





## INDICE

1.	INTRODUZIONE .....	4
1.1	OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO .....	4
1.2	METODOLOGIA DI LAVORO .....	4
1.3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	5
1.4	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO .....	8
2.	CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO .....	8
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'INTERVENTO .....	8
2.2	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA .....	9
2.3	CARATTERISTICHE AMBIENTALI E PAESISTICHE DELLA REGIONE FLUVIALE .....	10
2.4	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO .....	11
2.4.1	<i>Assetto del bacino</i> .....	11
2.4.2	<i>Assetto dei versanti e propensione al dissesto</i> .....	14
2.4.3	<i>Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo</i> .....	20
2.4.4	<i>Caratteristiche granulometriche del Torrente Cervaro</i> .....	22
2.4.5	<i>Indice di Dinamica Morfologica (IDM)</i> .....	23
2.4.5.1	<i>Metodo IDRAIM</i> .....	23
2.4.5.2	<i>Applicazione al caso di studio</i> .....	27
2.5	APPORTO DI SEDIMENTI AL TRATTO DI STUDIO .....	28
2.6	ANDAMENTO DELLE PORTATE LIQUIDE (DI MEDIO PERIODO) .....	28
3.	VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO .....	30
3.1	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO .....	30
3.1.1	<i>La teoria di Shields per il moto incipiente</i> .....	30
3.1.4	<i>Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità</i> .....	37

3.2	MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE .....	44
3.2.1	<i>HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti</i> .....	44
3.2.1.1	<i>Cenni generali</i> .....	44
3.2.1.2	<i>Funzionamento del programma</i> .....	45
3.2.2	<i>Schematizzazione idraulica adottata</i> .....	47
3.2.2.1	<i>Geometria del modello</i> .....	47
3.2.2.2	<i>Scabrezza idraulica</i> .....	47
3.2.2.3	<i>Condizioni al contorno</i> .....	48
3.2.2.4	<i>Limiti del fondo erodibile</i> .....	50
3.2.2.5	<i>Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo</i> .....	51
3.2.2.6	<i>Formula di trasporto solido</i> .....	51
3.2.2.7	<i>Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo</i> .....	52
3.2.2.8	<i>Granulometria del fondo alveo</i> .....	52
3.3	MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO.....	53
3.3.1	<i>Tendenza all'erosione e alla deposizione</i> .....	53
4.	CONCLUSIONI .....	55
4.1	ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO .....	55

## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1:	STRALCIO DELLA CARTA GEOMORFOLOGICA.....	9
FIGURA 2-2:	STRALCIO DELLA CARTOGRAFIA DEL PSAI PUGLIA, PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA.....	10
FIGURA 2-3:	LEGENDA DELLA CARTOGRAFIA DELLO PSAI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DELLA PUGLIA .....	10
FIGURA 2-4:	STRALCIO DEI PRINCIPALI ELEMENTI GEOMORFOLOGICI A SW DELL'IMBOCCO NORD-ORIENTALE DELLA GALLERIA "HIRPINIA" (SCALA 1:10.000).....	12
FIGURA 2-5:	VISTA DEI MOVIMENTI FRANOSI CHE INTERESSANO L'IMPLUVIO A NE DI PANNI, A MONTE DELL'IMBOCCO NORD-ORIENTALE DELLA GALLERIA "HIRPINIA" .....	13
FIGURA 2-6:	STRALCIO DEI PRINCIPALI ELEMENTI GEOMORFOLOGICI LUNGO IL VERSANTE SUD-OCCIDENTALE SU CUI SORGE IL CENTRO ABITATO DI PANNI (SCALA 1:10.000) .....	14
FIGURA 2-7:	TORRENTE ACQUARA: CONOIDE ALLUVIONALE .....	16
FIGURA 2-8:	AREA CONOIDE VS AREA BACINO: VALORI CARATTERISTICI DI SISTEMI BACINO-CONOIDE INTERESSATI DA FENOMENI DI TRASPORTO DI MATERIALE DETRITICO.....	17
FIGURA 2-9:	PENDENZA CONOIDE VS AREA BACINO: VALORI CARATTERISTICI DI SISTEMI BACINO-CONOIDE INTERESSATI DA TRASPORTO DI MATERIALE DETRITICO .....	18
FIGURA 2-10:	PENDENZA CONOIDE VS INDICE DI MELTON PER I SISTEMI "BACINO-CONOIDE" CAMPANI (SCORPIO, 2011). .....	20
FIGURA 2-11:	DISTRIBUZIONE TEORICA DELLA GRANULOMETRIA DEI SEDIMENTI IN UNA FORMA DI DEPOSITO.....	21
FIGURA 2-12:	CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE CER02 DEL TORRENTE CERVARO .....	23
FIGURA 2-13 –	SCHEMA GENERALE DELLA STRUTTURA DEL METODO IDRAIM. ....	25
FIGURA 2-14:	ESTRATTO DEGLI ANNALI IDROLOGICI PER IL TORRENTE CERVARO ALLA STAZIONE DI INCORONATA .....	29

FIGURA 3-1: SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UNA PARTICELLA SOLIDA AL FONDO DI UN CORSO D'ACQUA .....	30
FIGURA 3-2: DIAGRAMMA DI SHIELDS.....	32
FIGURA 3-3: BILANCIO DI MASSA DEI SEDIMENTI NEL VOLUME DI CONTROLLO .....	34
FIGURA 3-4: ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DEI LIMITI DEL FONDO MOBILE COINCIDENTI CON I LIMITI DEL CANALE PRINCIPALE .....	50
FIGURA 3-5: ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DELLA MASSIMA PROFONDITÀ ERODIBILE .....	51
FIGURA 3-6: SCHEMA DEL METODO DI MESCOLAMENTO DEL FONDO ALVEO .....	52
FIGURA 3-7: TORRENTE CERVARO, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE A FONDO MOBILE) .....	54

## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2.4-1: CARATTERISTICHE MORFOMETRICHE DEL SISTEMA "BACINO-CONOIDE" DEL T. ACQUARA .....	15
TABELLA 2.4-2: CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE DEI CORSI D'ACQUA IN ESAME .....	23
TABELLA 2.4-3 – LISTA DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL'IDM.....	27
TABELLA 2.4-4 – 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.....	28
TABELLA 3.1-1: LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLE FORMULE DI TRASPORTO SOLIDO .....	38
TABELLA 3.2-1: VALORI DI SCABREZZA ADOTTATI.....	48
TABELLA 3.2-2: VALORI DI PORTATA MEDIA MENSILE SIMULATI .....	48
TABELLA 3.3-1: STIMA DELLA TENDENZA EVOLUTIVA.....	53
TABELLA 4.1-1 – VALORI DELL'INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA .....	56
TABELLA 4.1-2 – VALORI DELL'INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA .....	56
TABELLA 4.1-3: LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA PER I CORSI D'ACQUA IN ESAME .....	57

	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 4 di 72

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Obiettivi e contenuti dello Studio

La presente Relazione riferisce in merito all'analisi di geomorfologia fluviale relativa al Torrente Cervaro nella zona di Orsara di Puglia, che è interessato dal Progetto Definitivo del raddoppio della tratta ferroviaria Apice-Orsara – Il Lotto funzionale Hirpinia-Orsara con il viadotto denominato appunto "VI01 – Viadotto Cervaro". Lo studio geomorfologico viene condotto con l'obiettivo di valutare la tendenza evolutiva del corso 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'ufficienza 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 4.1).

### 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)

	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 6 di 72

### **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 IF1V02D69RGGE0001001A e nella Relazione di compatibilità geomorfologica IF1V02D69RGGE0001002A.

### **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 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

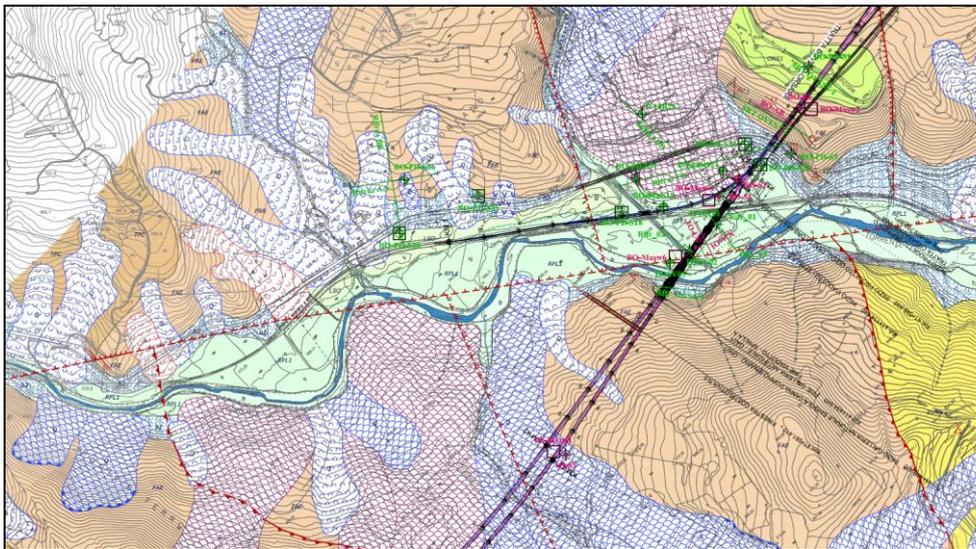
La documentazione di riferimento è la seguente:

Relazione geologica, idrogeologica, geomorfologica e sismica	IF1V02D69RGGE0001001A
Carta geologica-geomorfologica con elementi geostrutturali	IF1V02D69G5GE0001001A
Planimetria sistemazione idraulica Torrente Cervaro – viadotto VI01	IF1V02D09P7ID0102001A
Tipologico Sistemazione Idraulica Torrente Cervaro	IF1V02D09PZID0102001A
Sezioni sistemazione idraulica Torrente Cervaro – viadotto VI01	IF1V02D09WZID0102001A
Carta di sintesi dello studio geomorfologico	IF1V02D09G4ID0002001A

## 2. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

### 2.1 Inquadramento territoriale dell'intervento

Il viadotto sul Torrente Cervaro si trova in prossimità dell'attuale stazione di Orsara, tra le pk 41+114,64 e 41+442,68 della Tratta Apice-Orsara – II° Lotto Funzionale Hirpinia-Orsara, per uno sviluppo complessivo di 313.65 m. La seguente Figura 2-1 mostra uno stralcio della carta geomorfologica IF1V02D69G5GE0001001A.



Forme, processi e depositi gravitativi			
Descrizione	Stato di attività		
	Attivo (A)	Quiescente (Q)	Stabilizzato (S)
Scioglimento rotazionale/traslativo	ricchia		
	corpo		
Colamento lento	ricchia		
	corpo		
Complesso	ricchia		
	corpo		
Area a franosità diffusa	ricchia		

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			
Conolite 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 a quali classi di pericolosità sono associati i dissesti presenti sui versanti del Torrente Cervaro.

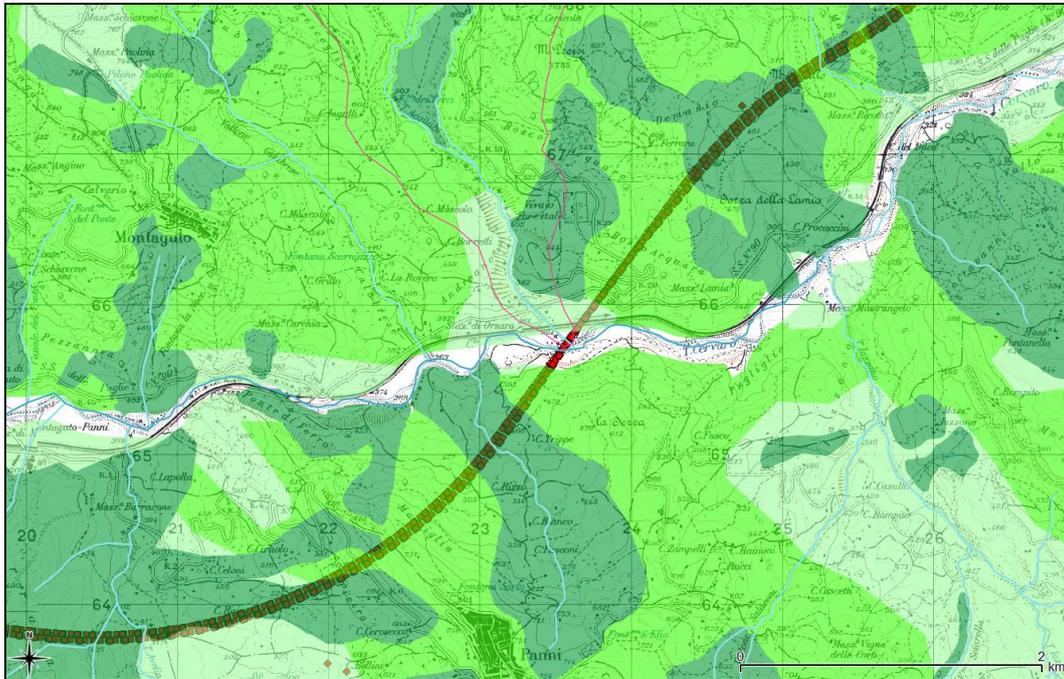


Figura 2-2: Stralcio della cartografia del PSAI Puglia, Pericolosità geomorfologica

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

### 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.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 11 di 72</p>

## 2.4 Assetto geomorfologico del Torrente Cervaro

### 2.4.1 Assetto del bacino

L'assetto geomorfologico del bacino del Torrente Cervaro è desunto dalla caratterizzazione geomorfologica effettuata per il progetto in esame, riportata nell'elaborato IF1V02D69RGGE0001001A 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 "Hirpinia" è essenzialmente privo di fenomeni di dissesto, in quanto caratterizzato dalla presenza dei litotipi calcareo-marnosi del Flysch di Faeto. Poche centinaia di metri a SW dell'imbocco, invece, si rinviene un'estesa area di impluvio caratterizzata dalla presenza di estesi movimenti franosi quiescenti e stabilizzati, essenzialmente riconducibili a colamenti e frane complesse in terra e detrito impostati nei termini litologici del Flysch di Faeto (Figura 2-4). I fenomeni più estesi presentano spessori dell'ordine di alcune decine di metri, fino ad un massimo di 50 m, ma in relazione alla loro posizione topografica non presentano interferenze dirette con la galleria in progetto.

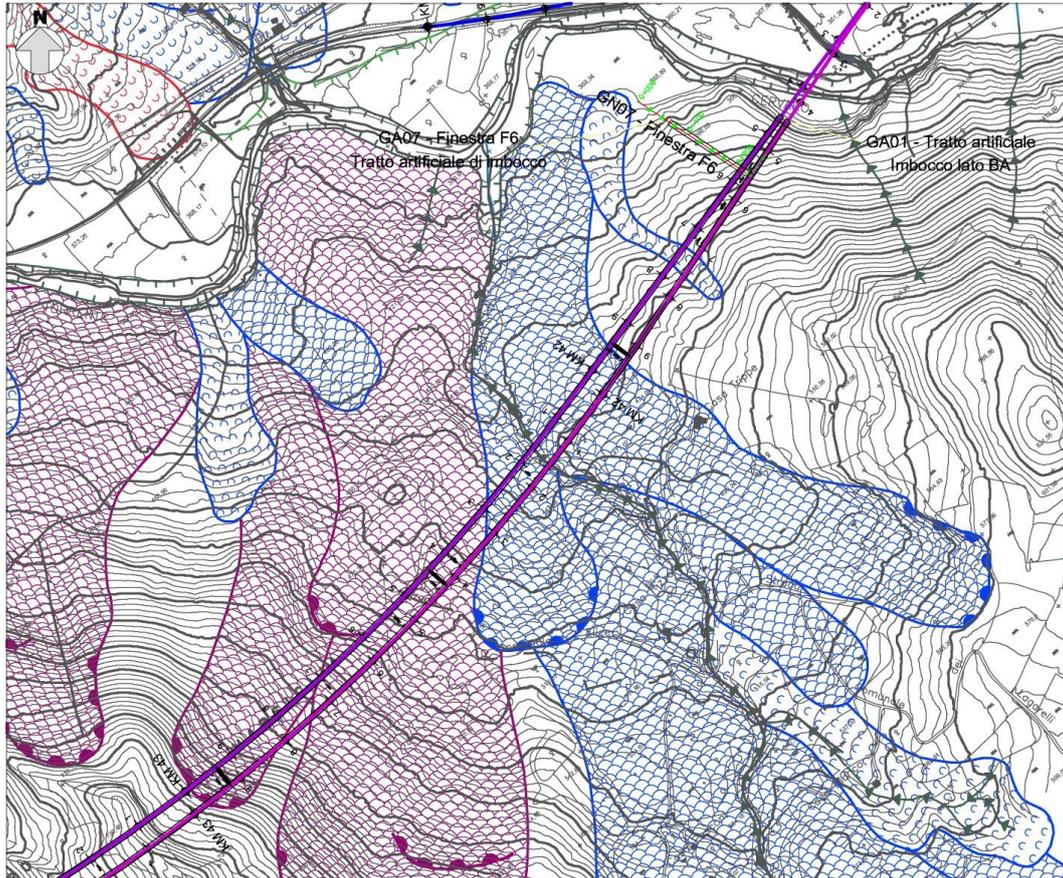


Figura 2-4. Stralcio dei principali elementi geomorfologici a SW dell'imbocco nord-orientale della galleria "Hirpinia" (scala 1:10.000)



Figura 2-5. Vista dei movimenti franosi che interessano l'impluvio a NE di Panni, a monte dell'imbocco nord-orientale della galleria "Hirpinia"

Il versante sud-occidentale su cui sorge il centro abitato di Panni, invece, è caratterizzato dalla presenza di estesi colamenti e frane complesse in terra, con stato quiescente, impostati nei termini argilloso-sabbiosi del Sintema di Bovino (Figura 2-6). Tali fenomeni presentano spessori variabili tra pochi metri e diverse decine di metri, fino ad un massimo di 40 m, ma in relazione alle notevoli coperture presenti al di sopra della calotta non interferiscono direttamente con le opere in progetto.

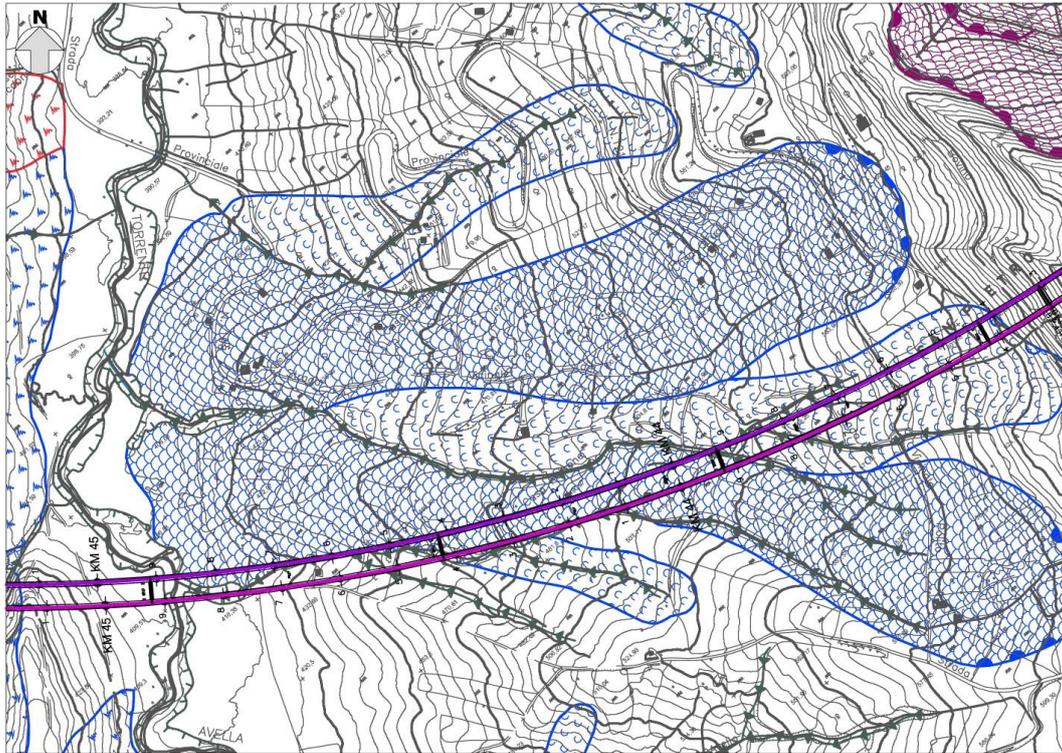


Figura 2-6. Stralcio dei principali elementi geomorfologici lungo il versante sud-occidentale su cui sorge il centro abitato di Panni (scala 1:10.000)

#### 2.4.2 Assetto dei versanti e propensione al dissesto

L'analisi dell'assetto geomorfologico del bacino del Torrente Cervaro mostra che i dissesti, presenti sui versanti e sui bacini delle incisioni affluenti al Cervaro, possono alimentare il trasporto solido del corso d'acqua, nonché essere associati a fenomeni caratterizzati da flussi idrici iperconcentrati e/o *debris-flows*, che potrebbero a loro volta interessare le opere in progetto.

La valutazione del possibile innesco di tali fenomeni può essere condotta, in via speditiva, in base agli approcci proposti da diversi autori, che propongono opportune relazioni tra alcuni parametri morfometrici che caratterizzano i sistemi "*bacino-conoide*".

Nel caso in esame, con riferimento all'elaborato IF1V02D09G4ID0002001A, la linea ferroviaria in progetto interferisce con il sistema "*bacino-conoide*" del Torrente Acquara (Figura 2-7), affluente in sinistra idraulica del T. Cervaro. I parametri morfometrici di tale sistema, valutati mediante elaborazioni

	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 15 di 72

geostatistiche in ambiente GIS del rilievo Lidar (risoluzione 1x1 m) fornito dal Ministero dell’Ambiente, sono riportati in Tabella 2.4-1.

Tabella 2.4-1: Caratteristiche morfometriche del sistema “bacino-conoide” del T. Acquara

<b><i>Superficie bacino (km<sup>2</sup>)</i></b>	4.7
<b><i>Lunghezza asta (km)</i></b>	4.0
<b><i>Quota massima (m slm)</i></b>	847.6
<b><i>Quota minima (m slm)</i></b>	350.5
<b><i>Quota media (m slm)</i></b>	637.2
<b><i>Area conoide (kmq)</i></b>	0.15
<b><i>Pendenza media conoide (°)</i></b>	8.5
<b><i>Quota apice conoide (m slm)</i></b>	372.7
<b><i>Quota unghia conoide (m slm)</i></b>	349.0
<b><i>Lunghezza canale in conoide (km)</i></b>	0.463
<b><i>Pendenza canale in conoide (%)</i></b>	5.1

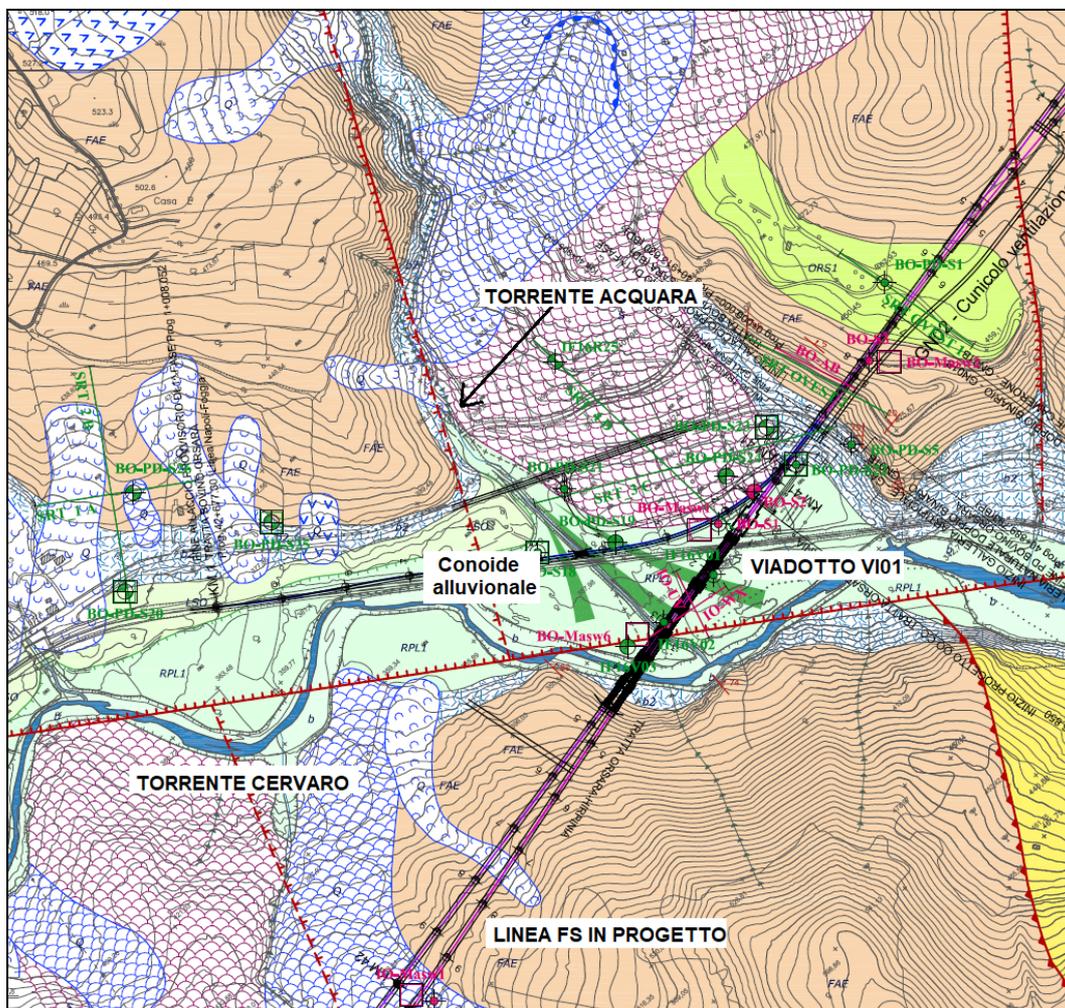


Figura 2-7: Torrente Acquara: conoide alluvionale

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:

$$Af = c \cdot Ab^k \quad (2.1)$$

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

Il coefficiente  $c$ , varia tra 0,1 e 2,2 (Harvey, 1997) e tiene conto dell'ubicazione geografica; dipende da fattori locali come l'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  $A_f$  e  $A_b$  caratteristici di sistemi *bacino-conoide* interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico verso valle. Si riportano su tale grafico (Figura 2-8) i valori di  $A_f$  e  $A_b$  relativi al sistema *bacino-conoide* del T. Acquara: il punto corrispondente ricade all'esterno del campo dei valori sopra definito.

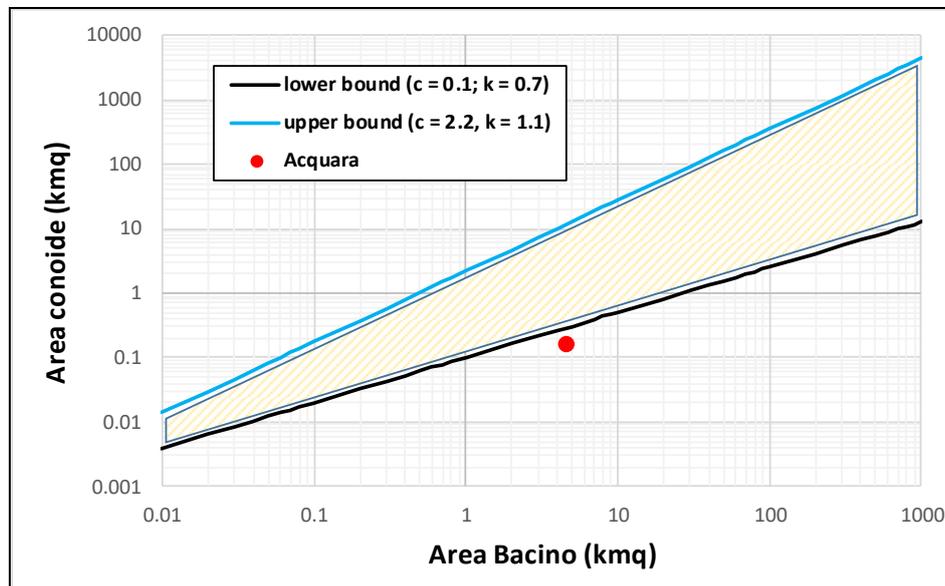


Figura 2-8: Area conoide vs area bacino: valori caratteristici di sistemi bacino-conoide interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico

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:

$$Sf = a \cdot Ab^m \quad (2.2)$$

in cui  $Sf$  è la pendenza del conoide (in gradi),  $Ab$  l'area del bacino ( $\text{km}^2$ );  $a$  è un coefficiente sperimentale che assume valori compresi tra 0,03 e 0,17 (Harvey, 1997);  $m$  rappresenta la variazione della pendenza del conoide con l'aumento dell'area del bacino; in genere varia tra -0,35 e -0,15 (Harvey, 1997). La relazione riflette la maggiore capacità di immagazzinare sedimenti da parte dei bacini più grandi. Inoltre, con l'aumento del rapporto ( $Ab/Sf$ ) diminuisce il valore della pendenza in quanto la deposizione si verifica in punti più distali. Anche per questa relazione, sulla base del range di variabilità dei coefficienti empirici  $a$  e  $m$ , è stato ricavato il campo dei valori di  $Sf$  e  $Ab$  caratteristici di sistemi *bacino-conoide* interessati da fenomeni di trasporto di materiale detritico (Figura 2-9). Riportando su tale grafico i valori di  $Sf$  e  $Ab$  relativi al sistema *bacino-conoide* del T. Acquara si osserva che il punto corrispondente ricade appena fuori dal campo dei valori caratteristici.

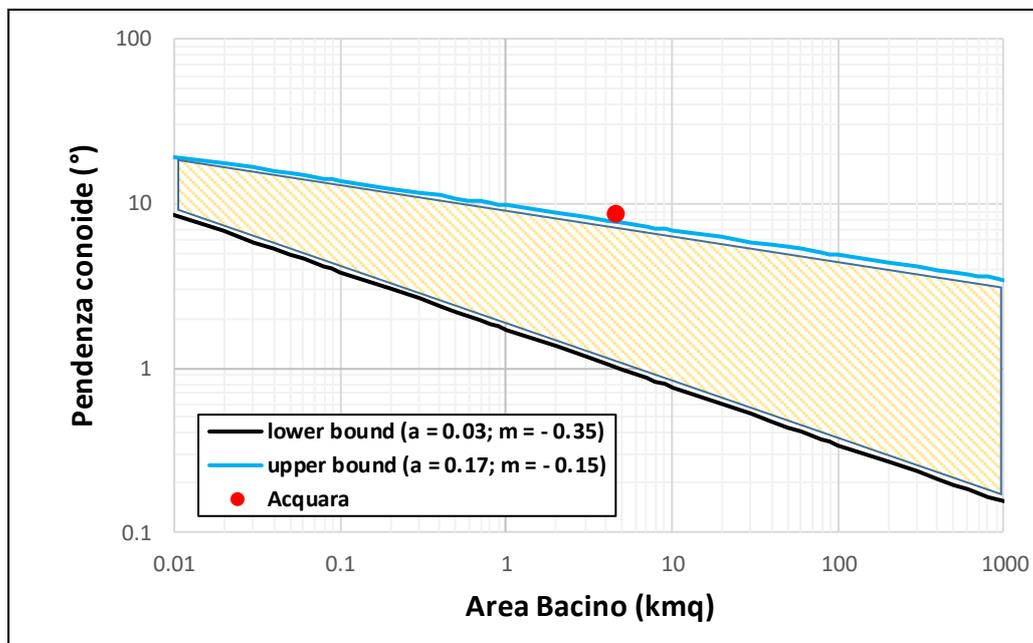


Figura 2-9: Pendenza conoide vs area bacino: valori caratteristici di sistemi bacino-conoide interessati da trasporto di materiale detritico

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 19 di 72</p>

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):

$$R = Ab^{0,5} \cdot (Q_{b,max} - Q_{b,min}) \quad (2.3)$$

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

$$S = q \cdot R^n \quad (2.4)$$

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 2-10 (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 2-10, 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*.

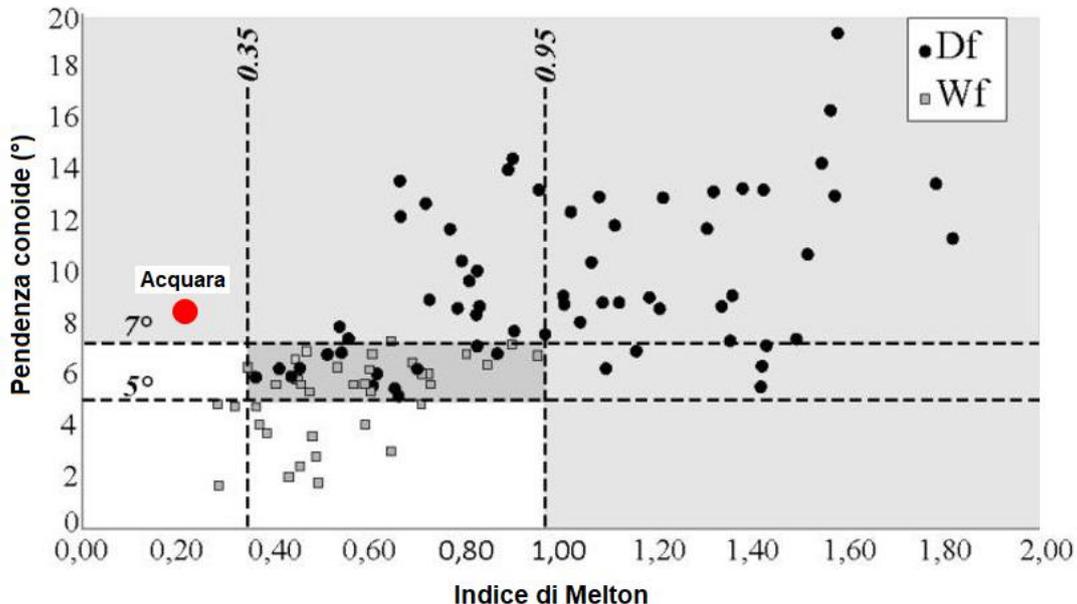


Figura 2-10: Pendenza conoide vs indice di Melton per i sistemi "bacino-conoide" campani (Scorpio, 2011).

In conclusione, sulla base delle valutazioni speditive sopra illustrate e delle risultanze dello studio di compatibilità geomorfologica (elaborato IF1V02D69RGGE0001002A), che evidenzia l'assenza di fenomeni gravitativi in atto, si ritiene che il sistema *bacino-conoide* del T. Acquara non sia caratterizzato da meccanismi di trasporto di materiale detritico proveniente da versanti instabili, tali da interessare le opere in progetto.

#### 2.4.3 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).

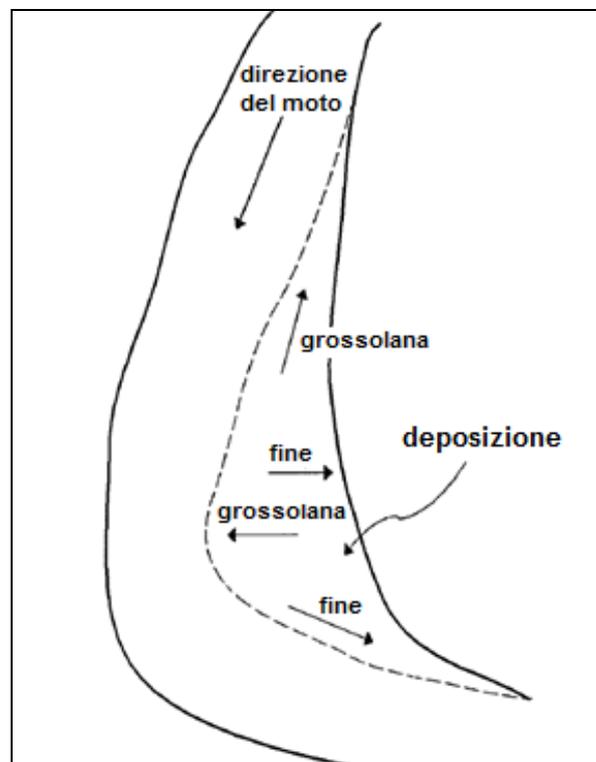


Figura 2-11: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

I fenomeni di trasporto solido presi in considerazione vengono indagati, tra l'altro, con una schematizzazione di calcolo idraulico, descritta nel successivo paragrafo 3.2, nella quale le sezioni vengono considerate omogenee dal punto di vista granulometrico (nessuna variabilità trasversale della granulometria), di conseguenza, poiché il campione di materiale d'alveo deve essere rappresentativo di ciò che può essere movimentato anche dalle basse portate, si possono individuare le seguenti condizioni per la scelta del punto di prelievo.

- Esame visivo della sezione:

	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 22 di 72

- Sedimenti deposti 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

#### **2.4.4 Caratteristiche granulometriche del Torrente Cervaro**

Il campione prelevato secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.4.3 è stato analizzato in laboratorio per la determinazione della curva granulometrica, riportata nella seguente Figura 2-12 e sintetizzata nella seguente Tabella 2.4-2, in cui è riportato il diametro caratteristico  $D_{50}$ . Il corso d'acqua indagato è caratterizzato da materiale appartenente alla classe granulometrica delle ghiaie medie.

Tabella 2.4-2: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame

Corso d'acqua	Codice punto di prelievo	D <sub>50</sub> (mm)
Cervaro	CER02	10

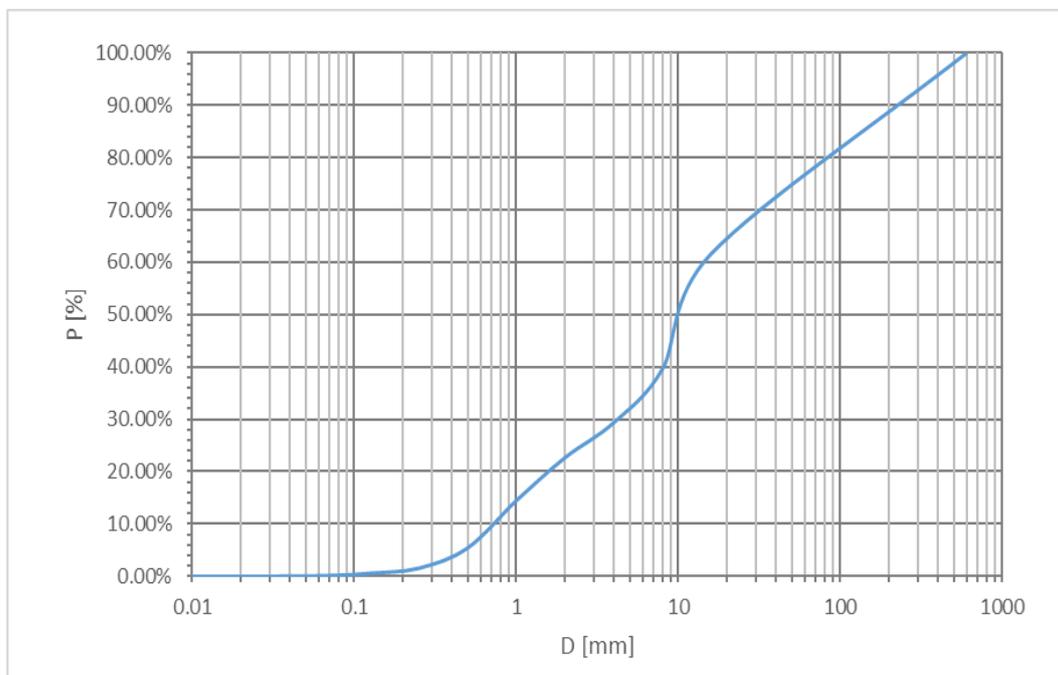


Figura 2-12: Curva granulometrica del campione CER02 del Torrente Cervaro

## 2.4.5 Indice di Dinamica Morfologica (IDM)

### 2.4.5.1 Metodo IDRAIM

Il “Sistema di valutazione **id**romorfologica, **analisi** e **monitoraggio** dei corsi d'acqua”, denominato IDRAIM, costituisce un quadro metodologico complessivo di analisi, valutazione post-monitoraggio e di definizione delle misure di mitigazione degli impatti ai fini della 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 2-13. Si sottolinea che si tratta di uno strumento metodologico flessibile a seconda delle finalità per le quali viene impiegato, in cui ogni componente può essere affrontata per livelli di approfondimento crescenti, tenendo conto degli obiettivi e delle esigenze specifiche. I metodi utilizzati per la valutazione della qualità e della **dinamica morfologica** presentano un'analogia e coerente impostazione. Essi possono essere utilizzati insieme o anche separatamente, secondo l'esigenza di analizzare entrambi gli aspetti o uno solo di essi. Infine, i due aspetti di qualità morfologica e pericolosità da dinamica morfologica sono tenuti concettualmente separati, ma una delle finalità del metodo è di fare emergere le conflittualità e individuare le possibili azioni per tenere conto dei diversi obiettivi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b> <b>RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA</b> <b>II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE</b> <b>CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

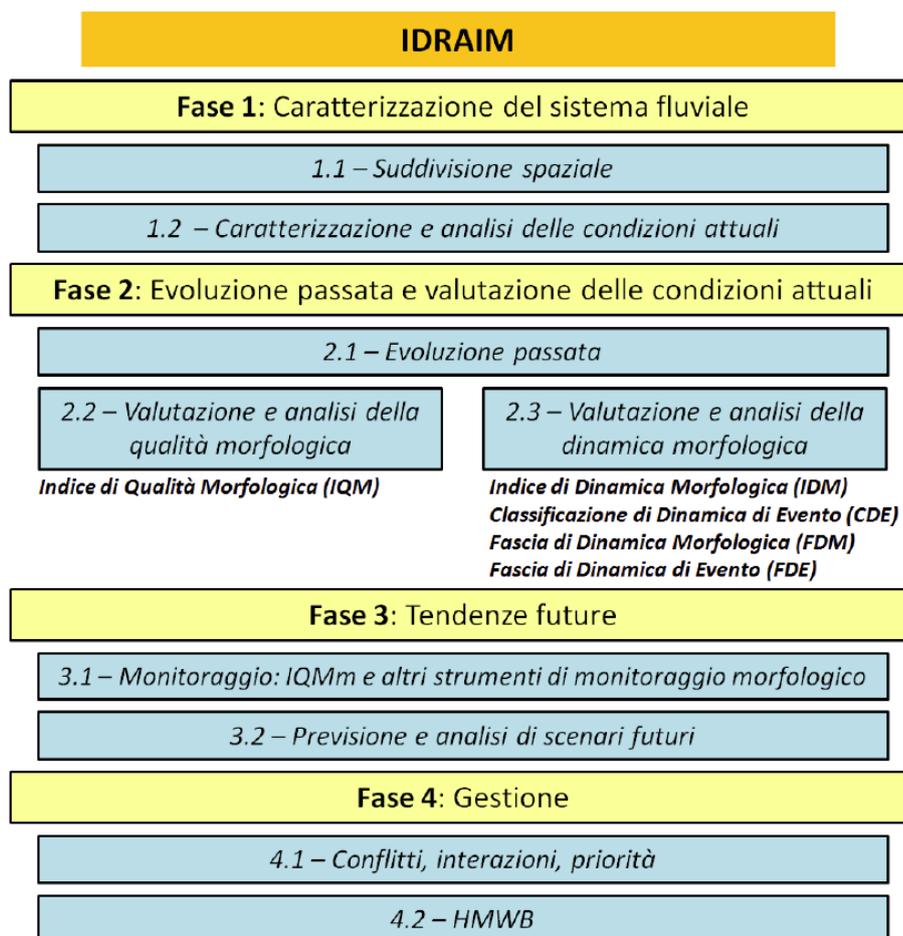


Figura 2-13 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.

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.).

#### 2.4.5.2 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 2.4-3.

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 2.4-3 – Lista degli indicatori per la valutazione dell'IDM

SIGLA	INDICATORE
<b>Morfologia e Processi</b>	
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
<b>Artificialità</b>	
A1	Difese di sponda
A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo
<b>Variazioni morfologiche</b>	
V1	Variazione della configurazione morfologica
V2	Variazioni di larghezza
V3	Variazioni altimetriche

Il risultato dell'applicazione viene riportato in Tabella 2.4-4, 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). Nell'Allegato 2 alla presente Relazione sono riportate le Schede complete per la valutazione dell'IDM.

Tabella 2.4-4 – 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.

Denominazione corso d'acqua	Lunghezza tratto [m]	Indice di Dinamica Morfologica (IDM)	Classe di Dinamica Morfologica				
			Molto bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
Torrente Cervaro	3891	0.64					

## 2.5 Apporto di sedimenti al tratto di studio

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 del corso d'acqua oggetto di studio, come meglio descritto nel seguito al capitolo 3.

Il Torrente Cervaro è caratterizzato da una dinamica morfologica elevata, 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.

## 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 delle portate medie mensili per il periodo di funzionamento della stazione idrometrica di Incoronata.

10 - CERVARO AD INCORONATA (Mr)

Anno 2012

CARATTERISTICHE DELLA STAZIONE: a) Bacino di dominio 657 Km<sup>2</sup> (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 m<sup>3</sup>/s (17 gennaio 1957); minima 0.00 m<sup>3</sup>/s (vari).

ELEMENTI CARATTERISTICI PER L'ANNO 2012													
	ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Q max (m <sup>3</sup> /s)	34.36	-	34.36	14.26	5.84	1.25	0.74	-	-	0.83	0.29	3.08	10.24
Q media (m <sup>3</sup> /s)	1.49	-	5.06	3.72	2.07	0.92	0.11	-	-	0.31	0.29	0.50	4.94
Q minima (m <sup>3</sup> /s)	-	-	-	1.60	1.25	0.74	-	-	-	0.00	0.29	-	1.08
Q media (l/s Km <sup>2</sup> )	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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q media (l/s Km <sup>2</sup> )	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 2-14: estratto degli Annali idrologici per il Torrente Cervaro alla stazione di Incoronata

### 3. VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO

#### 3.1 Modelli matematici per il trasporto solido

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

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

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

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

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

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

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

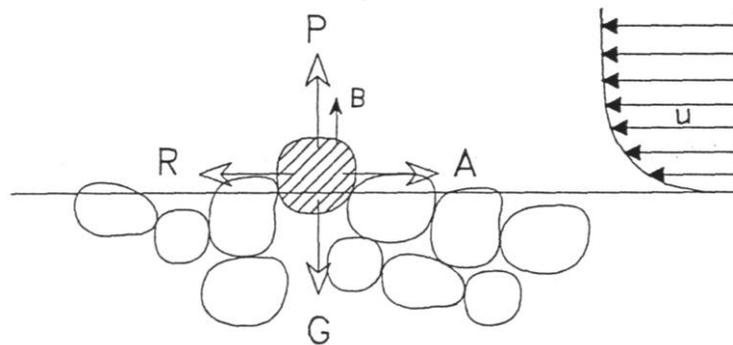


Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

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  $\theta_{cr}$ , prende il nome di *parametro di stabilità* o di mobilità di Shields

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

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

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

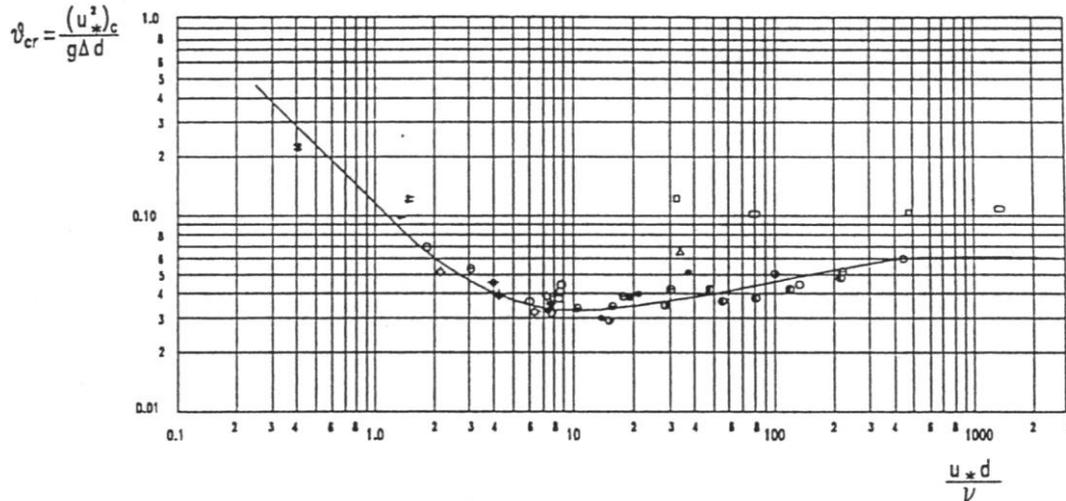


Figura 3-2: Diagramma di Shields

Questa curva separa la zona di mobilità delle particelle da 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:

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 33 di 72</p>

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

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

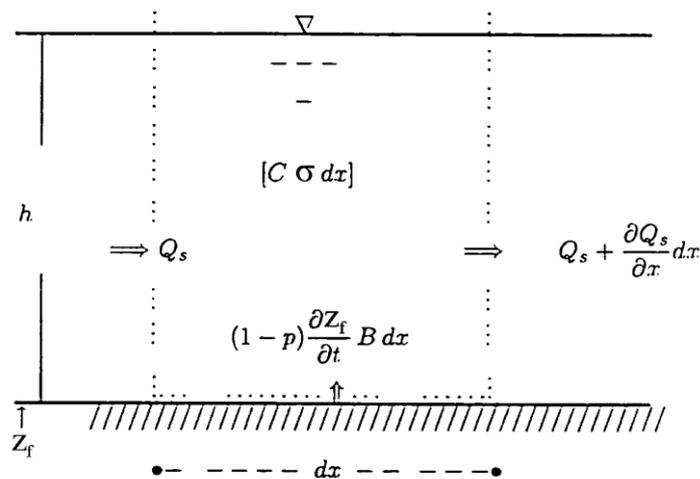


Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- 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 3.2, 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 3.1-1, 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 3.1-1: limiti di applicabilità delle formule di trasporto solido

Autore	d <sub>50</sub> [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	4·10 <sup>-4</sup> ÷ 2·10 <sup>-2</sup>			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 esprime il parametro di Einstein  $\Psi$  (intensità della corrente) come:

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

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

Egli divide l'altezza della corrente in tre zone:

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

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:

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

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

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

La distribuzione della concentrazione dei sedimenti è espressa da:

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

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

Per la zona centrale:

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

nella quale  $w_s$  è la velocità di sedimentazione della particella in piedi/s e  $C_z$  è un fattore correttivo per la temperatura che vale  $260.67 - 0.667T$  (con  $T$  in °F). L'esponente  $z$  della distribuzione della

concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore ed in quella superiore sono, rispettivamente, 0.756 e 1.5 volte quello della zona centrale.

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

### 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):

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

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

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

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

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

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

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

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

$$C = 10^{[2.861 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53]}$$

per  $d_{gr} > 60$

$$n = 0.0$$

$$A = 0.170$$

$$m = 1.50$$

$$C = 0.025$$

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:

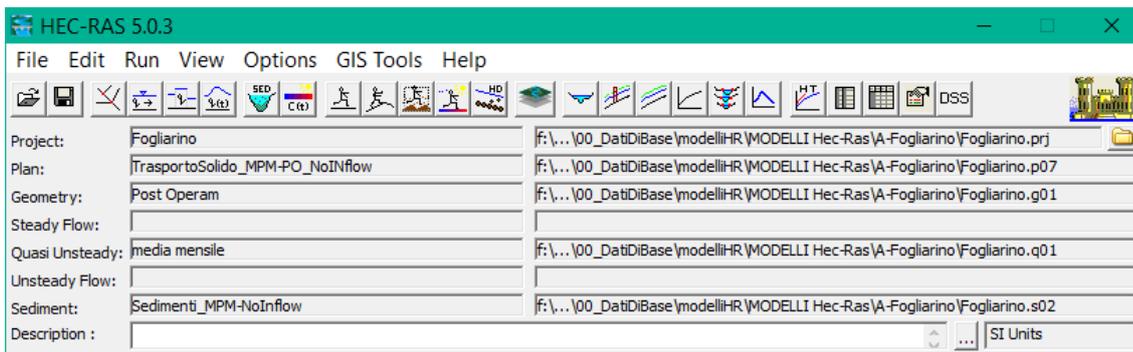
$$q_s = q_f + q_{ss} = \omega \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left( \frac{e_f}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{u_s}{w_s} \right) \frac{1}{\rho_s}$$

## 3.2 Modello di calcolo idraulico a fondo mobile

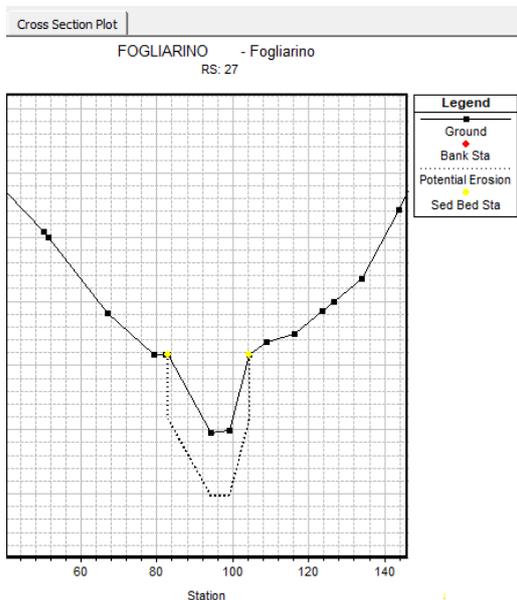
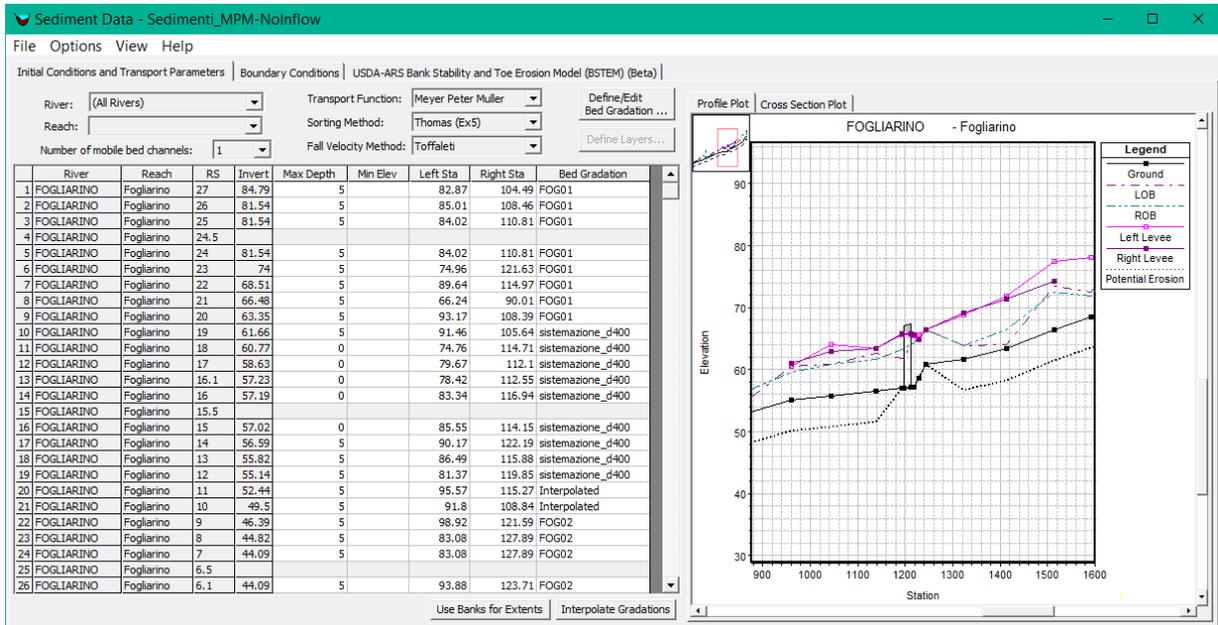
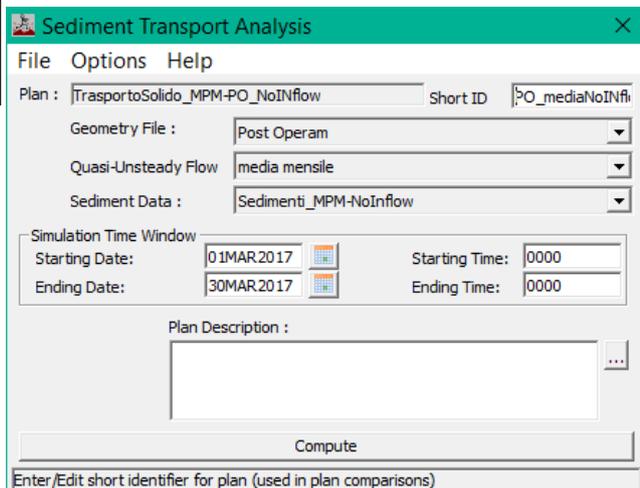
### 3.2.1 HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti

#### 3.2.1.1 Cenni generali

HEC-RAS<sup>1</sup> è un noto codice di calcolo per il moto di correnti idriche in simulazione monodimensionale di una rete di canali naturali e/o artificiali, messo a punto dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito Americano. La versione 4.0.x del codice ha incluso la possibilità di svolgere analisi sul trasporto di sedimenti, basate sulla metodologia già in uso nel vecchio codice HEC-6<sup>2</sup> e disponibili anche nella versione 5.0.5 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)

**Sediment Transport Analysis**

File Options Help

Plan : TrasportoSolido\_MPM-PO\_NoInflow | Short ID : O\_mediaNoInfl

Geometry File : Post Operam  
 Quasi-Unsteady Flow : media mensile  
 Sediment Data : Sedimenti\_MPM-NoInflow

Simulation Time Window  
 Starting Date : 01MAR2017 | Starting Time : 0000  
 Ending Date : 30MAR2017 | Ending Time : 0000

Plan Description :

Compute

Enter/Edit short identifier for plan (used in plan comparisons)

### 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.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b></p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 46 di 72</p>

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

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

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

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

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

Il programma utilizza come equazione di continuità quella di Exner:

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

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

Questa equazione può essere espressa in termini di differenze finite:

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

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;
- $\Delta t$  Passo temporale

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

### 3.2.2 Schematizzazione idraulica adottata

#### 3.2.2.1 Geometria 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 IF1V02D09G4ID0002001A.

#### 3.2.2.2 Scabrezza idraulica

I valori di scabrezza adottati sono riportati nella seguente tabella.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b> <b>RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA</b> <b>II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE</b> <b>CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

Tabella 3.2-1: valori di scabrezza adottati

Corso d'acqua	golena sinistra	canale principale	golena destra
Cervaro	0,06	0,04	0,06

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).

### 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 3.2-2. 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 3.2-2: valori di portata media mensile simulati

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)
Cervaro	7,70

	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 49 di 72

### 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 interesse<sup>3</sup>, si può anche assumere un carico entrante nullo, in modo che siano proprio le prime sezioni di monte a costituire un serbatoio di sedimenti per il modello a fondo mobile. Qualora, però, ci si trovi in condizioni di forte apporto solido dai versanti (in caso di fenomeni franosi attivi, ad esempio), è necessario stimare tale apporto ed introdurlo come condizione al contorno. In alternativa, è anche possibile estrarre dai risultati del codice di calcolo il carico solido uscente 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 il caso in esame, la condizione di carico di equilibrio, in quanto l'analisi di caratterizzazione geomorfologica ha portato a valutare che vi è apporto di sedimenti da monte.

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

### 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.

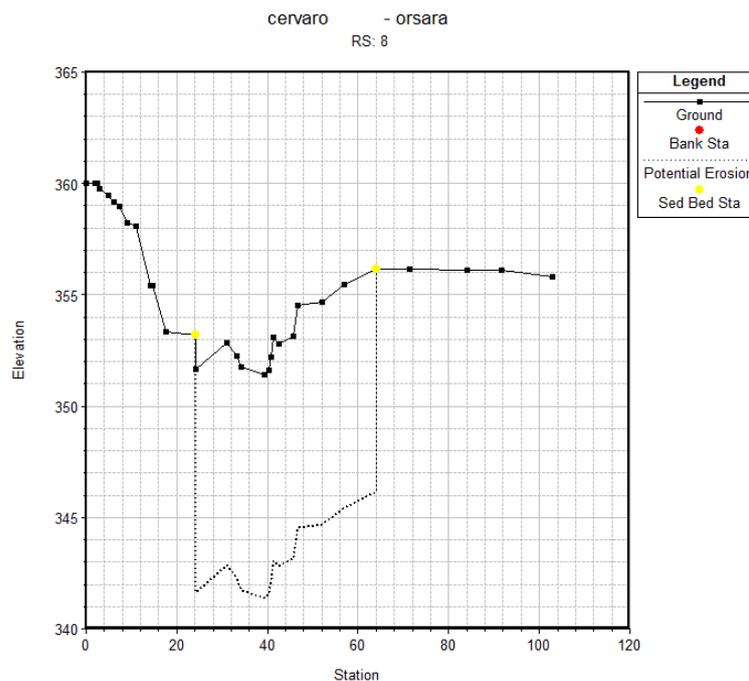


Figura 3-4: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale

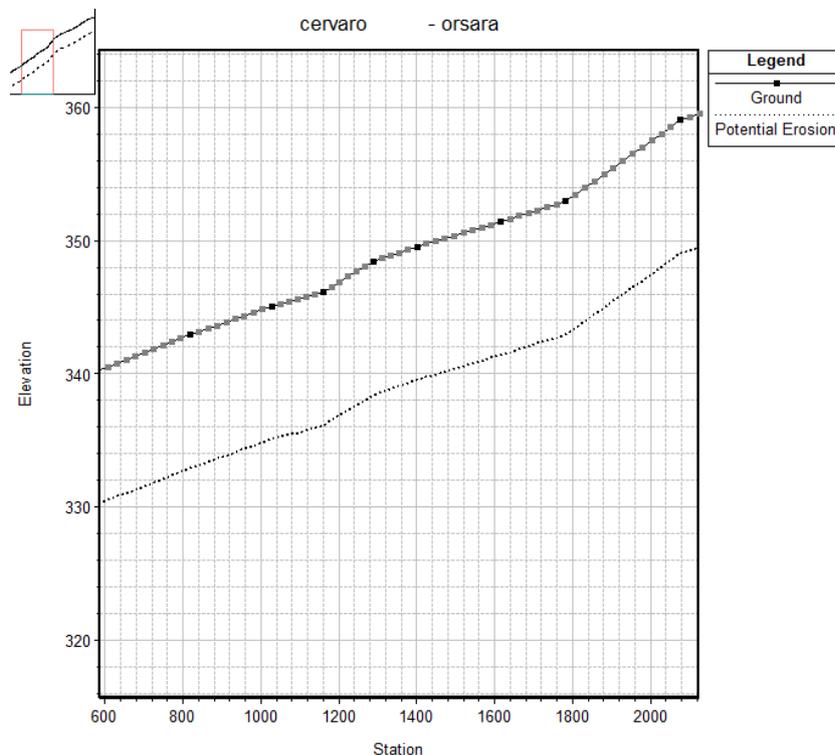


Figura 3-5: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile

### 3.2.2.5 Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo

La morfologia 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 il caso 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.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 52 di 72</p>

### 3.2.2.7 Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo

Le formule di trasporto solido calcolano il trasporto potenziale senza considerare la reale disponibilità di materiale solido movimentabile, la quale dipende dalle caratteristiche granulometriche che influenzano il fenomeno del rimescolamento del fondo con conseguente possibile corazzamento dello stesso (*armoring*). Il codice di calcolo consente quindi di selezionare l'opzione più adatta per rappresentare questo fenomeno e nei casi in esame è stata adottata in prima approssimazione quella di default, che corrisponde al cosiddetto metodo "Exner 5" in cui si considera un modello di fondo alveo a tre strati in cui si forma uno strato corazzato che limita lo scambio di materiale dagli altri due strati.

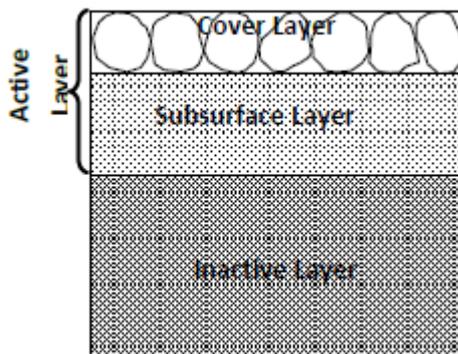


Figura 3-6: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo

### 3.2.2.8 Granulometria del fondo alveo

La granulometria dei sedimenti di cui è costituito il fondo alveo viene rappresentata con la curva granulometrica del campione prelevato secondo i criteri riportati nel precedente paragrafo 2.4.3. 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.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 53 di 72</p>

L'ubicazione del punto di prelievo è riportata nella Tavola IF1V02D09G4ID0002001A e la relativa curva granulometrica è stata associata 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 del Torrente Cervaro, 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 3.2.

Il risultato della simulazione è riportato nella Figura 3-7, che rappresenta 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 3.3-1 riporta in sintesi le condizioni di simulazione ed i risultati ottenuti in termini di tendenza all'erosione o alla deposizione. Nel tratto di interesse il Torrente Cervaro presenta una zona con tendenza alla deposizione poco a monte dell'attraversamento in progetto, mentre in corrispondenza di quest'ultimo si ha una tendenza all'erosione.

Tabella 3.3-1: Stima della tendenza evolutiva

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva
Cervaro	7	Carico di equilibrio	deposizione/erosione

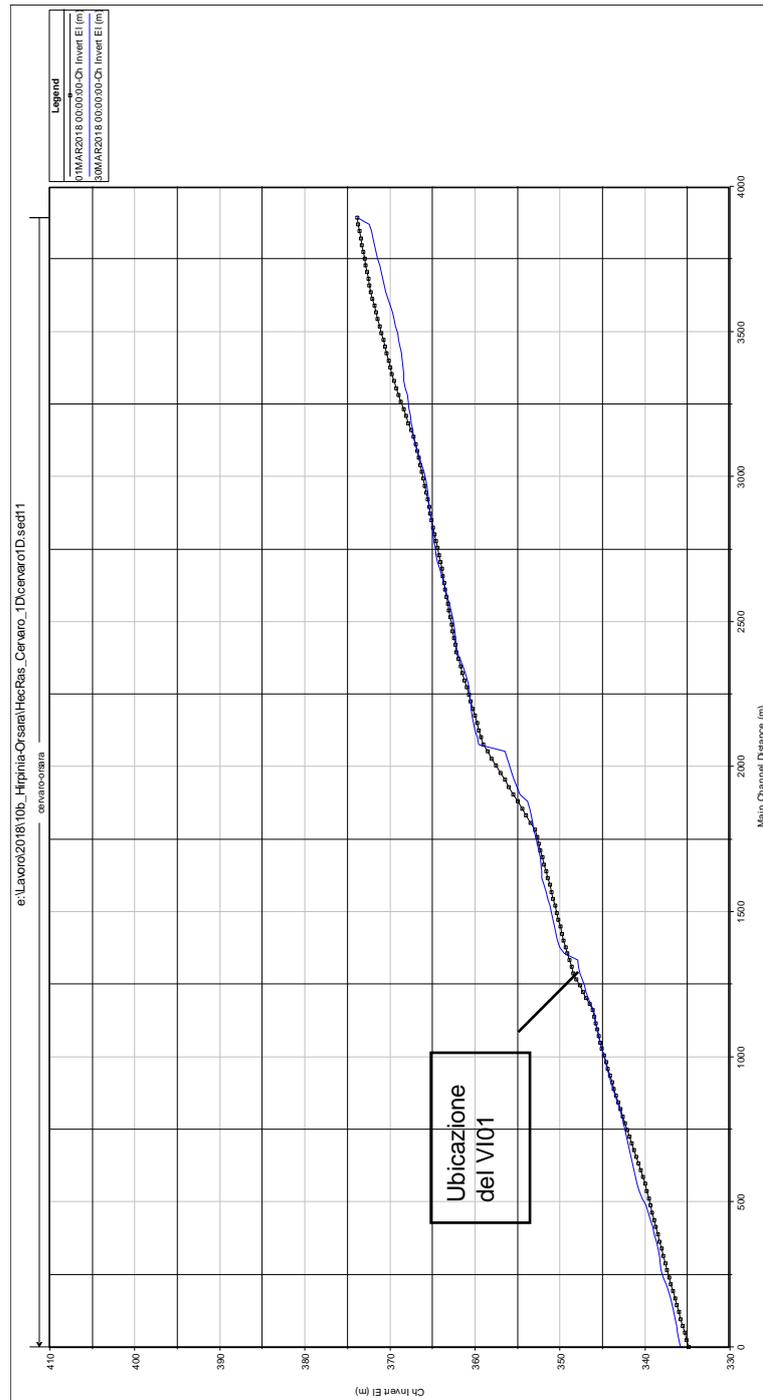


Figura 3-7: Torrente Cervaro, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione a fondo mobile)

	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b>	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 55 di 72

## 4. CONCLUSIONI

### 4.1 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 4.1-1.

Ad ogni valore di *LAm* è possibile associare una indicazione di "frequenza suggerita" per ispezioni manutentive (Tabella 4.1-2), 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 4.1-1 – Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata

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

Tabella 4.1-2 – 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

Tabella 4.1-3: Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata per i corsi d'acqua in esame

Corso d'acqua	Portata media mensile (m <sup>3</sup> /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
Cervaro	7	Carico di equilibrio	deposizione/erosione	alta	alto

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 58 di 72</p>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p><b>STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE CERVARO – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 59 di 72</p>

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.

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.



ITINERARIO NAPOLI – BARI  
RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA  
II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA  
PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE  
CERVARO – RELAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RG	ID0002 001	A	60 di 72

## ALLEGATO 1

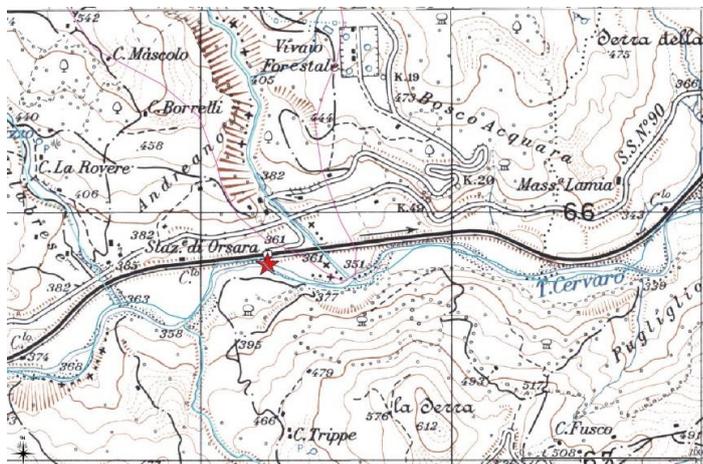
### SCHEDA DI CAMPIONAMENTO GEOMORFOLOGICO

**STUDIO GEOMORFOLOGICO DEL TORRENTE  
CERVARO – RELAZIONE**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RG	ID0002 001	A	61 di 72

PROGETTO	PD Hirpinia-Orsara			
CODICE COMMESSA	IF16.2D01.A01			
CORSO D'ACQUA	TORRENTE CERVARO			
CODICE TRANSETTO	CER02	COORDINATE PUNTO DI PRELIEVO (WGS84)	<b>41.241441° N</b>	<b>15.276922° E</b>
TOPONIMO UBICAZIONE PUNTO DI PRELIEVO	ORSARA DI PUGLIA	COORDINATE PUNTO DI PRELIEVO (Gauss- Boaga)	<b>4565592.63 N</b>	<b>523197.65 E</b>

STRALCIO PLANIMETRICO SU CTR



STRALCIO PLANIMETRICO SU FOTO AEREA



CARATTERIZZAZIONE PUNTO DI PRELIEVO

FOTO DEL TRANSETTO (mostrare punto di prelievo)



FOTO RIPRESA DA

SINISTRA

(specificare sponda sn o sponda dx)

NOTE (eventuali)

VARIABILITÀ TRASVERSALE DEL TRANSETTO

sabbia (da fine a grossolana)

sabbia grossolana e ghiaia fine

ghiaia

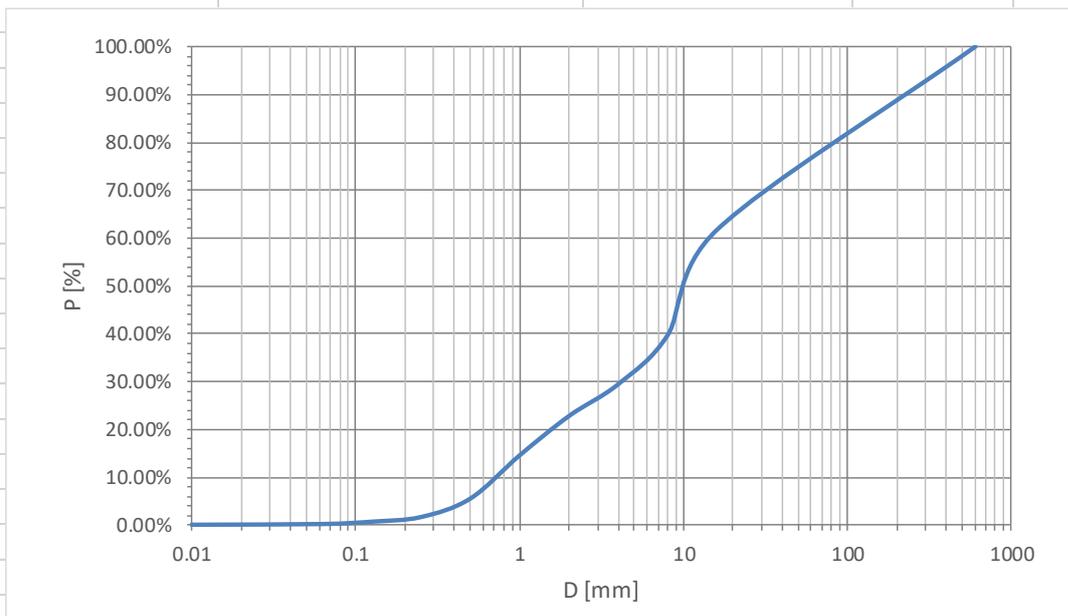
ghiaia e ciottoli

FOTO DEL PUNTO DI PRELIEVO



PUNTO DI PRELIEVO (rispettare il più possibile le seguenti condizioni e barrare quelle che occorrono)

<input type="checkbox"/>	Sedimenti depositi a valle di ostacolo in alveo
<input checked="" type="checkbox"/>	Punto prossimo all'alveo bagnato, ma situato all'asciutto
<input checked="" type="checkbox"/>	Deposito rappresentativo di ciò che si può movimentare con piene ordinarie
<input checked="" type="checkbox"/>	Deposito rappresentativo della variabilità trasversale del transetto
CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE PRELEVATO	
QUANTITÀ	4 574 Kg
<input checked="" type="checkbox"/>	SCARTATI ELEMENTI DI DIMENSIONI > 6 cm
<input type="checkbox"/>	PRESENZA DI MATERIA ORGANICA (es. argilla torbosa)
<input type="checkbox"/>	altro: _____



## ALLEGATO 2

### SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA DINAMICA MORFOLOGICA

IDRAIM

sistema di valutazione IDR morfologica, Analisi e Monitoraggio dei Corsi d'Acqua

Versione IDM 1.0 - Settembre 2015

**IDM - SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA DINAMICA MORFOLOGICA**

**GENERALITÀ**

Data	15/07/2018	Operatori	<i>Cappelli</i>
Bacino	Torrente Cervaro	Corso d'acqua	<i>Torrente Cervato</i>
Estremità monte	1,4 km da confluenza	Estremità valle	1,2 km a valle dell'Acquara
Codice Segmento	CER	Codice Tratto	<i>CER-Orsara</i>
Lunghezza tratto (m) - $L_t$	3891		

**TIPOLOGIA D'ALVEO**

Confinamento	NC	Pendenza media fondo (S)	0.008
Morfologia	SBA	Larghezza media alveo (m) - $La$	30

**DATI UTILIZZATI**

<b>Immagini</b>	<b>per situazione attuale e tendenze laterali</b>	
	nome	anno
Immagine situazione attuale	Volo XX	2014
Immagine ultimi 10-20 anni	Volo YY	2000

<b>Rilievi topografici</b>	<b>per tendenze e variazioni altimetriche</b>	
	nome	anno
Attuale	Rilievo XX	2013
Ultimi 10-20 anni	Rilievo YY	2002
Precedente	Rilievo ZZ	1990

## MORFOLOGIA E PROCESSI

M1 Tipologia d'alveo		pt	scelta	conf	ptconf
A	Configurazione morfologica associata a condizioni di energia estremamente bassa (rettilinei o sinuosi di pianura costiera, fondo sabbioso, privi di barre)	0			
B	Configurazione associata a condizioni di bassa energia (sinuosi, meandriformi o anastomizzati privi di barre)	3			
C	Configurazione morfologica associata a condizioni di medio-elevata energia (sinuosi o meandriformi con barre, sinuosi a barre alternate, letto piano e alvei a <i>riffle-pool</i> )	6	x		
D	Configurazione morfologica associata a condizioni di elevata energia e mobilità laterale ( <i>wandering</i> , a canali intrecciati)	10			

NOTE:

M2 Erodibilità delle sponde		pt	scelta	conf	ptconf
A	Presenza di sponde alluvionali erodibili (non protette) <i>non coesive</i> $\leq 10\%$ o <i>coesive</i> $\leq 33\%$ della lunghezza totale delle sponde (ovvero somma di entrambe)	0			
B	Presenza di sponde alluvionali erodibili (non protette) <i>non coesive</i> $\leq 33\%$ o <i>coesive</i> $\leq 66\%$ della lunghezza totale delle sponde (ovvero somma di entrambe)	2			
C	Presenza di sponde alluvionali erodibili (non protette) <i>non coesive</i> $\leq 66\%$ o <i>coesive</i> $\leq 90\%$ della lunghezza totale delle sponde (ovvero somma di entrambe)	4			
D	Presenza di sponde alluvionali erodibili (non protette) <i>non coesive</i> $\leq 90\%$ o <i>coesive</i> $> 90\%$ della lunghezza totale delle sponde (ovvero somma di entrambe)	6	x		
E	Presenza di sponde alluvionali erodibili (non protette) <i>non coesive</i> $> 90\%$ della lunghezza totale delle sponde (ovvero somma di entrambe)	8			

Nel caso di sponde *prive di copertura vegetale*  $> 10\%$  lunghezza totale: passare alla *classe superiore*

Nel caso di sponde *prive di copertura vegetale*  $> 33\%$  lunghezza totale: passare a *due classi superiori*

Nel caso di *corsi d'acqua di bassa energia* (di risorgiva o  $S \leq 0.001$ ) e  $L_a > 10$  m: passare a *due classi inferiori*

Nel caso di *corsi d'acqua di bassa energia* (di risorgiva o  $S \leq 0.001$ ) e  $L_a \leq 10$  m: si attribuisce alla *classe A*

NOTE:

M3	Erodibilità del fondo	pt	scelta	conf	ptconf
A	Presenza di fondo alluvionale erodibile, non protetto da elementi artificiali (rivestimenti, rampe) e/o naturali (affioramenti, corazzamento) per $\leq 10\%$ lunghezza tratto	0			
B	Presenza di fondo alluvionale erodibile per 10-33% lunghezza tratto	2			
C	Presenza di fondo alluvionale erodibile per 33-66% lunghezza tratto	4			
D	Presenza di fondo alluvionale erodibile per 66-90% lunghezza tratto	6			
E	Presenza di fondo alluvionale erodibile per $>90\%$ lunghezza tratto	8	x		
Nel caso di <i>corsi d'acqua di bassa energia</i> (di risorgiva o $S \leq 0.001$ ) e $La > 10$ m: passare a una classe inferiore					
Nel caso di <i>corsi d'acqua di bassa energia</i> (di risorgiva o $S \leq 0.001$ ) e $La \leq 10$ m: passare a due classi inferiori					

NOTE:

M4	Processi di arretramento delle sponde	pt	scelta	conf	ptconf
A	Completa assenza di sponde in arretramento	0	x		
B	Sponde in arretramento $\leq 5\%$ lunghezza totale (somma di entrambe) oppure: sponde in arretramento $\leq 33\%$ con tassi trascurabili	2			
C	Sponde in arretramento $\leq 33\%$ lunghezza totale (somma di entrambe) con tassi $\leq 3$ m/a oppure: sponde in arretramento $> 33\%$ con tassi trascurabili	4			
D	Sponde in arretramento $\leq 33\%$ lunghezza totale (somma di entrambe) con tassi $> 3$ m/a oppure: sponde in arretramento $> 33\%$ con tassi $\leq 3$ m/a	6			
E	Sponde in arretramento $> 33\%$ lunghezza totale (somma di entrambe) con tassi $> 3$ m/a	8			

NOTE:

<b>M5 Tendenze di larghezza</b>		pt	scelta	conf	ptconf
C-	Restringimento >25% (alvei a canale singolo o <i>SBA</i> ) o >15% (alvei <i>CI</i> o <i>W</i> )	8			
B-	Restringimento >10% (alvei a canale singolo o <i>SBA</i> ) o >5% (alvei <i>CI</i> o <i>W</i> )	4			
A	Variazioni di larghezza $\leq 10\%$ (alvei a canale singolo o <i>SBA</i> ) o $\leq 5\%$ (alvei <i>CI</i> o <i>W</i> )	0			
B+	Allargamento >10% (alvei a canale singolo o <i>SBA</i> ) o >5% (alvei <i>CI</i> o <i>W</i> )	4	x		
C+	Allargamento >25% (alvei a canale singolo o <i>SBA</i> ) o >15% (alvei <i>CI</i> o <i>W</i> )	8			

**NOTE:**

<b>M6 Tendenze altimetriche</b>		pt	scelta	conf	ptconf
C-	Incisione: evidenze di incisione largamente prevalenti e diffuse	8			
B-	Incisione lieve: evidenze di incisione prevalenti ma non diffuse	4			
A	Equilibrio: assenza di prevalenti condizioni di incisione o sedimentazione	0	x		
B+	Sedimentazione lieve: evidenze di sedimentazione prevalenti ma non diffuse	4			
C+	Sedimentazione: evidenze di sedimentazione largamente prevalenti e diffuse	8			

**NOTE:**

## ARTIFICIALITÀ

A1 Difese di sponda		pt	scelta	conf	ptconf
A	Difese di sponda per >80% lunghezza totale sponde (escluso versanti o terrazzi antichi)	0			
B	Difese di sponda per 66÷80% lunghezza totale sponde (escluso versanti o terrazzi antichi)	4			
C	Difese di sponda per 33÷66% lunghezza totale sponde (escluso versanti o terrazzi antichi)	8			
D	Difese di sponda per 5÷33% lunghezza totale sponde (escluso versanti o terrazzi antichi)	12	x		
E	Difese di sponda per ≤5% lunghezza totale sponde (escluso versanti o terrazzi antichi)	15			

Nel caso di *corsi d'acqua di bassa energia* (di risorgiva o  $S \leq 0.001$ ) e  $La > 10$  m: passare a *una classe inferiore*

Nel caso di *corsi d'acqua di bassa energia* (di risorgiva o  $S \leq 0.001$ ) e  $La \leq 10$  m: passare a *due classi inferiori*

**NOTE:**

A2 Opere di rivestimento o consolidamento del fondo		pt	scelta	conf	ptconf
A	Rivestimenti del fondo per quasi tutto il tratto (>80% lunghezza)	0			
B	Rivestimenti del fondo per 66÷80% della lunghezza del tratto oppure come D con presenza di diga all'estremità a valle	4			
C	Rivestimenti del fondo per 33÷66% della lunghezza del tratto e/o soglie, rampe, briglie, traverse >1 ogni $d$ , dove $d=1000$ m per $S \leq 1\%$ ; $d=200$ m per $S > 1\%$ oppure come E con presenza di diga all'estremità a valle	8			
D	Rivestimenti del fondo per 5÷33% della lunghezza del tratto e/osoglie, rampe, briglie, traverse ≤1 ogni $d$ , dove $d=1000$ m per $S \leq 1\%$ ; $d=200$ m per $S > 1\%$	12			
E	Assenza o presenza localizzata di rivestimenti (≤5% lunghezza del tratto) e assenza di altre opere di consolidamento (soglie, rampe)	15	x		

Nel caso di *corsi d'acqua di bassa energia* (di risorgiva o  $S \leq 0.001$ ) e  $La > 10$  m: passare a *una classe inferiore*

Nel caso di *corsi d'acqua di bassa energia* (di risorgiva o  $S \leq 0.001$ ) e  $La \leq 10$  m: passare a *due classi inferiori*

**NOTE:**

**IDRAIM**

sistema di valutazione **IDR**omorfologica, **Analisi** e **Monitoraggio** dei Corsi d'Acqua  
**Versione IDM 1.0 - Settembre 2015**

<b>INDICI E CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA</b>			
<b>del tratto CER-Orsara</b>			
<b>INDICI DI DINAMICA MORFOLOGICA</b>			
<b>IDM</b>	<b>IDM<sub>min</sub></b>	<b>IDM<sub>max</sub></b>	<b>NOTE</b>
<u><b>0.64</b></u>	<i>0.64</i>	<i>0.64</i>	<b>3/11 IND. N.A.</b>
<b>CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA</b>			
<b>CLASSE<sub>med</sub></b>	<b>CLASSE<sub>min</sub></b>	<b>CLASSE<sub>max</sub></b>	<b>NOTE</b>
<u><b>Elevata</b></u>	<u><b>Elevata</b></u>	<u><b>Elevata</b></u>	<b>3/11 IND. N.A.</b>

N.A. = non applicato

<b>IDM</b>	<b>CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA</b>
$0.0 \leq IDM < 0.2$	<i>Molto bassa</i>
$0.2 \leq IDM < 0.4$	<i>Bassa</i>
$0.4 \leq IDM < 0.6$	<i>Media</i>
$0.6 \leq IDM < 0.8$	<i>Elevata</i>
$0.8 \leq IDM \leq 1.0$	<i>Molto elevata</i>