (1984).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

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 2.6 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 (m³/s)
Acquara	0,05
Versante di Orsara (Bacino B2)	0,004
Corso d'acqua B5	0,008
Cantalanoite	0,08

Per il Torrente Acquara si è scelto di simulare anche l'idrogramma di piena con tempo di ritorno $T = 10$ anni (riportato nella seguente Figura 3-4), per valutare correttamente gli effetti del contributo solido proveniente dai versanti a monte del tratto di studio (cfr. capitolo 4).

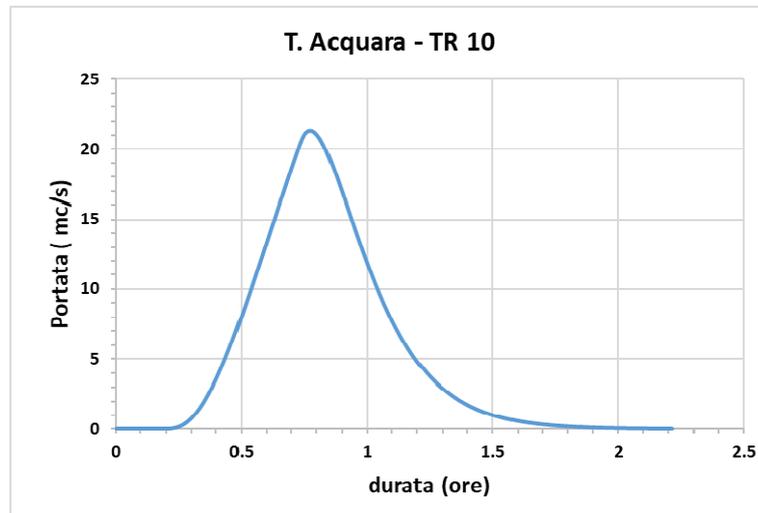


Figura 3-4: Idrogramma di piena del Torrente Acquara per $T = 10$ anni

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 posto pari all'altezza di moto uniforme.

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 del bacino, 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 interesse³, 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

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

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 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 Torrente Acquara, per il quale, è stato inserito il carico entrante (540 tonnellate) corrispondente al volume solido stimato in base alle considerazioni esposte nel capitolo 4.

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. Nel caso 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 10 m.

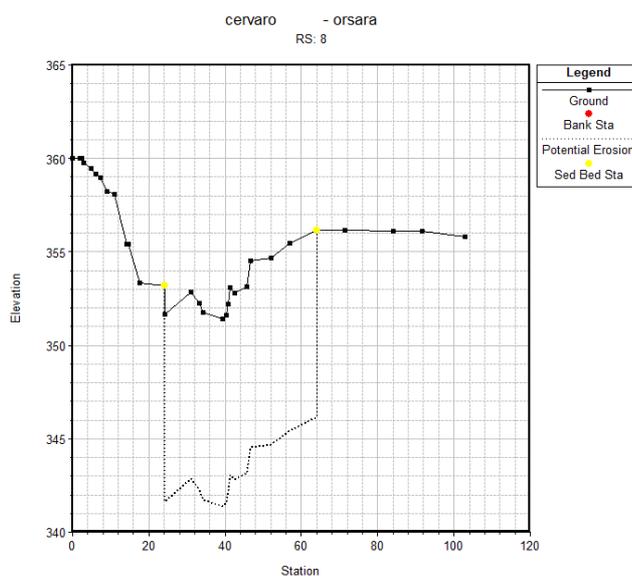


Figura 3-5: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale

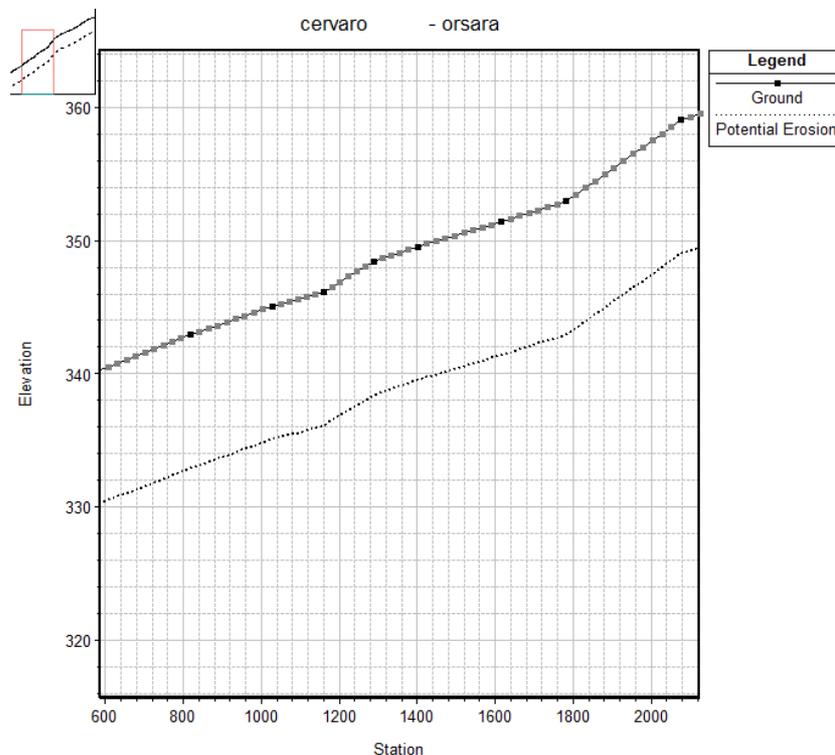


Figura 3-6: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile

3.2.2.5. Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo

La morfologia del corso 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 alla granulometria rilevata.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D’ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

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.

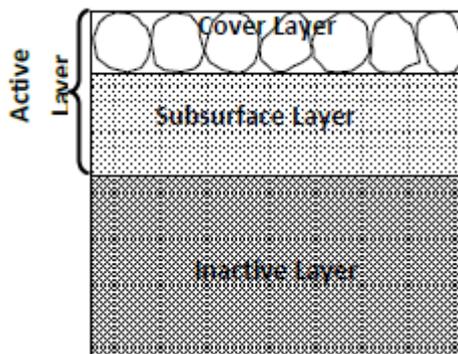


Figura 3-7: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo

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

L'ubicazione dei punti di prelievo è riportata nella Tavola IF1W00D09G4ID0002001A e le relative curve granulometriche sono state associate all'intero tratto di studio, in quanto si è osservato che per quel tratto le caratteristiche morfologiche sono uniformi.

3.3. Modalità evolutive dell'alveo

3.3.1. Tendenza all'erosione e alla deposizione

Le modalità evolutive dell'alveo dei corsi d'acqua oggetto di studio, per il tratto 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 del modello idraulico a fondo mobile descritto nel precedente paragrafo 0.

I risultati delle simulazioni 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), 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 ³ /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva
Acquara**	0,050	Carico entrante pari a 21 t/giorno	deposizione
IN06	0,004	Carico entrante nullo	deposizione
Bacino B4	0,008	Carico di equilibrio	stabile
Cantalanotte	0,080	Carico di equilibrio	Stabile

** per il Torrente Acquara è stato simulato l'idrogramma di piena con $T = 10$ anni per valutare l'effetto del contributo solido proveniente dai versanti di monte

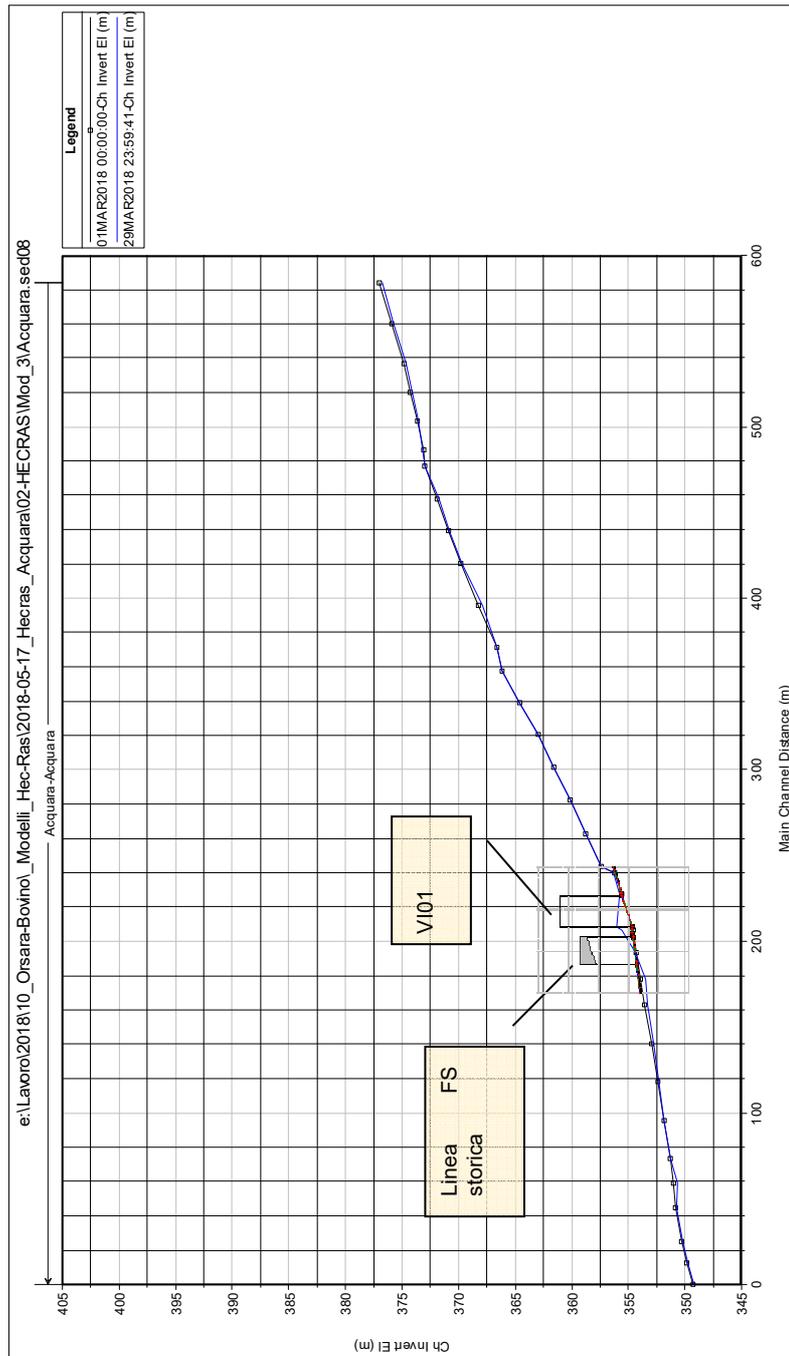


Figura 3-8: Torrente Acquara, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione a fondo mobile)

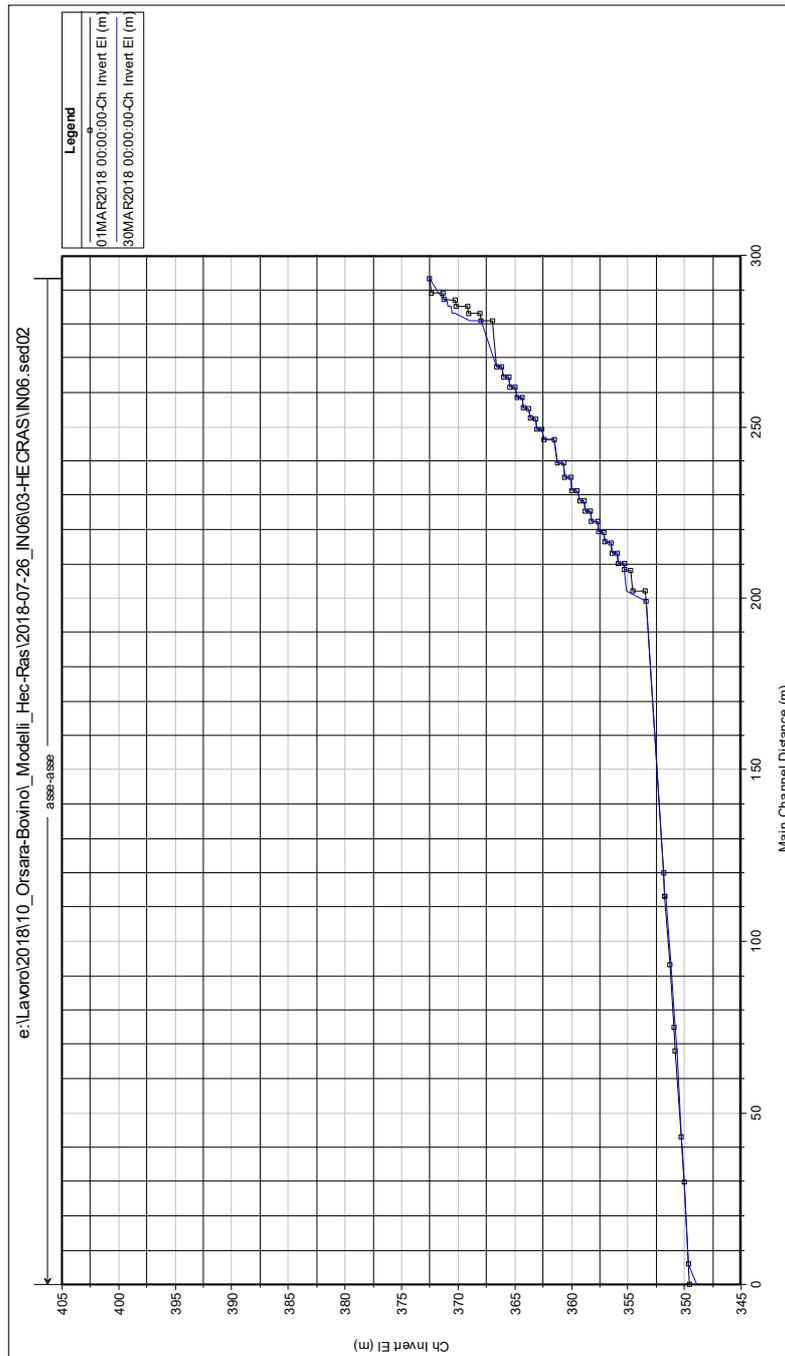


Figura 3-9: Corso d'acqua bacino B2 (IN06), profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione a fondo mobile)

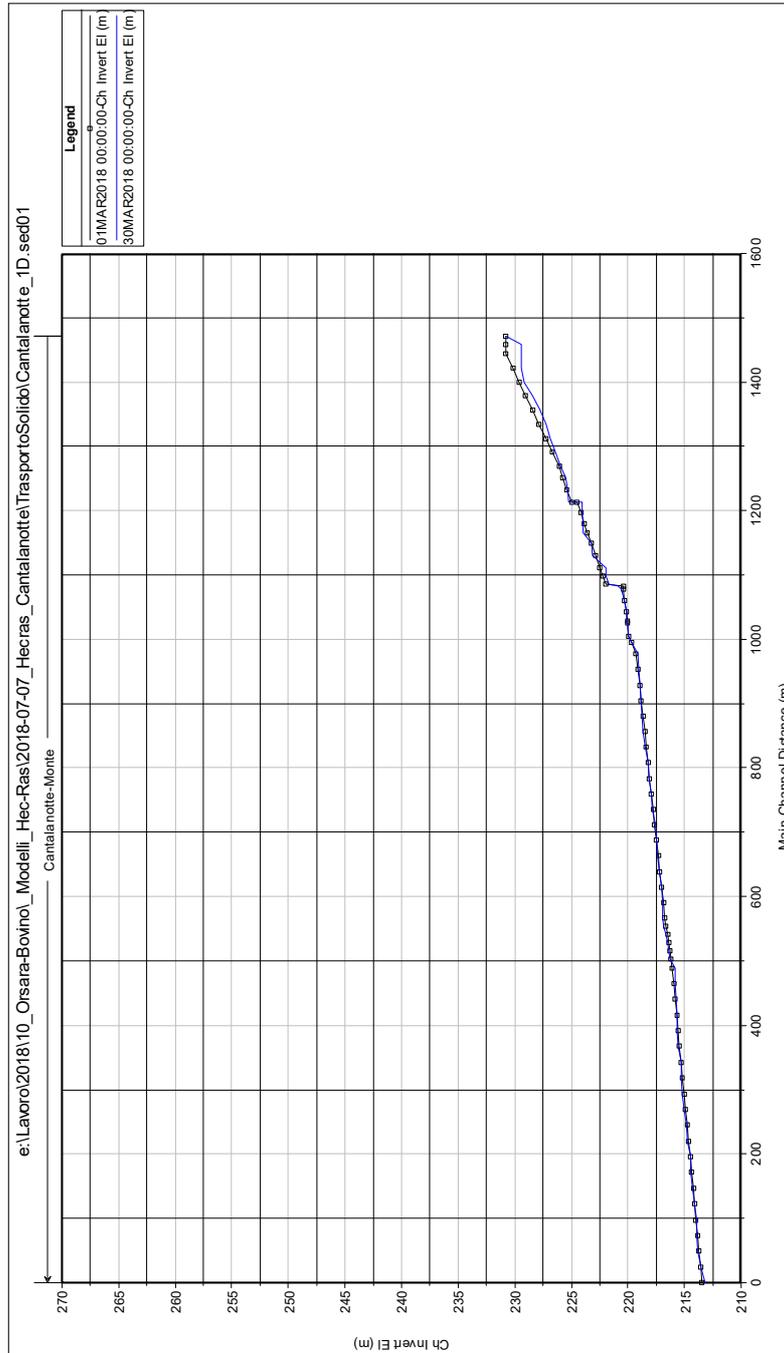


Figura 3-11: Torrente Cantalanotte, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione a fondo mobile)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

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

L'analisi della vulnerabilità delle opere in progetto a fenomeni di colate detritiche è stata condotta rivolgendo particolare attenzione ai cosiddetti sistemi "bacino-conoide" interferenti con l'infrastruttura ferroviaria. La metodologia adottata per l'individuazione delle zone di intervento "critiche" si articola in generale nelle seguenti fasi (Figura 4-1):

- Consultazione delle mappe di pericolosità geomorfologica e dei dissesti, sviluppate nell'ambito della redazione di Piani di Assetto Idrogeologico (PAI)
- Analisi delle caratteristiche morfometriche dei sistemi "bacino-conoide" interferenti con le opere in progetto, sulla base di formulazioni e abachi riportati in letteratura
- Sopralluoghi, indagini in sito
- Individuazione dei sistemi "bacino-conoide" potenzialmente suscettibili a fenomeni di colate detritiche
- Valutazione dei volumi mobilitabili
- 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

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 nell'elaborato annesso IF1W00D09G4ID0002001A e riscontrate nei sopralluoghi, nonché nelle mappe di pericolosità geomorfologica redatte dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia (AdBP) nell'ambito del P.A.I. (Piano di Assetto idrogeologico), sono state individuate le zone di intervento in cui è necessario procedere con approfondimenti ed analisi della propensione al dissesto.

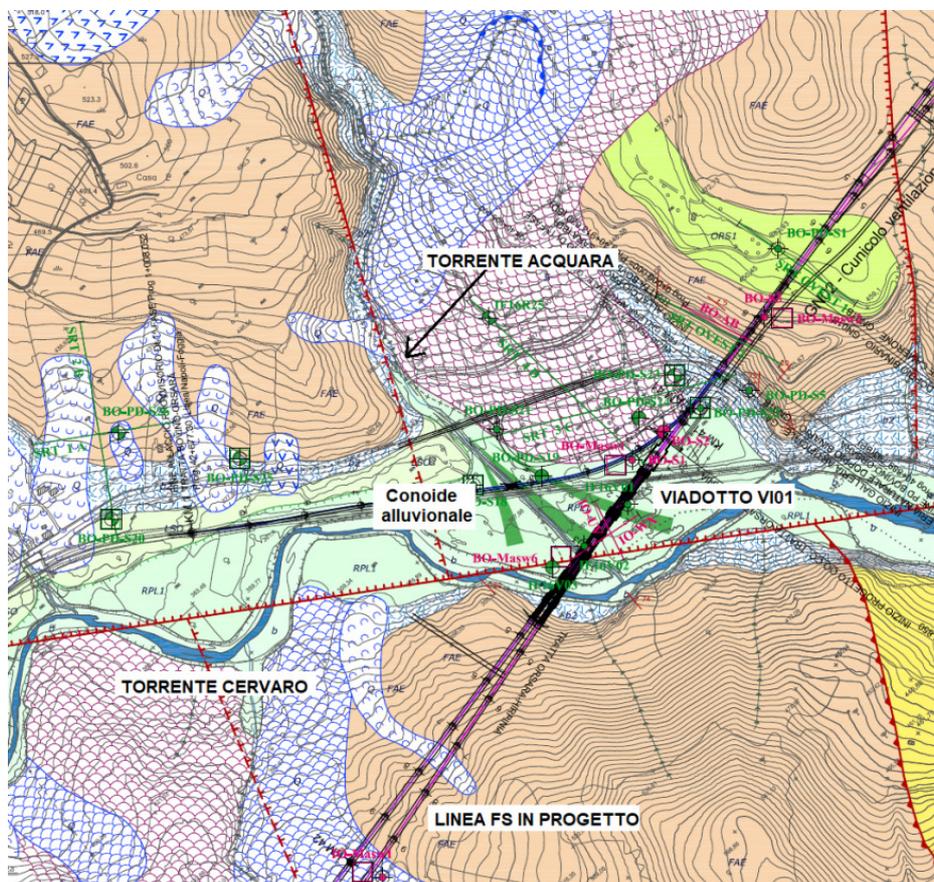


Figura 4-2: Torrente Acquara: conoide alluvionale.

In particolare, è stato preso in esame il sistema “bacino-conoide” del Torrente Acquara (Figura 4-2, Figura 4-3), affluente in sinistra idraulica del Torrente Cervaro, caratterizzato da aree a pericolosità geomorfologica molto elevata (PG3), corrispondenti a frane e/o fenomeni di instabilità pregressi identificati nello studio di fotointerpretazione condotto dall'AdBP (fonte: <http://webgis.adb.puglia.it>).

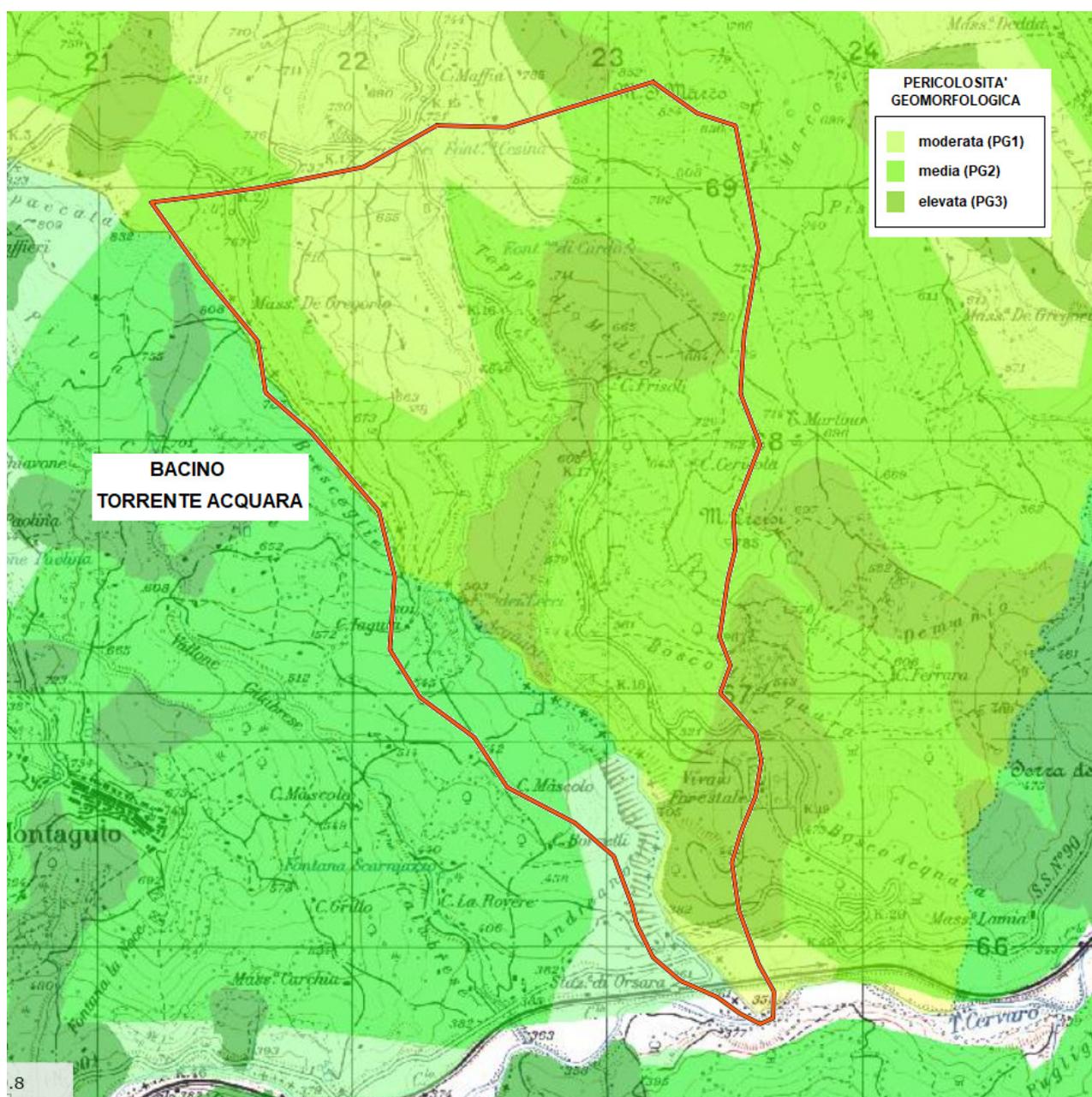


Figura 4-3: Torrente Acquara: bacino idrografico e pericolosità geomorfologica.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

I parametri morfometrici di tale sistema, valutati mediante elaborazioni geostatistiche in ambiente GIS del rilievo Lidar (risoluzione 1x1 m) fornito dal Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare, sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 4-1: Caratteristiche morfometriche del sistema "bacino-conoide" del T. Acquara

Superficie bacino (km²)	4.7
Lunghezza asta (km)	4.0
Quota massima (m slm)	847.6
Quota minima (m slm)	350.5
Quota media (m slm)	637.2
Area conoide (kmq)	0.15
Pendenza media conoide (°)	8.5
Quota apice conoide (m slm)	372.7
Quota unghia conoide (m slm)	349.0
Lunghezza canale in conoide (km)	0.463
Pendenza canale in conoide (%)	5.1

Lo studio morfometrico del sistema "bacino-conoide" del Torrente Acquara 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 (km²), Ab quella del bacino (km²), 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'erosività 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 4-4) i valori di Af e Ab relativi al sistema

bacino-conoide del T. Acquara: il punto corrispondente ricade all'esterno del campo dei valori sopra definito.

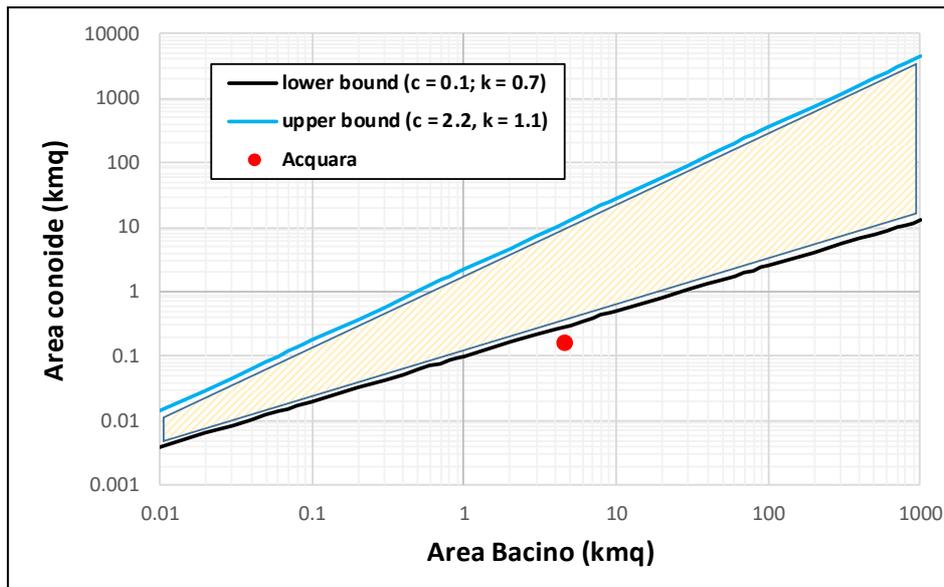


Figura 4-4: Area conoide vs area bacino: valori caratteristici di sistemi bacino-conoide interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico

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 che presentano pendenze minori sono alimentati da un bacino più ampio di quelli con pendenza maggiore; nel 1962 Bull propose la relazione:

$$Sf = a \cdot Ab^m \quad (4.2)$$

in cui Sf è la pendenza del conoide (in gradi), Ab l'area del bacino (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 4-5). Riportando su tale

grafico i valori di S_f e Ab relativi al sistema *bacino-conoide* del T. Acquara si osserva che il punto corrispondente ricade appena fuori dal campo dei valori caratteristici.

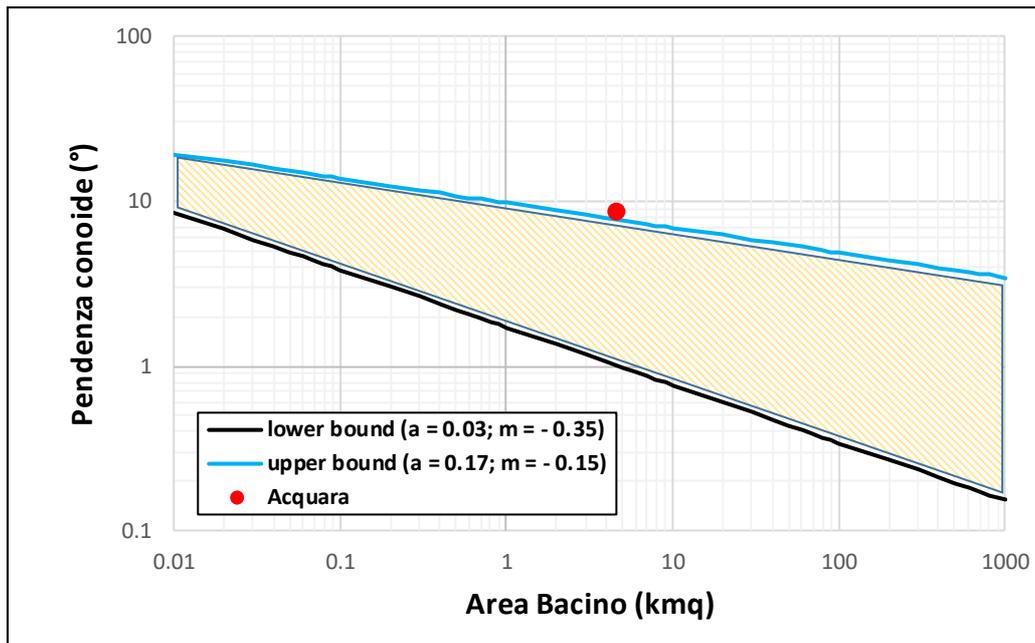


Figura 4-5: Pendenza conoide vs area bacino: valori caratteristici di sistemi bacino-conoide interessati da trasporto di materiale detritico

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):

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

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

Con riferimento all'area di studio, per i sistemi campani si può ricorrere all'abaco di Figura 4-6 (Scorpio, 2011); in particolare sono evidenziati diversi settori, di cui il primo, caratterizzato da pendenze

medie del conoide minore di 5° e valori dell'indice di Melton minori di 0,9, è costituito solo da sistemi con trasporto prevalente da "water flow" (*Wf*); il secondo presenta invece un trasporto da "debris flow" (*Df*) con valori della pendenza del conoide maggiori di 7° indipendentemente da quello assunto dall'indice di Melton. Per pendenze inferiori occorrono indici di Melton maggiori di 0,95 affinché si possa prevedere un trasporto da *Df*; nel settore centrale, caratterizzato da valori dell'indice di Melton compresi tra 0,35 e 0,65 e della pendenza del conoide compresi tra 5° e 7° , si rinviene una zona di coesistenza delle due tipologie all'interno del quale risulta abbastanza incerta la definizione del trasporto.

Per il sistema "bacino-conoide" del T. Acquara, l'indice di Melton (*R*) assume un valore pari a 0,23. Riportando i valori di *R* e *Sf* sull'abaco di Figura 4-6, il sistema del T. Acquara, seppure discostandosi dal trend (e quindi dalla relazione esponenziale 2.4) che caratterizza gli eventi verificatesi nella Regione Campania, ricade in un settore che identifica la presenza di fenomeni di trasporto da *debris flow*.

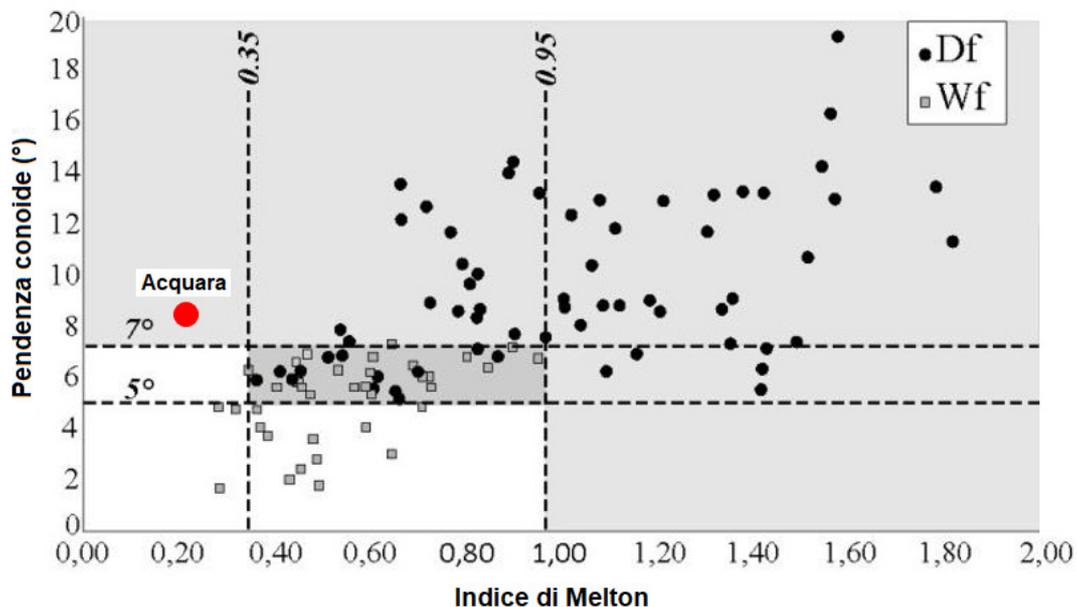


Figura 4-6: Pendenza conoide vs indice di Melton per i sistemi "bacino-conoide" campani (Scorpio, 2011).

In conclusione, sulla base delle valutazioni speditive sopra illustrate e delle risultanze dello studio di compatibilità geomorfologica (elaborato IF1W00D69RGGE0001002A), si ritiene che il sistema bacino-conoide del T. Acquara possa essere caratterizzato da meccanismi di trasporto di materiale detritico

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

proveniente da versanti instabili, tali da poter interessare le opere in progetto. Per tale motivo nel successivo paragrafo viene valutato il volume solido potenzialmente mobilizzabile.

4.2. Stima dei volumi potenzialmente mobilitabili dai versanti

4.2.1. Metodologia generale

Il volume di materiale potenzialmente mobilitabile dai versanti può essere stimato tramite analisi e valutazioni riguardanti gli spessori delle coltre detritiche sui versanti, supportate da indagini in sito e analisi delle loro caratteristiche meccaniche/geotecniche.

In generale, per i sistemi “*bacino-conoide*” suscettibili a fenomeni di “*debris flows*”, il volume di materiale potenzialmente mobilitabile può essere stimato anche tramite formulazioni empiriche disponibili in letteratura, che si basano su alcuni parametri morfometrici relativi alle 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 quello in esame), è possibile ricorrere alle relazioni proposte da Marchi e Tecca (1996) e da Ceriani et al. (2000).

- *Marchi & Tecca (1996)*

$$V = 70000 \cdot S$$

con V = volume di materiale solido (m^3); S = superficie del bacino (km^2)

- *Ceriani et al. (2000)*

$$V = k \cdot (Ab)^a \cdot (R)^b \cdot (ScI_c)^c (IF)^{-d}$$

con V = volume di materiale solido ($10^3 m^3$); k = coefficiente empirico e [3; 5.4]; Ab = superficie del bacino (km^2); R = Numero di Melton; ScI_c = pendenza media del canale in conoide (%); IF = indice di frana pari a 1 se sono presenti frane rilevanti che interagiscono con il reticolo idrografico, 2 se sono presenti frane ma in collegamento diretto con il reticolo idrografico e 3 se non sono presenti frane significative nel bacino; a, b, c , e d = costanti ($a = 1$; $b = 0.8$; $c = 1$; $d = 2$).

La pendenza media del canale in conoide è valutabile come $\Delta Hc/Lcl_c$ dove ΔHc è l'energia di rilievo del conoide, data dalla differenza di quota tra apice e unghia, e Lcl_c è la lunghezza del canale in canale.

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 generale, tale metodo prevede il calcolo della portata di picco della colata ricorrendo a formule empiriche (Tabella 4-2), in funzione del 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 4-2: formule empiriche per la stima della portata al colmo di una colata detritica.

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 , derivante dalla relazione tra C_v e $1/(1-C_v)$ che appunto non è lineare (D’Agostino, 2013).

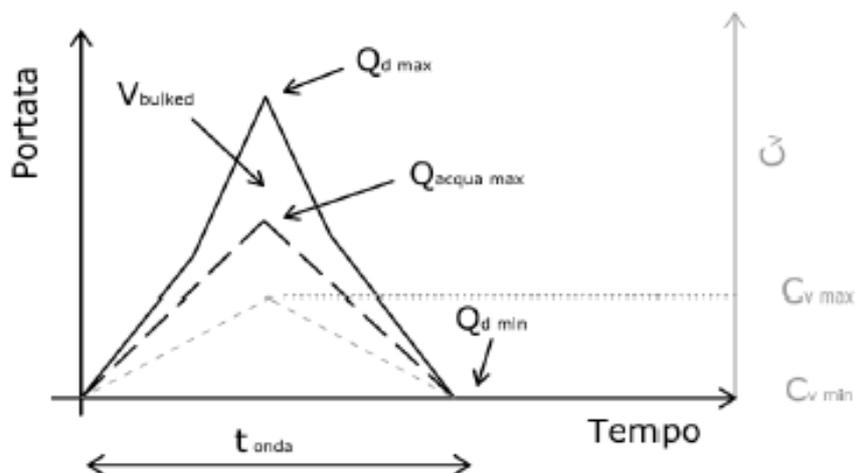


Figura 4-7 – Metodo volumetrico: determinazione dell’onda di colata detritica (debrisgramma).

Con riferimento allo schema di Figura 4-7, integrando l'area sottesa dal debrisgramma non lineare si ottiene l'equazione:

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

con

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

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:

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

4.2.2. Indagini in sito

Ai fini della valutazione dello spessore delle coltri detritiche sui versanti del bacino del T. Acquara, sono stati effettuati due sondaggi geognostici. Tali indagini sono state ubicate all'interno dell'area classificata come "a pericolosità geomorfologica elevata PG3" (come da P.A.I. della Regione Puglia), che è stata interessata in passato anche da eventi franosi, come riportato nello studio di fotointerpretazione condotto dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia (Figura 4-8).



Figura 4-8 – Sistema “bacino-conoide” del T. Acquara: ubicazione delle indagini.

Di seguito, si riportano le stratigrafie e le “cassette” contenenti i primi 5 metri di materiale relativi ai due sondaggi. Per quanto concerne il sondaggio BO-PD-S27, il materiale costituente la coltre detritica superficiale (spessore 1,5 m), in potenziale scorrimento sul substrato di “argilla limosa a luoghi con intercalazioni sabbiose millimetriche, umida, da consistente a dura”, è classificato come “terreno vegetale costituito di argilla limosa, umida, di colore marrone scuro nerastro, con resti vegetali e grossi clasti di origine calcarea, (diametro massimo 7 cm)”; mentre, per quanto riguarda il sondaggio BO-PD-

S28, la coltre detritica superficiale (spessore 2,3 m), in potenziale scorrimento sul substrato di “limo argilloso debolmente ghiaioso fine, umido, molto consistente”, è costituita di i) “terreno vegetale con da limo argilloso sabbioso fine-medio, umido, brunastro” (profondità 0-0.3 m); ii) “limo sabbioso fine-medio, debolmente umido, avana-biancastro con clasti di origine calcarea” (profondità 0.3-2,0 m); iii) “ghiaia debolmente sabbiosa, eterometrica, debolmente umida, avana-biancastra” (profondità 2 – 2,3 m).

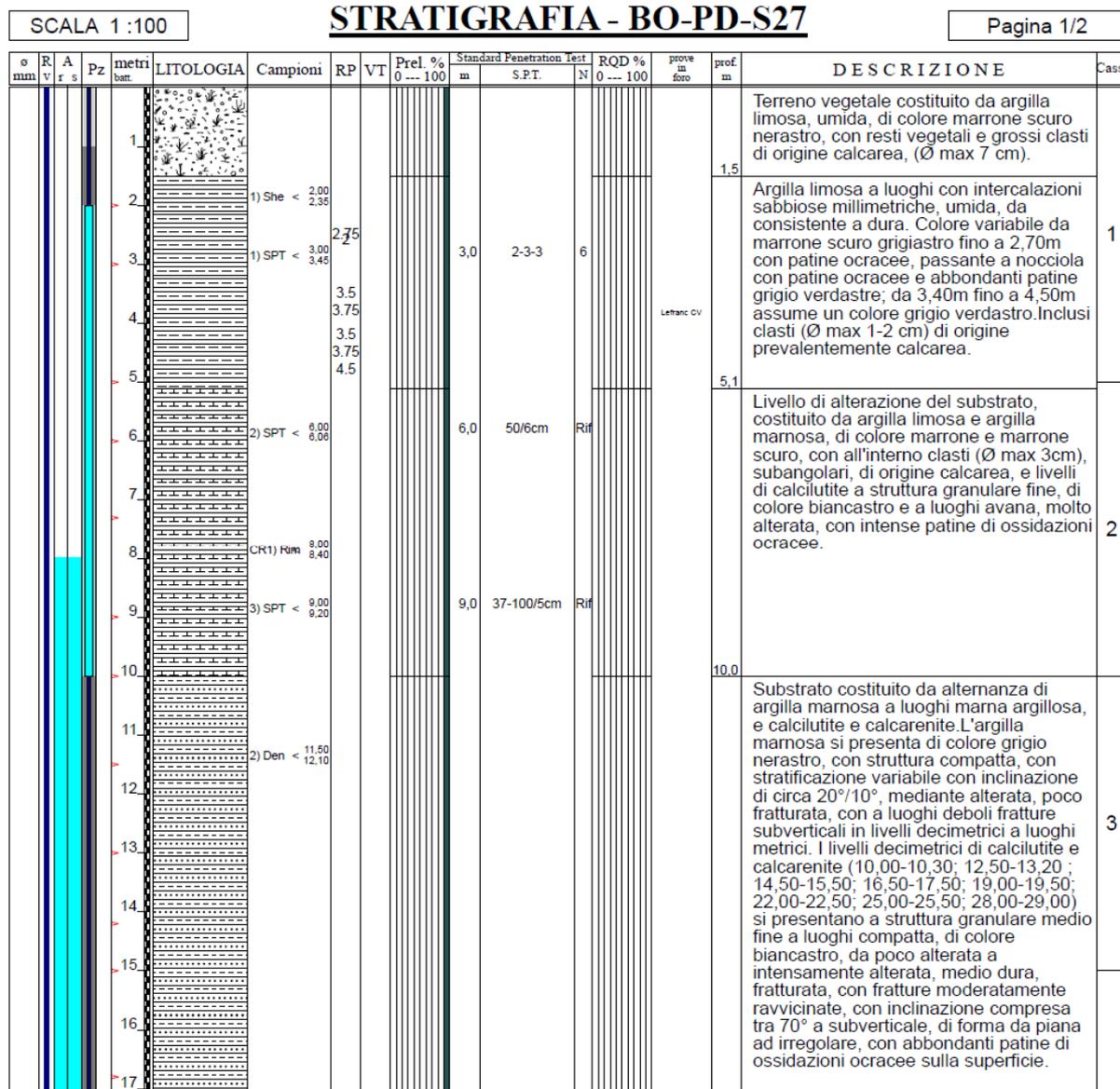


Figura 4-9 – Sondaggio BO-PD-S27: stratigrafia.

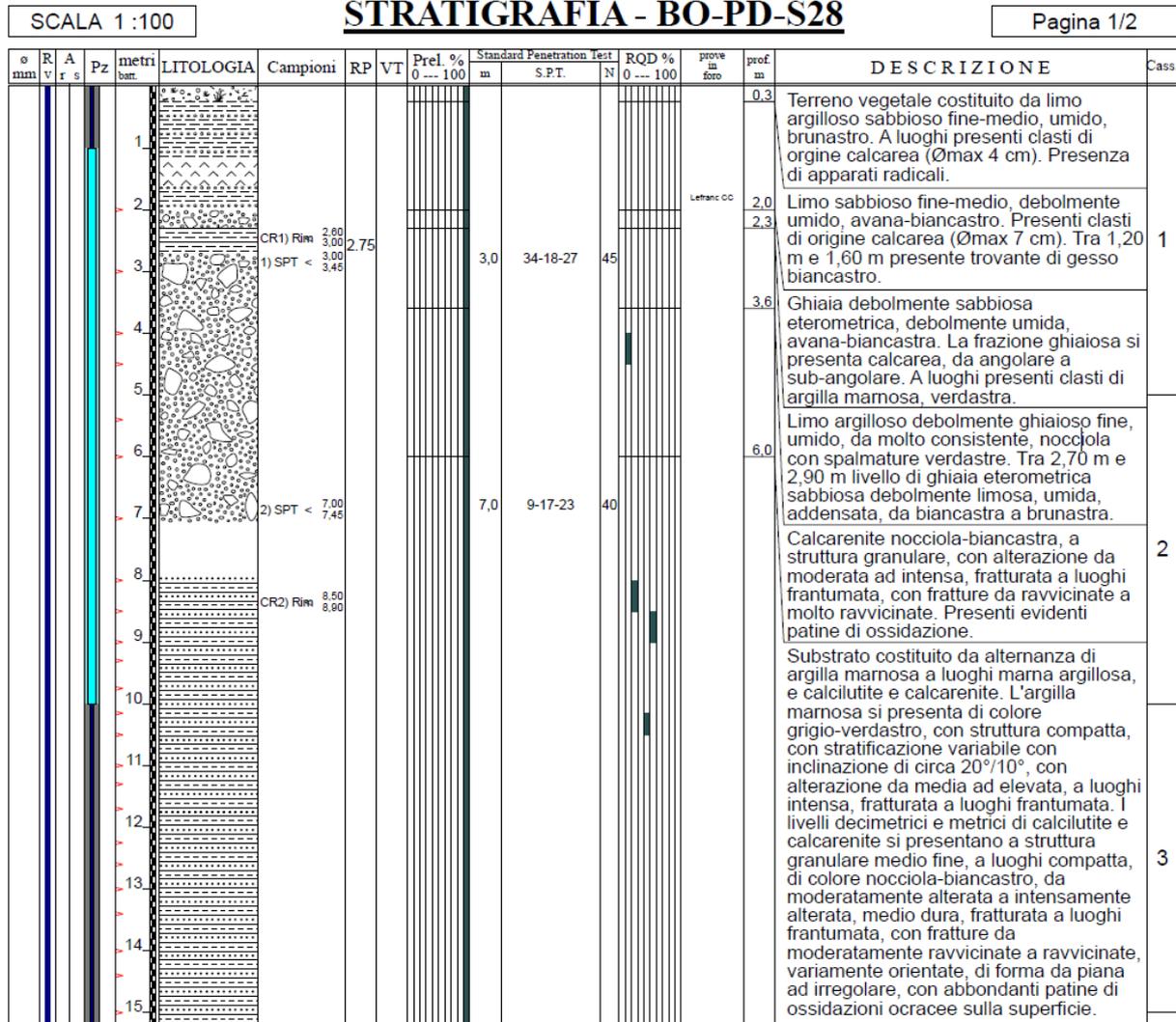


Figura 4-10 – Sondaggio BO-PD-S28: stratigrafia.



Figura 4-11 – Materiale alla profondità 0 - 5 m: a) Sondaggio BO-PD-S27, b) Sondaggio BO-PD-S28.

Nel corso della campagna di indagini sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di materiale, da sottoporre a prove di laboratorio ai fini della determinazione dei relativi parametri fisico-meccanici. In particolare, il materiale costituente la coltre detritica superficiale è caratterizzato dai parametri: $\delta = 27^\circ$ (angolo di attrito interno); $\varphi = 17^\circ$ (angolo di resistenza al taglio all'interfaccia "coltre-substrato"). Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati specialistici IF1W00D69SGGE0005008A, IF1W00D69PRGE0005010A.

4.2.3. Calcolo dei volumi solido e liquido

Sulla base dei risultati delle indagini in sito precedentemente illustrate, lo spessore medio della coltre detritica superficiale (relativamente all'area indagata) si attesta a circa 2 metri. I sopralluoghi effettuati, unitamente alle analisi delle foto aeree, hanno evidenziato nell'area indagata (classificata come a "pericolosità geomorfologica elevata PG3") la presenza di zone (o nicchie) di distacco pregresse.

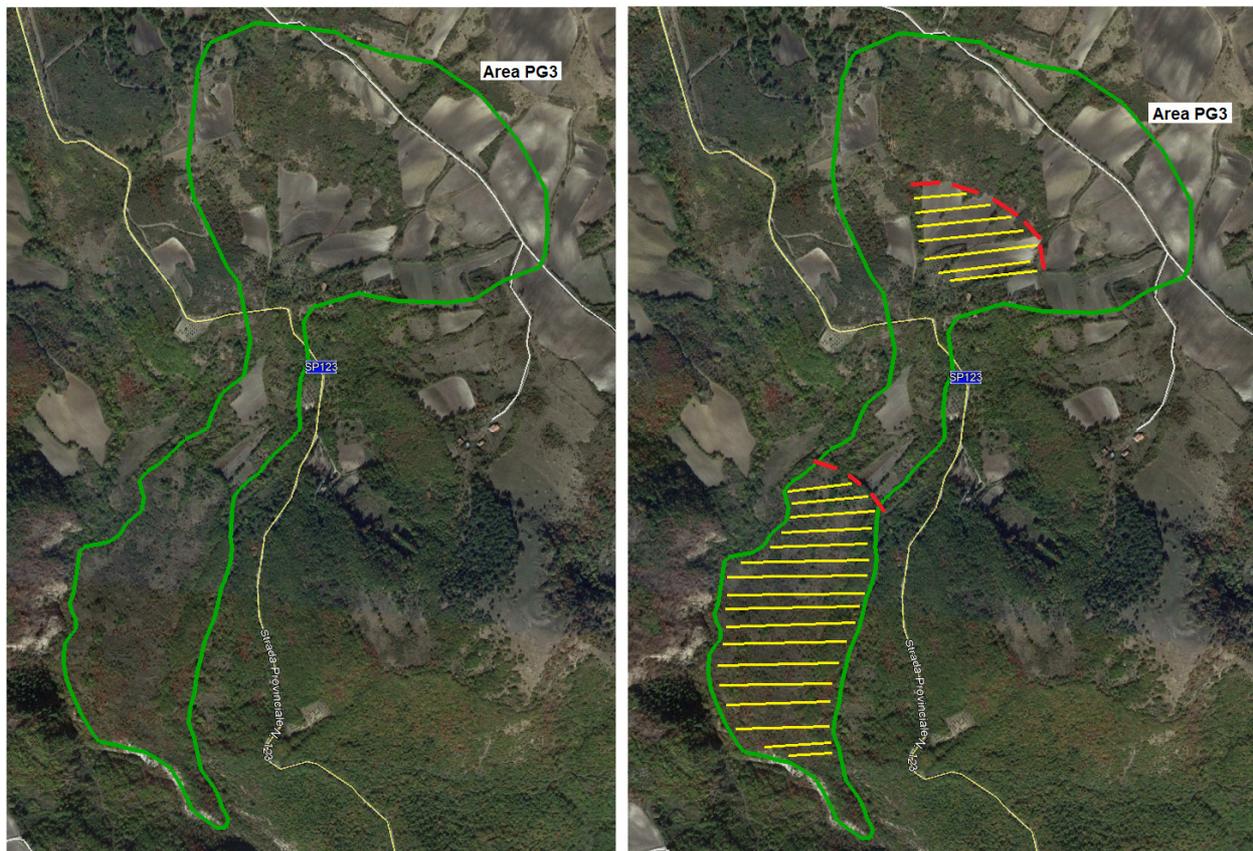


Figura 4-12 – Sistema "bacino-conoide" del T. Acquara: individuazione di aree potenzialmente instabili.

Sono state quindi individuate due aree potenzialmente instabili (Figura 4-12), che sottendono un'area complessiva di circa 150000 m². Pertanto, come anzidetto, assumendo uno spessore medio della coltre detritica superficiale di 2 metri, il volume solido potenzialmente mobilitabile si attesterebbe a circa 300000 m³.

Si è proceduto quindi all'applicazione del metodo del “*debrisgramma*” ai fini della determinazione del volume liquido. In particolare, si è fatto riferimento alla portata corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni, pari a 55.2 m³/s (=Q_{acqua,max}), come da elaborato specialistico IF1W00D29RIID0001001A.

Applicando l'equazione

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

da cui (imponendo Q_{d,min} = 0, Q_{acqua,min} = 0.1 m³/s, C_{v,min} = 0.2)

$$Q_{d,max} = \frac{Q_{acqua,max}}{1 - C_{v,max}} - \frac{Q_{acqua,min}}{1 - C_{v,min}}$$

e assegnando alla concentrazione volumetrica massima (C_{v,max}) i valori 0.5 e 0.65 (minimo e massimo ammissibili per la tipologia di fenomeni esaminati), è stata quindi valutata la portata al colmo del “*debrisgramma*” (Q_{d,max} = Q_d); nello specifico, Q_d = 110,3 m³/s per C_{v,max} = 0.5; Q_d = 157.6 m³/s per C_{v,max} = 0.65.

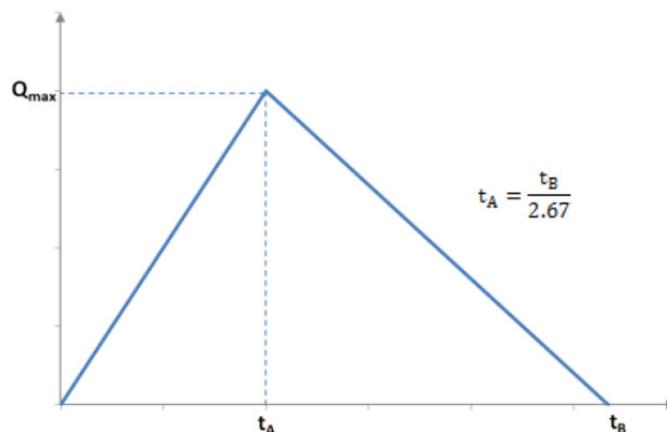


Figura 4-13 – Torrente Acquara: tipologia di idrogramma di piena (fonte: Studio AdBP).

Nota la portata $Q_{d,max}$ e il volume solido potenzialmente mobilitabile ($V_s = 300000 \text{ m}^3$), considerando un idrogramma di piena di tipo triangolare con fase ascendente di durata pari a t_A e durata complessiva pari a t_B (con $t_B = t_{onda} = 2.67 \cdot t_A$, da cui $V_f = Q_{acqua,max} \cdot t_B / 2$, con $V_f =$ volume liquido), come riportato nello studio idrologico-idraulico del bacino del T. Cervaro redatto dall'Autorità di bacino della Regione Puglia (P.O. FESR 2007-2013), e imponendo che l'area sottesa dal *debrisgramma* sia pari alla somma $V_s + V_f$, è stato possibile determinare la durata complessiva dell'evento (t_{onda}) ed il corrispondente coefficiente di non linearità (k).

Di seguito, si riportano i “*debrisgramma*”, unitamente ai volumi *solido* e *liquido*, relativi ai due valori di $C_{v,max}$ assegnati.

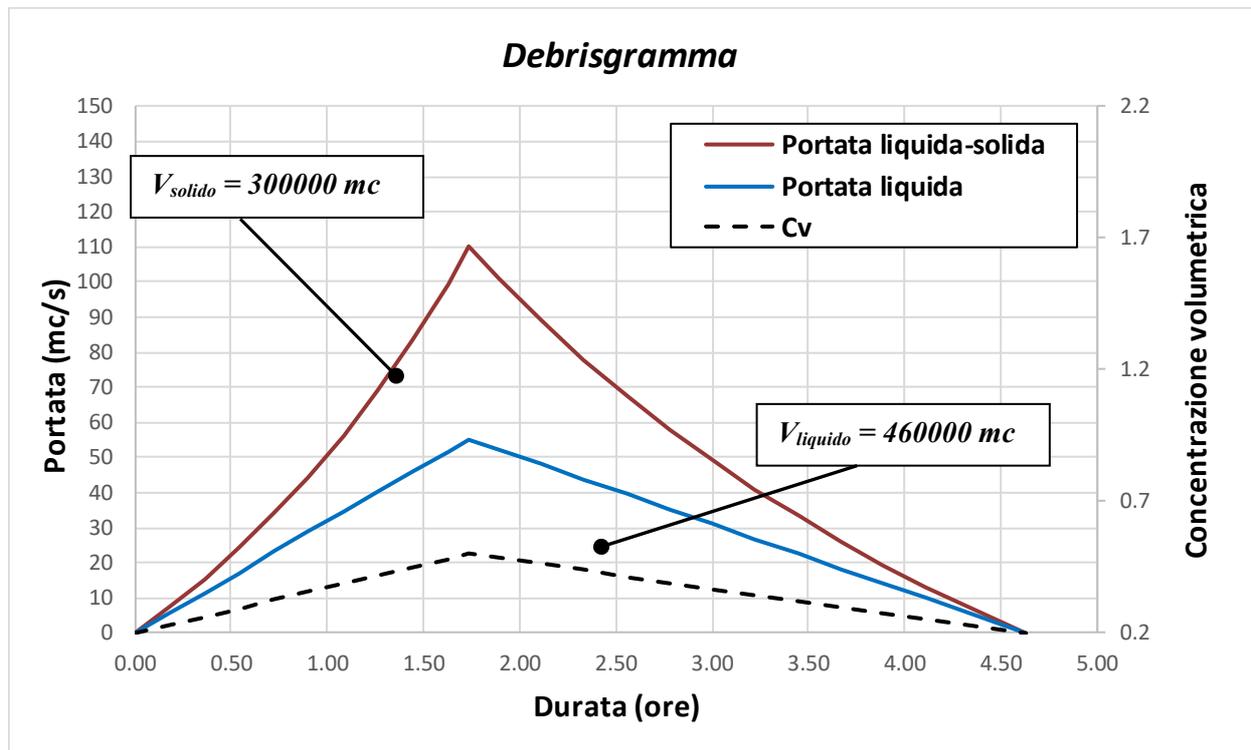


Figura 4-14 – Sistema bacino-conoide del T. Acquara: debrisgramma per $C_{v,max} = 0.5$.

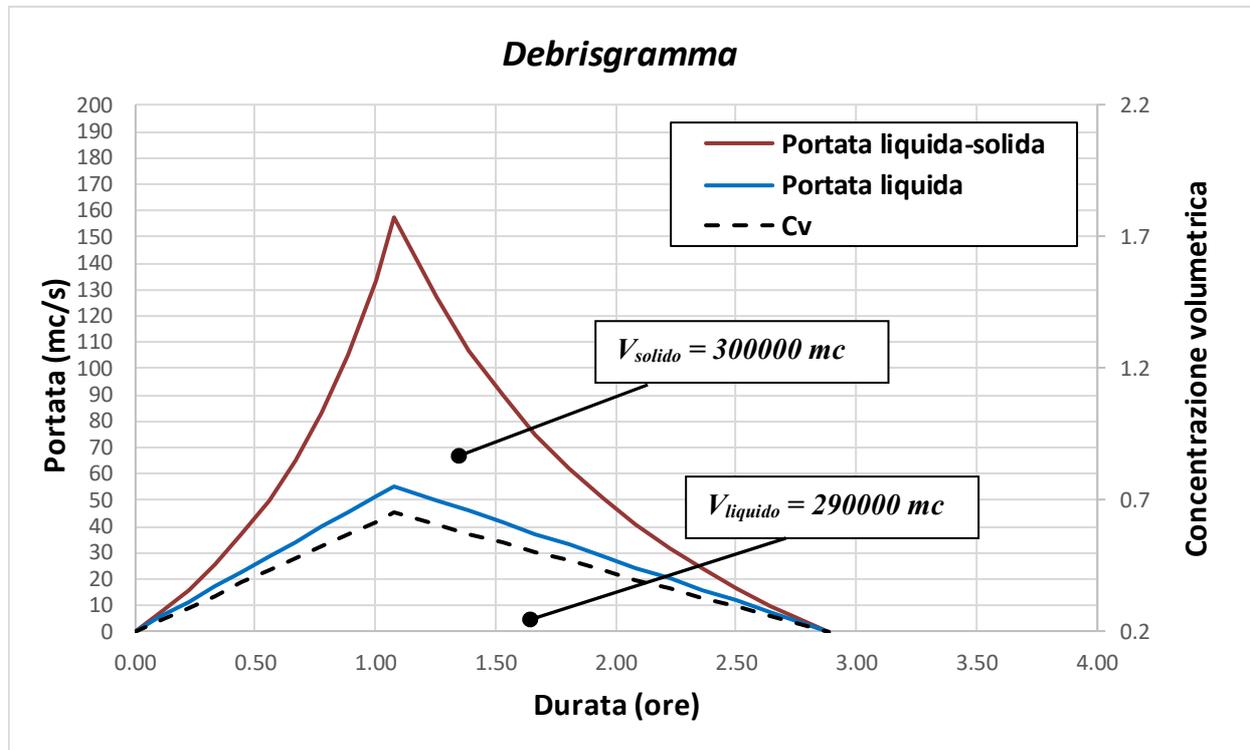


Figura 4-15 – Sistema bacino-conoide del T. Acquara: debrisgramma per $C_{v,max} = 0.65$.

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 nel sistema “bacino-conoide” del T. Acquara, teso alla determinazione delle aree di deposizione.

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, α_{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 ≥ 4 values

Tabella 4-3: *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 4-4) durante la propagazione (coefficienti empirici i cui valori possono essere assegnati direttamente oppure sottoforma di mappe raster di distribuzione).

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.

Symbol	Parameter	Unit
ρ_S	Solid material density (grain density)	kg m^{-3}
ρ_F	Fluid material density	kg m^{-3}
φ	Internal friction angle	Degree
δ	Basal friction angle ^a	Degree
C_{VM}	Virtual mass	–
v_T	Terminal velocity	ms^{-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	–
χ	Viscous shearing coefficient for fluid	–
ξ	Solid concentration distribution with depth	–
C_{AD}	Ambient drag coefficient ^b	–
C_E	Entrainment coefficient ^a	kg^{-1}

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

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.

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.

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 4-5: *r.avaflow* – principali outputs.

4.3.2. Parametri geometrici e fisico-meccanici ed implementazione del modello di calcolo

Si riportano sinteticamente i valori dei volumi "solido" e "fluida" (principali dati di input di *r.avaflow*) per il sistema "bacino-conoide" del T. Acquara, relativamente agli scenari simulati.

Scenario	$C_{v,max}$	Volume solido (mc)	Volume liquido (mc)	Volume totale (mc)
1	0.65	300000	290000	590000
2	0.50	300000	460000	760000

Per confronto si riportano anche i valori del volume (totale) dell'evento (V) stimati tramite le formulazioni empiriche descritte in precedenza:

- $V = 329000 \text{ m}^3$, secondo Marchi & Tecca (1996)
- $V = 775000 \text{ m}^3$, secondo Ceriani et al. (2000) (assumendo $k = 4.2$ e $IF = 2$)

Per il sistema "bacino-conoide" in esame, la formulazione di Ceriani et al. (2000) risulta essere più attendibile.

L'estensione delle aree di distacco è stata ricavata in relazione alle considerazioni esposte in precedenza (Figura 4-12, Figura 4-16). Come topografia di base è stato utilizzato il rilievo LiDar, con risoluzione 1x1 m, fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Le opere di attraversamento lungo il Torrente Acquara sono state implementate nel software *r.avaflow* modificando opportunamente il modello digitale del terreno in ambiente GIS.

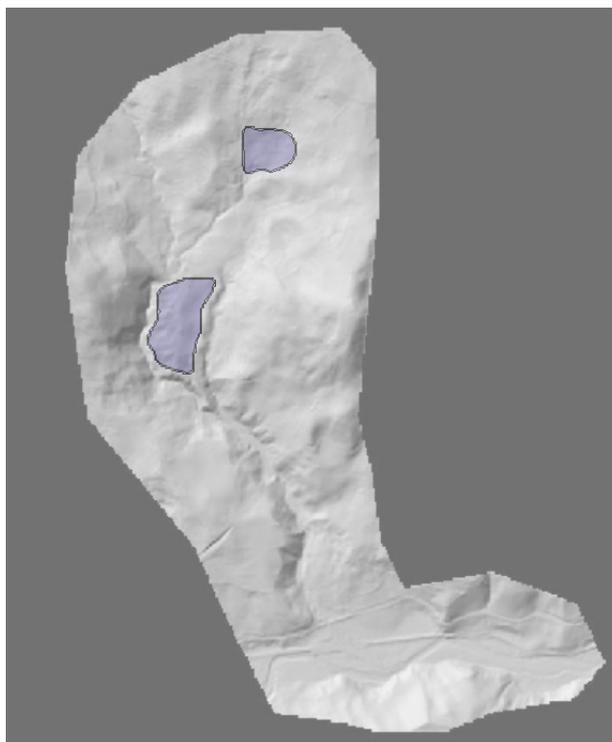


Figura 4-16: Sistema bacino-conoide del T. Acquara: aree di distacco simulate.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

Noti i volumi e gli spessori “solido” e “liquido” è stato quindi possibile costruire le mappe raster riportanti la distribuzione delle relative altezze, “solid release height” e “liquid release height”. Possibili fenomeni di erosione dei canali di scorrimento durante la propagazione non sono stati simulati.

Per quanto concerne i parametri meccanici “angolo di attrito interno, δ ” e “angolo di attrito alla base, φ ”, con riferimento ai risultati delle prove di laboratorio effettuate sui campioni estratti durante la campagna di indagini, sono stati considerati i seguenti valori: $\delta = 27^\circ$; $\varphi = 15^\circ$.

Inoltre, sono stati assunti i seguenti parametri: ρ_s (peso dell'unità di volume della fase solida) = 2600 kg/m³ e ρ_w (peso dell'unità di volume della fase liquida) = 1000 kg/m³, da cui un peso specifico della colata $\rho_c = 1800 - 2100$ kg/mc (con riferimento ai valori di $C_{v,max}$ considerati).

Definito ρ_c e noto il volume solido potenzialmente mobilitabile dai versanti (V_s), è stato possibile stimare il carico solido entrante (CS) da imporre come input nel modello idraulico a fondo mobile, descritto nel precedente capitolo (CS = 540 tonnellate).

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* = 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 allo scenario simulato.

4.3.3. Risultati delle simulazioni numeriche

Di seguito, i risultati in termini di aree di deposizione finali (totali, solido + liquido) e di “*inviluppo*” delle altezze (totali) massime (fluido + solido), per entrambi gli scenari simulati.

Scenario 1

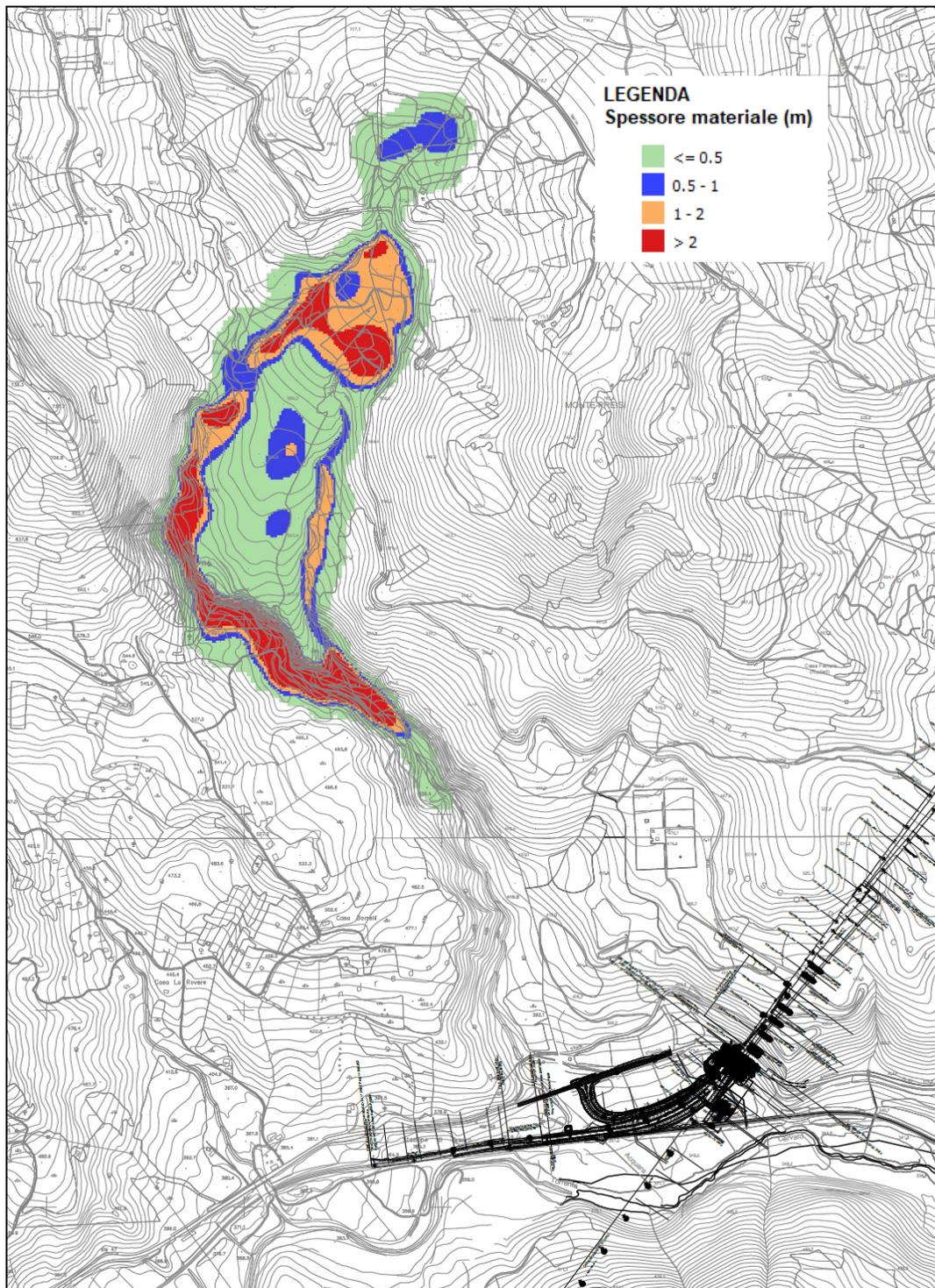


Figura 4-17: Scenario 1: aree di deposizione finali (solido + liquido).

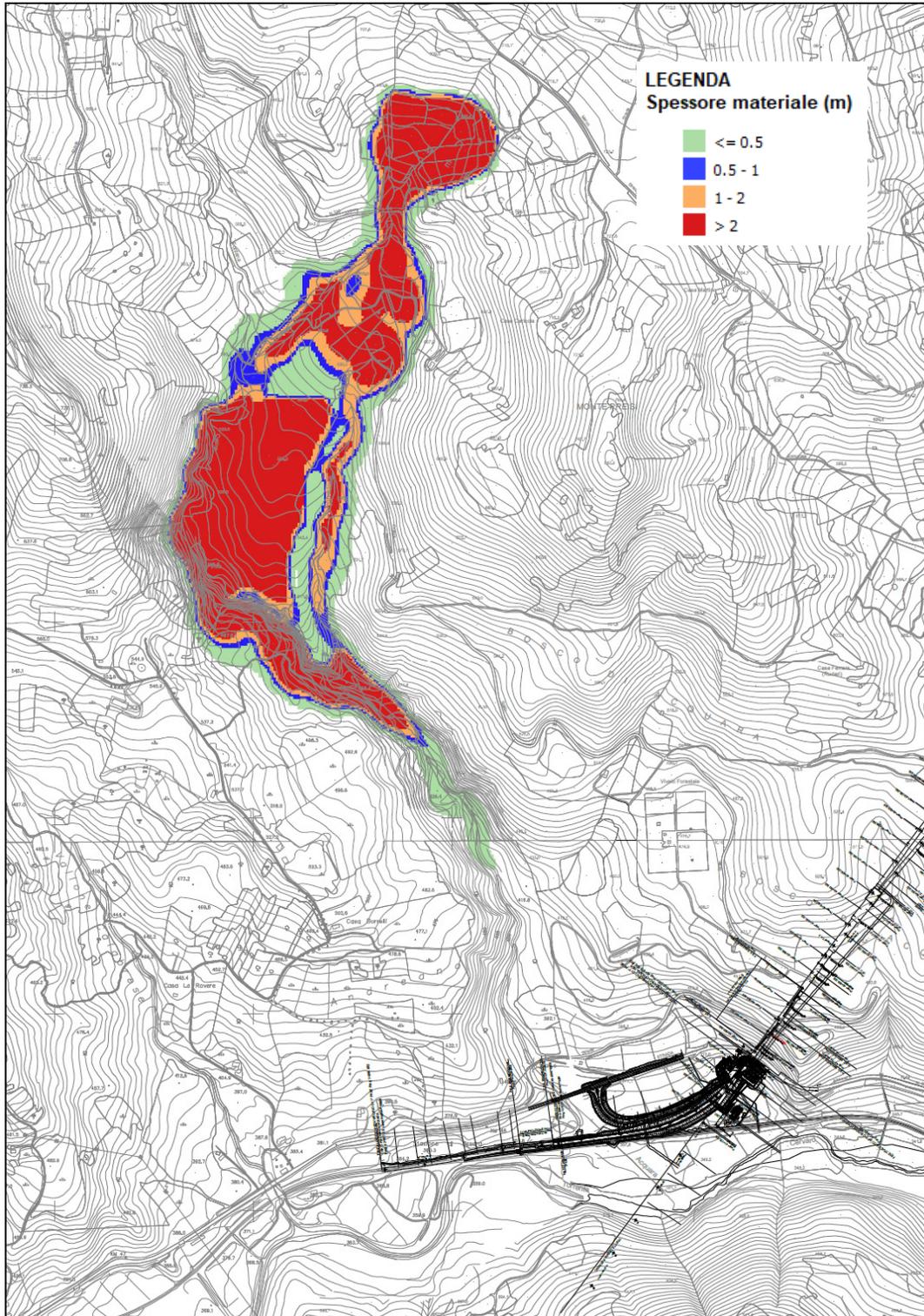


Figura 4-18: Scenario 1: involuppo delle altezze massime (solido + liquido).

Scenario 2

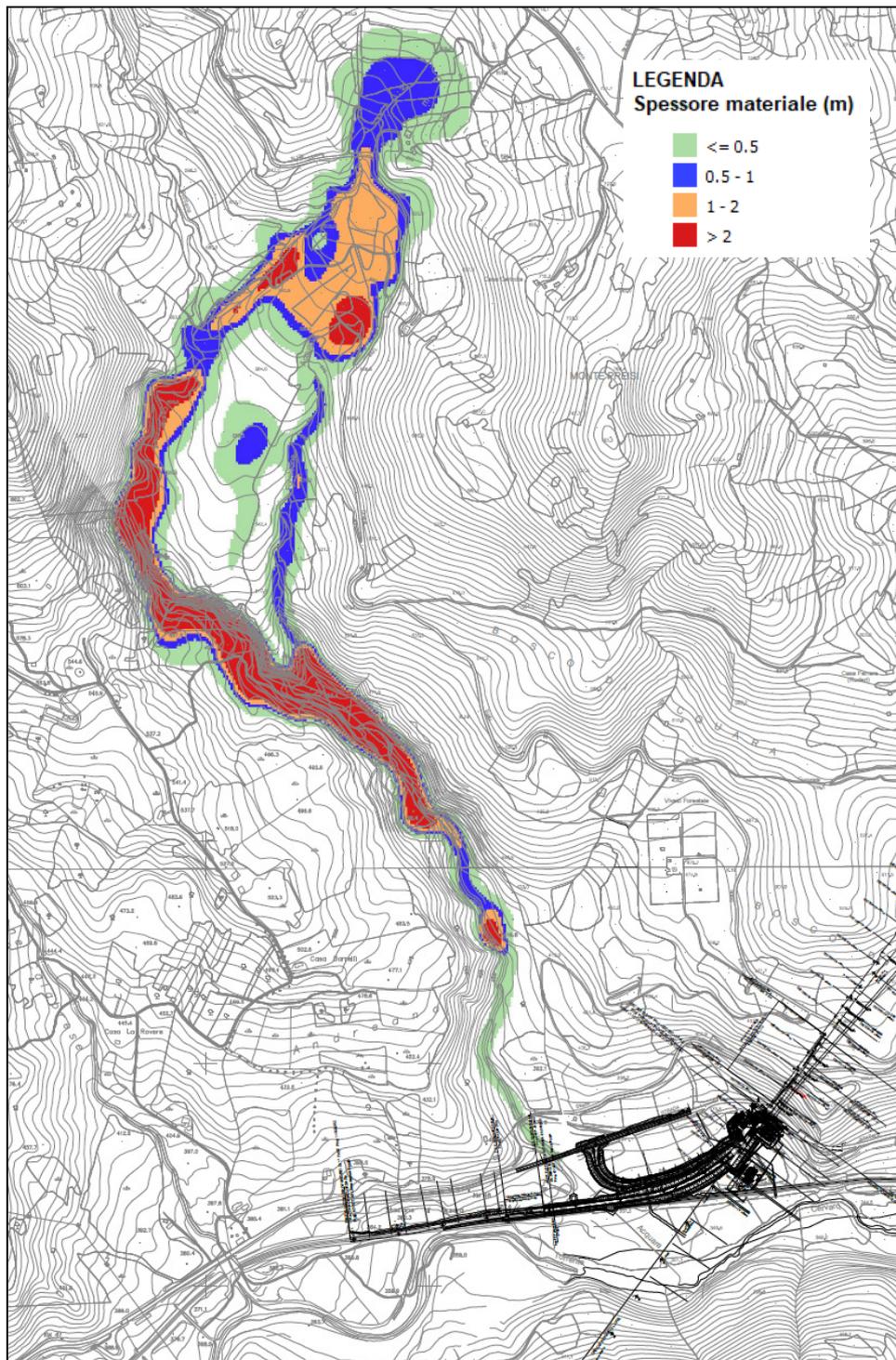


Figura 4-19: Scenario 2: aree di deposizione finali (solido + liquido).

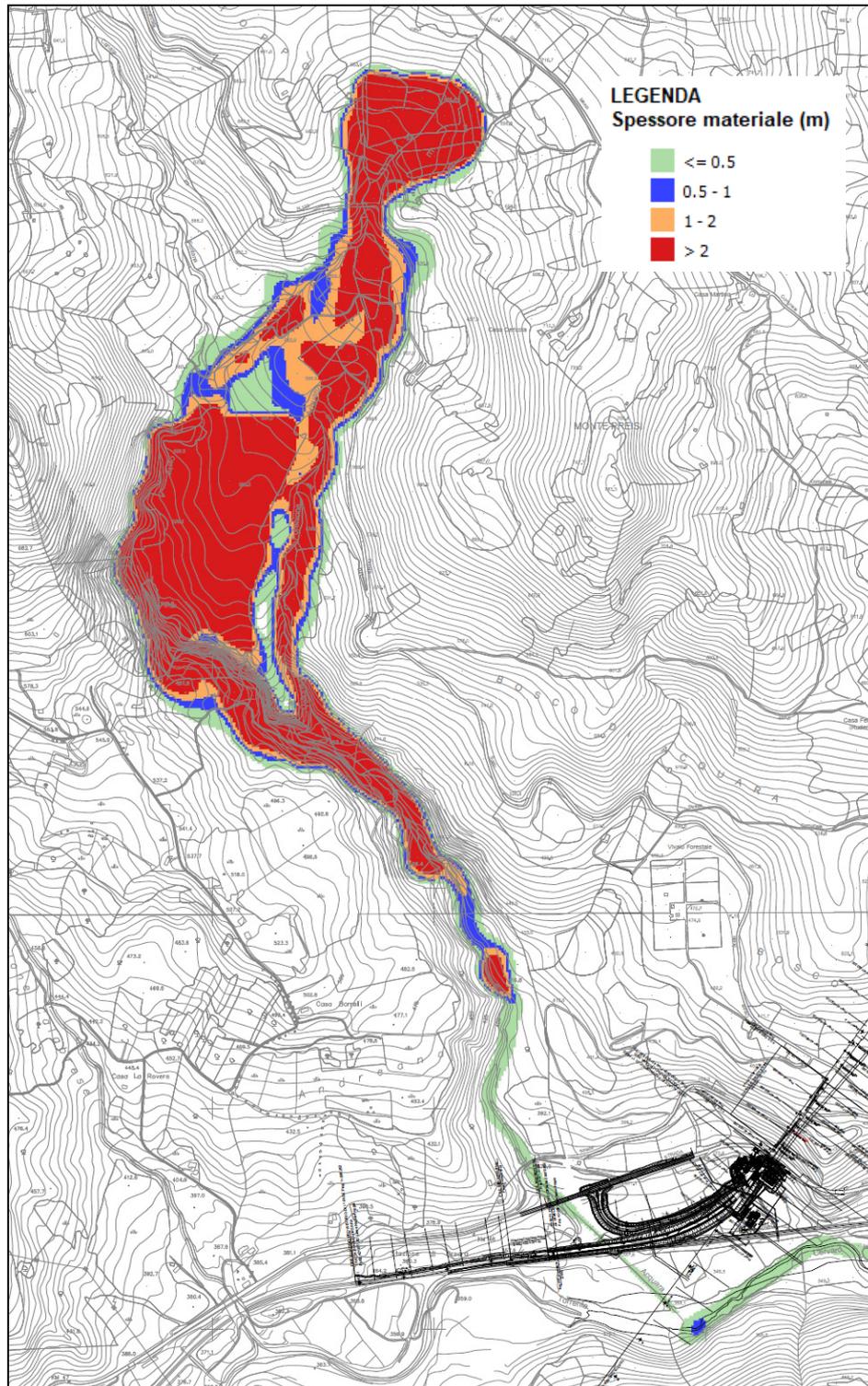


Figura 4-20: Scenario 2: involuppo delle altezze massime (solido + liquido).

I risultati ottenuti riproducono le aree di pericolosità geomorfologica censite nel P.A.I.. Nello specifico, per quanto concerne lo scenario 1 ($C_{v,max} = 0.65$), il potenziale flusso detritico si arresta a monte dell'area di intervento, ad una distanza di circa 1 km dalle opere in progetto (i.e. tratto di raccordo con la linea storica e attraversamento del T. Acquara).

Nello scenario 2 ($C_{v,max} = 0.50$), il potenziale flusso detritico percorre invece una distanza tale da giungere, sebbene con tiranti modesti (< 0.20 m), al Torrente Cervaro passando attraverso il ponte in progetto, sul tratto di raccordo con la linea esistente. Non si rilevano criticità per le strutture ferroviarie.

Possibili fenomeni di interrimento in corrispondenza dell'opera in progetto, dovuti al trasporto, all'erosione e alla deposizione di materiale solido, sono valutati tramite appositi modelli idraulici a fondo mobile, illustrati nel capitolo precedente.

La conformazione e la morfologia del sistema "bacino-conoide" del T. Acquara, come anche dimostrato dagli abachi impiegati inizialmente in via speditiva, limitano/sfavoriscono la propagazione verso valle di possibili fenomeni di colate detritiche.

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 delle 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.

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

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).

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.

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

Infine è stata valutata anche la vulnerabilità dell'opera a possibili fenomeni di *debris flow* nel sistema “bacino-conoide” del T. Acquara.

Le simulazioni numeriche della propagazione di tali fenomeni lungo l'asta fluviale del T. Acquara hanno dimostrata l'assenza di criticità per le opere in progetto.

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 ³ /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
Acquara**	0,050	Carico entrante pari a 21 t/giorno	deposizione	media	alto
IN06	0,004	Carico entrante nullo	deposizione	media	alto
Bacino B4	0,008	Carico di equilibrio	stabile	bassa	basso
Cantalanotte	0,08	Carico di equilibrio	stabile	bassa	basso

** per il Torrente Acquara è stato simulato l'idrogramma di piena con $T = 10$ anni per valutare l'effetto del contributo solido proveniente dai versanti di monte

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA BOVINO – ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA MINORI – RELAZIONE	COMMESSA IF1W	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

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.
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., & Quattrini, S. (2000). *Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans*. In International Symposium INTERPRAEVENT 2000, pp.213-225.
- 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*: Geologica 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

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

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

Marchi L. & Tecca P.R. (1996). *Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali italiane*. GEAM, **33** (2-3), p. 79-86.

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

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

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

V. Scorpio (2011). “Analisi Geomorfologica dei sistemi bacino-conoide dell'Appennino campano: scenari di suscettibilità alluvionale”. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, XXIV ciclo. FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI. UNIVERSITA' DEGLI STUDI FEDERICO II NAPOLI

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

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

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