

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA

RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI

TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO

STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE

Relazione

SCALA:

-

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

IA4S 00 D 09 RG ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato, Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	A. Cappelli	Luglio 2019	F. Cabas	Luglio 2019	T. Paoletti	Luglio 2019	A. Vitozzi Luglio 2019

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e Gestione delle Varianti
Dott. Ing. Angelo Vitozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
N° A20783

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	12
2.4	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA	12
2.4.1	<i>Assetto dei bacini</i>	12
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>	14
2.4.4	<i>Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua minori</i>	16
2.4.5	<i>Indice di Dinamica Morfologica (IDM)</i>	18
2.4.5.1	<i>Metodo IDRAIM</i>	18
2.4.5.2	<i>Applicazione al caso di studio</i>	21
2.5	APPORTO DI SEDIMENTI AL TRATTO DI STUDIO	22
2.5.1	<i>Considerazioni generali</i>	22
2.6	ANDAMENTO DELLE PORTATE LIQUIDE (DI MEDIO PERIODO)	23
3.	VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO	25
3.1	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO	25
3.1.1	<i>La teoria di Shields per il moto incipiente</i>	25

3.1.2	<i>L'equazione di Exner</i>	28
3.1.3	<i>Accoppiamento acqua-sedimenti</i>	30
3.1.4	<i>Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità</i>	32
3.2	MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE	39
3.2.1	<i>HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti</i>	39
3.2.1.1	<i>Cenni generali</i>	39
3.2.1.2	<i>Funzionamento del programma</i>	40
3.2.2	<i>Schematizzazione idraulica adottata</i>	42
3.2.2.1	<i>Geometria del modello</i>	42
3.2.2.2	<i>Scabrezza idraulica</i>	43
3.2.2.3	<i>Condizioni al contorno</i>	43
3.2.2.4	<i>Limiti del fondo erodibile</i>	45
3.2.2.5	<i>Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo</i>	46
3.2.2.6	<i>Formula di trasporto solido</i>	46
3.2.2.7	<i>Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo</i>	47
3.2.2.8	<i>Granulometria del fondo alveo</i>	47
3.3	MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO	48
3.3.1	<i>Tendenza all'erosione e alla deposizione</i>	48
4.	CONCLUSIONI	53
4.1	ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO	53

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1: INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELLA TRATTA IN PROGETTO	9
FIGURA 2-2: STRALCIO DELLA "CARTA DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA" DELLO PAI (AUTORITÀ DEI BACINI REGIONALI, 2010). IN ROSSO È INDICATO IL TRATTO DI STUDIO.....	10
FIGURA 2-3: STRALCIO DELLA "CARTA DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA" DELLO PAI (AUTORITÀ DEI BACINI REGIONALI, 2010). IN ROSSO È INDICATO IL TRATTO DI STUDIO.....	11
FIGURA 2-4: DISTRIBUZIONE TEORICA DELLA GRANULOMETRIA DEI SEDIMENTI IN UNA FORMA DI DEPOSITO.....	15
FIGURA 2-5 – SCHEMA GENERALE DELLA STRUTTURA DEL METODO IDRAIM.	19
FIGURA 2-6: ESTRATTO DEGLI ANNALI IDROLOGICI PER IL BACINO DEL F. PESCARA ALLA STAZIONE DI S. TERESA.....	23
FIGURA 3-1: SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UNA PARTICELLA SOLIDA AL FONDO DI UN CORSO D'ACQUA	25
FIGURA 3-2: DIAGRAMMA DI SHIELDS.....	27
FIGURA 3-3: BILANCIO DI MASSA DEI SEDIMENTI NEL VOLUME DI CONTROLLO	29
FIGURA 3-4: ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DEI LIMITI DEL FONDO MOBILE COINCIDENTI CON I LIMITI DEL CANALE PRINCIPALE	45
FIGURA 3-5: ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DELLA MASSIMA PROFONDITÀ ERODIBILE	46
FIGURA 3-6: SCHEMA DEL METODO DI MESCOLAMENTO DEL FONDO ALVEO	47

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 3 di 59

FIGURA 3-7 – CORSO D’ACQUA DEL BACINO B4, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE).....	49
FIGURA 3-8 – CORSO D’ACQUA DEL BACINO B26, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE).....	50
FIGURA 3-9 – CORSO D’ACQUA DEL BACINO B29, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE).....	51
FIGURA 3-10 – CORSO D’ACQUA DEL BACINO B30, PROFILO DEL FONDO ALVEO (IN BLU IL PROFILO AL TERMINE DELLA SIMULAZIONE).....	52

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2.4-1: CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE DEI CORSI D’ACQUA IN ESAME	17
TABELLA 2.4-2 – LISTA DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL’IDM.....	21
TABELLA 2.4-3 – INDICE E CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA DEI CORSI D’ACQUA OGGETTO DI STUDIO. L’APPLICAZIONE EFFETTUATA COSTITUISCE UN PRIMO TENTATIVO DI DETERMINARE TALE INDICE E NON VUOLE SOSTITUIRE ALCUNA ALTRA APPLICAZIONE UFFICIALE SVOLTA IN REGIONE ABRUZZO DAGLI ENTI PREPOSTI.....	22
TABELLA 2.6-1: VALORI DI PORTATA MEDIA ADOTTATI	24
TABELLA 3.1-1: LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLE FORMULE DI TRASPORTO SOLIDO	33
TABELLA 3.2-1: VALORI DI SCABREZZA ADOTTATI	43
TABELLA 3.2-2: VALORI DI PORTATA MEDIA MENSILE SIMULATI	43
TABELLA 3.3-1: STIMA DELLA TENDENZA EVOLUTIVA.....	48
TABELLA 4.1-1 – VALORI DELL’INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA	54
TABELLA 4.1-2 – VALORI DELL’INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA	54
TABELLA 4.1-3: LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA PER I CORSI D’ACQUA IN ESAME	55

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	4 di 59

1. INTRODUZIONE

1.1 Obiettivi e contenuti dello Studio

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

1.2 Metodologia di lavoro

La metodologia da seguire per valutare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua si può articolare, come svolto nell'ambito del presente studio, sulla combinazione di analisi quali-quantitative basate sui seguenti approcci:

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 5 di 59

- 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 5.0.7, 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 dell'Autorità dei Bacini di Rilievo Regionale dell'Abruzzo e del Bacino Interregionale del Fiume Pescara;
- Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 6 di 59

Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico

La disamina delle Norme del P.A.I., per quanto attiene agli aspetti geomorfologici, è riportata nella Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica IA4S01D69RGGE0001001A e IA4S02D69RGGE0001002A.

Piano di gestione dei sedimenti

Allo stato attuale la Regione Abruzzo 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.

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 7 di 59

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).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 8 di 59

1.4 Documentazione di riferimento

La documentazione di riferimento è la seguente:

Relazione geologica, geomorfologica e idrogeologica	IA4S01D69RGGE0001001A IA4S02D69RGGE0001001A
Carta geologica con elementi di geomorfologia	IA4S01D69G5ID0002001A IA4S01D69G5ID0002002A IA4S02D69G5ID0002001A IA4S02D69G5ID0002002A
Carta di sintesi dello studio geomorfologico	IA4S00D09G5ID0002001A IA4S00D09G5ID0002002A

2. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

2.1 Inquadramento territoriale dell'intervento

L'area di studio si colloca a ridosso della costa adriatica e, più precisamente, nell'estremo settore nord-orientale della Regione Abruzzo; essa è posta in corrispondenza di una porzione della linea ferroviaria Roma-Pescara che si estende per una lunghezza di circa 12 km, in direzione all'incirca NE-SW. L'area esaminata, compresa tra le province di Pescara e Chieti, si snoda in direzione NNO-SSE attraversando i comuni di Pescara, S. Giovanni Teatino e Chieti. Con riferimento alla Carta Topografica d'Italia edita dall'Istituto Geografico Militare Italiano (I.G.M.I.), l'area oggetto di studi è individuabile all'interno del Foglio 141 "Pescara" in scala 1:100.000, nelle Tavole 141 II NO (Pescara), 141 III NE (Spoltore), 141 III SE (Chieti) in scala 1:25.000 e, con riferimento alla Carta Tecnica Regionale della Regione Abruzzo, negli elementi 35112, 351151, 351154, 351153, 351142, 351142, 351153, 361021, 361022 e 361034 in scala 1:5.000.

La seguente Figura 2-1 mostra l'inquadramento territoriale su foto aerea.

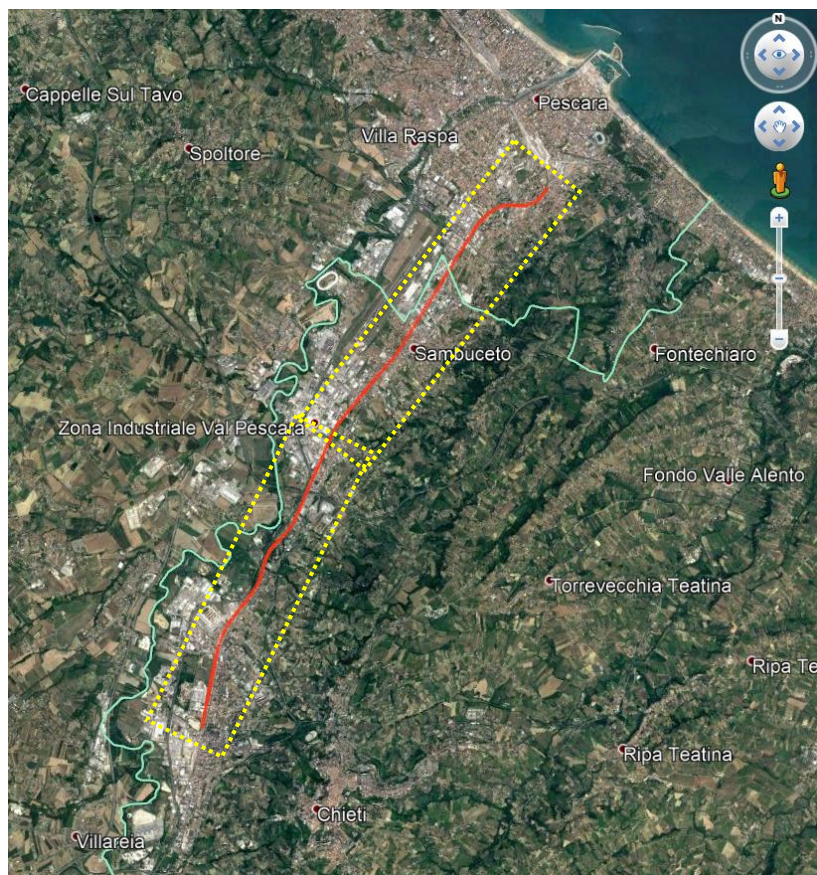
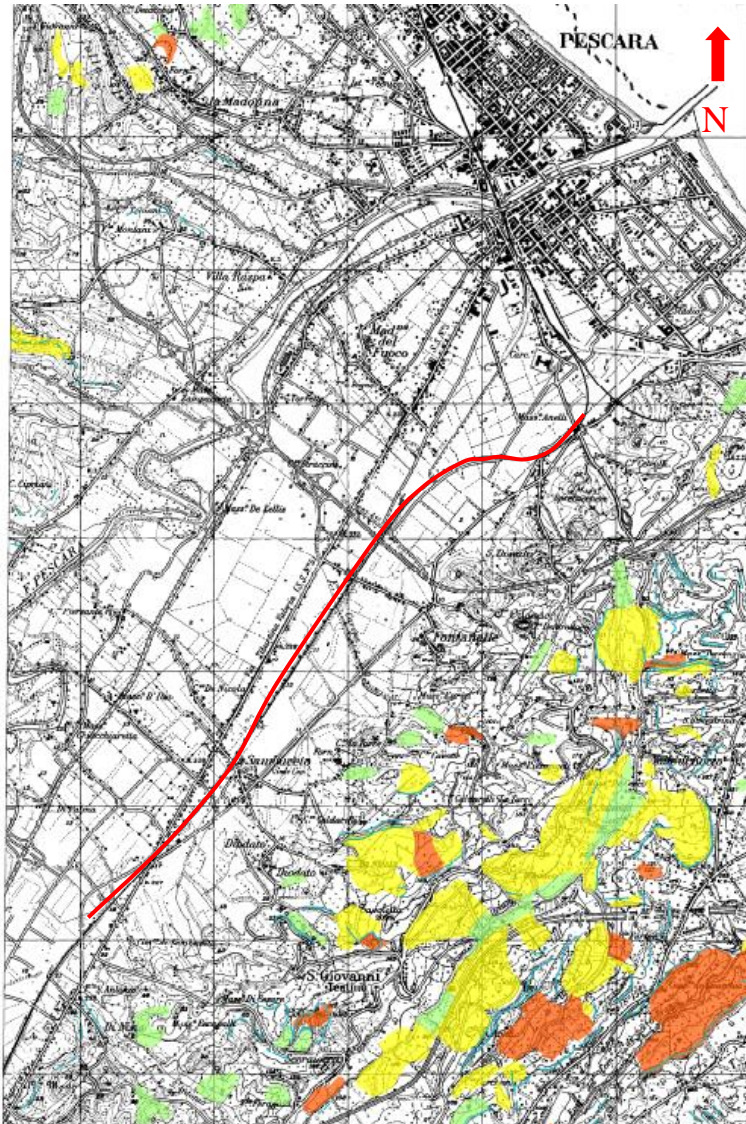


Figura 2-1: Inquadramento territoriale della tratta in progetto

2.2 Aree a pericolosità geomorfologica

Il Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità dei Bacini di Rilievo Regionale dell'Abruzzo e del Bacino Interregionale del Fiume Pescara, in particolare la "Carta della pericolosità da frana" mostra che le aree interessate dal tracciato di progetto non presentano criticità geologiche, maggiormente diffuse nelle adiacenti aree collinari. La seguente Figura 2-2 e la Figura 2-3 riportano uno stralcio delle aree a pericolosità da frana.



CLASSI DI PERICOLOSITA'

- P1 PERICOLOSITA' MODERATA**
Aree interessate da Dissesti con bassa possibilità di riattivazione.
- P2 PERICOLOSITA' ELEVATA**
Aree interessate da Dissesti con alta possibilità di riattivazione.
- P3 PERICOLOSITA' MOLTO ELEVATA**
Aree interessate da Dissesti in attività o riattivati stagionalmente.
- PS PERICOLOSITA' DA SCARPATA**
Aree interessate da Dissesti generati da Scarpate.

Figura 2-2: Stralcio della "Carta della pericolosità da frana" dello PAI (Autorità dei Bacini Regionali, 2010). In rosso è indicato il tratto di studio

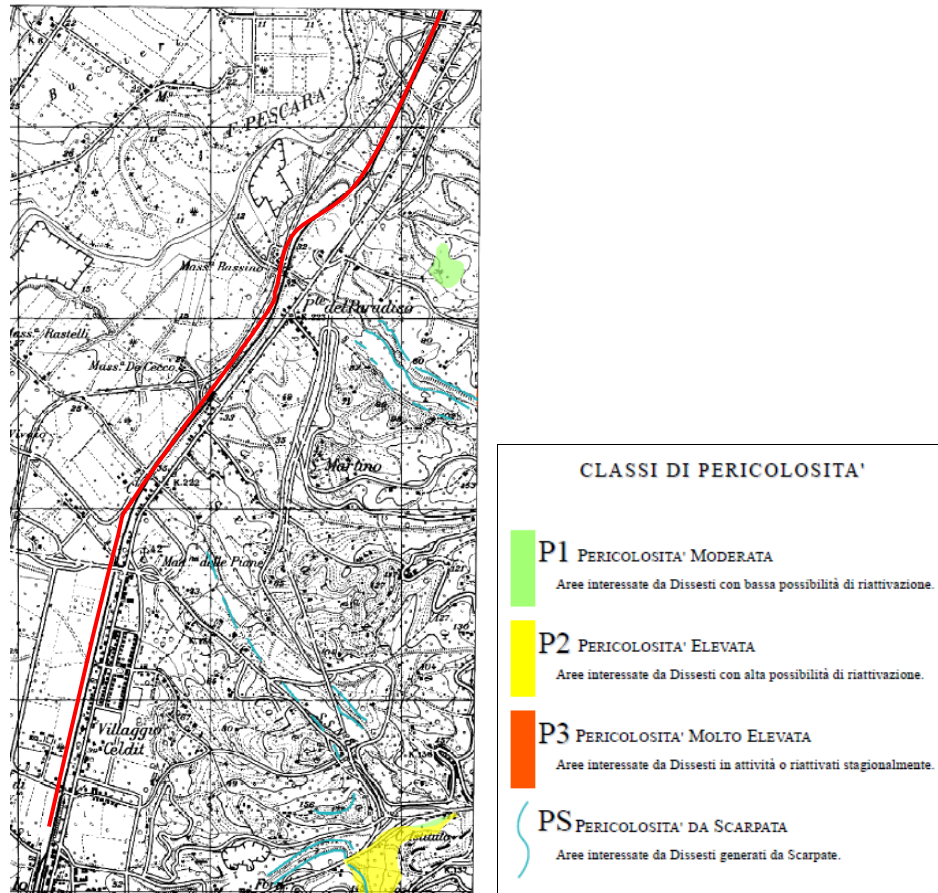


Figura 2-3: Stralcio della "Carta della pericolosità da frana" dello PAI (Autorità dei Bacini Regionali, 2010). In rosso è indicato il tratto di studio

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	12 di 59

2.3 Caratteristiche ambientali e paesistiche della Regione fluviale

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

2.4 Assetto geomorfologico dei corsi d'acqua

2.4.1 Assetto dei bacini

L'assetto geomorfologico dei bacini dei corsi d'acqua interferiti dalla linea ferroviaria in progetto è desunto dalla caratterizzazione geomorfologica effettuata per il progetto in esame, riportata negli elaborati IA4S01D69RGGE0001001A e IA4S02D69RGGE0001001A, di cui di seguito si riportano gli estratti significativi per lo scopo del presente documento.

La dinamica e l'evoluzione geomorfologica del basso corso del Fiume Pescara sono il risultato di una complessa interazione di numerosi fattori, come clima, contesto tettonico e attività antropica. In particolare, l'evoluzione olocenica dei sistemi fluviali ha risentito direttamente dei cambiamenti climatici che si sono succeduti a partire dall'ultima glaciazione, oltre che dalla presenza dell'uomo (Parlagreco et alii, 2011, Miccadei et alii, 2011a; Urbano et alii, 2017).

L'evoluzione morfologica del territorio ed i principali elementi geomorfologici rilevati, pertanto, sono connessi principalmente ai meccanismi di erosione ed accumulo operati dalle acque superficiali e continentali. Ad essi si aggiungono, inoltre, locali elementi di origine strutturale e gravitativa, forme e depositi connessi con l'attività antropica ed elementi di genesi mista dovuti all'azione congiunta di più fattori morfogenetici.

Le maggiori forme di accumulo connesse al deflusso idrico superficiale derivano, essenzialmente, dai processi deposizionali dei principali sistemi fluviali presenti, che conferiscono all'area di studio una morfologia blandamente ondulata e piuttosto regolare. Tali depositi presentano al loro interno vistose variazioni granulometriche e tessiturali, dovute fondamentalmente all'elevata variabilità spazio-temporale dei processi di accumulo.

In corrispondenza dei corsi d'acqua principali, e lungo gli alvei di quelli secondari, si rinvengono vistose scarpate fluviali e zone di erosione laterale delle sponde. Gli alvei secondari mostrano, in

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	13 di 59

generale, una marcata tendenza all'approfondimento, mentre i corsi d'acqua più importanti sono caratterizzati da zone di erosione laterale e settori di prevalente deposizione. Ulteriori scarpate fluviali, ormai inattive e fortemente degradate, sono inoltre presenti in corrispondenza dei margini delle incisioni fluviali più estese, in particolare nei settori di affioramento di antichi terrazzi alluvionali.

Infine, in corrispondenza dei rilievi collinari e dei settori terrazzati, sono presenti chiari fenomeni erosivi connessi col deflusso non regimato delle acque correnti superficiali, come solchi di erosione concentrata e vallecole a fondo concavo. I primi sono particolarmente diffusi nelle aree di affioramento di termini litologici sciolti o poco consistenti, mentre i secondi sono più frequenti nelle aree di affioramento di termini arenacei e conglomeratici. Tali elementi portano, in genere, all'accumulo di frequenti depositi eluvio-colluviali alla base delle principali scarpate morfologiche e delle aree impluviali più estese, che localmente possono superare i 3 m di spessore.

I fenomeni gravitativi di versante, nell'attuale contesto morfoclimatico, rappresentano un fattore morfoevolutivo di secondaria importanza, in quanto scarsamente influenti sul modellamento dei rilievi e sull'evoluzione morfologica generale dell'intero territorio in esame. Infatti, a causa dell'assetto morfologico piuttosto regolare e blandamente degradante verso i settori costieri, i suddetti elementi geomorfologici sono piuttosto rari e comunque limitati alle scarpate morfologiche che bordano le superfici terrazzate più estese.

Per quanto detto in precedenza, tali fenomeni non intercettano le opere di progetto ma lungo i versanti orientali della zona di intervento (San Giovanni Teatino, C.le Tavoletta), come viene segnalato nelle cartografie PAI e IFFI e viene confermato dai sopralluoghi di terreno.

Si tratta essenzialmente di piccole movimenti franosi in terra, riconducibili a colamenti, scivolamenti e frane complesse e deformazioni lente superficiali con stato variabile dall'attivo al quiescente. I fenomeni presentano spessori piuttosto contenuti, generalmente variabili tra 1 e 5 m circa, e una estensione areale molto limitata, in quanto condizionata dalla ridotta altezza morfologica delle scarpate da cui si originano. La distribuzione dei movimenti franosi è generalmente retrogressiva e connessa al progressivo arretramento morfologico delle scarpate ad opera dei fenomeni di erosione superficiale.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 14 di 59

2.4.2 Assetto dei versanti e propensione al dissesto

L'analisi dell'assetto geomorfologico del bacino del F. Pescara mostra che i fenomeni geomorfologici presenti sui versanti dei bacini delle incisioni affluenti al Pescara, non alimentano il trasporto solido dei corsi d'acqua.

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).

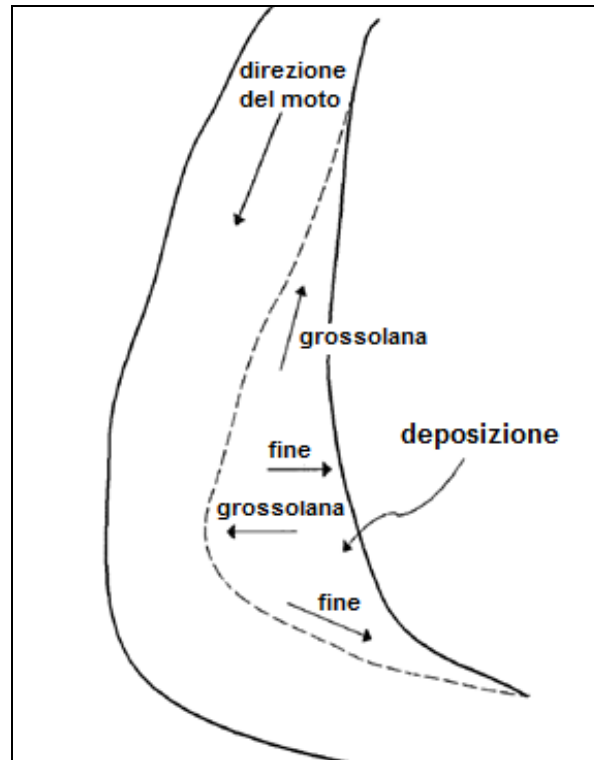


Figura 2-4: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

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:
 - Sedimenti depositi a valle di ostacoli naturali in alveo (es.: grandi massi o vegetazione, oppure strutture)
 - Deposito rappresentativo della variabilità trasversale della sezione
 - Deposito rappresentativo di ciò che si può movimentare con le piene ordinarie
 - Punto prossimo all'alveo bagnato, ma situato all'asciutto

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	16 di 59

- 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 dei corsi d’acqua minori

I campioni prelevati secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.4.3 sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione delle curve granulometriche, sintetizzate nella seguente Tabella 2.4-1, in cui è riportato il diametro caratteristico D_{50} e le percentuali granulometriche delle varie classi. I corsi d’acqua indagati sono prevalentemente caratterizzati da materiale appartenente alla classe granulometrica dei limi argillosi. Questa caratteristica consente di svolgere una disamina preliminare della possibile tendenza evolutiva del fondo alveo, soprattutto nei riguardi dei fenomeni di interrimento. Infatti, con un’alta percentuale di componente limo-argillosa, è lecito attendersi una tendenza alla deposizione. Inoltre, i sedimenti fini, una volta depositati, possono anche subire fenomeni di cementazione, peraltro non rappresentabili mediante le analisi di trasporto solido condotte in questa sede. Di conseguenza, per quei corsi d’acqua per i quali la composizione granulometrica limo-argillosa è importante (>50%), non si ritiene significativo condurre simulazioni di calcolo idraulico a fondo mobile e si adotta il criterio di attribuire a priori un livello di attenzione per interventi di manutenzione programmata (LAm) di tipo “alto”, come meglio definito nel successivo capitolo 4.

Tabella 2.4-1: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame

Codice bacino	Codice punto di prelievo	D ₅₀ (mm)	Ghiaia %	Sabbia %	Limo %	L+A %	Argilla %
B4	PR17	0,300	33,98	27,49	17,16	38,53	21,37
	PR18	2,000	45,74	26,52	16,09	27,74	11,65
B11	PR15	0,030	13,78	28,1	31,73	58,11	26,38
	PR16	0,060	27,76	18,67	26,7	53,57	26,87
B21	PR13	0,035	11,96	20,99	41,13	67,05	25,92
	PR14	0,010	5,06	13,6	45,6	81,34	35,74
B26	PR09	0,200	37,54	16,02	17,82	46,43	28,61
	PR10	0,035	17,01	18,48	38,57	64,51	25,94
B28	PR07	0,015	0,24	9,4	57,71	90,37	32,66
	PR08	0,018	0,48	17,01	54,17	82,51	28,34
B32	PR01	0,040	5,19	27,92	46,33	66,89	20,56
B29	PR05	0,035	11,24	26,01	35,91	62,75	26,84
	PR06	0,015	2,86	22,61	42,63	74,53	31,9
B30	PR02	0,020	0	7,5	66,55	92,5	25,95
	PR03	0,150	30,34	25,18	21,41	44,48	23,07

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 18 di 59

2.4.5 *Indice di Dinamica Morfologica (IDM)*

2.4.5.1 Metodo IDRAIM

Il “Sistema di valutazione **idromorfologica**, **analisi** e **monitoraggio** dei corsi d’acqua”, denominato IDRAIM, costituisce un quadro metodologico complessivo di analisi, valutazione post-monitoraggio e di definizione delle misure di mitigazione degli impatti ai fini della pianificazione integrata prevista dalle Direttive 2000/60/CE (Acque) e 2007/60/CE (Alluvioni).

La metodologia IDRAIM prende in considerazione i processi legati alle variazioni del fondo alveo, alla mobilità laterale, alla presenza di opere e a tutte quelle componenti che vanno a determinare la dinamica morfologica di un fiume. Tali valutazioni, opportunamente integrate con le metodologie tradizionalmente impiegate per le analisi idrauliche, forniscono un quadro completo e dettagliato degli elementi che caratterizzano un corso d’acqua. Il metodo IDRAIM tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità ambientale e di mitigazione dei rischi legati ai processi di dinamica fluviale, si pone quindi come sistema a supporto della gestione dei corsi d’acqua e dei processi geomorfologici.

La struttura complessiva del metodo IDRAIM si articola in 4 fasi che possono essere riassunte come riportato in Figura 2-5. 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 19 di 59

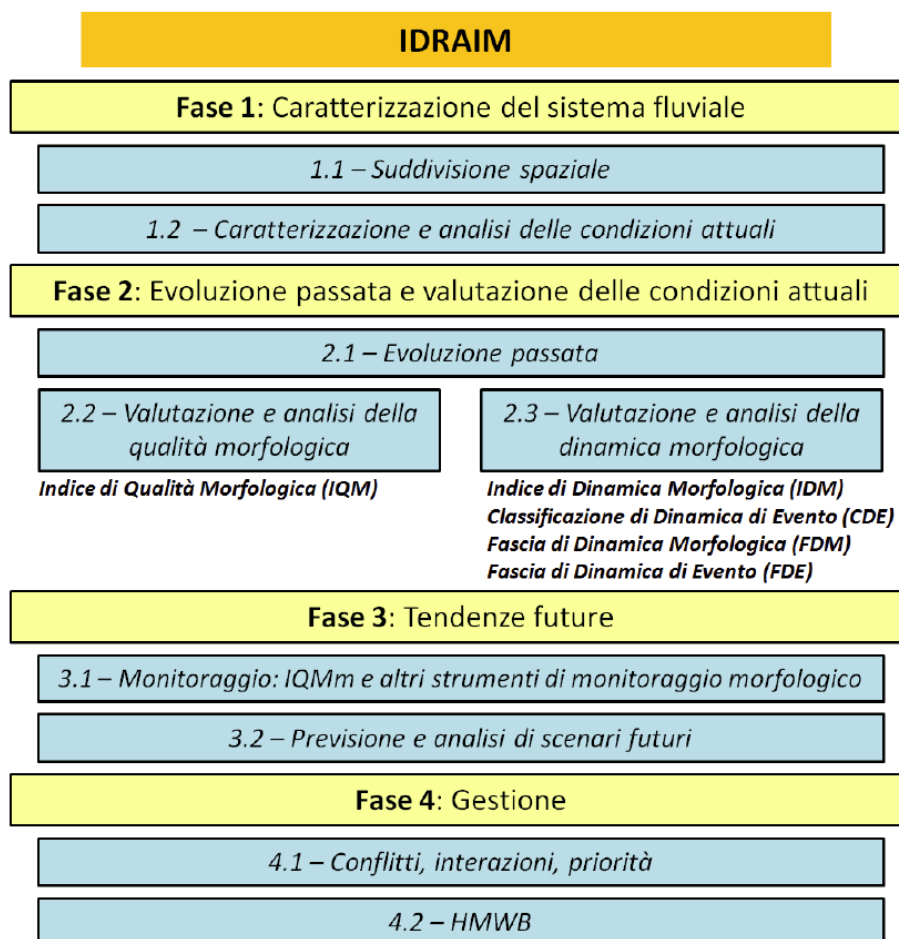


Figura 2-5 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	20 di 59

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.**

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 21 di 59

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 2.4-2.

Si precisa che nel caso di studio trattato in questa sede, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori della componente "variazioni morfologiche" si è basata su quanto osservato in campo e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.

Tabella 2.4-2 – Lista degli indicatori per la valutazione dell'IDM

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 22 di 59

Il risultato dell'applicazione viene riportato in Tabella 2.4-3, precisando che l'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Abruzzo dagli Enti preposti (ARPA).

Tabella 2.4-3 – Indice e Classe di Dinamica Morfologica dei corsi d'acqua oggetto di studio. L'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Abruzzo dagli Enti preposti.

Codice Bacino	Classe di Dinamica Morfologica				
	Molto bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
B4					
B11					
B21					
B26					
B28					
B32					
B29					
B30					

2.5 Apporto di sedimenti al tratto di studio

2.5.1 Considerazioni generali

Sulla base delle analisi condotte ed illustrate nei paragrafi precedenti è possibile correlare, seppur in maniera qualitativa, le dinamiche di versante e del corso d'acqua (IDM semplificato) con le litologie presenti nel bacino, al fine di valutare la dinamica di trasporto solido dei corsi d'acqua oggetto di studio, come meglio descritto nel seguito al capitolo 3. Gli affluenti del Fiume Pescara sono caratterizzati da una dinamica morfologica bassa e media, dovuta alla presenza di sponde e fondo non erodibili per buona parte dei tratti in esame. I bacini sono caratterizzati dalla presenza di modesti fenomeni geomorfologici, la cui natura non contribuisce all'apporto di materiale solido in alveo.

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, come indicato nel precedente paragrafo 2.4.3). 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. Allo scopo sono stati consultati gli Annali idrologici, da cui è stata ricavata la portata media mensile rapportata all'area del bacino. Dai dati riportati nella seguente Figura 2-6, si è ricavato il valore massimo della portata media mensile per unità di area del bacino sotteso, nel periodo di funzionamento della stazione idrometrica, riscalandolo opportunamente il valore sull'area del bacino dei corsi d'acqua oggetto di studio con una durata costante pari a 24 ore, valida quest'ultima solamente ai fini delle simulazioni a fondo mobile più avanti descritte. La seguente Tabella 2.6-1 riporta i valori adottati.

VII. – PESCARA a S.TERESA (Mr)

CARATTERISTICHE DELLA STAZIONE Bacino di dominio 3125 Km² (parte permeabile 58%), altitudine max 2795 m s.l.m., media 940 m s.l.m., zero idrometrico 4 512 (1) m s.l.m., distanza dalla foce 9 Km circa, inizio osservazioni luglio 1921, inizio misure luglio 1921, altezza idrometrica max 5 52 (1)(2) m (10 04 1992), minima -2 10 (1)(2) m (25 08 1974), portata max 1092 67(2) mc/sec (10 04 1992), minima 18 40 (2) mc/sec (14 08 1951)

ELEMENTI CARATTERISTICI PER L'ANNO 1992													
	ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Q max (mc/s)	594 08	42 55	40 14	63 99	594 08	71 53	33 85	33 15	28 80	32 45	36 37	48 55	64 75
Q media (mc/s)	40 14	38 64	37 61	40 11	101 24	42 02	31 15	28 50	26 84	29 33	33 37	34 45	39 41
Q minima (mc/s)	25 36	36 90	36 00	35 70	45 41	34 55	29 13	25 90	25 36	27 93	31 77	32 45	32 45
Q media (l/s kmq)	12 84	12 36	12 03	12 83	32 40	13 45	9 97	9 12	8 59	9 39	10 68	11 02	12 61
Deflusso (mm)	406 18	33 12	30 15	34 38	83 97	36 01	25 84	24 43	23 01	24 33	28 60	28 57	33 77
Afflusso met (mm)	799 90	27 10	10 90	72 40	192 40	50 00	68 30	31 70	12 90	31 70	124 70	65 30	112 50
Coeffic di deflusso	0 51	1 22	2 77	0 47	0 44	0 72	0 38	0 77	1 78	0 77	0 23	0 44	0 30
ELEMENTI CARATTERISTICI PER IL PERIODO 1922-30, 1936-42, 1945-61, 1965-76 e 1986-91													
Q max (mc/s)	384 00	339 00	265 00	222 00	384 00	164 00	374 00	115 00	77 70	172 00	259 00	288 00	232 00
Q media (mc/s)	51 65	60 24	62 33	63 16	61 08	52 53	44 05	38 19	37 07	41 58	46 64	54 00	59 47
Q minima (mc/s)	18 40	33 90	32 88	30 92	28 49	28 10	26 81	19 90	18 40	20 40	22 70	25 40	28 90
Q media (l/s kmq)	16 52	19 27	19 90	20 18	19 55	16 80	14 06	12 21	11 89	13 33	14 90	17 25	19 01
Deflusso (mm)	521 31	51 64	48 66	54 10	50 63	45 05	36 57	32 68	31 76	34 51	39 98	44 74	50 99
Afflusso met (mm)	886 44	78 78	75 27	71 29	78 45	70 85	57 11	36 12	37 57	71 80	86 09	113 45	109 87
Coeffic di deflusso	0 59	0 81	0 67	0 77	0 66	0 64	0 68	1 05	0 90	0 50	0 47	0 40	0 49

Figura 2-6: estratto degli Annali idrologici per il Bacino del F. Pescara alla stazione di S. Teresa

Tabella 2.6-1: Valori di portata media adottati

ID Bacino	Area del bacino (km ²)	Portata media mensile (m ³ /s)
B4	0,450	0,015
B11	0,580	0,019
B21	1,460	0,047
B26	1,003	0,032
B28	0,867	0,028
B32	1,317	0,043
B29	0,668	0,022
B30	1,137	0,037

3. VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO

3.1 Modelli matematici per il trasporto solido

3.1.1 La teoria di Shields per il moto incipiente

La prima interpretazione del fenomeno di inizio del trasporto al fondo, comunemente noto come *moto incipiente* o condizione critica per il fondo, si deve a Shields (1936), che individuò la relazione tra il valore della tensione al contorno τ_0 che pone in movimento il materiale di fondo di densità ρ_s e diametro d_s e le proprietà del fluido, μ e ρ . Nella formulazione più semplice tale relazione si deduce come segue.

In alveo rettangolare molto largo il raggio idraulico si confonde con la profondità h e la tensione al fondo τ_0 si può esprimere come

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

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

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

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

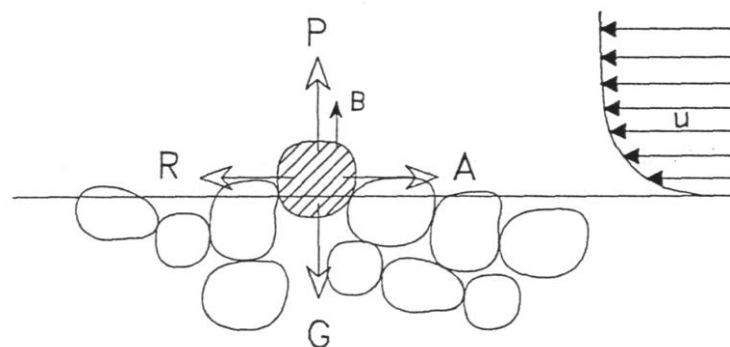


Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

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

- la velocità di attrito $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$
- il diametro del granulo d_s
- la viscosità cinematica del fluido $\nu = \mu / \rho$

ossia dal numero

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

Si ha in definitiva

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

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

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

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

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

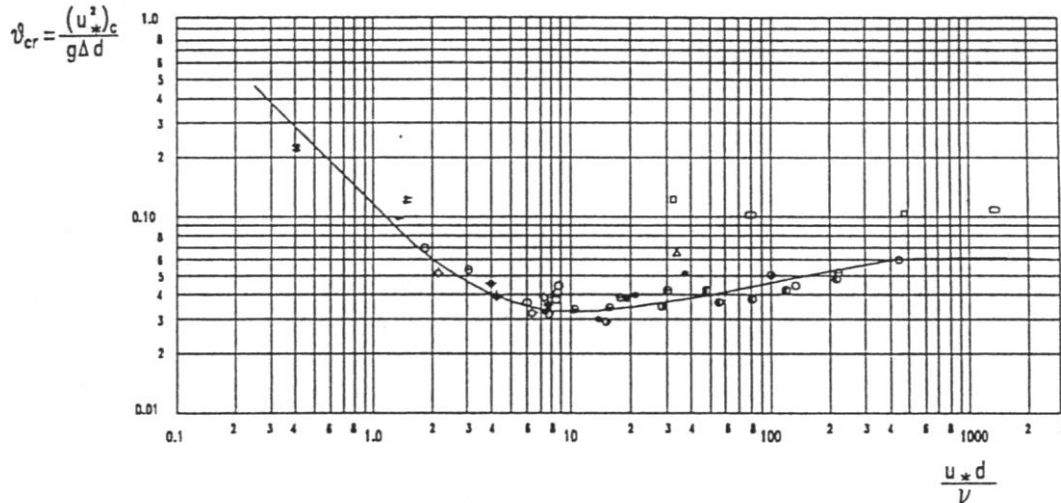


Figura 3-2: Diagramma di Shields

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

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

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

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

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

cioè:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 28 di 59

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

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

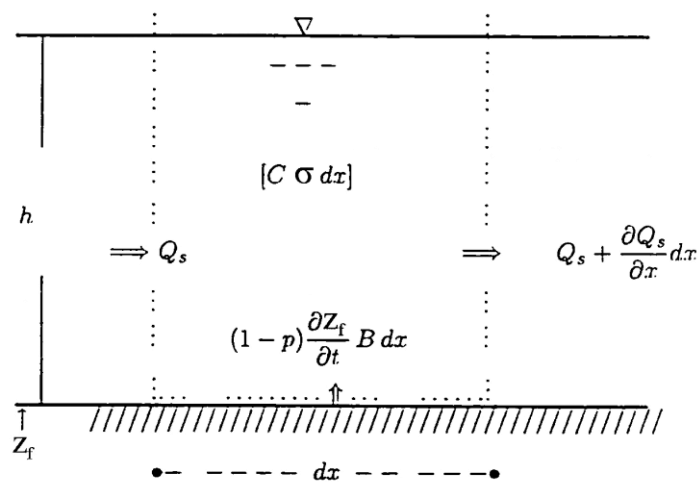


Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo

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

3.1.3 Accoppiamento acqua-sedimenti

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

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

Le variabili dipendenti da considerare sono tre:

- la velocità o la portata;
- il tirante idrico;

- la quota del fondo.

Quindi si ha bisogno di tre equazioni:

- conservazione della massa;
- bilancio della quantità di moto;
- bilancio della portata di materiale solido trasportata sul fondo.

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

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

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

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

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

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

- 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:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 32 di 59

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

- 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 dalle curve granulometriche, 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 ₅₀ [mm]	pendenza fondo	Froude	Rapporto tra larghezza e tirante B / h	Tirante idrico h [m]
Meyer-Peter e Muller trasporto di fondo	0.4 ÷ 30	4·10 ⁻⁴ ÷ 2·10 ⁻²			0.01 ÷ 1.2
Toffaletti trasporto totale	0.062 ÷ 16				> 3
Ackers-White trasporto totale	0.04 ÷ 4.9		< 0.8		<0.4
	0.1 ÷ 68		< 0.8	9 ÷ 60	
Yang trasporto di fondo	0.137 ÷ 1.35				0.022 ÷ 0.86

Formula di Meyer-Peter e Müller (1948)

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

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

con:

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

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

Nell'equazione sono presenti due fattori di riduzione, Q_B/Q e K_B/K_G ; il primo serve per tenere conto del fatto che solo una parte (Q_B) della portata totale (Q) agisce sul fondo ed è quindi responsabile del movimento del trasporto di fondo; il secondo per tenere conto della presenza della resistenza di formiche riduce lo sforzo di taglio che è disponibile per il trasporto di fondo. Meyer-Peter e Müller assunsero che $Q_B/Q=1$ per i letti dei fiumi piatti e che $K_B/K_G=1$ per i canali larghi. Nel caso di dati di laboratorio, si può porre $Q_B/Q = 1 - h/B$ con B larghezza del canale. Il diametro nella formula è in m.

Formula di Toffaleti (1968)

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

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

Questa formula calcola il trasporto totale.

Toffaleti esprime il parametro di Einstein Ψ (intensità della corrente) come:

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

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	35 di 59

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	36 di 59

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):

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

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

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

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:

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

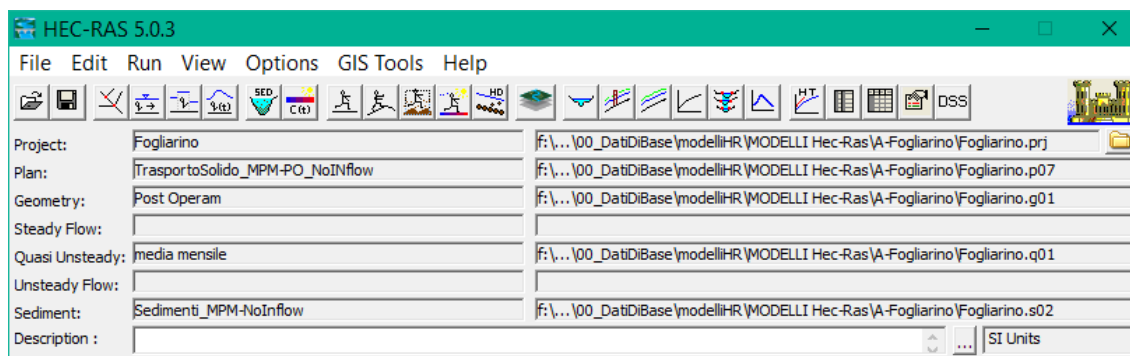
 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	39 di 59

3.2 Modello di calcolo idraulico a fondo mobile

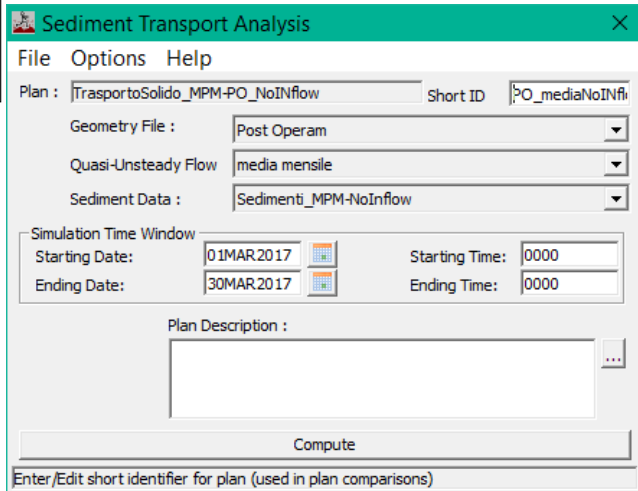
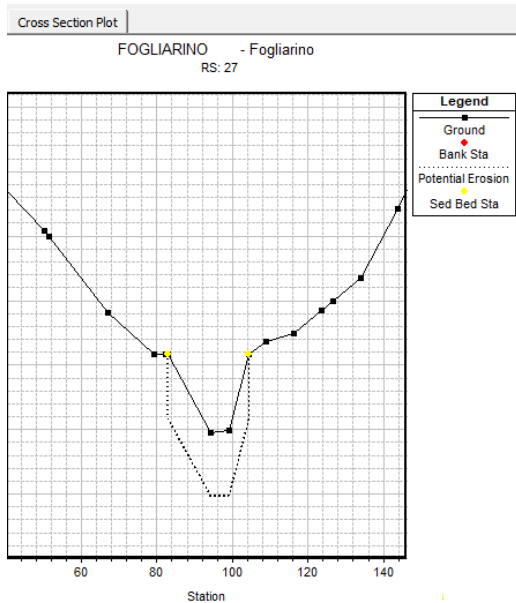
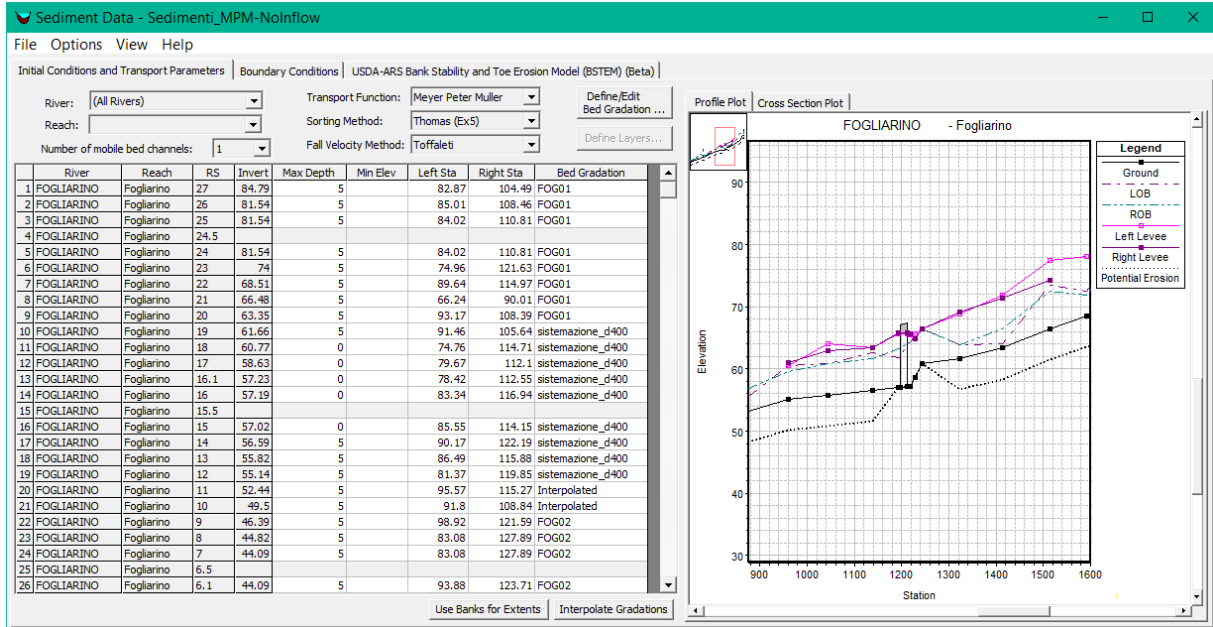
3.2.1 HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti

3.2.1.1 Cenni generali

HEC-RAS¹ è un noto codice di calcolo per il moto di correnti idriche in simulazione monodimensionale di una rete di canali naturali e/o artificiali, messo a punto dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito Americano. La versione 4.0.x del codice ha incluso la possibilità di svolgere analisi sul trasporto di sedimenti, basate sulla metodologia già in uso nel vecchio codice HEC-6² e disponibili anche nella versione 5.0.7 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)



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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	41 di 59

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

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

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

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

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

Il programma utilizza come equazione di continuità quella di Exner:

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

con Q_s portata media dei sedimenti (in m^3/s) durante l'intervallo Δt .

Questa equazione può essere espressa in termini di differenze finite:

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	42 di 59

con:

B_{0p}	larghezza del letto mobile al punto P;
Q_{su}	carichi di sedimenti alla sezione di monte;
Q_{sd}	carichi di sedimenti alla sezione di valle;
L_u	lunghezza del tratto di monte tra le sezioni;
L_d	lunghezza del tratto di valle tra le sezioni;
Y_{sp}	profondità dei sedimenti all'inizio dello step nel punto P;
Y'_{sp}	profondità dei sedimenti alla fine dello step nel punto P;
Δt	Passo temporale

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

3.2.2 Schematizzazione idraulica adottata

3.2.2.1 Geometria del modello

La geometria del modello di calcolo a fondo mobile è costruita a partire dai rilievi topografici appositamente eseguiti per il Progetto in esame. Ricordiamo che la geometria del modello di calcolo è costituita dalle sezioni trasversali, dalle opere eventualmente presenti e dalle caratteristiche idrauliche delle sezioni stesse. L'ubicazione delle sezioni di studio è riportata nelle tavole IA4S00D09G5ID0002001A e IA4S00D09G5ID0002002A. i corsi d'acqua indagati sono solo quelli per i quali le analisi a fondo mobile sono state ritenute significative, secondo le considerazioni riportate nel precedente paragrafo 2.4.4.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 43 di 59

3.2.2.2 Scabrezza idraulica

I valori di scabrezza adottati sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 3.2-1: valori di scabrezza adottati

golena sinistra	canale principale	golena destra
0,035	0,030	0,035

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 24 ore è stato suddiviso in incrementi computazionali di durata pari a 1 ora.

Tabella 3.2-2: valori di portata media mensile simulati

ID Bacino	Portata modale (m ³ /s)
B4	0,015
B26	0,032
B29	0,022

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 44 di 59

ID Bacino	Portata modale (m ³ /s)
B30	0,037

Livello idrico di valle

Il livello idrico di valle deve essere assegnato per ogni intervallo temporale con cui viene discretizzato l'idrogramma di calcolo e può essere calcolato dal programma assegnando la scala di deflusso della sezione di valle. Nel caso di portata costante per tutta la durata della simulazione, è sufficiente fornire un unico valore di livello idrico, che è stato posto pari all'altezza di moto uniforme.

Carico solido entrante

La condizione al contorno relativa ai sedimenti riguarda l'apporto di materiale solido al tratto di studio. Nel caso in esame, in base alle informazioni ricavate dalla caratterizzazione geomorfologica del bacino, è stato possibile valutare in via preliminare se il carico entrante da monte nel modello di calcolo è significativo ai fini delle valutazioni sulla tendenza evolutiva. Se la sezione di monte del modello è sufficientemente lontana dal tratto di interesse³, si può anche assumere un carico entrante nullo, in modo che siano proprio le prime sezioni di monte a costituire un serbatoio di sedimenti per il modello a fondo mobile. Qualora, però, ci si trovi in condizioni di forte apporto solido dai versanti (in caso di 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.

Per i casi in esame è stata adottata la condizione di *carico entrante nullo*.

³ 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 2 m.

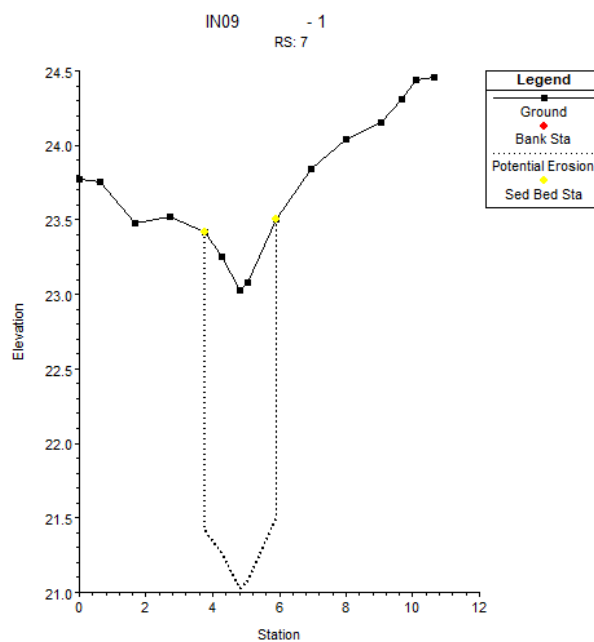


Figura 3-4: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale

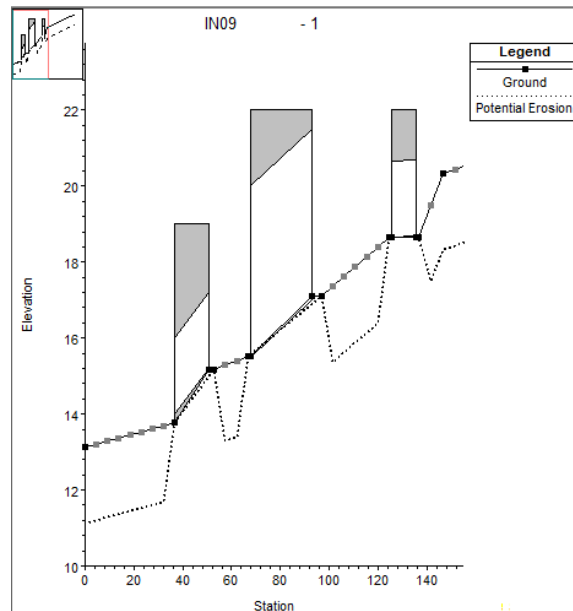


Figura 3-5: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile

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 i casi in esame, condotta secondo quanto indicato nel precedente paragrafo 3.1.4, ha portato ad individuare quella di Yang come la più adatta in base alle granulometrie rilevate.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 47 di 59

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.

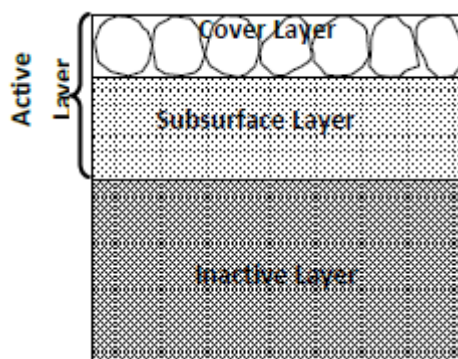


Figura 3-6: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 48 di 59

L'ubicazione dei punti di prelievo è riportata nelle Tavole IA4S00D09G5ID0002001A e IA4S00D09G5ID0002002A e le relative curve granulometriche sono state associate ai tratti di studio per i quali si è osservato che le caratteristiche morfologiche sono uniformi.

3.3 Modalità evolutive dell'alveo

3.3.1 *Tendenza all'erosione e alla deposizione*

Le modalità evolutive dell'alveo dei corsi d'acqua oggetto di studio, per il tratto in esame in questa sede, vengono sinteticamente valutate in base alla possibile tendenza all'erosione o alla deposizione, stimata a sua volta mediante l'applicazione del modello idraulico a fondo mobile descritto nel precedente paragrafo 3.2.

I risultati delle simulazioni sono riportati nelle figure seguenti, che rappresentano il profilo del fondo alveo al termine del periodo di simulazione (24 ore a portata costante, pari alla portata media mensile), 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.

Tabella 3.3-1: *Stima della tendenza evolutiva*

Codice bacino / WBS	Portata media mensile (m³/s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva
B4 / IN04	0,015	Carico entrante nullo	Stabile
B26 / IN09	0,032	Carico entrante nullo	Erosione
B29 / VI06	0,022	Carico entrante nullo	Erosione
B30 / VI07	0,037	Carico entrante nullo	Deposizione

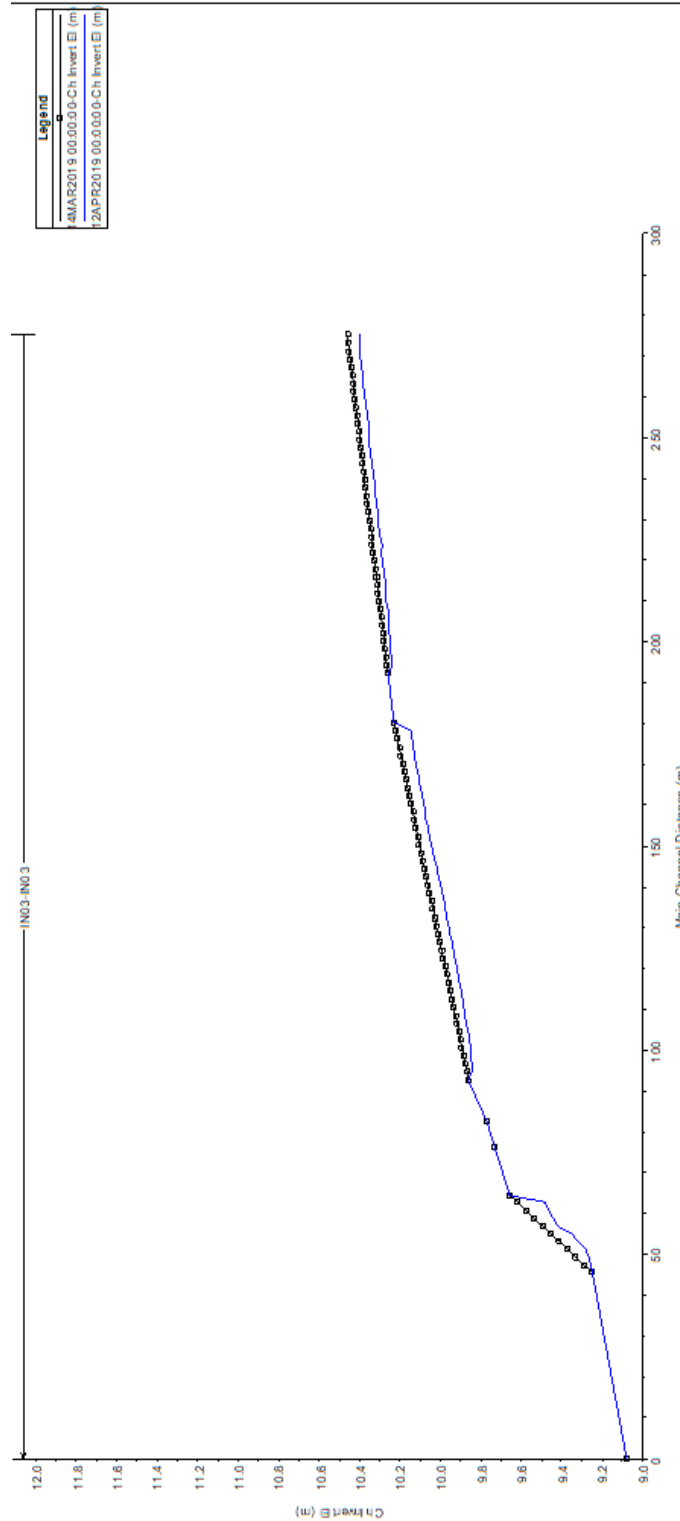


Figura 3-7 – Corso d'acqua del Bacino B4, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

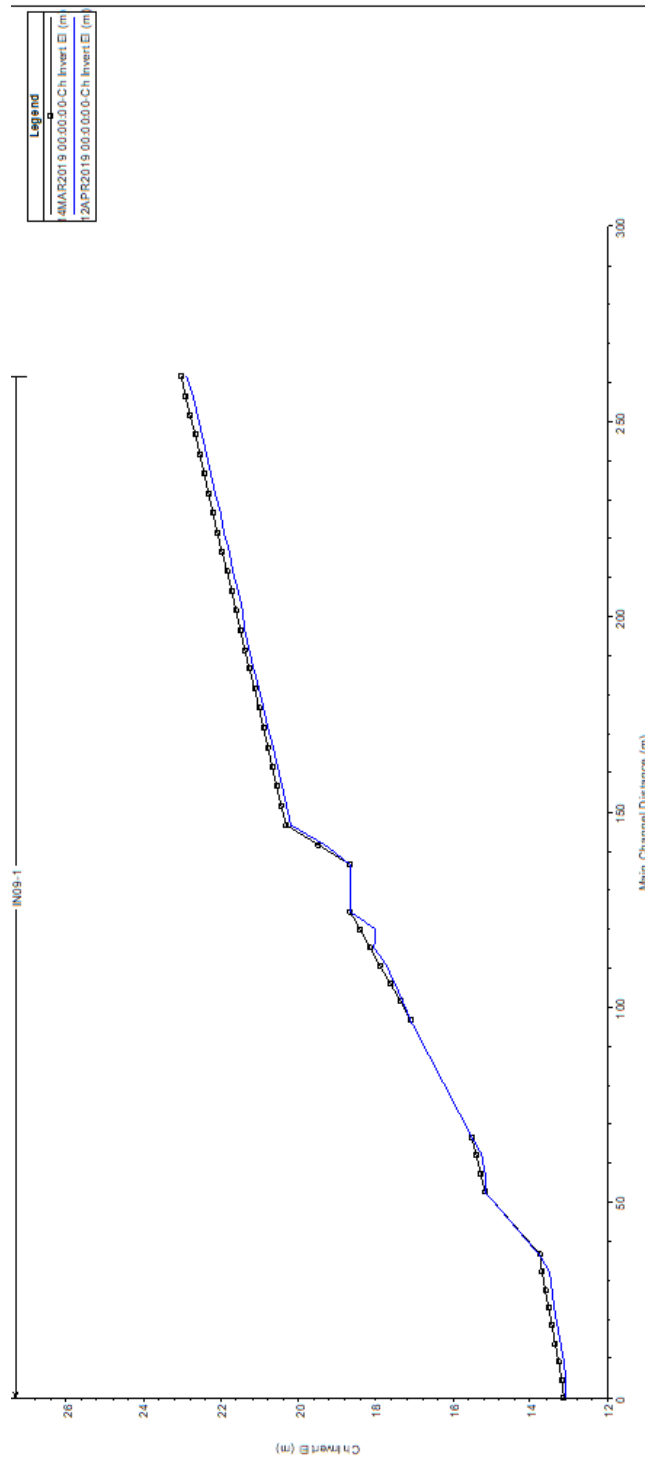


Figura 3-8 – Corso d'acqua del Bacino B26, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

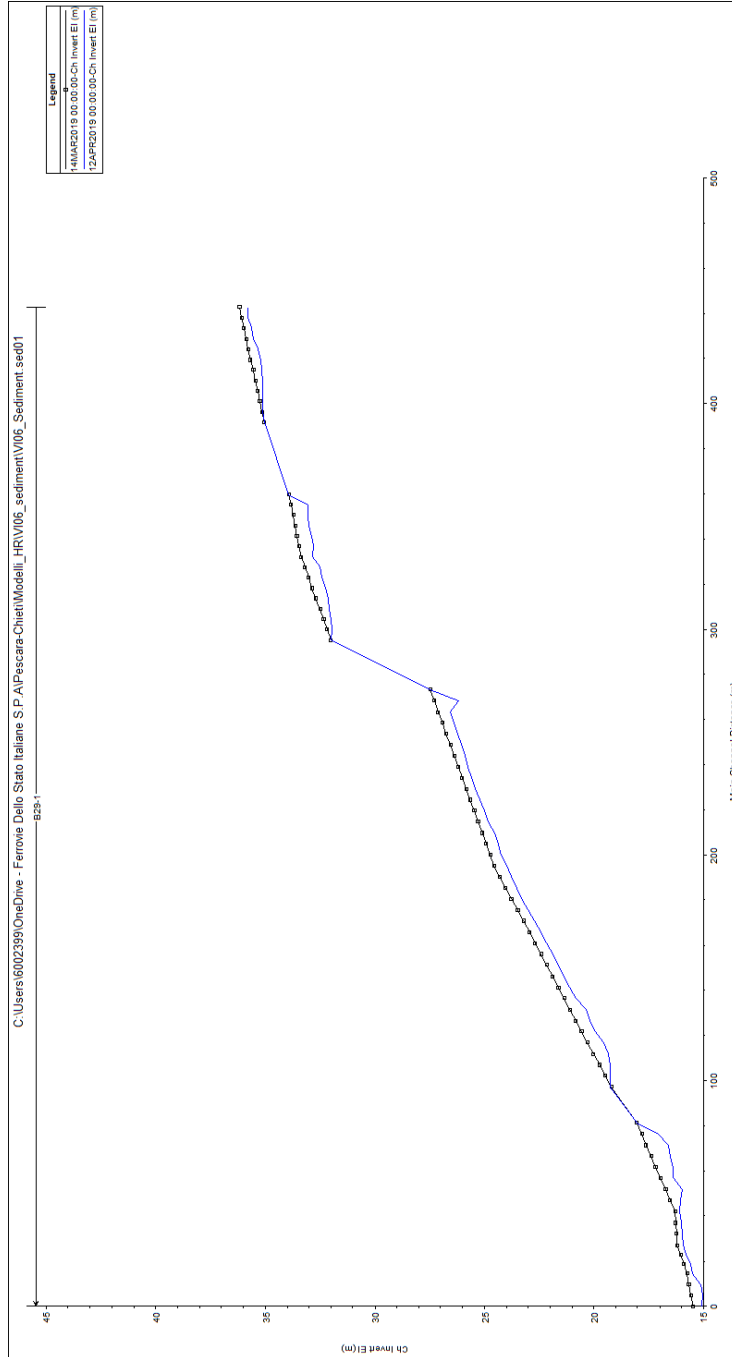


Figura 3-9 – Corso d'acqua del Bacino B29, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

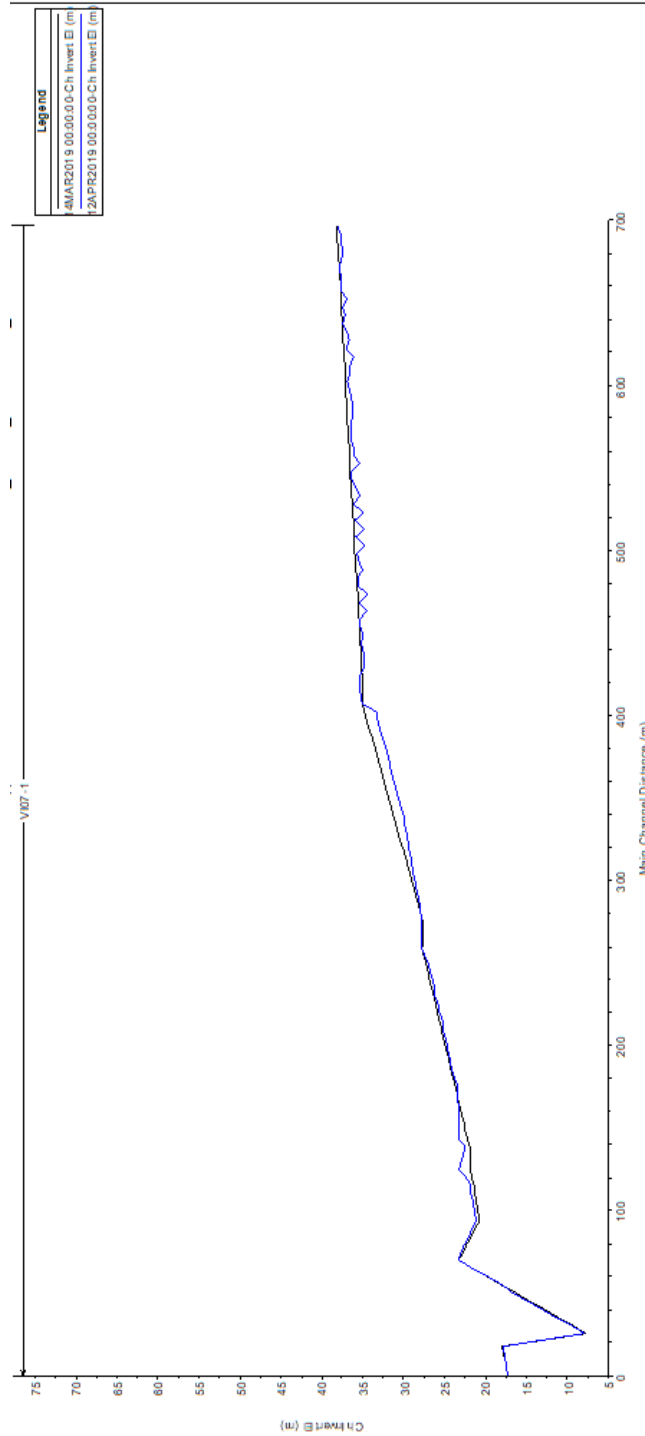


Figura 3-10 – Corso d'acqua del Bacino B30, profilo del fondo alveo (in blu il profilo al termine della simulazione)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	53 di 59

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 al territorio problemi connessi con le dinamiche morfologiche.

L'insieme delle valutazioni effettuate sulla dinamica morfologica dei corsi d'acqua (IDM) e le applicazioni modellistiche (HEC-RAS) 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

Codice bacino / WBS	Portata media mensile (m ³ /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
B4 / IN04	0,015	Carico entrante nullo	Stabile	bassa	basso
B11 / IN05	---	---	---	bassa	alto ***
B21 / IN07	---	---	---	bassa	alto ***
B26 / IN09	0,032	Carico entrante nullo	Erosione	bassa	basso
B28 / IN10	---	---	---	bassa	alto ***
B32 / IN08	---	---	---	bassa	alto ***
B29 / VI06	0,022	Carico entrante nullo	Erosione	media	medio
B30 / VI07	0,037	Carico entrante nullo	Deposizione	media	Alto

***Livello di attenzione per manutenzione stimato in base solo alla caratterizzazione granulometrica, laddove essa mostra un'alta percentuale di componente limo-argillosa, per cui, come discusso nel paragrafo 2.4.4, è lecito attendersi una tendenza alla deposizione e che i sedimenti depositi possano subire fenomeni di cementazione, peraltro non rappresentabili mediante le analisi di trasporto solido condotte in questa sede.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA IA4S	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 56 di 59

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.
- Castiglioni G. B. – *Geomorfologia*, ed. UTET
- Catalano S., De Guidi G. (2003) – *Late Quaternary uplift of northeastern Sicily: relation with the active normal faulting deformation*. Journal of Geodynamics, **36**, 445-467.
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., & Quattrini, S. (2000). *Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans*. In International Symposium INTERPRAEVENT 2000, pp.213-225.
- De Scally F.A. & Owens I.F. (2004). *Morphometric controls and Geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand*. Earth Surface Processes and Landforms, **29**,311– 322.
- Drew F. (1873). *Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the Upper Indus Basin*: Geologica Society of London Quarterly Journal, **29**, 441-471.
- Garde R. J. – Ranga Raju K. G. – *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, ed. WILEY EASTERN LTD
- Graf W. H. – *Fluvial Hydraulics* – LRH Lausanne
- Graf W. H. – *Hydraulics of Sediment Transport*, ed. MCGRAW-HILL
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. (1999). *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. Geomorphology **31**, 181-216.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA4S	00 D 09	RG	ID0002 001	A	57 di 59

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

HEC– *River Hydraulics*, USACE

HEC – *Sediment Transport Mechanics*, USACE

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

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

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

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

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

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

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.