



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

MANUALE PER L'APPLICAZIONE DELLE LINEE GUIDA SULL'UTILIZZO DELLA MODELLISTICA A SUPPORTO DELLA GESTIONE DELLE ATTIVITÀ DI DRAGAGGIO IN AMBITO PORTUALE

AZIONE T1.6 – PRODOTTO T1.6.7

SETTEMBRE 2019

REALIZZATO DA



SE.D.Ri.Port – Sedimenti, Dragaggi, Rischi Portuali

<http://interreg-maritime.eu/web/se.d.ri.port>

Responsabile azione T1.6 “Diagnosi monitoraggio e modellistica”: ARPAL

ARPAL - Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente ligure
Via Bombrini, 8 16149 – Genova
www.arpal.liguria.it/

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

Coordinatore ARPAL: Stefania Magri

Coordinatore ISPRA: Iolanda Lisi

Estensori del Report: Alessandra Feola¹, Iolanda Lisi¹, Stefania Magri², Andrea Salmeri¹, Francesco Venti¹

Ringraziamenti: Simona Macchia, Maria Elena Piccione, Mauro Quagliati, Rosella Bertolotto, David Pellegrini, Andrea Pedroncini, Marcello di Risio e Antonello Bruschi

Grafica di copertina: Elena Porrizzo

Foto di copertina: per gentile concessione dell’Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Si prega di citare il documento come:

ARPAL - ISPRA, AA.VV (2019). Manuale per l'applicazione delle linee guida sull'utilizzo della modellistica a supporto della gestione delle attività di dragaggio in ambito portuale.

¹ ISPRA, ² ARPAL

SOMMARIO

PREMESSE	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 Inquadramento della problematica nel contesto istituzionale e normativo	8
1.2 Oggetto e scopo del Manuale applicativo	9
2 LA MODELLISTICA COME STRUMENTO DI SUPPORTO DECISIONALE	11
2.1 Descrizione della metodologia: l'approccio modellistico integrato	12
2.2 La modellazione idrodinamica	14
2.2.1 Definizione del dominio di calcolo	16
2.2.2 Definizione degli scenari di modellazione	17
2.2.3 Definizione ed introduzione dei termini forzanti	20
2.2.3.1 <i>Dati batimetrici</i>	20
2.2.3.2 <i>Dati sedimentologici</i>	20
2.2.3.3 <i>Dati meteo-climatici ed idrodinamici</i>	21
2.2.3.4 <i>Dati oceanografici ed idrologici</i>	24
2.2.3.5 <i>Torbidità e sedimenti in sospensione</i>	25
2.3 La modellazione degli scenari di rilascio per operazioni di dragaggio	26
2.3.1 Analisi delle modalità operative di dragaggio.....	28
2.3.2 Analisi delle frazioni sedimentarie disponibili al trasporto	31
2.3.3 Frazionamento del sedimento fine disponibile al campo lontano	35
2.4 La modellazione del trasporto dei sedimenti	37
2.4.1 Applicazione del termine sorgente nel dominio di calcolo	38
2.5 Analisi e sintesi dei risultati	40
2.5.1. Finalità delle analisi degli scenari di idrodinamica e trasporto	40
2.5.2. Analisi e sintesi dei risultati per scenari di lungo periodo	41
3 INTERAZIONE TRA MODELLISTICA E MONITORAGGIO	45
3.1 Il monitoraggio a supporto della validazione e della verifica dei risultati	47
3.1.1 Finalità del monitoraggio ante operam.....	48
3.1.2 Finalità del monitoraggio in corso d'opera	50
3.1.3 Finalità del monitoraggio post operam.....	51
3.2 La modellistica a supporto del monitoraggio	51
3.2.1 Modellazione operativa in fase di cantiere.....	52
3.3 Standardizzazione delle misure e del flusso delle informazioni	52
4 CONCLUSIONI	56
5 BIBLIOGRAFIA	58
APPENDICE 1: ESEMPIO DI SCHEDE INFORMATIVE DI PROGETTO	64

PREMESSE

Il progetto Se.D.Ri.Port (SEdimenti, Dragaggi e RIschi PORTuali), finanziato dal Programma di cooperazione Italia-Francia Marittimo 2014-2020, si pone come obiettivo principale quello di identificare delle soluzioni operative per il problema dell'insabbiamento dei porti dell'area transfrontaliera. Il progetto risponde alla richiesta a livello europeo di realizzare piani di azione congiunti, ossia studi generali di fattibilità con cui programmare le necessità, in termini quantitativi, di dragaggi portuali e di riutilizzo dei sedimenti dragati. In particolare, capitalizzando il contributo di precedenti progetti e sperimentando sistemi di monitoraggio dello stato dei porti, il partenariato Se.D.Ri.Port (con capofila la Regione Sardegna, il dipartimento del VAR, le Università di Cagliari e di Tolone, la Provincia di Livorno, ARPAL Liguria, ISPRA, l'Office des Transports della Corsica) agisce congiuntamente per individuare procedure operative e strategie condivise di intervento, sia per minimizzare gli effetti negativi dell'insabbiamento e dei dragaggi, sia per ottenere una migliore affidabilità delle risorse portuali dell'intera area transfrontaliera.

I fenomeni di insabbiamento, infatti, possono minacciare la corretta funzionalità operativa ed economica dei porti, compromettendo le attività economiche legate al trasporto marittimo. Le attività di movimentazione di sedimenti che spesso si rendono necessarie per il mantenimento e il ripristino dei fondali portuali, inoltre, possono determinare effetti ambientali negativi (sia sul comparto abiotico che biotico dell'ecosistema marino) nelle aree portuali e ad esse limitrofe a causa della eventuale risospensione e successiva deposizione della frazione più fine dei sedimenti movimentati (e dei contaminanti di natura organica ed inorganica che spesso sono presenti nei sedimenti portuali).

Nell'ambito del progetto Se.D.Ri.Port., ISPRA e ARPAL hanno collaborato all'implementazione di modelli numerici applicati al caso studio della Rada di La Spezia, con l'obiettivo di quantificare i potenziali effetti ambientali legati alla movimentazione dei sedimenti portuali con la tecnica del livellamento. Tale tecnica, in generale, può essere schematizzata come l'escavo e il successivo spostamento/ridistribuzione del sedimento dragato dal fondale ad una zona adiacente, senza che la testa del mezzo dragante fuoriesca dalla colonna d'acqua. La descrizione delle applicazioni modellistiche al caso studio di La Spezia è riportata nel report Se.D.Ri.Port "Sperimentazione dell'applicazione modellistica" (ARPAL e ISPRA, 2019, Task T1.6, prodotto T1.6.6, progetto Se.D.Ri.Port), nell'ambito del quale è stata verificata la replicabilità a nuovi contesti ambientali e operativi dei principi metodologici delle tecniche di analisi proposte nel metodo Dr-EAM (Feola *et al.*, 2016), beneficiando di nuovi dati sito-specifici.

L'obiettivo del presente Manuale è quello di esplicitare, in maniera schematica e funzionale ad applicazioni modellistiche in bacini portuali, i criteri esistenti in letteratura ed adottabili nei diversi contesti portuali transfrontalieri per la corretta impostazione degli studi modellistici per l'analisi dei potenziali effetti ambientali generati dai sedimenti risospesi (e ri-deposti) durante operazioni di dragaggio. Tali studi possono essere funzionali sia alla progettazione delle operazioni di dragaggio dei fondali portuali sia alla pianificazione dei sistemi di monitoraggio delle possibili alterazioni della qualità dell'ecosistema marino durante lo svolgimento delle attività. A tal fine, sono stati ripresi i criteri delineati per l'applicazione dell'Approccio Modellistico Integrato (AMI) proposto nelle LL.GG. ISPRA "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere" (Lisi *et al.*, 2017), redatte da ISPRA in collaborazione con l'Università dell'Aquila e

DHI. In particolare, nel seguito sono riprese, talvolta integralmente per comodità di trattazione, le indicazioni operative delineate nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sulle modalità di implementazione dei modelli matematici e sulle necessarie interazioni con i dati di monitoraggio ambientale, a supporto della gestione di interventi di dragaggio in bacini semichiusi e ambiti portuali.

1 INTRODUZIONE

La movimentazione dei sedimenti rappresenta un'attività di grande rilevanza per mantenere o migliorare la funzionalità dei porti e la fruibilità dei canali navigabili.

Nella prassi l'intero ciclo della movimentazione dei sedimenti (opportunamente caratterizzati qualora previsto dalla normativa) è generalmente articolato in tre principali fasi operative: l'escavo (o dragaggio), il trasporto e lo sversamento (o collocazione finale). Sia che esso venga eseguito in ambiti costieri o al largo, gli effetti ambientali chimico-fisici e biologici sugli ecosistemi marini possono essere molteplici, con conseguenze talvolta anche sulla salute pubblica (e.g. Wilber & Clark, 2001; HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Erftemeijer and Lewis, 2006; Erftemeijer *et al.*, 2012; Nicoletti *et al.*, 2006; PIANC, 2006; Paganelli *et al.*, 2014; Lisi *et al.*, 2017 e 2019a,b; CEDA/IADC, 2018). In particolare, gli effetti sui comparti abiotici (substrato e colonna d'acqua) e biotici (popolamenti bentonici, ittici, ecc.) possono essere localizzati:

- all'interno dei siti di intervento, in prossimità del mezzo dragante, principalmente riconducibili all'azione diretta del prelievo e dello sversamento dei sedimenti;
- a diversa distanza dai siti di intervento, prevalentemente riconducibili al trasporto e alla deposizione dei sedimenti fini in seguito alla formazione di pennacchi di torbida (superficiali e profondi) durante le attività.

All'interno dei siti di intervento, l'azione diretta del prelievo e dello sversamento dei sedimenti causa effetti localizzati prevalentemente associati alle modifiche arrecate alla morfologia e alla batimetria dei fondali, nonché alla defaunazione e ai fenomeni di seppellimento e soffocamento dei popolamenti bentonici presenti, con possibile defaunazione dei fondi. Le alterazioni morfo-batimetriche, inoltre, possono causare cambiamenti dell'idrodinamica locale (e quindi dei fenomeni di erosione e deposizione) e, laddove il dragaggio e lo sversamento esponano sedimenti con caratteristiche granulometriche e tessiture differenti, cambiamenti nella composizione e struttura delle comunità bentoniche.

A diverse distanze dall'area di intervento i principali effetti ambientali sono generalmente associati all'incremento temporaneo della concentrazione dei sedimenti sospesi in colonna d'acqua e della possibile variazione dei tassi di deposizione e della natura del sedimento rideposto al fondo nelle aree interessate dall'estensione del pennacchio di torbida. In particolare, gli effetti fisici di tipo diretto sul comparto abiotico sono dovuti prevalentemente alle alterazioni delle caratteristiche chimico-fisiche della colonna d'acqua (es. diminuzione temporanea della penetrazione della luce e della concentrazione di ossigeno disciolto, mobilizzazione e solubilizzazione dei contaminanti eventualmente associati ai sedimenti sospesi, ecc.) e del fondo (es. per la deposizione di sedimento fine su substrati di diversa tipologia). Sul comparto biotico, invece, gli effetti diretti sono essenzialmente legati ai possibili fenomeni di seppellimento e soffocamento (intrappolamento e trascinarsi sul fondo, inefficienza dell'attività di filtrazione e intasamento dell'apparato branchiale, ricopertura, abrasione dei tessuti, ecc.).

Agli effetti già citati si vanno a sommare a quelli di tipo indiretto, come ad esempio il disturbo alle aree di *nursery*, quelli associati a variazioni della quantità di sostanza organica presente nelle frazioni sedimentarie più sottili che, nel caso di movimentazione di rilevanti volumi di sedimento², possono determinare situazioni di anossia, e soprattutto in presenza di habitat sensibili come le praterie di *Posidonia oceanica* o biocenosi del Coralligeno in prossimità delle aree di intervento alterazioni della capacità fotosintetica (es. Manzanera *et al.*, 1998). Inoltre, nel caso di movimentazione di sedimenti contaminati, ulteriori effetti indiretti sul comparto biotico possono essere causati dalla mobilitazione dei contaminanti presenti (es. bioaccumulo dei contaminanti nei tessuti degli organismi, biomagnificazione e trasferimento nella catena trofica, alterazione microbiologica di acqua e sedimenti, ecc.).

L'individuazione di aree maggiormente critiche in termini di entità degli effetti (attesi e/o riscontrati) e della significatività dei livelli di esposizione deve tener conto, oltre che delle caratteristiche idrodinamiche locali, anche dei volumi e della tipologia dei sedimenti da movimentare, delle modalità tecniche e operative utilizzate e della posizione, rispetto alle aree di intervento, di obiettivi sensibili e vincoli ambientali eventualmente presenti.

Pertanto, sebbene la scelta delle modalità tecniche e operative sia spesso legata alle finalità dell'intervento e alla loro incidenza sulla durata e sui costi di esecuzione (EPA, 1993; OMOE, 1994; IADC, 1998; USACE, 2003; Anchor Environmental, 2003; Eisma, 2006, CEDA/IADC, 2018), le diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi devono essere precedute da studi specialistici finalizzati ad individuare le possibili criticità ambientali³ (Lisi *et al.*, 2017) e le modalità operative da adottare per minimizzare i possibili effetti ambientali (fisici, chimici, biologici ed ecotossicologici) che potrebbero conseguire, su diverse scale spaziali e temporali, alle operazioni di movimentazione.

Nella fattispecie, studi internazionali raccomandano di dotarsi, in fase di progetto e gestione degli interventi, di modelli matematici in grado di riprodurre i processi di generazione e sviluppo dei pennacchi di torbida (superficiali e di fondo) laddove si riconosca l'insorgenza di possibili criticità ambientali. Tali modelli devono permettere di riprodurre la dinamica dei sedimenti risospesi a partire dall'analisi delle interazioni tra fattori operativi (tipo di draga, velocità e produttività del ciclo di dragaggio/sversamento, volumi complessivi da movimentare, ecc.) e ambientali (composizione e granulometria dei sedimenti da movimentare, caratteristiche idrodinamiche e morfo-batimetriche, ecc.) che condizionano i processi di trasporto (dispersione, diffusione e deposizione) a differenti profondità e distanze dal sito di intervento (es. Nakai, 1978; Herbich & Brahme, 1991; Collins, 1995; Pennekamp *et al.*, 1996; IADC, 1998; Johnson & Parchure 1999; Burt *et al.*, 2000; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo & Averett, 2003; USACE, 2003; Bridges *et al.*, 2008; Palermo *et al.*, 2008).

² La significatività dei volumi da movimentare deve sempre essere valutata in relazione allo specifico contesto ambientale in cui è eseguito l'intervento (Lisi *et al.*, 2017). Per il caso specifico di interventi di ripascimento, inoltre, si riporta nel *D.M. 173/2016* la distinzione per gli interventi di ripascimento in: piccoli interventi annuali che comportano un apporto complessivo di sabbia inferiore a 5000 m³, interventi annuali di media entità complessiva superiore a 5000 m³ e fino a 40000 m³ di materiale dragato ed infine interventi di notevole entità con volumi complessivi superiori ai 40000 m³ annui.

³ Qualsiasi alterazione dei parametri ambientali d'interesse che può aversi in seguito alle operazioni di movimentazione, su diverse scale spaziali/temporali, e in grado di produrre effetti (o stress) significativi (reversibili o irreversibili) sui recettori e gli obiettivi sensibili individuati. Ai fini del presente Manuale, rientrano in questa definizione anche i vincoli ambientali (si veda relativa definizione) e quei fattori ambientali (tipologia dei sedimenti e dei contaminanti eventualmente associati, volumi complessivi da movimentare, ecc.), a cui potrebbero essere correlate alterazioni significative dei parametri di interesse, che condizionano e limitano la scelta delle modalità operative (Lisi *et al.*, 2017).

Le attività di movimentazione dei sedimenti devono essere condotte in modo tale da garantire il “non peggioramento” dello stato riscontrato e la compatibilità rispetto agli obiettivi di qualità previsti.

Un prerequisito di base per la valutazione degli effetti ambientali consiste nell’identificare i potenziali effetti delle attività di movimentazione (Becker *et al.*, 2015):

- nel breve periodo, durante la realizzazione degli interventi;
- nel medio periodo, dovuti al susseguirsi di operazioni ripetute nel tempo;
- nel lungo periodo, legati alla configurazione finale di progetto.

La corretta impostazione degli studi ambientali richiede, pertanto, di prevedere e quantificare la variabilità degli incrementi della concentrazione dei sedimenti sospesi e dei tassi di sedimentazione, nel tempo e nello spazio, tramite un opportuno approccio modellistico (CEDA/IADC, 2018; Lisi *et al.*, 2019b).

Le recenti LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), a tal proposito, forniscono indicazioni operative per l’utilizzo dei modelli matematici come strumento di supporto per le diverse fasi di progettazione delle operazioni di movimentazione, la valutazione di alternative di progetto (ad esempio nella scelta della tecnologia di dragaggio, nell’individuazione delle migliori finestre temporali, etc.), nonché per la pianificazione delle attività di monitoraggio, consentendo l’ottimizzazione delle risorse necessarie a garantire un accurato controllo dei potenziali effetti sull’ambiente. Le LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sono nate dall’esigenza di colmare la mancanza di metodologie condivise, in ambito nazionale e internazionale, per l’analisi e il confronto dei potenziali effetti ambientali generati da operazioni di movimentazione di sedimenti in diversi ambiti marino-costieri. Facendo tesoro di approfondimenti scientifici condotti negli anni da ISPRA in collaborazione con diverse professionalità (Lisi *et al.*, 2012; 2016; Feola *et al.*, 2015; 2016; Di Risio *et al.*, 2017), sono state messe a sistema le informazioni di letteratura e sono stati definiti approcci standardizzati per l’impostazione e l’implementazione degli studi modellistici (es. definizione del termine sorgente, scelta e durata degli scenari di modellazione, interazioni con il monitoraggio) mediante l’AMI (Lisi *et al.*, 2017; 2019a, b), in funzione delle fasi operative del ciclo della movimentazione (escavo/trasporto/sversamento), delle peculiarità degli ambiti di intervento (aree costiere, comprensive delle aree litoranee e di transizione, bacini semi-chiusi e aree al largo) e della tipologia di effetti ambientali attesi nel breve e nel lungo periodo.

Particolare attenzione è stata rivolta a definire tecniche di analisi e sintesi dei risultati per agevolare l’individuazione delle aree maggiormente interessate dalle variazioni, nello spazio e nel tempo, di concentrazione di solidi sospesi (SSC) e deposizione al fondo (DEP), riprendendo i principi metodologici delle tecniche di analisi proposte in Feola *et al.* (2016).

Nell’ambito del progetto Se.D.Ri.Port, la sinergia tra ISPRA e ARPAL è stata volta a testare la replicabilità dei criteri delineati nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) per la corretta impostazione degli studi modellistici in diversi ambiti di portuali e contesti transfrontalieri e per l’interazione con il monitoraggio ambientale nelle diversi fasi di pianificazione gestione degli interventi. In particolare, sono state condotte specifiche applicazioni per modellare la dispersione della frazione fine in seguito al dragaggio ed alla ricollocazione dei sedimenti mediante la tecnica del livellamento dei fondali in ambito portuale.

La sinergia tra ISPRA e ARPAL ha portato, inoltre, alla stesura del contributo “Sinergia tra modellazione matematica e monitoraggio ambientale a supporto della gestione ambientale delle operazioni di movimentazione di sedimenti in ambito portuale e costiero:

standardizzazione di metodi a partire da casi applicativi” riportato nel Rapporto del Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (SNPA) – anno 2018 (Pellegrini *et al.*, 2019b).

1.1 Inquadramento della problematica nel contesto istituzionale e normativo

Nell’ambito delle attività del presente progetto è stato valutato il quadro normativo vigente inerente la movimentazione dei sedimenti in ambito marino costiero e la loro gestione, a partire dalle indicazioni fornite dalle convenzioni internazionali.

Si riportano di seguito alcune sintetiche considerazioni in merito al contesto istituzionale e normativo italiano proposte in Pellegrini *et al.* (2019a) nell’ambito del workshop Se.D.Ri.Port organizzato in collaborazione con la Central Dredging Association (CEDA), nell’Aprile 2019.

Nello specifico è stato riportato, evidenziandone analogie e differenze, il quadro normativo italiano che disciplina la movimentazione dei sedimenti ricadenti in ambito portuale e marino costiero (art 109 D.lgs. 152/09 e D.M. 173/2016) e all’interno dei Siti di bonifica di Interesse Nazionale (art. 5-bis della L. 84/1994, D.M. 7/11/2008 e D.M. 172/2016) con particolare enfasi ai criteri per la predisposizione e l’attuazione delle attività di monitoraggio e al possibile utilizzo dei modelli matematici come strumento a supporto.

In particolare, l’Allegato Tecnico al D.M. 173/2016, che aggiorna le indicazioni del Manuale APAT-ICRAM (2007), disciplina l’intero percorso di caratterizzazione e gestione dei sedimenti da movimentare, includendo le fasi di campionamento, analisi di laboratorio (fisiche, chimiche, ecotossicologiche, e biologiche) e di classificazione della qualità dei sedimenti, fino a indicazioni tecniche per la gestione dei materiali, caratterizzazione dell’area destinata all’immersione, modalità di escavo, trasporto e immersione dei materiali e il monitoraggio ambientale.

Inoltre, l’art. 5-bis della L. 84/1994, il D.M. 7/11/2008 e D.M. 172/2016 disciplinano gli aspetti principali del processo di movimentazione dei sedimenti nei Siti di bonifica di Interesse Nazionale (SIN), dalla caratterizzazione (campionamento, analisi di laboratorio, restituzione dei risultati) alle modalità di intervento e gestione dei materiali (tecnologie di dragaggio e trasporto, gestione del materiale dragato, misure di mitigazione e monitoraggio).

Nell’Allegato A al D.M. 172/2016, seppur riferito ad interventi di dragaggio in aree SIN, si fa in esplicita menzione all’utilizzo di modelli matematici. In particolare:

- nella gestione ambientale del processo di movimentazione dei sedimenti (art. 2), *“le scelte progettuali, effettuate in conformità di quanto previsto dall’articolo 3 del presente decreto, possono essere adottate [...] anche sulla base di modelli matematici adeguatamente implementati in grado di prevedere, per i diversi scenari ipotizzati, il comportamento del sedimento movimentato in ambiente acquatico e i processi di dispersione e/o diffusione della contaminazione eventualmente presente. I risultati di tali modelli, ove applicati, devono costituire parte integrante del progetto di dragaggio [...];*
- nell’ambito delle attività di collocazione del materiale dragato (art. 5), *“Tutte le tipologie di intervento devono essere realizzate secondo modalità tali da escludere impatti misurabili e significativi [...], prevenendo e limitando eventuali dispersioni e rilasci accidentali di materiale, salvaguardando altresì obiettivi sensibili o aree a vario titolo protette, e nel rispetto della pertinente normativa regionale. In funzione della complessità dell’intervento e del contesto ambientale in cui si opera, la valutazione degli effetti deve interessare l’intera area potenzialmente influenzata dalle attività,*

tenendo conto di diversi fattori tra i quali, [...] i risultati dell'applicazione di eventuali modelli matematici, adeguatamente implementati, in grado di prevedere, per i diversi scenari ipotizzati, il comportamento del sedimento movimentato e i processi di dispersione e/o diffusione della contaminazione eventualmente presente;

- *in merito alle misure di mitigazione (art. 6) e alle attività di monitoraggio (art. 7) sono citati nel decreto studi delle caratteristiche idrodinamiche, valutazioni sulla presenza di obiettivi sensibili, sulle modalità di dragaggio/trasporto e collocazione, nonché la valutazione delle opzioni di gestione, che potrebbero sicuramente trarre beneficio dall'applicazione dei modelli per le valutazioni dell'evoluzione spazio/temporali degli effetti indotti dalle movimentazioni.*

Per un confronto tra le normative esistenti nei paesi coinvolti nell'ambito del progetto e la realtà europea, si rimanda, inoltre, al prodotto Se.D.Ri.Port "Studio comparato delle normative in vigore e in corso di esame (italiana, francese ed europea) in materia di dragaggio dei sedimenti portuali ed individuazione delle criticità (ambientali e tecnico/logistiche) relative alla gestione della filiera marino- costiera (gestione "acquatica)" redatto da ISPRA nell'ambito del task T1.2.

Sulla base dell'esperienza maturata in ambito internazionale, si fa sempre più strada l'esigenza di ricorrere a studi modellistici volti ad escludere eventuali impatti nell'area vasta durante l'esecuzione degli interventi e a verificare la rispondenza delle scelte progettuali alle prescrizioni ambientali eventualmente richieste (Lisi *et al.*, 2017 e 2019b).

1.2 Oggetto e scopo del Manuale applicativo

Nel presente Manuale applicativo sono stati ripresi, rimodulati e generalizzati i contenuti salienti delle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) riguardo gli aspetti da considerare per la corretta impostazione delle applicazioni modellistiche in ambito portuale, al fine di renderli facilmente applicabili nelle diverse tipologie portuali presenti nell'area transfrontaliera.

Nello specifico, sono stati messi in evidenza i criteri a supporto dell'identificazione delle forzanti e delle condizioni al contorno (batimetriche, sedimentologiche, climatiche, idrodinamiche) e della caratterizzazione delle sorgenti di rilascio da dragaggio (es. modalità con cui i sedimenti risospesi e/o rilasciati in colonna d'acqua rispetto al volume e alla distribuzione granulometrica iniziale; profondità di rilascio, intensità del rilascio per ciclo di dragaggio).

In particolare, sono dettagliati:

- i fattori ambientali e operativi da considerare per l'implementazione dell'approccio modellistico integrato (AMI);
- le principali interazioni con il monitoraggio ambientale, la cui pianificazione deve consentire sia il controllo degli effetti sull'ambiente sia verifica dei risultati modellistici, in linea con le indicazioni fornite nel D.M. 172/2016 "[...] il piano di monitoraggio deve contenere la descrizione del contesto ambientale in cui si svolgono gli interventi (caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche, presenza di obiettivi sensibili e/o aree a vario titolo protette) [...]";
- le modalità di analisi e sintesi dei risultati per la definizione di "potenziali impatti" sulla base della conoscenza dell'area di intervento (es. presenza e tipologia di obiettivi

- sensibili da tutelare coerentemente con le indicazioni europee ed internazionali, quali, *P. oceanica*, formazioni coralligene, ecc.);
- l'utilizzo di Schede Informative di Progetto (SIP), contenenti le principali informazioni (ambientali e operative) che dovrebbero essere acquisite per una migliore applicazione e verifica degli studi modellistici e per arricchire la disponibilità di dati di campo in vista di progetti futuri.

2 LA MODELLISTICA COME STRUMENTO DI SUPPORTO DECISIONALE

Nel caso della formazione di un pennacchio durante l'escavo (Figura 1), l'area di generazione può essere considerata approssimativamente coincidente con la posizione della draga (o dredging zone). I meccanismi di risospensione e/o rilascio in colonna d'acqua dal mezzo dragante sono strettamente dipendenti dalle modalità tecnico-operative utilizzate (tipologia di draga, velocità, produttività e spessore del taglio durante un ciclo di dragaggio, profondità di escavo, accorgimenti operativi di tipo ambientale, ecc.), legate, a loro volta, alle caratteristiche dei sedimenti da movimentare. Il limite esterno dell'area di generazione del pennacchio di torbida delimita il cosiddetto campo vicino (o *near-field zone*), all'interno del quale i sedimenti sospesi iniziano a subire processi di sedimentazione differenziale (Hadfield, 2014), per cui solo le frazioni granulometriche più fini contribuiscono a formare il pennacchio di torbida nel campo lontano (o *far-field zone*).

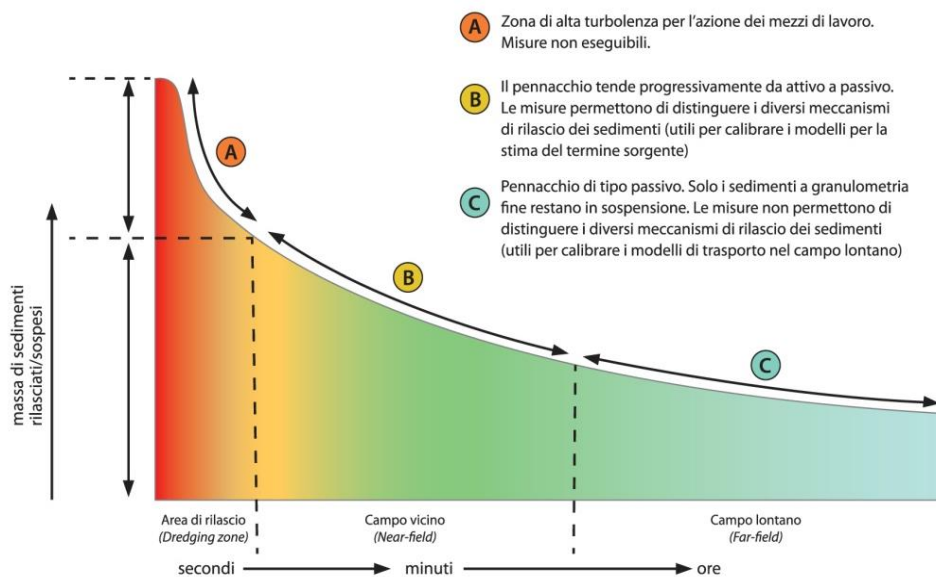


Figura 1: Schema della formazione di un pennacchio di torbida durante la fase operativa di escavo (dragaggio). *Tratto da Lisi et al., 2017 (modificato da HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003).*

Nel campo lontano, i fenomeni di trasporto sono riproducibili con i modelli matematici con un buon livello di affidabilità, essendo la dinamica del pennacchio di tipo passivo⁴.

I modelli matematici, calibrati e validati attraverso l'utilizzo di dati di letteratura e di campo, sono un valido strumento di supporto nelle diverse fasi di progettazione e gestione di un intervento di movimentazione dei sedimenti, possono supportare la scelta comparata delle modalità tecnico-operative in grado di minimizzare gli effetti sull'ambiente, ed essere di riferimento per la pianificazione delle attività di monitoraggio di tali effetti, soprattutto laddove

⁴ I processi di trasporto sono condizionati principalmente dall'azione delle forzanti idrodinamiche (es. onde, maree, vento, gradienti di densità) e sono caratterizzati da scale spaziali dei chilometri e da scale temporali di diversi giorni (es. HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; John et al., 2000).

si riconoscano possibili criticità ambientali che possono scaturire dal trasporto e dalla deposizione dei sedimenti fini rilasciati durante l'intero ciclo di dragaggio.

In linea con i principi metodologici riportati nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), per una stima attendibile dei processi fisici che caratterizzano la dinamica dei sedimenti (rilascio, dispersione, diffusione, deposizione e talvolta risospensione dal fondo) a diverse distanze dal sito d'intervento è opportuno che la selezione dei modelli matematici da implementare sia effettuata in base alle finalità degli studi progettuali e ambientali sia alla tipologia di risultato desiderata e/o richiesta (Figura 2).

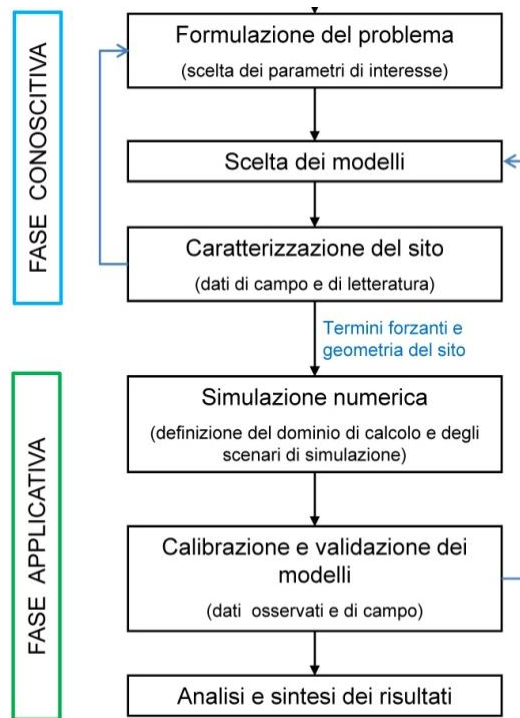


Figura 2: Diagramma di flusso dell'approccio modellistico. Tratto da Lisi *et al.*, 2017 (modificato)

Nel seguito si riportano le caratteristiche salienti dei modelli numerici utilizzabili nell'ambito dell'AMI. Si rimanda alle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) ed alla letteratura di settore per approfondimenti (es. Blumberg & Mellor, 1987; Pedlosky, 1996, 2003; Mei 1989; Chorin *et al.* 2000; Becker *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2016).

2.1 Descrizione della metodologia: l'approccio modellistico integrato

Con riferimento al diagramma in Figura 2, le LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) prevedono una fase conoscitiva preliminare (FCP) basata sulla ricognizione di informazioni e dati (operativi e ambientali) esistenti per stabilire, anche tramite giudizio esperto, la necessità di eseguire studi modellistici e verificare l'idoneità dei set di dati disponibili per implementare, calibrare e validare i modelli matematici e valutare quindi anche l'eventuale necessità di nuove misure.

Si evidenzia che gli studi modellistici si rendono necessari solo a valle di accertata presenza di criticità ambientali e di significativi effetti ambientali attesi in seguito alla formazione del pennacchio di torbida durante le operazioni.

Qualora sia verificata l'esigenza di ricorrere a studi modellistici, le LL.GG. (2017) forniscono

indicazioni per l'implementazione dell'AMI costituito da quattro moduli (Figura 3):

- un modulo idrodinamico (H-M),
- un modulo per la stima del termine sorgente (ST-M),
- un modulo per lo studio del trasporto dei sedimenti (T-M),
- un modulo per la valutazione della significatività degli effetti, (EA-M) tramite strumenti di analisi e sintesi dei risultati.

La Figura 3, riformulata nell'ambito di Lisi *et al.*, 2019 (a,b), riporta in maniera schematica anche le informazioni e i dati (ambientali e sulle modalità operative) necessarie per l'implementazione dell'AMI e la costante interazione tra le attività di modellistica e di monitoraggio ambientale necessarie nelle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi per fornire indicazioni sui set di dati da impiegare per implementare, calibrare e validare e verificare i risultati modellistici (e quindi rispondenza ambientale delle operazioni di movimentazione).

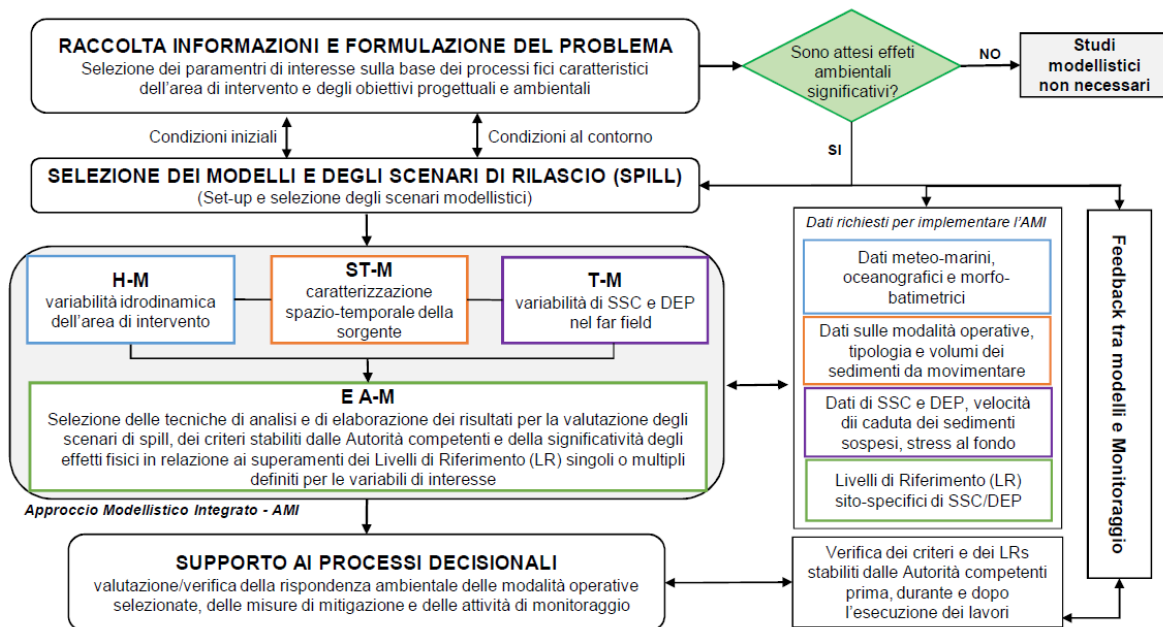


Figura 3: Schema dell'Approccio Modellistico integrato (AMI) e indicazione delle informazioni e dei dati ambientali e operativi necessari riadattato da Lisi *et al.*, 2019 (a,b).

Lo schema in Figura 4 evidenzia infine la tipologia dei modelli transitori utilizzabili nei diversi moduli concettuali dell'AMI (modulo di idrodinamica, modulo per la stima del termine sorgente e modulo di trasporto) e dei risultati che è possibile ottenere in relazione al contesto ambientale (aree costiere, bacini semi-chiusi e aree al largo) e operativo (dragaggio, trasporto e sversamento) dell'intervento. In particolare:

- il modulo di idrodinamica include i modelli di propagazione del moto ondoso e di circolazione;
- il modulo per la stima del termine sorgente include modelli (parametrici ed empirici) differenziati in relazione alle diverse fasi operative dell'intero ciclo del dragaggio;
- il modulo di trasporto include i modelli per lo studio dei fenomeni di dispersione, diffusione e deposizione dei sedimenti che alimentano il pennacchio di torbida nel campo lontano.

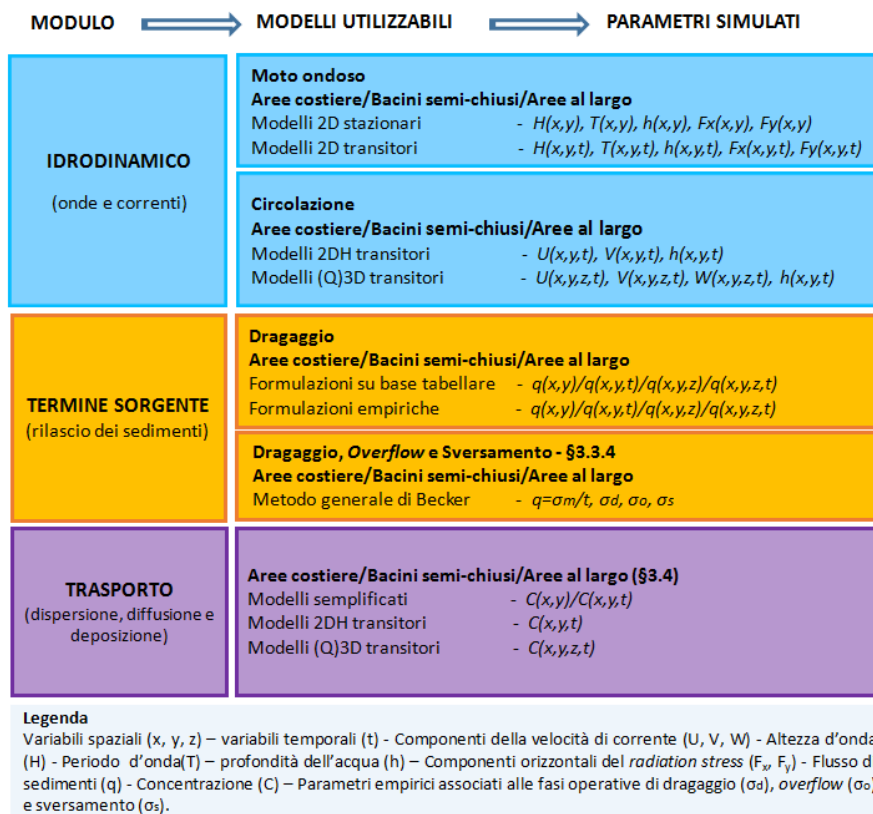


Figura 4: Tipologia dei modelli transitori utilizzabili nell'AMI e dei risultati che è possibile ottenere. Da Lisi *et al.*, 2017 (modificato).

2.2 La modellazione idrodinamica

Il modulo idrodinamico è funzionale alla valutazione dei parametri meteo-marini e idrodinamici (onde, livelli, correnti, ecc.) che incidono sul trasporto e la deposizione dei sedimenti risospesi. Per la simulazione dell'idrodinamica è necessario prendere in considerazione le forzanti presenti nel dominio computazionale, e nell'area circostante l'area di interesse, che tipicamente caratterizzano le aree litoranee generalmente contraddistinte da profondità limitate non superiori a 15 metri⁵ (Lisi *et al.*, 2017).

Le forzanti che maggiormente incidono sulle dinamiche di circolazione nel dominio computazionale, e conseguentemente sul trasporto del sedimento, sono:

- vento locale;
- moto ondoso;
- oscillazione di marea;
- eventuali apporti fluviali e scarichi significativi.

Le forzanti che incidono nell'area circostante l'area di interesse, considerate forzanti di larga scala rispetto al dominio considerato, sono tipicamente:

- correnti di larga scala (es. correnti litoranee o di gradiente interagenti con l'imboccatura di un bacino-semichiuso);

⁵ Si specifica che per l'individuazione delle aree litoranee si deve fare riferimento alla profondità locale piuttosto che alla distanza dalla costa del sito. Infatti, in base alla pendenza locale del fondale due siti a pari distanza da costa potrebbero essere considerati appartenenti ad aree costiere o non costiere ed essere caratterizzati da forzanti idrodinamiche diverse.

- correnti indotte dalle maree e moti propri a scala di bacino (es. sesse) qualora l'area di interesse ne rappresenti una porzione.

Per quel che riguarda le potenzialità dei modelli idrodinamici rispetto alle forzanti correlate si osserva che:

- in relazione all'azione del vento: sono generalmente in grado di riprodurre la generazione di correnti superficiali indotte, ma la valutazione del campo di vento (vista la complessità del fenomeno) dovrebbe essere definita con l'utilizzo di altri strumenti modellistici nell'ambito della definizione degli scenari di simulazione (es. risultati dell'analisi statistica di misure in campo o di dati ricostruiti tramite l'utilizzo di modelli numerici meteorologici integrati con misure satellitari, es. CMEMS, CFSR, ECMWF);
- in relazione all'azione del moto ondoso: alcuni modelli idrodinamici risolvono direttamente la propagazione del moto ondoso, mentre altri considerano la componente ondosa una forzante esterna, che in maniera simile all'azione del vento, rappresenta un termine forzante delle equazioni risolte dal modello numerico;
- in relazione alla presenza di foci (o da scarichi significativi): sono in grado di riprodurre i fenomeni di interazione onda-corrente (in questi casi è importante fornire in input al modello anche il campo di corrente alla foce/scarico).

Più in particolare, il modello idrodinamico deve essere selezionato in funzione delle caratteristiche dell'area in esame e del dettaglio richiesto per i risultati attesi, al fine di:

- valutare l'influenza che un determinato processo fisico ha nella produzione del campo idrodinamico;
- tenere conto dei processi fisici legati all'interazione dell'idrodinamica con tutti i contorni (es. il fondo e l'eventuale linea di costa) nonché con eventuali elementi posti all'interno del dominio di calcolo (es. opere di difesa costiera, strutture morfologiche, barre o scanni in aree di foce).

Scendendo nello specifico dei bacini semichiusi portuali, le dinamiche di circolazione sono prevalentemente associate alla combinazione tra vento locale e oscillazione di marea (quest'ultima generalmente in misura minore) in maniera dipendente dall'estensione del bacino⁶ (e.g. Lisi *et al.* 2009b; Jouon *et al.*, 2006).

Se i bacini portuali sono di piccole dimensioni e caratterizzati da profondità superiori a 5 metri (è il caso della maggior parte dei porti) l'effetto del moto ondoso sulla circolazione è in genere secondario. Inoltre, per bacini portuali con profondità elevate, la circolazione presenta caratteristiche tipicamente tri-dimensionali che dovranno essere adeguatamente rappresentate nei modelli numerici (Lisi *et al.*, 2017).

Tuttavia, è sempre necessario porre attenzione ai casi in cui possono aversi sensibili variazioni dei profili di corrente lungo la verticale, quali ad esempio gli ambienti caratterizzati da importanti processi di stratificazione (es. foci fluviali, aree in cui si ha una rilevante azione del vento sullo strato superficiale).

⁶ In generale, nei casi in cui la dimensione verticale del dominio sia nettamente inferiore a quella orizzontale (ad esempio negli ambienti di transizione, quali aree lagunari e lacustri, caratterizzati da profondità dell'ordine del metro), l'utilizzo di modelli 2DH è particolarmente indicato (e.g. LL.GG. ISPRA, Lisi *et al.*, 2017).

Sulla base di quanto sopra accennato, e a seconda delle formulazioni risolte dai modelli, alcuni modelli risultano più adatti per lo studio di alcuni fenomeni fisici rispetto ad altri, ed alcuni per applicazioni a grande scala piuttosto che di dettaglio.

In Tabella 1 sono riportate le indicazioni di utilizzo più opportuno per i tipi di modelli di applicazione più diffusa per le finalità del presente Manuale:

- modelli tridimensionali e a strati, che considerano il flusso nella sua tridimensionalità e sono quindi in grado di simulare stratificazioni;
- modelli 2DH che invece mediano sulla verticale fornendo una rappresentazione del campo di corrente bidimensionale sull'orizzontale.

Tabella 1: Applicabilità dei modelli per le principali finalità di interesse delle operazioni di movimentazione. Legenda: ++: applicazione consigliata (anche in relazione all'economia computazionale e alla qualità dei risultati necessari); +: applicazione possibile; ○: i risultati risentono parzialmente della formulazione del modello; -: applicazione sconsigliata, i risultati risentono fortemente della formulazione del modello. Tratto da Lisi *et al.*, 2017 (modificato).

CASO IN ESAME	TIPO DI MODELLO	
	Modello 3D, Q3D, a strati	Modello 2DH
Rilascio di sedimenti ad opera di dragaggio in profondità limitate rispetto la dimensione della draga	+	++
Rilascio di sedimenti ad opera di dragaggio in profondità rilevanti rispetto la dimensione della draga	++	-
Rilascio di sedimenti ad opera di dragaggio di porti in prossimità di foci fluviali e con scarichi significativi	++	-
Influenza significativa del vento in bacini semi-chiusi	++	+
Influenza significativa del onde e maree in bacini semi-chiusi	+	++

2.2.1 Definizione del dominio di calcolo

La corretta impostazione della risoluzione del dominio di calcolo è alla base di un buon livello di affidabilità dei risultati. Nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sono fornite indicazioni per definire la risoluzione spaziale da adottare in funzione della dimensione del dominio di calcolo, della complessità della batimetria e della durata prevista per la simulazione (e quindi dell'onere di memorizzazione del dato). Nella simulazione della dispersione di sedimenti, la dimensione spaziale del dominio computazionale è generalmente dell'ordine del chilometro e quella temporale dell'ordine della settimana⁷.

È possibile la costruzione di una griglia ritagliata sulla batimetria di interesse. In questo modo è possibile ottimizzare la conformazione della griglia in termini di accuratezza e riduzione del tempo di calcolo. Ovviamente, sarà utile diradare o infittire la griglia in funzione di una lunga durata della simulazione (diradamento) o della presenza di regioni con forti gradienti batimetrici (infittimento).

⁷ Pertanto, è tecnicamente (ed economicamente) impossibile risolvere il sistema di equazioni dei modelli più complessi (es. con la tecnica DNS – *Direct Numerical Simulation*) che, risolvendo direttamente il sistema di equazioni non semplificato, non sono adatti per simulare in maniera estensiva casi reali, poiché necessitano di una risoluzione spaziale e un passo di integrazione molto piccoli (Lisi *et al.*, 2017).

Una volta definita la griglia di calcolo (mesh), il dato batimetrico da associare ai diversi elementi della stessa può essere definito a partire da tutti i database batimetrici disponibili (vedi par. 2.2.3.1), tipicamente ad alta risoluzione nella zona più vicino a costa o a strutture che definiscono il bacino semi-chiuso e con risoluzione più grossolana allontanandosi da esse, interpolando i dati sui nodi di calcolo della griglia. In molte applicazioni, anche in funzione del solutore che si utilizza, sarà necessario procedere con una fase di “regolarizzazione” della batimetria. Tale operazione, necessaria per l’accuratezza della simulazione, deve essere eseguita in modo tale da non alterare le caratteristiche morfologiche nel dominio di calcolo.

In funzione delle finalità e livello di dettaglio degli studi, eventuali opere presenti nel dominio possono essere inserite tramite formulazioni parametriche che variano da modello a modello. Se la griglia di calcolo ha una risoluzione sufficiente, alcune opere potrebbero essere inserite anche attraverso opportune alterazioni della batimetria.

Il dominio di calcolo deve includere le aree oggetto di eventuali criticità ambientali e coprire un’area sufficientemente estesa in modo da evitare effetti di bordo dovuti all’imposizione delle condizioni al contorno si verifichino anche a ridosso dell’area di intervento. L’intero dominio deve essere discretizzato con una risoluzione adeguata per la riproduzione della complessità dei flussi di corrente e dei diversi processi fisici che riguardano le dinamiche del pennacchio di torbida (dispersione, diffusione e processi di sedimentazione) dal sito di movimentazione al campo lontano (Bridges *et al.*, 2008). È auspicabile, inoltre, un’analisi di sensitività per valutare se la discretizzazione scelta per il dominio di calcolo sia adeguata a rappresentare i fenomeni in gioco. Il dominio di calcolo deve anche includere eventuali apporti di portata fluida e solida (es. immissioni fluviali in bacini o aree litoranee, scarichi industriali all’interno di porti, ecc.) ritenuti significativi in relazione alle dinamiche di interesse.

In caso di corpi idrici stratificati è necessario considerare le variazioni tridimensionali del campo di moto e i loro effetti sui processi di trasporto del pennacchio di torbida, tramite l’utilizzo di modelli tridimensionali (es. Davies *et al.*, 2002; Bai *et al.*, 2003; Lumborg, 2005; De Marchis *et al.*, 2014; DHI, 2017c). In tali casi, l’intero dominio deve essere discretizzato, con una risoluzione adeguata, sia in termini planimetrici che lungo la direzione verticale.

2.2.2 Definizione degli scenari di modellazione

Affinché il sistema di equazioni che governa il problema sia risolto numericamente è necessario fornire le condizioni iniziali delle variabili considerate e le condizioni al contorno del dominio di calcolo. Tali condizioni hanno l’effetto di tener conto delle azioni di tutte le forzanti che agiscono dall’esterno sul dominio computazionale. La loro definizione è inquadrabile nell’ambito della definizione degli scenari di simulazione. Per discernere tra effetti attesi di breve e lungo periodo, l’AMI, presentato nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) prevede l’implementazione di diverse tipologie di scenari:

- sintetici-climatologici: basati su forzanti di carattere statistico che sintetizzano le condizioni rappresentative di un dataset (composto da dati osservati o ricostruiti) relativo ad uno specifico intervallo temporale;
- realistici di breve periodo: volti ad approfondire solo specifiche condizioni considerate sfavorevoli, ossia che possono indurre situazioni di criticità (scenari critici), sono indicati nella fase di modellistica preliminare;

- realistici di lungo periodo: indicati nell'ambito di studi modellistici di dettaglio, il modello viene integrato per lunghi periodi, così da rappresentare la variabilità intra-annuale e, nel caso di simulazioni pluriennali, inter-annuale;
- previsionali: permettono di intervenire tempestivamente sulle modalità operative selezionate al fine di evitare i rischi associati alle condizioni ambientali ritenute avverse (es. adozione tempestiva di accorgimenti tecnico-operativi o interruzione delle operazioni di movimentazione) e di ottimizzare le attività di monitoraggio pianificate per il controllo degli effetti attesi.

L'analisi e la definizione degli scenari, così come degli strumenti modellistici da adottare, riveste un ruolo fondamentale per il conseguimento degli obiettivi dello studio. A tal fine si deve innanzitutto stabilire quali fenomenologie fisiche sia strettamente necessario considerare per una realistica rappresentazione delle condizioni locali e quali possano essere ritenute secondarie.

Tali considerazioni derivano, in particolare, da aspetti legati a:

- caratteristiche locali (es. meteo-marine, morfobatimetriche e idrodinamiche) e distanza dalla costa;
- scale spazio-temporali (dipendenti sia dai fenomeni fisici che caratterizzano il sito, che dai parametri operativi e ambientali dell'intervento).

È necessario, inoltre, considerare che:

- la componente di dispersione e trasporto dei sedimenti legata al moto ondoso assume una rilevanza maggiore proporzionalmente alla vicinanza alla linea di costa;
- la caratterizzazione della componente idrodinamica deve includere valutazioni della circolazione generale di larga scala a meno che non esista una disconnessione tra circolazione al largo e circolazione di piccola scala e le aree interne al bacino portuale che deve comunque essere adeguatamente verificata e motivata.

In ogni caso, la selezione dei processi fisici ritenuti significativi nella definizione degli scenari deve essere sempre e comunque supportata da evidenze analitiche che ne giustifichino la scelta. In generale, l'aumento del livello di dettaglio fornito dai modelli matematici ne aumenta il grado di aderenza alla realtà, ma deve essere valutato caso per caso, anche in relazione all'identificazione di eventuali criticità ambientali nell'ambito delle fasi conoscitiva e modellistica preliminari, cercando il giusto bilanciamento tra la capacità del modello di essere aderente alla realtà e le risorse necessarie.

Nel seguito le metodologie di approccio per la definizione degli scenari di modellazione di possibile adozione nell'AMI, raggruppate nelle quattro generali tipologie sopra riportate, sono definite in relazione ai vari obiettivi degli studi (Tabella 2).

Tabella 2: Schema di confronto delle principali caratteristiche degli approcci modellistici descritti (da Lisi *et al.*, 2017)

APPROCCIO MODELLISTICO	FINALITÀ DI UTILIZZO	CONDIZIONI E LIMITI DI APPLICABILITÀ	DATI NECESSARI
Climatologico	<p>Scenari specifici rappresentativi di condizioni da analizzare in maniera più dettagliata, ad esempio:</p> <ul style="list-style-type: none"> - condizioni statisticamente più ricorrenti; - condizioni stagionali; - condizioni estreme (es. mareggiate, intensi apporti fluviali); - condizioni climatiche non estreme, ma comunque sfavorevoli (ad esempio, forzanti che inducono correnti in uscita dalle imboccature portuali, o dirette verso recettori sensibili). 	<p>Non riproduce fedelmente gli effetti dovuti all'interazione tra le forzanti, in quanto ognuna di esse è selezionata sulla base di caratteristiche statistiche e non della loro effettiva contemporaneità.</p> <p>Non permette la possibilità di calibrare/validare il modello con dati di campo.</p> <p>Utilizzabile prevalentemente nella fase modellistica preliminare ed eventualmente nella fase di dettaglio per approfondimenti specifici</p>	<p>Statistiche per:</p> <ul style="list-style-type: none"> - forzanti atmosferiche; - forzanti idrodinamiche
Realistico a scenari	<p>Scenari rappresentativi di:</p> <ul style="list-style-type: none"> - condizioni statisticamente più ricorrenti; - condizioni stagionali; - condizioni estreme (es. mareggiate, intensi apporti fluviali); - condizioni climatiche non estreme, ma comunque sfavorevoli (ad esempio, forzanti che inducono correnti in uscita dalle imboccature portuali, o dirette verso ricettori sensibili). <p>Rispetto allo scenario climatologico permette una riproduzione più realistica dell'interazione tra le diverse forzanti fisiche, basata su dati reali. Inoltre, permette il riscontro dei risultati modellistici con i dati di campo.</p>	<p>Non sempre è possibile reperire dati realistici corrispondenti a particolari situazioni di interesse (es. eventi estremi con particolari tempi di ritorno).</p> <p>Indicato nella fase modellistica preliminare per valutazioni speditive d'insieme e nella modellazione di dettaglio per approfondimenti specifici</p>	<p>Dati osservati o ricostruiti tramite database modellistici</p>
Realistico di lungo periodo	<p>Riproduce situazioni realistiche per lunghi periodi, così da rappresentare la variabilità intra-annuale, e, nel caso di simulazioni pluriennali, inter-annuale.</p> <p>Permette di riprodurre la completa variabilità fisica dei processi idrodinamici e di condurre una analisi dei risultati di carattere statistico, ad esempio</p> <ul style="list-style-type: none"> - il tempo e la frequenza di superamento di determinati livelli di riferimento per le variabili di interesse; - le intensità massime raggiunte dalle variabili su un periodo rappresentativo; - l'evoluzione spazio-temporale delle variabili simulate, fornendo utili informazioni sui periodi più o meno indicati nel corso dell'anno per le attività di dragaggio. 	<p>È necessario verificare che le forzanti corrispondenti al periodo scelto siano rappresentative della variabilità climatica del sito, sia in termini di condizioni medie che estreme.</p> <p>Indicato nell'ambito di studi di dettaglio.</p>	<p>Dati osservati o ricostruiti tramite database modellistici</p>
Previsionale-operativo	<p>Previsione in corso d'opera delle condizioni meteo-marine, idrodinamiche e di trasporto per intervenire tempestivamente in caso di condizioni ambientali ritenute particolarmente avverse in relazione alle modalità operative selezionate e stabilire se e quando adottare accorgimenti operativi al fine di evitare i rischi evidenziati nella fase di progettazione.</p>	<p>L'adozione di tale approccio richiede una adeguata pianificazione delle attività modellistiche in corso d'opera per rendere fruibili i risultati in tempi compatibili con lo svolgimento delle operazioni di movimentazione.</p>	<p>Dati previsionali da modelli di larga scala</p>

2.2.3 Definizione ed introduzione dei termini forzanti

2.2.3.1 Dati batimetrici

Come accennato in precedenza, è necessario fornire in ingresso ai modelli il valore della profondità all'interno del dominio computazionale in ogni punto di griglia ed è essenziale che la risoluzione del dato batimetrico sia sufficientemente rappresentativa rispetto alla variabilità del fondale in funzione della risoluzione utilizzata. Qualora il fondale marino in una certa area, ad esempio di largo, abbia un limitato gradiente spaziale sono sufficienti dati batimetrici a risoluzione idonea a rappresentare la variabilità naturale dei fondali, a prescindere dalla risoluzione della griglia utilizzata.

Inoltre, è utile disporre anche della conformazione e della posizione di tutte le infrastrutture (porti, opere di difesa, ecc.) presenti. Tali opere, infatti, interagiscono con l'idrodinamica e quindi con i processi di trasporto dei sedimenti sospesi (e dei contaminanti, se presenti) e vanno adeguatamente inserite all'interno del dominio computazionale.

Il dato batimetrico delle aree di intervento è essenziale per tutte le tipologie di modelli di idrodinamica e trasporto. Tali dati possono essere ricavati da carte nautiche, da indagini precedentemente effettuate (es. per la gestione della logistica portuale e per la realizzazione di nuove strutture), o altro.

Qualora la batimetria non descriva dettagliatamente il tratto di costa fino alla riva, è possibile ricavare una linea di riva di dettaglio da ortofoto, immagini satellitari o rilievi di campo. In tal modo è possibile interpolare i dati di profondità dalla batimetrica più vicina alla riva disponibile (almeno la -5 m in caso di mari e laghi) e la linea di riva. È evidente che tale operazione va eseguita utilizzando dati batimetrici e rilievi della linea di riva quanto più recenti e relativi a periodi temporali vicini tra loro.

L'implementazione di studi modellistici a media/larga scala richiede la disponibilità di set di dati batimetrici omogenei ed in grado di garantire un'ampia copertura spaziale (Tabella 3).

Per l'applicazione di modelli a piccola scala, utili per gli studi che rientrano nelle finalità del presente Manuale, e qualora vi sia la necessità di un'analisi accurata dei processi idrodinamici e dei fenomeni della generazione e del trasporto dei sedimenti sospesi vi è la necessità di dataset di dettaglio. Gli strumenti generalmente utilizzati per la ricostruzione di batimetrie sono ecoscandagli tipo *Singlebeam* o *Multibeam* e dati da laser scanner tipo *LiDAR*.

2.2.3.2 Dati sedimentologici

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti dell'area di intervento sono fondamentali nella pianificazione delle operazioni di movimentazione perché danno informazioni importanti circa l'ambiente di deposizione e i parametri sedimentologici che ne governano le dinamiche di sedimentazione. Anche i dati acquisiti mediante il posizionamento di trappole sedimentarie (deposimetri), inoltre, rivestono un ruolo cruciale per la calibrazione/validazione dei modelli di trasporto qualora vi sia la necessità di un'analisi accurata dei tassi di deposizione dei sedimenti.

Come riportato nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), ai fini degli studi modellistici per lo studio della dispersione della frazione fine dei sedimenti sospesi è necessario che siano eseguite analisi granulometriche per la determinazione del diametro medio delle classi dimensionali che, in funzione delle caratteristiche del sito (idrodinamica e tassi di erodibilità), sono considerabili disponibili al trasporto nel campo lontano durante le operazioni di

dragaggio (e successivamente per risospensione della quota rideposta al fondo) per l'azione delle correnti locali.

La definizione della curva granulometrica rappresentativa del sedimento che andrà ad essere movimentato è di sostanziale importanza ai fini della determinazione dei diametri medi delle particelle e dell'abbondanza percentuale della frazione fine, $<63 \mu\text{m}$ (nel rispetto della scala *Wentworth*) o $<74 \mu\text{m}$ (nel rispetto della classificazione USCS - *Unified Soil Classification System*), necessaria per la modellazione della plume. Tali informazioni possono essere reperite da analisi granulometriche pregresse effettuate nell'area di interesse o in alternativa, se possibile, si possono anche prevedere dei campionamenti mirati tramite benna o box corer nel caso in cui la profondità di dragaggio sia limitata o tramite carotiere nel caso in cui sia prevista la movimentazione di sedimento più profondo.

2.2.3.3 Dati meteo-climatici ed idrodinamici

La caratterizzazione meteo-marina può essere effettuata attraverso la ricostruzione storica delle serie temporali di marea, anemometriche (intensità e direzione del vento) e ondamiche (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) a partire dai dati misurati in prossimità del sito di interesse (stazioni mareografiche, anemometri, boe ondamiche, ecc.).

I dati ondametrici possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondamica.

Non è sempre possibile fare affidamento su misure di vento e di onda a causa della frammentarietà delle serie temporali, dovuta a malfunzionamenti o a periodi di manutenzione della strumentazione, alla mancanza o alla non rappresentatività del paragone in esame a causa della distanza dal sito di interesse, o della copertura di un intervallo di tempo esiguo non sufficiente a rappresentare le condizioni climatiche dell'area (rappresentatività statistica delle osservazioni tipicamente accettabili per periodi di osservazione superiori ai 5-10 anni).

Per ovviare alla mancanza di serie di dati rappresentative si fa spesso ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteo-marine attraverso modellistica matematica. Tale approccio, comunemente definito come "*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali (intensità e direzione del vento; altezza, periodo e direzione delle onde) nel punto desiderato. Nel caso si ricorra a tale tipologia di dati, va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate con osservazioni *in situ* o da remoto.

Per la caratterizzazione dei livelli, in particolare in relazione alla componente meteorologica della marea, sorgono le medesime problematiche citate per i dati di onda e vento, talvolta riconducibili alla limitata copertura spaziale dei mareografi presenti nei pressi del sito di studio e/o alla disponibilità di serie di dati eccessivamente frammentate a causa di malfunzionamenti o manutenzioni. Anche in questo caso si può in parte ovviare alla mancanza di misure di campo facendo ricorso alla modellistica matematica. In particolare, esistono numerosi *software* di *hindcast* e previsione mareale gratuiti, accessibili al pubblico, e di facile implementazione che permettono di ricostruire serie di marea astronomica, sia passata che futura, in qualsiasi punto del globo a frequenze anche inferiori all'ora. La qualità di questi prodotti è oramai molto elevata, e l'errore commesso è normalmente ampiamente inferiore al 10% rispetto al dato misurato. I *software* normalmente reperibili forniscono, oltre all'oscillazione della superficie libera, anche la velocità mareale barotropica, parametro che

risulta di grande importanza per un corretto annidamento dei modelli idrodinamici ad alta risoluzione.

Si riporta nel seguito una rassegna dei dati disponibili utili per applicazioni modellistiche in ambiti portuali, rimandando alle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) per una descrizione di maggiore dettaglio circa la tipologia dei dati e degli strumenti disponibili.

- *Onde*

Nel caso in cui sia ritenuta non trascurabile l'influenza del moto ondoso, si deve fornire una stima del campo di moto ondoso in ingresso ai bordi del dominio computazionale. L'informazione sul campo di moto ondoso di largo in un punto è generalmente rappresentativa delle condizioni di area vasta. Considerando le dimensioni tipiche delle applicazioni considerate, ciò significa che l'informazione in un punto di largo può essere sufficiente a caratterizzare le condizioni di largo per l'intero dominio computazionale. Nei casi di vicinanza alla costa, e quindi dei sensibili effetti di schermatura dovuti alla presenza delle strutture portuali (o di promontori, isole e altre infrastrutture se presenti in prossimità dell'ambito di intervento) è necessario, invece, caratterizzare il moto ondoso in maniera più dettagliata, o tramite un modello matematico che parte dalle condizioni di largo o da un sistema di misure adeguato.

La misurazione dei parametri relativi al moto ondoso può essere eseguita tramite radar costieri (prevalentemente radar in banda X), satelliti (prevalentemente sensori altimetrici e SAR, ma anche scatterometri radar), ADCP, sensori di pressione o boe ondometriche. Radar e Satelliti possono produrre campi di moto ondoso su aree marine estese. In particolare, i dati radar sono caratterizzati da un'alta risoluzione sia spaziale che temporale, mentre, quelli satellitari da risoluzioni più basse e una maggiore estensione della copertura spaziale (sebbene siano poco affidabili vicino alla costa). ADCP, sensori di pressione e boe ondometriche producono invece dati puntuali, comunque generalmente sufficienti, specialmente in mare aperto, a caratterizzare il moto ondoso in una vasta area. Al fine di rappresentare correttamente il fenomeno, le serie storiche devono avere una discretizzazione temporale non superiore alle 6 ore.

- *Vento*

Il dato cui si fa riferimento nei modelli numerici è quello del vento a 10 m s.l.m. Similmente al caso della variabilità dei dati di onda, il dato relativo al campo di vento può essere rappresentativo di aree vaste, anche se ciò non può essere considerato valido nel caso in cui siano presenti caratteristiche morfologiche (es. presenza di promontori) in grado di modificare a scala locale il campo di vento.

A differenza del campo di onde e correnti, il campo di vento non è mai risolto dal modello idrodinamico, pertanto, non ci si può limitare a fornire le condizioni al contorno, ma sono necessari valori di intensità e direzione del vento all'interno dell'intero dominio computazionale.

Gli strumenti utilizzabili per tali misurazioni sono satelliti (prevalentemente scatterometri radar ma anche sensori altimetrici e SAR), radar (radar in banda X) e anemometri (di varie tipologie).

Va tenuto a mente che, sebbene siano di primaria importanza per applicazioni modellistiche in ambito portuale, raramente si dispone di misure di vento sul corpo idrico e che generalmente i modelli numerici per la meteorologia tendono a sottostimare l'intensità del campo di vento in mare, in particolare nelle vicinanze della costa.

- *Livello marino*

Il valore del livello marino è influenzato da forzanti astronomiche, venti e variazioni di pressione atmosferica (es. Pasquali *et al.*, 2015). Nell'ambito di bacini chiusi o semi-chiusi possono, inoltre, instaurarsi processi di oscillazione (sesse) con periodi ed effetti assimilabili a quelli delle maree astronomiche.

Il livello del mare è un parametro sostanzialmente uniforme per ampie aree. Non è generalmente necessario, pertanto, per aree delle dimensioni tipiche di quelle utilizzate negli studi numerici che riguardano processi di movimentazione di sedimenti, acquisirne il valore in maniera spazializzata.

Per le aree assimilabili a bacini semichiusi se il dominio computazionale include l'intero bacino è importante che il dato di livello marino provenga da un punto di misura sufficientemente rappresentativo del livello presente nei pressi delle bocche di comunicazione del bacino con il mare aperto. Se il dominio computazionale rappresenta solo una parte del bacino stesso, allora è necessario che il punto di misura sia interno al bacino e vicino ai bordi del dominio computazionale. La frequenza temporale con cui viene acquisito il dato deve essere rappresentativa della variabilità del fenomeno che è su scala diurna o semidiurna per le maree, e dell'ordine di qualche ora per i fenomeni relativi a *storm surge* e *set up* da moto ondoso, con un conseguente ordine di grandezza dell'ora per gli intervalli temporali tra le misure.

Gli strumenti utilizzabili per la misura del livello marino sono satelliti (sensori altimetrici radar) e mareografi (ve ne sono di varie tipologie, meccanici, a ultrasuoni, radar, ecc.).

- *Correnti*

Le correnti possono essere indotte da diverse forzanti (vento, onde, marea, ecc.) e caratterizzate da diverse dimensioni di scala. A seconda delle dimensioni del dominio computazionale, alcuni tipi di corrente potranno essere inseriti come forzante nel processo di calcolo, includendo la causa generatrice (es. vento, onde) nella formulazione del modello, mentre altri dovranno essere simulati come forzanti esterne (es. circolazione termalina a livello di bacino, maree, sesse, ecc.).

Nel primo caso non è necessario disporre di informazioni specifiche di campo rispetto al dato di corrente, in quanto queste saranno calcolate nel modello numerico a partire dai dati di altri parametri fisici. Nel secondo caso è invece necessario disporre del dato di corrente prodotto da una specifica misurazione o simulazione numerica.

Gli strumenti utilizzabili per ottenere misure di velocità e direzione di corrente sono vari. Per misurare la corrente superficiale sono disponibili dati satellitari (prevalentemente sensori altimetrici e SAR, ma anche scatterometri radar) e dati rilevati dai radar costieri (prevalentemente in banda HF). Questi strumenti offrono il vantaggio di produrre informazioni per un'area spaziale estesa, seppur limitatamente allo strato superficiale. I profili verticali di corrente sono, invece, prodotti da altri strumenti che eseguono misure tendenzialmente puntuali (possono eventualmente essere ripetute in punti diversi per avere un'informazione spaziale). Tra questi possono essere citati gli ADCP (strumenti che sfruttano l'effetto Doppler), *drifter* ARGO (che sfruttano il posizionamento GPS), correntometri meccanici equipaggiati su boe galleggianti o sonde calate in acqua da natante. Nello specifico i *drifter* ARGO vengono utilizzati per acquisire dati in mare aperto ed hanno il vantaggio di raggiungere anche grandi profondità, ma la produzione di dati è disomogenea sia nello spazio che nel tempo. L'utilizzo di radar costieri produce campi con una buona frequenza temporale e con copertura di aree marine sufficientemente estese, ma le misurazioni si limitano agli strati superficiali della colonna d'acqua. Le informazioni da satellite producono

campi di corrente superficiale generalmente più estesi di quelli prodotti dai radar ma con più bassa risoluzione spaziale e temporale. Infine, gli ADCP e i correntometri meccanici stazionari producono dati in continuo di intensità e direzione della corrente in un punto (particolarmente indicati per la misurazione della corrente alla foce di fiumi o di scarichi), mentre, se equipaggiati a bordo di imbarcazioni possono produrre informazioni spaziali a scapito però della continuità temporale.

Per quanto riguarda gli intervalli di campionamento, le correnti di largo legate alla circolazione termoclinala hanno una variabilità che può essere rappresentata anche da dati mensili o giornalieri. Nel caso in cui il dato di corrente debba tener conto anche degli effetti legati alla presenza di vento o onde (perché non inseriti direttamente nella formulazione del modello) è allora necessario che l'intervallo di campionamento sia in grado di rappresentare la variabilità di questi altri fenomeni (si rimanda ai singoli paragrafi per la descrizione).

2.2.3.4 Dati oceanografici ed idrologici

- *Temperatura e salinità dell'acqua*

L'acquisizione di dati di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua è importante per verificare l'eventuale presenza, anche nel caso di fondali poco profondi, di stratificazioni dovute a masse d'acqua di diversa densità. In questi casi sarà necessario utilizzare un modello 3D o quasi-3D per descrivere anche la densità variabile lungo la colonna d'acqua. Ciò si ottiene tramite l'inserimento in input al modello dei valori di temperatura e salinità, sia come condizioni iniziali che al contorno. Generalmente tali valori possono essere ottenuti da modelli numerici oceanografici, sebbene per studi di dettaglio sia importante tenere conto anche di eventuali foci o scarichi di acque a diversa densità (es. acque dolci). La presenza di corpi idrici o scarichi nel dominio di calcolo, infatti, può determinare una significativa variazione locale di salinità e temperatura. Questi devono pertanto essere tenuti in considerazione tra le forzanti in termini di portata, temperatura e salinità o differenza di temperatura e salinità rispetto al corpo ricevente.

Purtroppo i prodotti dei modelli numerici relativi a temperatura e salinità sono spesso vicini alla realtà in superficie perché possono assimilare il dato satellitare, ma lungo la colonna d'acqua possono verificarsi divergenze notevoli. Al fine di porre rimedio a tale limite è opportuno dotarsi di misure di salinità e temperatura lungo la verticale che possano rappresentare la situazione all'interno del dominio computazionale (generalmente ciò corrisponde al considerare misure eseguite all'interno dell'area coperta dal dominio stesso).

Le misure di temperatura superficiale sono prodotte con un buon grado di precisione da sensori satellitari, mentre il prodotto relativo alla salinità, essendo di più recente introduzione, è meno preciso. Lungo la colonna d'acqua è necessario utilizzare invece strumenti come sonde multiparametriche CTD e ADCP che possono acquisire misure in continuo in una posizione fissata o, se equipaggiati su imbarcazioni, fornire misure in più punti del dominio a scapito della continuità temporale.

Nel caso di aree marine al largo la variazione dei parametri di temperatura e salinità è molto lenta e dati con cadenza mensile o giornaliera possono essere sufficientemente rappresentativi del fenomeno (es. i *drifter* ARGO sopra descritti per le correnti). Nei pressi della costa invece tali variazioni, soprattutto nel caso della presenza di stratificazioni, possono mostrare una variabilità maggiore a causa dei processi di mixing innescati prevalentemente dalla presenza del moto ondoso. In generale, la stratificazione viene considerata soltanto per la creazione della condizione iniziale prima dell'avvio del modello.

Fanno eccezione i modelli particolarmente avanzati che assimilano durante l'esecuzione i dati misurati per correggere *in itinere* i campi da essi prodotti.

2.2.3.5 Torbidità e sedimenti in sospensione

Nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) si fa riferimento generalmente alla concentrazione di solidi sospesi (SSC) come parametro correlato alla frazione sospesa e generalmente utilizzato dal modello di trasporto.

Le misure di torbidità e della concentrazione di solidi sospesi in colonna d'acqua non sono parametri direttamente utilizzati per l'implementazione di modelli numerici, ma sono di primaria importanza in fase di verifica dei risultati modellistici e per la loro eventuale successiva ricalibrazione, al fine di garantire una maggiore aderenza con i dati di campo.

La sostanza solida sospesa è composta di frazione organica e inorganica, che possono essere separate attraverso trattamento termico. Per definizione, i solidi sospesi totali (TSS) rappresentano il materiale presente in sospensione in un campione d'acqua che può essere separato attraverso filtri o membrane di dimensioni standardizzate. Per la stima della concentrazione della componente inorganica (ISS), i solidi raccolti sul filtro vengono essiccati ad una temperatura di 103 - 105°C fino a peso costante.

Il parametro TSS, che richiede la raccolta e l'analisi di campioni di acqua e pertanto risulta non agevole da misurare, viene spesso sostituito dal parametro più generale di torbidità. Per la misura di torbidità possono essere utilizzate diverse tipologie di sonda che permettono l'acquisizione di misure (dirette e indirette) della torbidità. Si citano, ad esempio, sonde basate su tecnologie di tipo ottico (es. OBS), acustico (es. ADCP) o laser (es. LISST). A partire da misure di campo e da operazioni di calibrazione, è possibile derivare una correlazione tra i due parametri. Tale correlazione deve essere aggiornata durante le attività di movimentazione poiché fortemente dipendente dalle caratteristiche del sedimento risospeso (diametro delle particelle, composizione, indice di rifrazione, etc.).

I valori di concentrazione dei solidi sospesi totali possono essere quantificati anche attraverso altre indagini di utilizzo meno frequente, quali ad esempio, misure di densità della miscela di acqua e sedimenti (ma tale metodo è funzionale solo in presenza di alte concentrazioni di sedimenti in sospensione) e tramite lettura indiretta dalla rilevazione dei parametri di pH e DO (Ossigeno Disciolto) i cui valori sono alterati dalla presenza dei solidi sospesi.

Infine, vi è la possibilità di utilizzare strumenti da remoto (come foto aeree o dati da sensori multi spettrali da satellite) per ottenere una rappresentazione dell'estensione superficiale del pennacchio di torbida.

Tabella 3: Schema di sintesi delle fonti di dati topo-batimetrici e meteo-marini di libero accesso disponibili. Tratto da Lisi *et al.*, 2017

TIPO DI DATO	FONTE DEL DATO	LINK/GESTORE DEL DATO
Dati topo-batimetrici nazionale	Cartografia IIM in scala: 1:25.000/1:50.000/1:100.000	Istituto Idrografico della Marina Militare (IIM)
	Cartografie IGM in scala: 1:25.000/1:50.000/1:100.000	Istituto Geografico Militare (IGM)
	Batimetria EMODNET	http://portal.emodnet-bathymetry.eu/help/help.html
	CTR regionali in scala 1:100.000	
	Batimetria GEBCO	http://www.gebco.net
	Fogli della "Carta degli Elementi di Pericolosità Geologica dei Mari Italiani " in scala 1:50000 del progetto MaGIC	http://www.magicproject.it/index.php/it
	Dati LiDAR	http://www.pcn.minambiente.it/geoportal/
Immagini satellitari SAR (Sentinel)	http://copernicus.eu/main/sentinels	

TIPO DI DATO	FONTE DEL DATO	LINK/GESTORE DEL DATO
Correnti	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
Onde	ECMWF	http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	KASSANDRA	http://www.ismar.cnr.it/kassandra
	RON	http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/
	NOAA	http://www.noaa.gov/
Vento	ECMWF	http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets
	Aeronautica Militare	http://www.meteoam.it/dati_in_tempo_reale
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
	RON	http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/
Livelli marini	KASSANDRA	http://www.ismar.cnr.it/kassandra
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
Temperatura e salinità	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
Vincoli ambientali	SIN	http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/siti-contaminati/siti-di-interesse-nazionale-sin/
		http://www.bonifiche.minambiente.it/
	SIC, ZSC E ZPS	http://www.minambiente.it/pagina/sic-zsc-e-zps-italia/
	Aree Protette (parchi e aree marine protette)	http://www.minambiente.it/pagina/aree-naturali-protette/ http://www.minambiente.it/pagina/aree-marine-protette/
	Aree archeologiche e storico-architettoniche	#/">http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MiBAC/sito-MiBAC/MenuPrincipale/LuoghiDellaCultura/Ricerca/index.htm

2.3 La modellazione degli scenari di rilascio per operazioni di dragaggio

Le operazioni di movimentazione del sedimento sono schematizzate come una sorgente di rilascio. Il termine sorgente, in particolare, dipende dalle modalità tecniche e operative impiegate, dalle caratteristiche idrodinamiche e ambientali nelle immediate vicinanze del mezzo dragante (campo vicino) e dal volume e dalle caratteristiche del sedimento movimentato, quali ad esempio densità, distribuzione granulometrica, percentuale di frazione fine (es. Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.*, 2016).

La stima del termine sorgente durante le operazioni di movimentazione, e la caratterizzazione delle diverse fasi in cui si sviluppa (escavo, trasporto, sversamento), ha ricevuto particolare attenzione dalla letteratura tecnica di settore, in particolare per la fase di escavo (es. Nakai, 1978; Hayes, 1986; Collins, 1995; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo *et al.*, 2008; Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.*, 2017 e 2019b). Essa è da intendersi come la stima dell'intensità del flusso (q) della massa di sedimenti fini sospesi nell'unità di tempo (kg/s) che entra nel dominio di calcolo. La Figura 5 riporta una schematizzazione esemplificativa delle principali sorgenti di rilascio di sedimenti durante la movimentazione (escavo) dei sedimenti al fondo con tecniche di dragaggio idraulico e meccanico convenzionali. La tecnica del livellamento, considerata nell'ambito del progetto, può essere schematizzata come l'escavo e il successivo spostamento/ridistribuzione del sedimento

dragato dal fondale ad una zona adiacente, senza che la testa del mezzo dragante fuoriesca dalla colonna d'acqua.

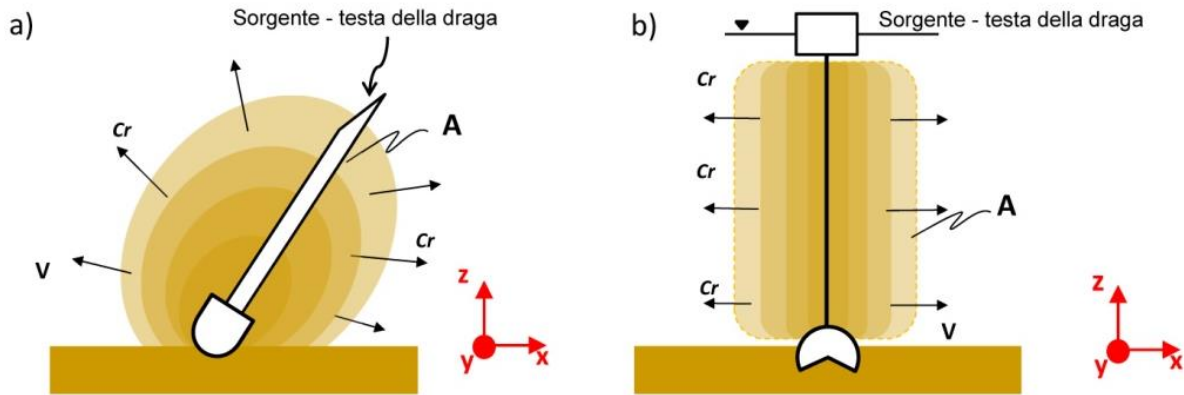


Figura 5: Schema concettuale del fenomeno di rilascio di sedimenti per: a) escavo con draga idraulica; b) escavo con draga meccanica; i piani (o,x,z) e (o,y,z) quelli verticali. Da Lisi *et al.*, 2017.

Come dettagliatamente illustrato nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), la quantità di sedimento effettivamente disponibile per la dispersione nel campo lontano (vedi Figura 1) si basa sull'analisi dei seguenti parametri (vedi Figura 5):

- la concentrazione (C_r , kg/m^3) del sedimento risospeso e/o rilasciato in prossimità del mezzo dragante;
- la geometria (forma e dimensione) della sorgente;
- la velocità della corrente (v , m/s) in prossimità della sorgente;
- la velocità di caduta dei sedimenti;
- la percentuale di sedimento fine contenuta nel sedimento complessivo;
- la frazione di sedimento fine che abbandona la sorgente, eventualmente scomponibile nelle diverse fasi in cui l'azione di movimentazione si sviluppa (escavo, trasporto, sversamento).

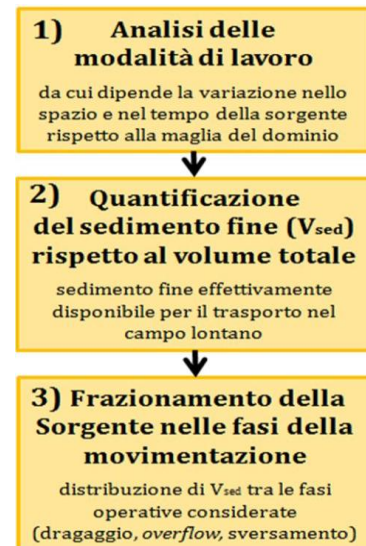
Per lo studio della dinamica dei pennacchi di torbida su larghe scale spaziali e temporali (quindi per le finalità delle applicazioni modellistiche proposte nel presente Manuale, nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) si suggerisce l'utilizzo dei modelli cosiddetti di campo lontano (*far-field models*, Figura 1). Tali modelli forniscono la stima del sedimento che rimane disponibile per il trasporto nel campo lontano (dove la dinamica del pennacchio è di tipo passivo), ma non forniscono la stima dei sedimenti rilasciati direttamente dalla draga (*dredging zone*) e non modellano la fase dinamica del pennacchio di torbida nel campo vicino (*near-field zone*). A tal proposito, in Lisi *et al.* (2016, 2017 e 2019a,b) si riporta una rassegna delle principali formulazioni disponibili suddivise, in relazione all'approccio utilizzato per derivare le formule, in formulazioni parametriche (utilizzabili su base tabellare) e in formulazioni empiriche (basate sull'utilizzo di gruppi adimensionali).

Va specificato che il termine sorgente è difficile da modellare, sia a causa dell'intima correlazione con il campo vicino sia del fatto che, durante la fase preliminare di pianificazione degli interventi, talvolta, non si hanno informazioni certe sul volume totale dei

sedimenti da movimentare oltre che sui parametri (geometrici e cinematici) rappresentativi delle modalità operative utilizzate⁸.

Per limitare le incertezze legate alla definizione del termine sorgente, riprendendo i concetti descritti in Becker *et al.* (2015), le LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) propongono una metodologia articolata nei seguenti passaggi:

1. Analisi delle modalità di lavoro, da cui dipendono la tipologia del termine sorgente e le tempistiche delle operazioni di movimentazione;
2. Quantificazione del volume totale di sedimento fine (V_{sed}) effettivamente disponibile per il trasporto nel campo lontano;
3. Frazionamento del termine sorgente (ossia distribuzione del volume totale di sedimento fine disponibile, V_{sed}) nell'intero ciclo del dragaggio (fasi operative di: escavo, eventuale *overflow* in fase di carico; e sversamento).



da Lisi *et al.* (2018)

Per la corretta definizione del termine sorgente, ad ogni modo, si consiglia una condivisione con l'impresa di dragaggio, al fine di disporre tempestivamente di informazioni più accurate e complete sulle specifiche modalità tecnico-operative da considerare per la modellazione del termine sorgente.

2.3.1 Analisi delle modalità operative di dragaggio

L'analisi delle modalità operative è un requisito imprescindibile per la definizione del termine sorgente. Le diverse fasi operative di un intero ciclo di dragaggio (escavo, carico/trasporto con eventuale *overflow*, e sversamento) possono, infatti, essere considerate come sorgenti di risospensione "frazionate e/o multiple" fino al completamento delle operazioni di movimentazione (e.s. Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.* 2017; 2019b).

Il termine sorgente deve essere caratterizzato in termini di variazione nello spazio (lungo la verticale e nel piano) e nel tempo in funzione delle modalità operative utilizzate.

Per quanto riguarda la caratterizzazione spaziale, nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) si definisce:

- sorgente di tipo puntiforme: una sorgente di rilascio che occupa un'area piccola rispetto alla dimensione delle maglie del dominio di calcolo;
- sorgente di tipo distribuito: una sorgente di rilascio che occupa un'area di estensione non trascurabile rispetto alla dimensione delle maglie dominio di calcolo e, di conseguenza, deve essere schematizzata considerando la sua intera estensione.

⁸ Pertanto, è tipica la stima dell'intensità, durata e localizzazione del rilascio dei sedimenti tramite l'utilizzo di metodi empirici che utilizzano misure di campo relative a interventi simili.

In relazione alla variazione della posizione della sorgente di rilascio (e conseguentemente della sua durata) nel tempo è possibile identificare le seguenti possibilità:

- sorgente di tipo stazionario (fissa nel tempo): se la dimensione caratteristica della traslazione della sorgente di risospensione/rilascio è inferiore rispetto alla dimensione delle maglie del dominio di calcolo, ad esempio nel caso di attività di livellamento per cui l'escavo può considerarsi prossimo e contemporaneo al rilascio;
- sorgente di tipo non stazionario (variabile nel tempo): se la dimensione caratteristica della traslazione della sorgente di risospensione/rilascio è confrontabile con la dimensione delle maglie del dominio di calcolo e la sua posizione può essere descritta anche nella sua variabilità nel tempo, ad esempio nel caso di dragaggio idraulico con draga semovente del tipo TSHD.

In termini di variazioni dell'intensità della sorgente nel tempo, infine, nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) si identificano, in relazione alla tipologia di effetti da valutare, le seguenti possibilità:

- se la simulazione ha l'obiettivo di valutare gli effetti a lungo termine, e pertanto la durata delle operazioni è sensibilmente inferiore alla durata della simulazione, l'intensità può essere considerata costante e di durata finita (pari alla durata delle operazioni);
- se la simulazione ha l'obiettivo di valutare gli effetti a breve termine, cioè la durata delle operazioni è confrontabile con la durata della simulazione, a seconda delle modalità operative utilizzate l'intensità della sorgente può essere considerata costante nel tempo (es. nel caso di un dragaggio meccanico per cui può essere considerato costante il rilascio lungo lo strato della colonna d'acqua considerata) o variabile nel tempo (es. durante l'*overcutting* e l'*undercutting* di un dragaggio idraulico con disgregatore, o per le diverse fasi di escavo e rilascio di un'operazione di livellamento durante le quali si può verificare una variazione dell'intensità della sorgente).

Una medesima tecnica operativa può essere schematizzata in modo diverso in relazione alle finalità delle simulazioni, dunque della durata, del passo di integrazione temporale e della discretizzazione spaziale (sia planimetrica che verticale) del dominio di calcolo. A titolo esemplificativo, un dragaggio di tipo meccanico può essere schematizzato come localizzato, stazionario e di durata finita e intensità costante nel caso in cui si vogliono valutare gli effetti a lungo termine e a grande scala in aree al largo. Lo stesso tipo di tecnica operativa, invece, può essere schematizzata come di estensione finita, di tipo non stazionario, di durata finita e intensità variabile (intermittente) nel caso in cui si vogliono valutare gli effetti a breve termine in bacini semichiusi (es. Di Risio *et al.*, 2017).

Nel seguito si riportano alcune considerazioni di tipo pratico, tratte dalle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), funzionali all'adeguata caratterizzazione del termine sorgente nell'AMI per le principali tecniche di dragaggio convenzionali:

1. In base alle modalità tecniche utilizzate (draga idraulica o meccanica), per la stima realistica del flusso dei sedimenti fini rilasciati dalla sorgente (frazionata) è importante definire la durata media di ogni fase del ciclo di lavoro (escavo, *overflow* in fase di carico e sversamento), identificata come una significativa sorgente di risospensione.
2. Le draghe meccaniche convenzionali sono generalmente contraddistinte da:
 - un ciclo di dragaggio di tipo aperto e discontinuo;
 - una densità dei sedimenti movimentati prossima a quella di origine;
 - livelli significativi di rilascio in fase di escavo, per l'azione meccanica del grappo (o della benna) sul fondale e durante la sua risalita in superficie;

- trascurabile *overflow* in fase di carico.

Il rilascio in sospensione della frazione fine dei sedimenti è ritenuto generalmente costante e omogeneo lungo la verticale. La definizione delle durate delle diverse fasi del ciclo di lavoro considerate per draghe di tipo meccanico (escavo e sversamento) permette la stima dell'intensità media ($\text{kg/m}^3/\text{s}$) del termine sorgente.

3. Le draghe idrauliche convenzionali sono contraddistinte da:

- un ciclo di dragaggio chiuso e continuo (il materiale è rimosso come una miscela di acqua e sedimento e trasportato direttamente nello scafo della draga o nel sito di destinazione attraverso pompe centrifughe);
- una densità dei sedimenti movimentati inferiore a quella di origine (la miscela di acqua e sedimento è costituita tipicamente dal 5-25% in fase di escavo e trasporto, ma può essere incrementata, con appositi accorgimenti tecnici, in relazione alla destinazione finale del sedimento);
- livelli significativi di rilascio in fase di escavo, che possono verificarsi in prossimità del fondo perché parte del sedimento sfugge dalle pompe di aspirazione;
- un significativo *overflow* in fase di carico delle draghe.

Il flusso dei sedimenti rilasciati in prossimità della sezione terminale della condotta di aspirazione durante la fase di escavo è generalmente ritenuto costante⁹ e localizzato in prossimità del fondo, con dimensioni dell'area di rilascio ottenibili in funzione delle dimensioni dei parametri geometrici e cinematici della testa della draga. È necessario considerare che l'eventuale *overflow* si ha quando la draga raggiunge la massima capacità di carico, e che durante i cicli di dragaggio si passa alternativamente da periodi di pieno carico a periodo di svuotamento dello scafo.

4. Nel rispetto del principio di conservazione della massa, la quantità totale di sedimento fine presente nel volume totale da movimentare e disponibile al trasporto nel campo lontano deve essere interamente ripartita (frazionata) tra il termine sorgente rappresentativo delle fasi di escavo e/o dell'*overflow* in fase di carico e/o dello sversamento in cui può essere scomposto l'intero ciclo di lavoro, in funzione delle tecniche di dragaggio e del programma dei lavori¹⁰.

Le considerazioni pratiche riportate nei p.ti 1-4 possono essere applicate anche nel caso specifico di operazioni di movimentazione dei sedimenti con la tecnica del livellamento che, nell'ambito del progetto, è stata schematizzata nell'escavo e nel successivo spostamento/ridistribuzione del sedimento dragato dal fondale ad una zona adiacente (entro 300 m), senza che la testa del mezzo dragante fuoriesca dalla colonna d'acqua. Più precisamente, nel caso di interventi di livellamento di questo tipo la sorgente di risospensione del sedimento può essere approssimata ipotizzando che la fase di escavo e la fase di rilascio/ridistribuzione avvengono simultaneamente (quando può essere considerato trascurabile il tempo per raggiungere la localizzazione nelle immediate vicinanze). I livelli di risospensione per le due fasi dipenderanno dalle modalità operative utilizzate.

⁹ Soprattutto nel caso di dragaggio di sedimenti omogenei (e.g. Collins, 1995; Bridges *et al.*, 2008; Palermo *et al.*, 2008; Lisi *et al.*, 2015).

¹⁰ In linea con il principio di conservazione di massa, la frazione fine disponibile al trasporto nel campo lontano nelle diverse fasi di un ciclo di dragaggio può subire variazioni qualora si utilizzino accorgimenti tecnici (es. per limitare la risospensione in prossimità della testa della draga e/o l'*overflow* in fase di carico, per limitare la quantità di sedimento fine trasferita nel sito di sversamento).

2.3.2 Analisi delle frazioni sedimentarie disponibili al trasporto

È prassi consolidata stimare il flusso di sedimenti rilasciati dalla sorgente a partire da relazioni che forniscono il volume totale di sedimento fine (in m³) disponibile per il trasporto nel campo lontano in funzione del volume totale (in m³) e delle caratteristiche (es. densità e distribuzione granulometrica) del sedimento da movimentare (es. Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Becker *et al.*, 2015).

Ai fini dell'applicazione dell'AMI, nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) si suggerisce che la stima del volume totale di sedimento fine disponibile al trasporto sia effettuata, almeno inizialmente, mediante l'applicazione del metodo generale di Becker *et al.* (2015), diffusamente ripreso in Lisi *et al.* (2019b).

Al fine di trascurare il possibile incremento (altrimenti di difficile quantificazione) derivante dall'azione di disturbo esercitata dal mezzo dragante, la stima della massa totale di sedimento fine (m_t , in kg di peso secco) potenzialmente disponibile al trasporto nel campo lontano può essere espressa, in prima approssimazione, in relazione al volume totale del sedimento da movimentare¹¹:

$$m_t = (1 - n)\rho_s V_{tot} f_{63\mu m} \quad (\text{eq. 1})$$

dove n è la porosità, ρ_s è la densità del grano, V_{tot} è il volume totale di sedimento movimentato (dragato o ricollocato) e $f_{63\mu m}$ è la frazione di sedimento fine (inferiore al diametro caratteristico pari a 63 μm).

Si osserva, però, che soltanto una frazione di V_{tot} è effettivamente rilasciata nel campo lontano. Pertanto, con un approccio del tutto empirico è possibile esprimere la massa totale di sedimento fine effettivamente (non potenzialmente) disponibile al trasporto nel campo lontano così come segue:

$$m_{eq} = \sigma_{eq} m_t \quad (\text{eq. 2})$$

2)

nella quale il coefficiente σ_{eq} costituisce un parametro empirico associato alla tecnica di dragaggio e alla fase del ciclo di lavoro considerata, da specificare in funzione delle scelte progettuali. Si riconosce in questo approccio il concetto di fattore di risospensione, seppur riferito alla massa di sedimento fine disponibile (m_{eq} , invece che alla massa totale di sedimento movimentato, m_t).

¹¹La relazione si riferisce alla percentuale di fine presente nel volume totale del sedimento da movimentare in condizioni indisturbate e non tiene conto del possibile incremento della percentuale di fine derivante dall'azione meccanica (di disturbo) esercitata dai mezzi di lavoro (soprattutto in fase di dragaggio). In quest'ultimo caso è possibile ricorrere a formulazioni empiriche che mirano a fornire direttamente l'intensità del termine sorgente in funzione, tra l'altro, delle caratteristiche del sedimento e della tecnica di movimentazione (si rimanda a Lisi *et al.*, 2016 e alle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) per una rassegna delle formulazioni di letteratura disponibili).

Come già in parte riportato al paragrafo 2.3.1, la stima del flusso dei sedimenti rilasciato dalla sorgente, può essere definito identificando la durata (Δt) di ciascuna fase del ciclo di lavoro e valutandone un valore medio:

$$q = \frac{m_{eq}}{\Delta t} \quad (\text{eq. 3})$$

nella quale q è la funzione sorgente relativa alla generica fase di lavoro di durata (Δt) per la quale vi è una massa di fine disponibile pari a m_{eq} .

Pertanto, l'identificazione delle fasi del ciclo di lavoro per cui è ipotizzabile un rilascio significativo dei sedimenti (dragaggio/escavo, *overflow* in fase di carico/trasporto e sversamento) costituisce un passo cruciale del metodo e deve presupporre l'analisi delle modalità di dragaggio impiegate (c.f.r. par. 2.3.3).

Nel caso di operazioni di movimentazione con draghe idrauliche il termine sorgente è calcolato frazionando la massa di sedimento fine disponibile per il trasporto nel campo lontano in punti e istanti diversi rappresentativi delle fasi operative: 1) escavo/dragaggio; 2) *overflow* in fase di carico/trasporto; 3) sversamento.

In particolare, tramite relazioni concettualmente simili alla eq. 1 sono calcolate:

1) la frazione di rilascio in fase di dragaggio (m_d):

$$m_d = \sigma_d m_t \quad (\text{eq. 4})$$

2) la frazione di rilascio per *overflow* in fase di carico (m_o)¹²:

$$m_o = \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_0} (1 - f_{sed})(1 - f_{trap}) m_h \quad (\text{eq. 5})$$

dove $m_h = (m_t - m_d)$ è la massa di sedimento fine trasportata nel pozzo di carico della draga (cioè quella totale decurtata della massa persa durante la fase di dragaggio), mentre la frazione (m_o) del sedimento fine soggetta ad *overflow* è calcolata al netto dei fenomeni di sedimentazione (f_{sed}) e intrappolamento (f_{trap}) dei sedimenti trasportati nel pozzo di carico, che accadono tra gli istanti t_0 e t_1 (sedimentazione) e t_0 e t_2 (intrappolamento). Inoltre, della frazione (m_o) del sedimento fine soggetta ad *overflow*, una parte (m_{od}) raggiunge il fondo nell'ambito di un processo di pennacchio dinamico (m_{od}):

$$m_{od} = (1 - \sigma_o) m_o \quad (\text{eq. 6})$$

e solo la rimanente va ad alimentare il pennacchio di tipo passivo (m_{op}) nel campo lontano:

$$m_{op} = \sigma_o m_o \quad (\text{eq. 7})$$

¹²Nell'equazione (5) gli istanti temporali t_0 , t_1 e t_2 caratterizzano le fasi temporali del ciclo di lavoro, dove: t_0 rappresenta l'inizio del ciclo di dragaggio e l'inizio del processo di caricamento; nell'istante t_1 la draga raggiunge la piena capacità di carico ed inizia l'*overflow* e la quantità di sedimenti all'interno della draga può aumentare; nell'istante t_2 il processo di carico e l'*overflow* si interrompono.

3) la frazione di rilascio in fase di sversamento, in cui la massa di sedimento fine $m_s=(m_h-m_0)$ è rilasciata in colonna d'acqua durante la fase di sversamento al netto della perdita di fine in fase di carico per *overflow*. Come per il passo precedente, della frazione rilasciata in fase di sversamento (m_s), una parte raggiunge il fondo nell'ambito di un processo dinamico (m_{sd}):

$$m_{sd} = (1 - \sigma_s)m_s \quad (\text{eq. 8})$$

mentre una parte va ad alimentare il pennacchio passivo nel campo lontano:

$$m_{sp} = \sigma_s m_s \quad (\text{eq. 9})$$

Nel caso di movimentazione con draghe meccaniche il rilascio riconducibile all'*overflow* è trascurabile, pertanto il termine sorgente è frazionabile in due parti:

- 1) la frazione della massa di fine rilasciata in fase di dragaggio/escavo (m_d);
- 2) la frazione della massa di fine rilasciata in fase di sversamento (m_s).

La definizione delle durate delle diverse fasi che generano un flusso di sedimenti durante il ciclo di lavoro considerate per draghe di tipo idraulico (dragaggio, *overflow* e sversamento) e di tipo meccanico (dragaggio e sversamento) permette la stima dell'intensità media (kg/s) del termine sorgente.

Si osserva, infine, che la corretta definizione dei parametri empirici (σ_d , σ_o , σ_s) del termine sorgente frazionato (eq. 4-9), concettualmente coincidenti con σ_{eq} della eq. 2, riveste un ruolo cruciale nella corretta applicazione del metodo.

Tali parametri possono essere stimati tramite le formulazioni di letteratura introdotte in precedenza descritte (es. Nakai, 1978; Hayes, 1986; Collins, 1995; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo *et al.*, 2008; Becker *et al.*, 2015). Tuttavia, dedurre questi parametri con buon livello di affidabilità richiede l'esecuzione di misure di campo *ad hoc* o l'utilizzo di modelli di dettaglio (cfr. par. 3.1.2 e 3.3).

La Tabella 4 riporta l'ordine di grandezza dei parametri σ (dragaggio: σ_d ; *overflow*: σ_o ; sversamento: σ_s) per le diverse fasi operative, tratti da Becker *et al.* (2015).

Tabella 4 Intervallo di variazione dei parametri empirici associati alle diverse fasi operative (dragaggio: σ_d ; *overflow*: σ_o ; sversamento: σ_s). Da Becker *et al.*, (2015) modificato da Lisi *et al.*, 2017

FASE OPERATIVA	VALORI CARATTERISTICI
Dragaggio/escavo (σ_d)	0,00 – 0,03
Coefficiente di sedimentazione (f_{sed})	0,00 – 1,00
Coefficiente di intrappolamento (f_{trap})	0,01 – 0,05
Testa dragante con disgregatore (σ_d)	0,01 – 0,05
Draga meccanica a grappo o benna (σ_d , σ_b)	0,00 – 0,04
<i>Overflow</i> (σ_o)	0,00 – 0,20
Sversamento (dragaggio idraulico, σ_s)	0,00 – 0,10
Sversamento (dragaggio meccanico, σ_s)	0,00 – 0,05

Nel caso di operazioni di movimentazioni con la tecnica del livellamento che prevede la distribuzione del materiale da una zona ad una adiacente del fondale, la sorgente può essere schematizzata stimando:

- 1) la frazione fine disponibile al trasporto in fase di escavo nell'area di dragaggio (m_d);
- 2) la frazione fine disponibile al trasporto in fase di sversamento nell'area di rilascio (m_s).

Per le operazioni di livellamento, la caratterizzazione della sorgente in termini di variabilità nel tempo deve essere effettuata considerando se la distanza dell'area di escavo e rilascio rendono accettabile l'ipotesi di contemporaneità delle due fasi.

Infine, con riferimento ai valori dei coefficienti di *spill* riportati in Tabella 4, si osserva che non esistono in letteratura valori di letteratura derivanti dall'acquisizione di dati di capo in concomitanza con operazioni di livellamento. Pertanto, talvolta potrebbe essere ragionevole e cautelativo considerare coefficienti di *spill* per la fase di escavo (σ_a) e per lo sversamento (σ_s) con un range di variabilità più elevato di quelli riportati nella suddetta tabella 4. In questi casi, la scelta dei coefficienti di *spill* deve essere effettuata in funzione delle modalità operative e delle caratteristiche granulometriche del sedimento da movimentare e dovrebbe essere supportata da opportune analisi di sensitività.

Le LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) pongono l'attenzione anche sulle ulteriori considerazioni di tipo pratico:

- è importante disporre, in fase di pianificazione degli interventi, di informazioni attendibili circa la quantità e la tipologia del sedimento da movimentare (spesso ricavabili solo mediante l'esecuzione di specifiche indagini);
- la dimensione dei grani che rappresenta la componente fine non è univocamente definita e può variare in funzione del dato disponibile. Tipicamente il limite utilizzato per discriminare la componente di fine varia tra 63 μm (nel rispetto della scala *Wentworth*) e 74 μm (nel rispetto della classificazione USCS - *Unified Soil Classification System*);
- la velocità di sedimentazione è un parametro importante per quanto riguarda la potenziale dispersione dei sedimenti in sospensione; pertanto, è consigliabile tener conto di un numero limitato di frazioni granulometriche di sedimento specificandone le corrispondenti velocità di sedimentazione. Si deve tenere a mente che, diversamente da un modello 3D, in un modello 2DH la velocità di sedimentazione è spesso utilizzata come parametro di calibrazione, quindi richiede apposite analisi che permettano aggiustamenti del valore per pervenire a stime attendibili delle concentrazioni di SSC nel campo lontano;
- è necessario riferirsi alla massa di sedimento asciutta (peso secco) per ridurre possibili errori dovuti alla conversione tra valori di concentrazione, densità e volume;
- le relazioni utilizzate (es. Becker *et al.*, 2015) si basano spesso sull'ipotesi che la frazione di sedimento fine presente nei sedimenti da movimentare in condizioni indisturbate (V_{situ}) sia costante nel tempo, mentre, nella realtà la frazione di sedimento fine disponibile per il trasporto nel campo lontano può variare in relazione alle tecniche utilizzate per la movimentazione nelle diverse fasi di un ciclo di lavoro ed alle caratteristiche sedimentologiche in differenti sub-aree di intervento. Generalmente, la frazione di sedimento fine può aumentare per la produzione di ulteriore volume a causa dell'azione meccanica dei mezzi di lavoro durante le operazioni (in misura maggiore durante l'escavo per l'azione diretta del disgregatore al fondo), al contrario può decrescere per la formazione di agglomerati argillosi dei sedimenti messi in sospensione;
- qualora lo spessore dei sedimenti da rimuovere sia disomogeneo (caso frequente), questo deve essere suddiviso in strati omogenei (ossia con simili caratteristiche sedimentologiche) e il volume di sedimento fine disponibile deve essere stimato per ciascuno strato, sommando/mediando tutti i contributi ottenuti;
- le relazioni esistenti possono essere utilizzate per stimare la quantità di sedimento appartenente a diverse classi granulometriche, sostituendo la frazione $f_{63\mu\text{m}}$ (ovvero

f_{fine}) con la frazione relativa alle classi desiderate. Per la definizione del numero di classi granulometriche si può fare riferimento alle classificazioni di Shepard (1954) e Nota (1958);

- è importante che in fase di carico su draghe autocaricanti il processo di analisi si basi sul volume da movimentare e non sul volume dei pozzi di carico, poiché il livello di compattazione può essere notevolmente diverso.

2.3.3 Frazionamento del sedimento fine disponibile al campo lontano

Come anticipato l'analisi delle modalità di lavoro (in termini fisici e di durata) permette il frazionamento del termine sorgente tra le diverse fasi delle operazioni di movimentazione in relazione alle tecniche di dragaggio ed al programma delle lavorazioni.

In particolare, per ogni possibile sorgente di risospensione devono essere definite (cfr. par. 2.3.2):

1. la frazione della massa totale di sedimento fine disponibile al trasporto nel campo lontano
2. il flusso di sedimenti fini che abbandona la sorgente nel tempo e nello spazio.

Si riportano nel seguito alcune considerazioni di tipo pratico tratte dalle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017):

- ci sono incertezze intrinseche nella stima del termine sorgente legate al suo frazionamento; in particolare l'utilizzo di parametri delle formule derivati empiricamente può portare a stime suscettibili di inesattezze di circa un ordine di grandezza. In questo ambito sono, quindi, auspicabili successivi monitoraggi di verifica in corso d'opera (cfr. cap.3, par. 3.1.2);
- le ore di lavoro settimanali (dipendenti dalla durata di un ciclo di lavoro) e la produttività delle tecniche adoperate (dipendente dal volume di sedimento movimentato per ciclo di lavoro) possono incidere sul numero di cicli settimanali; tuttavia, questi aspetti non sono considerati critici nelle fasi iniziali del processo decisionale se le informazioni fornite sul volume totale dei sedimenti sono corrette (Becker *et al.*, 2015);
- per quanto riguarda la durata delle fasi operative dell'intero ciclo di movimentazione in cui può essere frazionato il termine sorgente, è importante evidenziare che:
 - o al termine sorgente riconducibile alla risospensione dal fondo per azione diretta della testa della draga deve essere applicata una durata pari all'intera durata della fase di escavo;
 - o al termine sorgente riconducibile all'*overflow* in fase di carico deve essere applicata una durata pari all'intervallo compreso tra il momento in cui la draga raggiunge la piena capacità di carico (ed inizia l'*overflow*) ed il momento in cui il processo di carico (quindi l'*overflow*) si interrompono. Si suggerisce che il termine sorgente correlato all'*overflow* sia modellato come un valore medio piuttosto che variabile tempo a garanzia dell'accuratezza dei risultati (Becker *et al.*, 2015). Si vedano a tal proposito anche le considerazioni riportate al par. 2.3.2.
- in generale, è auspicabile l'esecuzione di campagne di monitoraggio in fase *ante operam* (cfr. par. 3.1.1) per supportare le ipotesi di definizione del termine sorgente ai fini della modellazione e campagne di monitoraggio in corso d'opera (cfr. par. 3.1.2) per verificare le ipotesi fatte ed i risultati previsionali ottenuti. Campagne di monitoraggio specifiche in corso d'opera costituiscono una fonte preziosa per arricchire i database utilizzati per

derivare le formulazioni empiriche per la stima del termine sorgente ed ampliarne gli intervalli di validità (USACE, 2002; VBKO, 2003; Aarninkhof *et al.*, 2008; Van Koningsveld *et al.*, 2010, 2013; Lisi *et al.*, 2016; Di Risio *et al.*, 2017). In questo contesto, la misurazione presso stazioni mobili da imbarcazioni è considerato un valido metodo per la verifica del flusso di sedimenti che abbandona la sorgente di rilascio (o *dredging zone*);

- misurazioni *ad hoc*, in corso d'opera, di densità e velocità in prossimità della testa della draga e delle condotte di aspirazione, permettono di verificare e/o modificare (se necessario) le stime ottenute sulla produttività (in kg/m³) espressa in relazione alla durata ed al numero di cicli di dragaggio/lavoro necessari per completare le operazioni di movimentazione;
- se vi è la necessità di modellare il termine sorgente (frazionato) con maggiori livelli di dettaglio è auspicabile, oltre alla verifica mediante apposite attività di monitoraggio, fare ricorso a modelli più complessi che permettono di considerare il contributo dei tassi di sedimentazione della miscela di acqua e sedimento (e di modellare con maggiore dettaglio il campo vicino (es. Van Rhee, 2002; De Wit, 2010; De Wit *et al.*, 2014; Becker *et al.*, 2015);
- sulla base delle raccomandazioni precedenti, grande attenzione deve essere posta in tutti i casi in cui le formule per la stima del termine sorgente (frazionato) non sono basate su una vasta gamma di esperienze e/o misurazioni di campo. In particolare, se i progetti devono essere eseguiti in prossimità di aree a grande valenza/sensibilità ambientale, si suggerisce di applicare un approccio precauzionale vagliando le ipotesi peggiori (Sunstein, 2003).

Nel seguito si riporta una sintesi dei principali parametri numerici da considerare per la stima del flusso di sedimenti che abbandona la sorgente (frazionata) durante l'esecuzione di operazioni di movimentazione con draghe meccaniche (Tabella 5) e idrauliche (Tabella 6).

Tabella 5: Alcuni parametri da considerare per definire il termine per draghe meccaniche. Da Lisi *et al.*, 2017

FASE OPERATIVA	PARAMETRI	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
DRAGAGGIO	Volume totale <i>in situ</i> da movimentare	V_{situ}	m ³
	Densità del sedimento secco	ρ_d	kg/m ³
	Percentuale del sedimento fine	$f_{<63\mu}$	%
	Produttività	P_{situ}	m ³ /h
	Durata del dragaggio	T	Gg
	Numero di draghe		
	Tempo di carico della betta		min/draga
	Numero di bette a pieno carico	n_c	
	Volumi per betta a pieno carico		m ³ /betta
	Volume totale di sedimento fine movimentato	V_t	m ³
	Percentuale di fine rilasciato dalla benna (grappo)	σ_b	%
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_b	Kg
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di escavo	q_{dp}	kg/s
SVERSAMENTO	Massa di fine trasportato nella betta a pieno carico	m_h	Kg
	Percentuale di fine sversato dalla benna (grappo)	σ_s	%
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sp}	kg/betta
	Massa di fine non disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sd}	kg/betta

	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di sversamento	q_{sp}	kg/s
--	---	----------	------

Tabella 6: Alcuni parametri da considerare per definire il termine per draghe idrauliche. Da Lisi *et al.*, 2017

FASE OPERATIVA	PARAMETRI	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
DRAGAGGIO	Volume totale in situ da movimentare	V_{situ}	m^3
	Densità del sedimento secco	ρ_d	kg/m^3
	Percentuale del sedimento fine	$f_{<63\mu}$	%
	Produttività	P_{situ}	m^3/h
	Durata del dragaggio	T	Gg
	Durata dell'intero ciclo della movimentazione		Min
	Frazione di fine rilasciato in prossimità della testa della draga	σ_d	%
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di escavo	q_{dp}	kg/s
OVERFLOW	Tempo di carico		min/ciclo
	Numero cicli di carico	n_c	
	Durata del singolo ciclo		min
	Volume totale di fine caricato		m^3
	Produttività per ciclo	P_c	m^3/s
	Massa di fine disponibile per il trasporto	m_t	kg
	Sedimento fine caricato nello scafo della draga	m_h	kg/ciclo
	Frazione del sedimento fine che deposita nello scafo	f_{sett}	%
	Sedimento fine trattenuto nello scafo	m_r	kg/ciclo
	Sedimento fine disponibile all' <i>overflow</i>	m_o	kg/ciclo
	Frazione di fine disponibile per <i>overflow</i>	σ_o	%
	Durata dell' <i>overflow</i>		min/ciclo
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{op}	kg/ciclo
	Massa di fine non disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{od}	kg/ciclo
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di overflow	q_{op}	kg/s
SVERSAMENTO	Frazione di fine disponibile per lo sversamento	σ_s	%
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sp}	kg/ciclo
	Massa di fine non disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sd}	kg/ciclo
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di sversamento	q_{sp}	kg/s

2.4 La modellazione del trasporto dei sedimenti

Un'adeguata modellazione dei fenomeni di trasporto del pennacchio di torbida richiede la definizione degli scenari di modellazione (cfr. par. 2.2.2) e delle forzanti ambientali nel dominio di interesse (cfr. par. 2.2.3) per riprodurre le caratteristiche idrodinamiche e un'adeguata definizione del termine sorgente (cfr. par. 2.3). A ciò si aggiunge l'importanza della definizione della velocità di deposizione nell'implementazione del modello di trasporto. Come già menzionato, nel caso di bacini semichiusi (o in aree comunque confinate) i fenomeni di trasporto sono correlati alle attività di movimentazione (definizione del termine sorgente) ed alla circolazione idrodinamica indotta principalmente dal vento locale e dalle

oscillazioni di marea (es. Bilgili *et al.*, 2005; Lumborg, 2005), generalmente in misura minore e dipendente dall'estensione del bacino e della relativa dinamica. La rilevanza dell'azione del moto ondoso, che tende a giocare generalmente un ruolo minore, va valutata rispetto all'esposizione e alle dimensioni caratteristiche tipiche dei bacini confinati ove si attuano movimentazioni di sedimento (es. Lisi *et al.*, 2017; 2019a, b). In questi casi va attentamente valutata la significatività della tridimensionalità dei fenomeni di trasporto (es. Bai *et al.*, 2003; De Marchis *et al.*, 2014; Feola *et al.*, 2015).

L'AMI si presta alla simulazione di molteplici scenari di movimentazione, al variare delle condizioni meteo-climatiche e al variare delle scelte tecnico-operative. In generale, per valutare e comparare l'influenza delle condizioni ambientali (definite nell'ambito della selezione degli scenari di simulazione) sui processi di trasporto del pennacchio di torbida generato dalla movimentazione dei sedimenti è importante:

1. disporre, già in fase di pianificazione, di un cronoprogramma attendibile dei lavori;
2. riprodurre molteplici scenari di simulazione che tengano conto della stagionalità delle condizioni ambientali e aventi una durata sufficiente alla valutazione della sedimentazione della gran parte dei sedimenti risospesi a causa delle attività di movimentazione;
3. ipotizzare una durata realistica degli scenari di modellazione delle operazioni di escavo e/o livellamento;
4. considerare opportunamente la torbidità naturale del sito (da bibliografia o da indagini di campo) per comparare la variazione della torbidità indotta dalle operazioni di movimentazione con quella indotta da altre cause naturali (es. apporti fluviali, polle d'acqua in presenza di falde, azione del moto ondoso, ecc.) e antropiche (es. altri progetti già realizzati). Nei casi in cui non vi sia disponibilità di dati è opportuno modellare, utilizzando approcci "a scenario" (es. Liu *et al.*, 2002), le condizioni ritenute rappresentative sulla base di una preliminare caratterizzazione dell'area (es. modellazione di scenari di risospensione indotta da condizioni estreme, piene fluviali, ecc.);
5. considerare l'interferenza di qualsiasi mezzo, indipendentemente dalla sua attività in corso (es. natante, bettolina, pontone) che potrebbe divenire sorgente di risospensione (Erm & Soomere, 2006) interagendo in modo più o meno consistente con il fondo (es. risospensione per azione delle eliche, strisciamento in condizioni di bassa marea, risucchio per spostamento di volumi di acqua).

2.4.1 Applicazione del termine sorgente nel dominio di calcolo

L'andamento della concentrazione dei sedimenti sospesi nel campo lontano dipende dal tipo di sorgente (fissa/mobile e continua/variabile nel tempo) e dal flusso di sedimenti rilasciato in determinati punti del dominio di calcolo e per determinati istanti temporali dello scenario di simulazione (es. Shao *et al.* 2015, 2016; Di Risio *et al.*, 2017; Lisi *et al.* 2017; 2019a, b).

La quantità di sedimento fine disponibile al campo lontano introdotto in una cella della griglia durante un passo temporale di calcolo è pari al flusso di sedimento (in kg/s) stimato per quella cella integrato per la durata del passo temporale.

Gli aspetti da considerare per la corretta implementazione del termine sorgente e, quindi, dei fenomeni di trasporto dei sedimenti rilasciati/risospesi nel campo lontano, così come dettagliato nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sono:

1. la dimensione delle celle della griglia di calcolo, che deve essere scelta in modo da caratterizzare adeguatamente i processi di dispersione, diffusione e sedimentazione di un pennacchio generato durante una specifica operazione di movimentazione. In particolare, se le celle della griglia sono troppo ampie, si può generare un termine artificiale di diffusione numerica, mentre nel caso in cui siano troppo piccole, potrebbero crearsi zone con livelli di concentrazione irrealistici (soprattutto per sorgenti fisse e continue);
2. la durata del passo temporale di calcolo, che deve essere selezionata con attenzione per evitare l'introduzione di SSC irrealistiche in alcuni istanti temporali e in alcuni punti della griglia di calcolo, che possono influenzare i livelli di concentrazione simulati dal modello: utilizzando un passo temporale di tipo dinamico (ossia variando la durata del passo temporale durante una simulazione) si può aumentare la precisione di simulazione;
3. l'eventuale movimento della draga all'interno dell'area di lavoro, che deve essere rappresentato con una risoluzione spaziale adeguata (es. per la valutazione di effetti di breve termine in bacini semichiusi);
4. il corretto flusso di sedimenti in sospensione dovrebbe essere ripartito sulle diverse celle della griglia in maniera proporzionale al tempo di permanenza del termine sorgente (debitamente frazionato) su ogni cella durante un determinato intervallo temporale; pertanto, è necessario caratterizzare la sorgente tramite la successione delle coordinate delle posizioni sulle celle occupate dalla testa dragante allo scorrere del tempo. Il tempo di permanenza della testa dragante sulla medesima area dipende dalla produttività oraria della specifica macchina operatrice (es. una draga meccanica con produttività di 2400 m³/giorno impiega poco più di un giorno per dragare una superficie unitaria media di 2500 m² e spessore di dragaggio pari ad 1 m);
5. nell'applicazione nella griglia di calcolo del termine sorgente, tra le condizioni al contorno imposte dal modello, la scelta della dimensione minima degli elementi della griglia in prossimità del termine sorgente è fondamentale perché può influenzare l'affidabilità dei risultati di trasporto nel campo lontano (maglie di grandi dimensioni provocano una "immediata diffusione numerica" che inficia il livello di dettaglio dei passaggi numerici successivi).
6. per ottenere risultati affidabili il termine sorgente deve essere applicato quando il modello idrodinamico è giunto ad una soluzione stazionaria, a meno che non si voglia analizzare il comportamento transitorio dovuto a campi idrodinamici ambientali non stazionari;
7. le differenti modalità di rilascio lungo la verticale devono essere opportunamente implementate nella definizione del modello di trasporto in funzione della discretizzazione verticale prescelta (cfr. par. 2.2.1);
8. la stima dell'impronta areale della sorgente permette di stimare il flusso di concentrazione di sedimenti (es. g/m³/s) da utilizzare come termine forzante dell'equazione di conservazione del sedimento in sospensione (cfr. par. 2.3).

2.5 Analisi e sintesi dei risultati

Come riportato nei paragrafi precedenti, l'AMI deve poter supportare la scelta delle modalità operative in grado di limitare la dispersione della frazione sedimentaria fine in colonna d'acqua. Pertanto, i risultati modellistici devono essere analizzati ed elaborati in maniera tale da essere funzionali alla valutazione della significatività degli effetti ambientali sul comparto fisico conseguenti agli incrementi di SSC e DEP. Tali valutazioni sono propedeutiche a valutazioni della severità degli impatti, e a più specifiche analisi di rischio, da effettuare quando sia accertata la presenza di recettori ambientali sensibili.

In linea con quanto riportato in *Feola et al.* (2016) e Lisi et al. (2017 e 2019b), è riconosciuta l'importanza di una restituzione sintetica dei risultati modellistici, ottenuta mediante tecniche di analisi e sintesi standardizzabili e replicabili, per quantificare gli effetti ambientali tramite un'analisi combinata dei superamenti, in termini di intensità, durata e frequenza, di valori prestabiliti per le variabili ambientali di interesse (es. intensità di corrente, SSC, DEP, ossigeno disciolto) considerabili rappresentativi della variabilità dei parametri di interesse in condizioni indisturbate (es. prima dell'inizio delle operazioni di movimentazione o, successivamente, in aree non influenzate dai lavori), in accordo con le LL.GG ISPRA (Lisi et al., 2017) definiti nel seguito come a livelli di riferimento (LR).

2.5.1. Finalità delle analisi degli scenari di idrodinamica e trasporto

In generale, l'implementazione dell'AMI può essere finalizzata a:

1. delimitare l'area di influenza;
2. valutare la significatività degli effetti fisici conseguenti alla formazione del pennacchio di torbida nell'area di influenza;
3. supportare la scelta delle modalità operative;
4. valutare le condizioni critiche per cui può essere necessario prevedere opportune misure di mitigazione;
5. ottenere risultanze funzionali all'ottimizzazione delle attività di monitoraggio.

Per il conseguimento di tali obiettivi ambientali e progettuali, le risultanze modellistiche possono esse presentate attraverso elaborati grafici e mappe di sintesi (es. SKM, 2013; Feola et al., 2016, Lisi et al., 2017) che riportano:

1. situazioni istantanee e ritenute critiche in termini di:
 - specifici scenari di condizioni meteo-climatiche (medie e/o estreme);
 - quantificazione della sola intensità massima del fenomeno di dispersione senza valutazioni di durata o frequenza;
 - eventuale quantificazione della durata totale di eventi di eccedenza di livelli di riferimento senza valutazioni dell'effetto cumulato di più eventi di intensità e durata differenti.
2. una sintesi delle risultanze di scenari multipli di lungo periodo:
 - mediante l'elaborazione combinata di indici e indicatori statistici volti a rappresentare la complessità spaziale e temporale dei parametri di interesse (es. identificazione delle aree caratterizzate da maggiore idrodinamismo e da una maggiore variabilità dei SSC e DEP) ed eventualmente la valutazione degli effetti in relazione a intensità, tempo di permanenza e frequenza con cui si verificano gli scostamenti rispetto ai prestabiliti livelli di riferimento (LR).

A supporto di valutazioni dell'insorgenza di possibili criticità ambientali e della quantificazione della significatività degli effetti conseguenti alla formazione del pennacchio di torbida, i LR (definiti prima dell'avvio delle attività o, successivamente, in aree non influenzate dai lavori) possono essere differenziati in una successione di livelli a crescente criticità ambientale per essere funzionali ad una caratterizzazione (spaziale e temporale) degli scostamenti osservati per i parametri di interesse e conseguenti alla formazione del pennacchio di torbida durante l'esecuzione del progetto in esame (es. Sofonia & Unsworth, 2010; Feola *et al.*, 2016, Lisi *et al.*, 2017; 2019b).

Qualora non sia possibile definire i livelli di riferimento sulla base di informazioni di letteratura o dati di monitoraggio, nella fase di modellistica preliminare è auspicabile una stima conservativa di tali valori, rivedibile nelle successive fasi di progettazione e modellistiche di maggiore dettaglio anche sulla base della nuova disponibilità di dati di monitoraggio (Lisi *et al.*, 2017).

Per la trasposizione della quantificazione della significatività degli effetti fisici sui recettori ambientali individuati come sensibili alle possibili alterazioni indotte sull'ecosistema marino dall'incremento della concentrazione di solidi sospesi e dei tassi di deposizione, anche in termini di intensità, durata e frequenza, risulta rilevante la conoscenza dell'ecologia di specie e *habitat* presenti in prossimità dei siti di intervento e la verifica del loro stato prima dell'avvio delle operazioni di movimentazione (es. Clarke & Wilber, 2000; Wilber & Clarke, 2001; Feola *et al.*, 2016; Fraser *et al.*, 2017; Jones *et al.*, 2016; Fisher *et al.*, 2017).

In particolare, sulla base di dati sito-specifici e/o di letteratura e mediante giudizio esperto, è auspicabile che le diverse classi di severità degli impatti rappresentative dell'area di studio siano definite associando la significatività della perturbazione (nel tempo e nello spazio) con eventuali valori di tolleranza stimati/disponibili per i recettori ambientali sensibili presenti. Le LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) definiscono come recettore sensibile "qualsiasi specie, popolamento o *habitat* che può subire un effetto (*stress*) in seguito a cambiamenti dei parametri di interesse (SSC, DEP, ecc.) indotti dalle operazioni di movimentazione". Si rimanda alle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) per maggiori dettagli circa l'utilizzo di studi modellistici a supporto della localizzazione delle stazioni in corrispondenza delle quali effettuare il monitoraggio funzionale a stabilire/verificare i valori sito-specifici dei parametri di interesse e della valutazione dei possibili impatti.

Per maggiori approfondimenti sull'individuazione di livelli di tolleranza sito-specifici per i diversi recettori ecologici si rimanda invece a studi di settore (es. PIANC, 2010; Gilmour *et al.*, 2006).

2.5.2. *Analisi e sintesi dei risultati per scenari di lungo periodo*

Una corretta analisi della significatività degli effetti sul sistema fisico e dei potenziali impatti che possono scaturire in relazione alla presenza dei recettori ambientali presenti in prossimità dell'area di intervento deve essere effettuata mediante un'analisi combinata di intensità, durata e frequenza dei superamenti di prestabiliti LR sito-specifici (e.g. Sofonia & Unsworth, 2010; Feola *et al.*, 2016, Lisi *et al.*, 2017; 2019b). In Feola *et al.* (2016) vengono fornite indicazioni sulle tecniche di sintesi, facilmente standardizzabili e replicabili, per lo studio degli effetti (durante ed al termine delle operazioni di movimentazione) dovuti all'incremento dei livelli di SSC e DEP.

Per la sintesi dei risultati modellistici deve essere definito un numero discreto di punti di controllo omogeneamente distribuiti all'interno del dominio di calcolo, eventualmente collocati a profondità diverse (sia l'area di intervento un bacino semi-chiuso, un tratto di litorale o

un'area al largo), in corrispondenza dei quali estrarre le serie temporali dei parametri idrodinamici e di trasporto ottenuti dalle simulazioni modellistiche. La distanza tra i punti deve essere definita in base alla variabilità dei risultati numerici per la specifica area di indagine, ragionevolmente superiore alla dimensione della griglia di calcolo. A titolo di esempio, eventuali variazioni localizzate di batimetria devono essere riprodotte nella griglia di calcolo poiché importanti da un punto di vista idrodinamico, ma non necessariamente rappresentate nelle mappe di sintesi prodotte ad una risoluzione spaziale maggiore.

Per ogni punto di controllo, sono note le serie temporali dei parametri di interesse (es. intensità di corrente, SSC, DEP, ecc.) ottenute da simulazioni numeriche che permettono una caratterizzazione della variabilità spaziale e temporale dei parametri idrodinamici nonché degli effetti associati alle attività di movimentazione dei sedimenti. Le serie temporali devono essere opportunamente analizzate al fine di produrre indici statistici relativi a specifiche finestre temporali con l'obiettivo di sintetizzare i risultati.

A titolo di esempio, per quanto riguarda l'idrodinamica, per ogni punto di controllo possono essere stimati alcuni parametri, quali: velocità media e massima raggiunta dalla corrente. Per quanto riguarda le variazioni in termini di incremento di torbidità indotto dalle attività di movimentazione, è possibile valutare l'intensità media e massima del parametro sull'intero dominio (rispettivamente SSC_{medio} e SSC_{max}).

Al fine di sintetizzare i risultati ottenuti, il parametro scelto come indicatore degli effetti della movimentazione dei sedimenti può essere restituito su mappe facilmente replicabili per ognuno degli scenari considerati. Se il parametro selezionato è di tipo idrodinamico, sarà possibile identificare per ciascuno scenario, sia su base stagionale che annuale, zone a differente regime correntometrico, così come sarà possibile rappresentare la variabilità spaziale della dispersione della nube di torbida in colonna d'acqua (SSC) e della deposizione dei sedimenti al fondo (DEP).

Per rendere conto dell'effetto combinato di durata e intensità, che non possono singolarmente descrivere in modo esaustivo la significatività dei superamenti dei livelli di riferimento stabiliti, in Figura 6 è riportato un esempio di rappresentazione dei diversi parametri statistici volti alla sintesi delle variazioni spaziali e temporali di SSC a diverse profondità (es. al fondo, in superficie) e deposizione (es. DEP_{max}) associate alla dinamica di un pennacchio di torbida nel caso di attività di dragaggio per uno scenario di simulazione esemplificativo (la cui durata può intendersi come rappresentativa di periodi aggregati, stagionali o dell'intero anno).

Si rimanda alle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) per una trattazione dettagliata della possibilità di correlare tali LR a livelli di tolleranza specifici derivanti da considerazioni biologiche e sull'ecologia di specie, ai quali associare classi di impatto caratterizzate da crescenti gradi di severità sito-specifiche.

In Tabella 7 si riportano, a titolo esemplificativo, alcuni livelli di riferimento indicativi per l'intensità (SSC_{LR}) e intervalli di durata crescenti, dalla combinazione dei quali è possibile associare corrispondenti valori di significatività di effetto crescente.

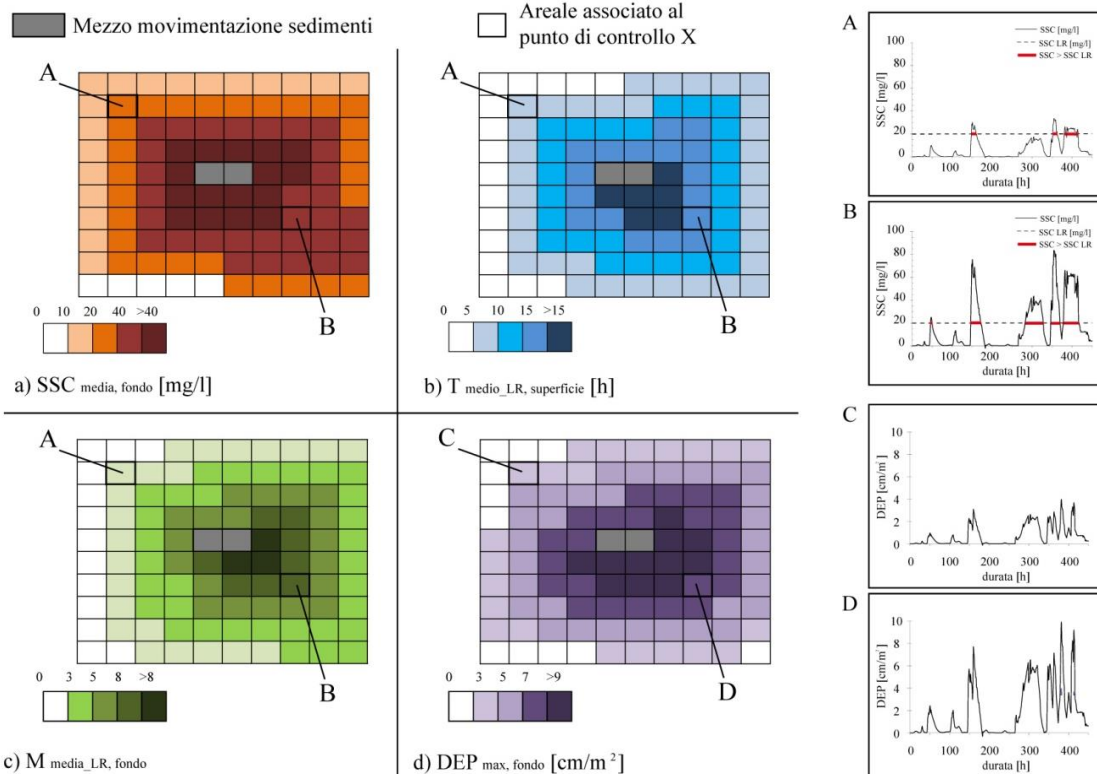


Figura 6- Esempio di mappa di parametri statistici derivati dall'analisi delle serie temporali estratte dal modello (a profondità e per scenari diversi) per la rappresentazione spaziale e temporale del pennacchio di torbida simulata per un intero anno: a) SSC_{media} al fondo per lo scenario N_i ; b) Tempo medio di superamenti, T_{medio_LR} , in superficie per le condizioni primaverili; c) Frequenza media di superamenti, M_{media_LR} , al fondo degli scenari distribuiti sull'intero anno; d) DEP_{max} al fondo per i mesi estivi.

Tabella 7: Esempio di significatività (0 – 5) di effetti associati a crescenti intensità dei livelli di riferimento LR di SSC (in mg/l) e della persistenza degli eventi di superamento (Lisi *et al.*, 2017). In tal caso dalla definizione di significatività di effetto è possibile arrivare alla corrispondente severità dell'impatto per lo specifico recettore sensibile.

		T_{max_LR} [h]						
		0-2	2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	>60
SSC _{LR} [mg/l]	0 - 10	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	1	1	2	3	4
	20-50	0	1	2	2	3	4	5
	> 50	0	1	2	3	4	5	5

Nell'esempio riportato la durata della perturbazione è intesa come massimo di persistenza ininterrotta dei singoli eventi al di sopra dello specifico SSC_{LR} (T_{max_LR}). La medesima valutazione può essere estesa ad altre coppie di parametri (es. SSC_{max_LR} , T_{medio_LR}) ritenute significative sulla base di valutazioni sito-specifiche e/o recettore-specifiche. È opportuno inserire anche criteri di frequenza di accadimento degli eventi nella assegnazione dei valori di significatività (Wilber & Clarke, 2001).

Vengono prodotte mappe di sintesi per ogni livello di riferimento in termini di intensità (es. SSC_{LR} = 10, 20, 50 mg/l) memorizzando in corrispondenza del singolo punto di controllo il valore di significatività dell'effetto associato alla durata massima di persistenza ininterrotta della concentrazione di solidi sospesi sopra lo specifico valore. Dalla sovrapposizione delle

mappe si ricava per ogni specifico punto di controllo il massimo valore di significatività registrato.

Il formato a “mappa”, inoltre, oltre a restituire informazioni mediate nel tempo e nello spazio in relazione alle scale di interesse, rende i risultati modellistici fruibili e facilmente sovrapponibili ad altre informazioni ambientali (LL.GG. ISPRA, Lisi *et al.*, 2017), quali la presenza e l'estensione di recettori sensibili (es. *habitat*, allevamenti di mitili, praterie di fanerogame, etc.).

3 INTERAZIONE TRA MODELLISTICA E MONITORAGGIO

Le LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017;) riportano come requisito basilare la mutua-interazione con il monitoraggio ambientale per il corretto utilizzo dei modelli matematici a supporto degli studi ambientali nelle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi che comprendono la movimentazione dei sedimenti.

In linea con quanto riportato dal *Central Dredging Association* (CEDA, 2015) e dall'*International Association of Dredging Companies* (IADC), dalle convenzioni internazionali in materia (IMO London Convention 1972 e London Protocol 1996; UNEP- MAP Dumping Protocol 1995) e nel rispetto di quanto previsto nel D.lgs. 152/2006, nel D.M. 172/2016 e nel D.M. 173/2016, il monitoraggio, in funzione delle diverse fasi di progetto (pianificazione, esecuzione e verifica) viene denominato come:

- monitoraggio *ante operam* (o *baseline monitoring*), attuato nella fase di caratterizzazione preliminare per costituire una base di riferimento per i parametri ambientali di interesse prima dell'avvio dei lavori, in condizioni indisturbate (o comunque 'disturbate' solo da fattori estranei ai lavori stessi);
- monitoraggio in corso d'opera eseguito durante le fasi di cantiere per confrontare gli scostamenti indotti dalle operazioni di movimentazione sui parametri di interesse simulati e/o monitorati nella fase *ante operam*;
- monitoraggio *post operam*, eseguito dopo il completamento degli interventi, fino alla verifica del ripristino delle condizioni ambientali o del raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio stabile (sulla base delle indicazioni fornite dagli Enti di Controllo).

In CEDA (2015) il monitoraggio finalizzato a confrontare gli scostamenti indotti dalle operazioni di movimentazione sui parametri di interesse simulati e/o monitorati nella fase *ante operam* prende il nome di monitoraggio di sorveglianza (*surveillance monitoring*). Nell'ambito della *London Convention* e del *London Protocol* è definito il monitoraggio sul campo (*field monitoring*), eseguito al fine di verificare l'ipotesi di impatto, ovvero valutare se le assunzioni alla base della scelta del sito di destinazione dei materiali di dragaggio sono corrette in termini di protezione dell'ambiente marino e della salute umana. Tale attività di monitoraggio deve essere attuata comprendendo la fase *ante operam* (il citato *baseline monitoring*), in corso d'opera e *post operam*.

Viene denominato monitoraggio di conformità (o *compliance monitoring*) quello finalizzato alla verifica dell'adeguamento alle prescrizioni e della compatibilità ambientale delle operazioni durante l'esecuzione (in corso d'opera) e dopo il completamento degli interventi (*post operam*).

In Figura 7 si riporta uno schema concettuale delle principali interazioni tra le attività modellistiche e le attività di monitoraggio nelle diverse fasi di progettazione e gestione delle operazioni di movimentazione dei sedimenti.

Si specifica che lo schema riporta la totalità delle interazioni tra le attività di monitoraggio e modellistiche da eseguire qualora gli studi condotti nelle fasi iniziali della progettazione (fase *ante operam*), nell'ambito della fase conoscitiva e della fase modellistica preliminare, per verificare la fattibilità/compatibilità ambientale degli interventi evidenzino criticità ambientali che richiedono di essere investigate con maggiore dettaglio.

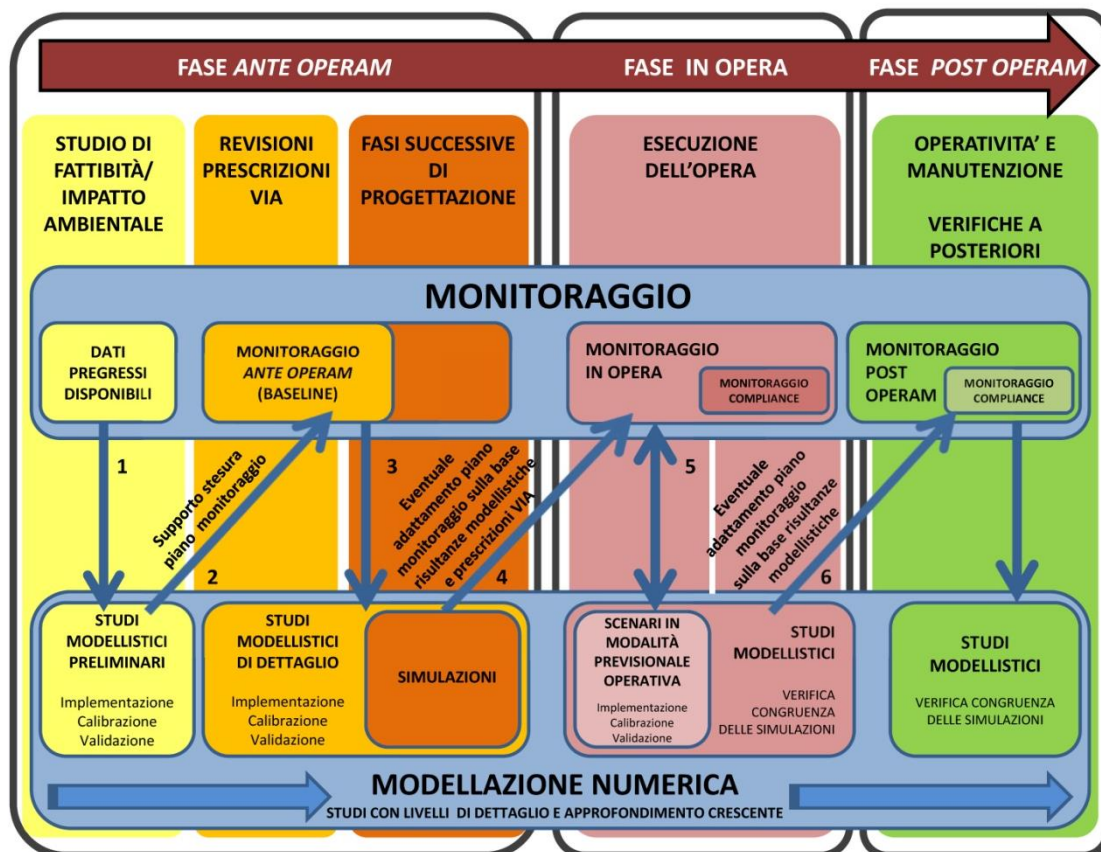


Figura 7: Schema concettuale di mutua-interazione tra attività di monitoraggio e attività modellistica nelle diverse fasi di progettazione, esecuzione e gestione delle operazioni di movimentazione. Da Lisi *et al.*, 2017.

Considerando le molteplici finalità, nel dettaglio, il monitoraggio ambientale può essere svolto al fine di:

- supportare la definizione degli scenari di modellazione per condizioni indisturbate e per diverse ipotesi progettuali selezionate al fine di valutare la fattibilità degli interventi (nelle diverse fasi di progettazione e degli studi di Valutazione di Impatto Ambientale condotti nell'*ante operam*);
- verificare la conformità del progetto alle normative di settore e/o a eventuali prescrizioni (nelle diverse fasi di progettazione e degli studi di Valutazione di Impatto Ambientale della fase *ante operam*);
- individuare/correggere la corretta disposizione delle stazioni di monitoraggio di controllo, in aree ipotizzabili come non influenzate dai lavori, per i parametri ambientali di interesse (nelle diverse fasi *ante operam*, in corso d'opera e *post operam*);
- individuare e quantificare i cambiamenti prodotti dalle operazioni di movimentazione rispetto alla condizione indisturbata (o precedentemente alterata), e fornire elementi utili per la tempestiva introduzione e per la verifica dell'efficacia delle misure di mitigazione eventualmente introdotte (nelle fasi in corso d'opera);
- calibrare e validare i modelli numerici implementati per la previsione degli effetti, per la verifica a posteriori delle ipotesi modellistiche adottate e la verifica/valutazione dei risultati modellistici (nelle diverse fasi *ante operam*, in corso d'opera e *post operam*);

- acquisire misure in prossimità dei mezzi di lavoro al fine di contribuire all'aggiornamento dei *data-set* utilizzati per derivare le formulazioni esistenti per la stima del termine sorgente ed ampliarne gli intervalli di validità (in corso d'opera)¹³.

Lo schema di Figura 7 mette in evidenza come, sulla base delle risultanze del monitoraggio e delle analisi modellistiche condotte nelle diverse fasi di progettazione, esecuzione e gestione degli interventi, sia possibile approfondire la comprensione del sistema, le sue risposte alle pressioni indotte dall'esecuzione degli interventi e, di conseguenza, apportare modifiche alle scelte progettuali effettuate.

3.1 Il monitoraggio a supporto della validazione e della verifica dei risultati

La raccolta di dati *in situ* è utile non solo per fornire alcuni parametri essenziali per la definizione delle condizioni iniziali e al contorno per la corretta implementazione del modello, ma anche per la verifica dei risultati del modello stesso.

Le formulazioni semplificate o parametriche alla base dei modelli matematici includono numerose ipotesi che non permettono di rappresentare pienamente la complessità dei fenomeni fisici considerati. Pertanto, anche un modello correttamente implementato può portare a risultati non coerenti con la realtà, qualora le parametrizzazioni utilizzate non rappresentino le principali peculiarità del caso in esame (es. risoluzione del modello non adatta a riprodurre le caratteristiche batimetriche). Discorso analogo si applica alle modellazioni che fanno ricorso a formulazioni empiriche atte a descrivere un fenomeno. In molti casi esistono diverse formule empiriche per la rappresentazione dello stesso fenomeno. In tali casi è necessario selezionare la più opportuna, adeguandone i parametri.

Pertanto, per garantire e verificare l'affidabilità dei risultati modellistici, si devono utilizzare i dati di campo per effettuare opportune procedure di calibrazione e validazione.

La calibrazione è il procedimento di comparazione dei risultati del modello con corrispondenti osservazioni e misure, al fine di identificare e modulare l'insieme di parametri che consente di ricostruire le osservazioni nel modo migliore.

Per validazione si intende, invece, il procedimento utilizzato per verificare che il modello sia in grado di realizzare delle predizioni accurate. Questo implica che il modello, precedentemente calibrato, venga applicato per la ricostruzione di un nuovo insieme di osservazioni (o sottoinsieme del set di dati originali, dataset di validazione) mantenendo inalterata la scelta dei parametri. Lo scopo della validazione è la stima del grado di approssimazione con cui il modello riesce a riprodurre i valori osservati/misurati. Pertanto, il modello è detto validato quando è accertato che l'accuratezza e la capacità predittiva rimangono all'interno di prefissati limiti di accettabilità nel periodo di validazione.

La fase combinata di calibrazione/validazione del modello permette di adattare gli strumenti di modellazione impiegati per ottenere una maggiore capacità di riproduzione della realtà. Pertanto, essa è tesa a verificare l'accettabilità delle ipotesi alla base del modello utilizzato e l'affidabilità dei valori numerici dei parametri necessari a risolvere il modello. La validazione

¹³ Sebbene tale finalità non sia strettamente legata all'intervento di movimentazione, mettere a disposizione nuovi dati di SSC misurati in prossimità dei mezzi di lavoro è importante per il miglioramento delle formulazioni esistenti per la stima del termine sorgente oltre che per la calibrazione dei modelli in corso d'opera.

dei modelli utilizzati si traduce nella valutazione dell'errore, o intervallo di confidenza, da considerare nell'analisi dei risultati da essi prodotti.

È necessario che l'AMI sia in grado di riprodurre correttamente i principali fenomeni fisici considerati, sia per la simulazione del campo idrodinamico, che per i processi di dispersione e sedimentazione del pennacchio di torbida generato durante la movimentazione di sedimenti. Pertanto, ognuno dei modelli che costituiscono l'AMI deve essere sottoposto ad un processo di calibrazione/validazione.

Da un punto di vista operativo, il procedimento di calibrazione/validazione può essere effettuato utilizzando varie tecniche basate sul confronto tra il risultato numerico e il corrispondente dato misurato nella realtà.

In linea generale, la verifica può essere effettuata sulla specifica grandezza (es. livelli idrici, intensità di corrente, concentrazione, ecc.), calcolata e osservata, oppure su grandezze derivate da valori calcolati e osservati (numero di superamenti di SSC rispetto ad un livello di riferimento, prisma di marea di un bacino semichiuso, distribuzione empirica di probabilità della specifica grandezza, ecc.).

L'analisi più immediata consiste nella stima della differenza media (anche quadratica) tra i valori calcolati e i valori osservati. A tal fine, è opportuno selezionare con attenzione la discretizzazione numerica del dominio di calcolo in modo tale che sia possibile estrarre il risultato numerico nell'esatto punto di misura senza la necessità di interpolazioni spaziali.

La differenza tra il campo misurato e quello da modello può fornire diversi elementi utili alla verifica della capacità del modello di rappresentare la realtà con il grado desiderato di approssimazione. Il valore delle differenze medie assolute indica la discrepanza media tra i valori del campo misurato e quello prodotto dal modello. Una differenza media semplice invece permette di valutare se mediamente il modello produce valori inferiori o superiori a quelli misurati. Una differenza semplice o assoluta solo per alcuni valori del campo fornisce elementi di dettaglio per la valutazione di fenomeni di particolare interesse.

Tuttavia, spesso è necessario ricorrere ad analisi più approfondite per valutare l'affidabilità dei modelli numerici. A titolo di esempio, si osserva che il semplice confronto sincrono tra dati osservati e dati misurati risente molto della capacità del modello di riprodurre correttamente la celerità di propagazione della grandezza considerata. Può, infatti, accadere che un modello sia in grado di riprodurre con un buon grado di precisione i valori di intensità dei parametri di interesse, seppur contraddistinti da una sfasatura temporale rispetto alle condizioni reali.

Si consiglia, quindi, di basare l'analisi dei risultati sul confronto di grandezze derivate (si veda, ad esempio, gli SSC_{medio} e SSC_{max} descritti al par. 2.5.2) in grado di valutare l'affidabilità dello strumento modellistico nel riprodurre i fenomeni di interesse volti alla valutazione degli impatti di tipo fisico dovuti alle attività di movimentazione. Per ulteriori approfondimenti sulle tematiche relative al processo di calibrazione e validazione degli strumenti modellistici si rimanda alla letteratura di settore (es. Oreskes *et al.*, 1994; Taylor, 2001; Stow *et al.*, 2009; Jiang, 2014; Olsen *et al.*, 2016).

3.1.1 Finalità del monitoraggio ante operam

Il monitoraggio *ante operam* (o di base) viene effettuato per definire le condizioni ambientali locali prima dell'inizio delle attività di cantiere e fornisce i dati necessari per valutare, nelle successive fasi in corso d'opera e *post operam*, le variazioni indotte sui parametri ambientali considerati, nonché per rispondere alle eventuali prescrizioni ambientali formulate. Durante

la fase *ante operam* sono raccolti i dati necessari per l'implementazione di studi modellistici preliminare e di dettaglio (es. dati idrodinamici e rilievi batimetrici aggiornati) e per investigare la sussistenza di una relazione di causa/effetto collegabile alla realizzazione dell'opera.

Il monitoraggio *ante operam* è talvolta implementato in due fasi differenti:

- una prima fase a supporto della progettazione e degli studi di impatto ambientale;
- una seconda fase, prima dell'inizio delle attività di cantiere, per caratterizzare nel dettaglio la naturale variabilità delle condizioni ambientali "sito-specifiche" anche ai fini di stabilire livelli di riferimento per i parametri fisici, chimici e biologici di acqua e sedimento (es. livello, correnti, onde, temperatura e salinità, solidi sospesi, torbidità, ossigeno, contaminanti, clorofilla, biomassa di organismi, ecc.) come riportato nel par. 2.2.3.

Anche se le attività di movimentazione possono indurre cambiamenti sul sistema fisico (es. variazione dell'integrità del fondale, aumento della concentrazione della frazione sedimentaria fine in sospensione, variazioni della batimetria e dell'idrodinamica locale, variazione del tasso di erosione e deposizione al fondo, ecc.), a questi potrebbe non corrispondere alcun effetto ambientale (o impatto) significativo se non sono rilevate criticità ambientali in prossimità dell'area di intervento.

In ambienti confinati e/o caratterizzati da bassa energia (es. bacini portuali e aree di transizione), inoltre, si deve prestare particolare attenzione, sia al controllo della frazione solida sospesa in uscita verso il mare aperto, sia alla presenza di contaminanti associati alla frazione sottile dei sedimenti sospesi. Questi ambienti, infatti, sono generalmente contraddistinti dalla sedimentazione di un'alta percentuale della frazione sedimentaria sottile, spesso veicolo dei contaminanti in virtù del forte potere adsorbente della frazione organica.

Pertanto, durante la fase *ante operam* è importante effettuare una preliminare analisi dei potenziali effetti attesi sul sistema acquatico in relazione alle peculiarità del contesto ambientale in cui si svolgono gli interventi (es. presenza di vincoli e criticità ambientali¹⁴), mediante l'implementazione di un modello concettuale. Ciò al fine di individuare un livello (o una serie di livelli) di riferimento e definire una scala di significatività degli effetti attesi anche in relazione ai recettori sensibili presenti (cfr. par. 2.5).

Qualora non siano disponibili informazioni relative al tipo di risposta dei recettori sensibili alle alterazioni indotte dall'incremento di SSC e DEP sulla qualità del sistema acquatico, in via precauzionale è possibile definire, sulla base dei dati pregressi ed acquisiti durante il monitoraggio *ante operam*, un livello (o una serie di livelli) di riferimento sito-specifico legato alla variabilità naturale dell'area. In virtù dell'arbitrarietà con cui spesso sono stabiliti tali valori, questi devono essere necessariamente verificati ed eventualmente corretti sulla base dei dati acquisiti in corso d'opera.

Infine, durante la fase *ante operam* deve essere definito il numero, l'ubicazione e la frequenza di campionamento di stazioni di controllo, ubicate in aree presumibilmente non soggette agli effetti di cantiere. Il monitoraggio in tali stazioni è utile a discriminare gli effetti

- ¹⁴ Qualsiasi alterazione dei parametri ambientali d'interesse che può aversi in seguito alle operazioni di movimentazione, su diverse scale spaziali/temporali, e in grado di produrre effetti (o *stress*) significativi (reversibili o irreversibili) sui recettori e gli obiettivi sensibili individuati. Rientrano in questa definizione anche i vincoli ambientali (si veda relativa definizione) e quei fattori ambientali (tipologia dei sedimenti e dei contaminanti eventualmente associati, volumi complessivi da movimentare, ecc.), a cui potrebbero essere correlate alterazioni significative dei parametri di interesse, che condizionano e limitano la scelta delle modalità operative (LL.GG, ISPRA, Lisi *et al.*, 2017).

legati alla naturale variabilità del sito dagli effetti correlabili, in *corso d'opera*, alle attività di cantiere.

In tale ottica, l'implementazione di modelli matematici prima dell'inizio dei lavori, consentendo di prevedere le aree e le finestre temporali critiche in relazione ai potenziali effetti attesi, può costituire un valido supporto per la pianificazione della strategia di monitoraggio, nella scelta dell'ubicazione e della frequenza di campionamento delle stazioni.

3.1.2 Finalità del monitoraggio in corso d'opera

Il monitoraggio in corso d'opera è finalizzato al confronto dei parametri misurati durante le attività di movimentazione con quelli pregressi (durante il monitoraggio *ante operam*) per verificare la natura e l'entità dei cambiamenti ambientali indotti dalle attività (monitoraggio in corso d'opera). Sulla base dei dati raccolti in corso d'opera viene condotta anche la verifica della conformità (*compliance*) rispetto al contesto normativo e ad eventuali prescrizioni formulate in relazione agli specifici obiettivi ambientali e di progetto.

Le attività di monitoraggio condotte in questa fase possono essere utilizzate in relazione all'attività modellistica per:

- valutare/verificare i contenuti e la congruenza dello studio modellistico condotto in fase di progetto;
- valutare/verificare la correttezza della definizione del termine sorgente in termini di quantità e modalità di rilascio del materiale;
- garantire in qualsiasi momento, anche posteriormente alle operazioni di movimentazione, la disponibilità di dati funzionali a ricostruire attraverso la modellistica numerica il regime idrodinamico e di trasporto durante le operazioni;
- implementare un sistema di modellazione operativa previsionale a supporto delle operazioni (cfr. par. 3.2.1).

Il monitoraggio durante le attività di cantiere può essere periodico o in continuo. Da un punto di vista spaziale, esso può essere (es. HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Cutruno *et al.*, 2012):

- mobile, in quanto condotto per mezzo di imbarcazione nelle vicinanze dei mezzi di movimentazione del sedimento per la caratterizzazione della sorgente del pennacchio di torbida;
- stazionario, in quanto basato sull'utilizzo di stazioni fisse per la valutazione nel tempo delle variazioni del sistema eventualmente collegate alle attività di movimentazione;
- localizzato in corrispondenza delle stazioni di controllo e/o di recettori sensibili.

Qualora i parametri misurati in corso d'opera discostino significativamente da quelli rilevati nell'*ante operam* è possibile attivare specifiche procedure di controllo e/o di allerta.

Osservazioni in tempo reale, un rapido processamento del dato e sistemi di valutazione standardizzati possono essere utilizzati per individuare gli effetti dell'opera, intensificare e/o rimodulare la strategia di monitoraggio (es. localizzazione delle stazioni ubicate nella fase *ante operam* e frequenza di campionamento per il controllo dei processi in atto), attivare una procedura di allerta in caso del superamento di livelli di riferimento prestabiliti per i parametri di interesse (es. interruzioni delle attività nel caso di anomalie significative di SSC riconducibili alle operazioni di movimentazione), o per intervenire tempestivamente sulle modalità operative con opportune misure di mitigazione in base alle scelte effettuate in fase di pianificazione.

3.1.3 Finalità del monitoraggio post operam

Il monitoraggio *post operam* è finalizzato alla verifica, nel medio e lungo termine, del ripristino delle condizioni ambientali *ante operam* o, alternativamente, del raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio stabile sulla base delle indicazioni fornite dall'Ente di Controllo.

Sulla base dei dati raccolti in *post operam* è possibile verificare anche la conformità (*compliance*) degli effetti a medio/lungo termine, previsti nelle antecedenti fasi di progetto, alle prescrizioni normative e formulate in fase di valutazione della conformità ambientale. La finalità di tale monitoraggio è quella di verificare/ottimizzare le azioni correttive o di mitigazione comunque previste in fase di progettazione/esecuzione degli interventi.

Il monitoraggio *post operam* risulta particolarmente importante anche per verificare gli effetti a breve/lungo termine individuati sulla morfodinamica e gli effetti sugli ecosistemi ad essi correlati.

3.2 La modellistica a supporto del monitoraggio

Come già descritto (cfr. par. 2.5), nelle prime fasi di pianificazione del monitoraggio è necessario considerare:

- la localizzazione dei recettori rispetto alle attività di movimentazione;
- i tipi di effetti ambientali;
- i possibili percorsi tra sorgente e recettori;
- i fattori (parametri) ai quali i ricettori risultano sensibili;
- i possibili livelli di riferimento in funzione della definizione della significatività degli effetti, ed eventualmente della valutazione della severità degli impatti.

In particolare, in funzione delle previsioni modellistiche e dei risultati ottenuti nelle diverse fasi di monitoraggio, è possibile individuare/verificare le aree entro cui posizionare stazioni (fisse e mobili) per il controllo del pennacchio di torbida e aree in cui posizionare stazioni fisse di controllo per l'acquisizione di misure di background, ossia in aree presumibilmente non soggette alle variazioni indotte dalle attività di cantiere.

Come riportato in CEDA (2015a), è possibile utilizzare un modello Sorgente – Percorso - Recettore (S-P-R) per rappresentare a livello teorico il legame tra la sorgente (attività di movimentazione) e i recettori che potrebbero essere coinvolti dagli effetti indotti dai lavori. In Figura 8 è illustrato in modo schematico come il modello S-P-R possa essere applicato ad attività di movimentazione di sedimenti.

Nello schema la sorgente (attività di movimentazione) genera una nube di torbida che, attraverso processi di dispersione e deposizione meccanica, produce effetti ambientali quali variazioni della concentrazione di solidi sospesi in colonna d'acqua e variazioni di spessore di sedimento depositato al fondo. Il recettore sensibile è rappresentato da una specifica area potenzialmente impattata. Il monitoraggio dei recettori ha lo scopo di identificare i possibili cambiamenti e assegnare, in termini qualitativi possibilmente quantitativi, un livello di significatività.

La significatività degli effetti ambientali è legata sia all'intensità che alla durata e alla frequenza della perturbazione oggetto di monitoraggio.

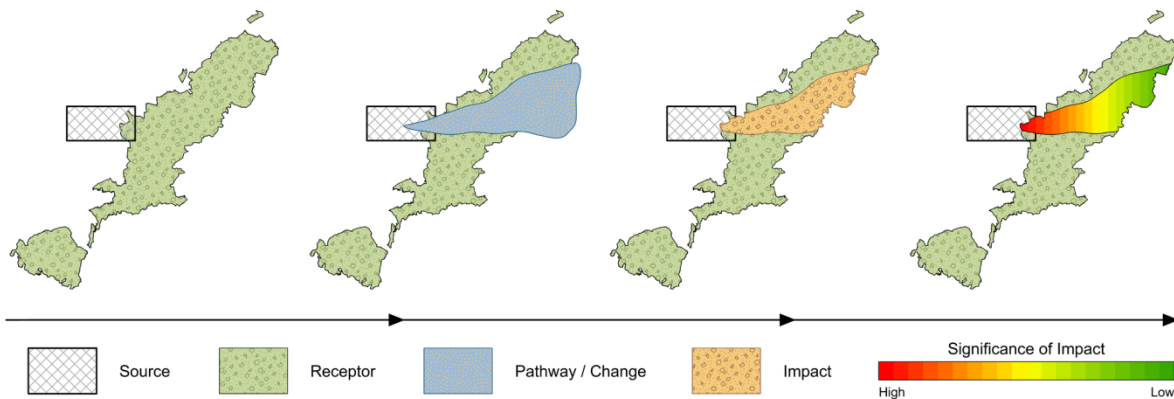


Figura 8: Illustrazione schematica dell'applicazione del modello sorgente-percorso-ricettore (S-P-R) alle attività di movimentazione di sedimenti (da CEDA, 2015a)

Come diffusamente trattato in LL.GG ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), poiché i modelli matematici permettono di prevedere l'andamento, l'estensione spaziale, l'intensità e la persistenza nel tempo del pennacchio di torbida (e quindi le variazioni spaziali e temporali dei parametri ambientali simulati) in funzione dell'idrodinamica locale e per selezionati scenari di movimentazione, essi possono fornire elementi utili anche per supportare la pianificazione della numerosità, localizzazione e frequenza di campionamento delle stazioni di monitoraggio.

3.2.1 Modellazione operativa in fase di cantiere

Per interventi di notevole estensione e particolare delicatezza potrebbe essere utile implementare i modelli in modalità operativa/previsionale al fine di reperire informazioni, durante le operazioni, quali ad esempio:

- previsione di vento, onda e correnti per le ore/giorni di attività;
- previsione della distribuzione della concentrazione di sedimento sospeso e della distribuzione della deposizione del materiale al fondo, entrambe indotte dalle operazioni di movimentazione del materiale.

Sulla base delle previsioni dello strumento modellistico operativo, che deve necessariamente essere calibrato/validato sui dati del monitoraggio via via acquisiti, risulta possibile definire o ottimizzare un Piano delle Operazioni a breve termine (Short Term Operations Plan – STOP) utile sia all'operatore (es. la conoscenza anticipata delle finestre temporali per cui sono previsti eventi avversi in corso d'opera risulta fondamentale per l'ottimizzazione dell'impiego dei mezzi coinvolti) sia agli Enti preposti al controllo.

Ad esempio, qualora fosse previsto il superamento di prestabiliti livelli di riferimento di SSC (livello di allerta) in uno o più punti target, il Piano delle Operazioni potrebbe prevedere l'attivazione di una procedura di allerta, l'interruzione delle operazioni o la modifica delle stesse (misure di mitigazione), al fine di abbassare l'effetto/impatto a livelli accettabili.

3.3 Standardizzazione delle misure e del flusso delle informazioni

Nel caso specifico delle operazioni di movimentazione dei sedimenti in ambito marino-costiero, l'applicazione di una metodologia condivisa di raccolta e gestione dei dati (di

monitoraggio, operativi e modellistici) è sicuramente funzionale alle procedure di autorizzazione di nuovi progetti e allo sviluppo di progetti di ricerca.

In letteratura, infatti, sono disponibili diversi set di dati di campo acquisiti durante l'esecuzione di operazioni di dragaggio e sversamento non utilizzabili in maniera sistematica negli studi di settore perché acquisiti mediante utilizzo di metodologie diverse (quindi disponibili in formati non standardizzati) o perché contenute in rapporti riservati (Hayes *et al.*, 2007; Kemps & Masini, 2017). Ciò si riflette ad esempio sull'affidabilità della stima del termine sorgente mediante l'utilizzo di formulazioni empiriche derivate da un numero limitato di dati di campo (sito-specifici e progetto-specifici) e sulla necessità di ricorrere arbitrariamente ad ipotesi di base spesso "eccessivamente conservative" per ovviare a problematiche ambientali conseguenti ad eventuali sottostime del termine sorgente.

A tal proposito, Kemps & Masini (2017) evidenziano l'importanza di disporre di *database* condivisi (*data library*) da aggiornare costantemente con nuove misure progetto-specifiche (eseguite in siti e per finalità progettuali diverse) e di adottare protocolli/approcci standardizzati per l'esecuzione delle misure e la compilazione dei database. In particolare, al fine di omogeneizzare e massimizzare l'utilità dei dati acquisiti, raccomandano la compilazione di una scheda informativa, specifica per il progetto in esame, che contenga almeno informazioni circa:

- le caratteristiche geotecniche e la distribuzione granulometrica dei sedimenti (PSD) dei fondali da movimentare (fondamentali per la convalida del set di dati);
- la distribuzione granulometrica dei sedimenti al fondo, a conclusione delle operazioni di movimentazione, nelle aree che possono aver risentito significativamente dell'esecuzione dei lavori e/o dell'azione dei mezzi di lavoro;
- le specifiche sul tipo di dati e sulle metodologie utilizzate per la raccolta degli stessi (es. posizione dei punti di campionamento/raccolta dati rispetto al mezzo di lavoro, profondità dei campionamenti/misurazioni lungo la colonna d'acqua, spessore dei sedimenti prelevati al fondo, ecc.);
- le specifiche sulle modalità tecnico e operative utilizzate (es. tipo di draga, velocità del ciclo di dragaggio, produttività oraria e giornaliera, cronoprogramma delle attività, eventuale suddivisione in lotti operativi, ecc.);
- le proprietà fisiche della frazione dei sedimenti in sospensione (es. velocità di sedimentazione e distribuzione granulometrica) durante le operazioni di movimentazione;
- il flusso (o del rateo) di risospensione/rilascio in prossimità del mezzo di lavoro, specificando chiaramente l'unità di misura in cui è espresso (es. percentuale rispetto alla frazione di fine, kg/s, ecc.) e il limite utilizzato per definire la frazione sedimentaria fine (es. 63 μm nel rispetto della scala *Wentworth* o 74 μm in accordo con la classificazione USCS);
- i dati sulle condizioni meteorologiche e i parametri chimico-fisici della colonna d'acqua da acquisire, per una migliore interpretazione dei dati acquisiti in corso d'opera, a partire dal periodo antecedente l'avvio delle operazioni di movimentazione (e quindi delle previste attività di monitoraggio) in corso d'opera.

In Appendice 1 si riporta un esempio di scheda informativa di progetto (SIP) tratta dalle LL.GG ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), specifica per ogni progetto ed articolata nelle fasi *ante operam* (Tabella SIP-AO), in corso d'opera (Tabella SIP-IO) e *post operam* (Tabella SIP-PO), contenente le principali informazioni (ambientali e operative) che possono essere raccolte (prima, durante e dopo l'esecuzione degli interventi) per una migliore applicazione degli studi modellistici.

In particolare, la compilazione delle schede informative di progetto (SIP) nelle diverse fasi del progetto in esame, ha le seguenti finalità:

- standardizzare la tipologia delle informazioni e delle metodologie di raccolta di dati, al fine di arricchire costantemente i database disponibili e utilizzabili, nell'ambito di studi modellistici condotti per valutare la fattibilità/compatibilità di progetti futuri, per incrementare l'attendibilità delle stime (es. del termine sorgente) ottenibili con l'implementazione dell'AMI;
- permettere un migliore utilizzo della modellistica e delle procedure di calibrazione e verifica dei risultati (e degli eventuali livelli cautelativi adottati), nell'ambito delle diverse fasi di progettazione e gestione del progetto in esame (es. qualora sia stato avviato un sistema decisionale di supporto alla verifica della rispondenza ambientale delle operazioni di movimentazione che comprenda anche l'utilizzo di modellistica in corso d'opera).

La Figura 9 evidenzia che la compilazione delle singole schede informative di progetto (SIP) nelle diverse fasi *ante operam* (SIP-AO), in corso d'opera (SIP-IO) e *post operam* (SIP-PO) possono essere considerate svincolate l'una dall'altra, poiché sono caratterizzate da finalità diverse, sia nell'ambito della progettazione e gestione del progetto in esame sia nell'ambito della verifica della fattibilità/compatibilità di progetti futuri.

RACCOLTA DI INFORMAZIONI E DATI (AMBIENTALI E OPERATIVI) NELLE DIVERSE FASI DI MONITORAGGIO E NELLE DIVERSE SESSIONI DEI LAVORI		UTILITÀ AI FINI MODELLISTICI NELLE DIVERSE FASI PROGETTUALI	
		PROGETTO IN ESAME	PROGETTI FUTURI
INFORMAZIONI AMBIENTALI (Misure in situ e ricognizione dati disponibili)		MIGLIORE UTILIZZO DELLA MODELLISTICA E DELLE PROCEDURE DI CALIBRAZIONE E VERIFICA DEI RISULTATI PRELIMINARMENTE L'ESECUZIONE DEGLI INTERVENTI	
SCHEDA INFORMATIVA ANTE OPERAM (*) (§. Appendice 2, SIP. AO)	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI OGGETTO (E IN PROSSIMITÀ) DEGLI INTERVENTI CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA		
INFORMAZIONI AMBIENTALI E OPERATIVE Relative alle diverse sessioni (o lotti funzionali - LF) dei lavori		VERIFICA DELL'ATTENDIBILITÀ DEGLI STUDI MODELLISTICI IMPLEMENTANTI NELL' ANTE OPERAM E VERIFICA/AGGIORNAMENTO DEGLI EVENTUALI LIVELLI CAUTELATIVI ADOTTATI	AGGIORNARE E ARRICCHIRE I DATABASE UTILIZZABILI A SUPPORTO DI PROGETTI CARATTERIZZATI DA PECULIARITÀ AMBIENTALI E PROGETTUALI SIMILI, PER MIGLIORARE L'AFFIDABILITÀ DELLE STIME DEL TERMINE SORGENTE E AMPIARE GLI INTERVALLI DI VALIDITÀ DELLE FORMULAZIONI EMPIRICHE DISPONIBILI
SCHEDA INFORMATIVA IN CORSO D'OPERA (**) (§. Appendice 2, SIP. IO)	LF.1 LF.2 ... LF.n CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI INTERESSATI DALLA RIDEPOSIZIONE/RISOSPENSIONE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO		
	CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA (*) CONDIZIONI DI UTILIZZO E MODALITÀ TECNICHE E OPERATIVE		
INFORMAZIONI AMBIENTALI (Misure in situ e ricognizione dati disponibili)		VERIFICA DELL'ATTENDIBILITÀ DEGLI STUDI MODELLISTICI IMPLEMENTANTI NELL' ANTE OPERAM E IN CORSO D'OPERA E VERIFICA/AGGIORNAMENTO DEGLI EVENTUALI LIVELLI CAUTELATIVI ADOTTATI	
SCHEDA INFORMATIVA POST OPERAM (***) (§. Appendice 2, SIP. PO)	CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI INTERESSATI DALLA RISOSPENSIONE/RIDEPOSIZIONE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA		

Figura 9: Schema di sintesi delle principali finalità della compilazione delle singole schede informative di progetto (SIP) nelle diverse fasi *ante operam*, in corso d'opera e *post operam*. Da Lisi *et al.* (2017).

(*) Per massimizzare l'utilità della SIP-AO è auspicabile la sua compilazione con una frequenza (o numero di campagne di monitoraggio) adeguata a fornire informazioni statisticamente rappresentative della torbidità naturale dell'area di intervento (quindi per le principali condizioni meteo-marine e di eventuale traffico dei natanti che caratterizzano il paraggio in esame)

- (**) Per massimizzare l'utilità della SIP-IC (per il progetto in esame e per progetti futuri) è auspicabile la sua compilazione ad ogni cambio della sessione dei lavori (e delle modalità operative) e di rilevanti variazioni delle condizioni meteo-marine.
- (***) Da compilare solo se previsto monitoraggio nel *post operam* in funzione delle finalità ambientali e progettuali delle operazioni e dei risultati degli studi, al fine di verificare il ripristinarsi delle condizioni ambientali iniziali o di nuove condizioni di equilibrio.

4 CONCLUSIONI

Le attività di movimentazione di sedimenti spesso si rendono necessarie per il mantenimento e il ripristino dei fondali portuali.

I modelli matematici, calibrati e validati attraverso l'utilizzo di dati di letteratura e di campo, sono funzionali, sia alla progettazione delle operazioni di dragaggio dei fondali portuali sia alla pianificazione dei sistemi di monitoraggio ambientali delle attività, soprattutto laddove si riconoscano criticità ambientali e possibili effetti negativi sul comparto abiotico e biotico dell'ecosistema marino, riconducibili al trasporto e alla deposizione della frazione dei sedimenti fini rilasciati durante l'intero ciclo di movimentazione.

Nell'ambito del progetto Se.D.Ri.Port., ISPRA e ARPAL hanno collaborato per l'implementazione di modelli matematici al caso studio della Rada di La Spezia, con l'obiettivo di quantificare i potenziali effetti fisici legati alla risospensione, e successiva deposizione, della frazione più fine dei sedimenti movimentati. Nel caso specifico sono stati riprodotti scenari modellistici rappresentativi della movimentazione dei sedimenti portuali a seguito di operazioni di livellamento. Tale tecnica è stata schematizzata come l'escavo e il successivo spostamento/ridistribuzione del sedimento dragato dal fondale ad una zona adiacente, senza che la testa del mezzo dragante fuoriesca dalla colonna d'acqua rimanendo in prossimità del fondo. La descrizione delle applicazioni modellistiche e dei principi metodologici utilizzati per l'analisi dei risultati in linea con il metodo Dr-EAM (Feola *et al.*, 2016) al caso studio di La Spezia è riportata nel report Se.D.Ri.Port "Documento di sintesi della sperimentazione dell'applicazione modellistica all'interno di un bacino portuale pilota" (ARPAL e ISPRA, 2019, Task T1.6, prodotto T1.6.6, progetto Se.D.Ri.Port).

Il presente Manuale riporta, talvolta integralmente per comodità di trattazione, le indicazioni operative delineate nelle LL.GG. ISPRA "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere" (Lisi *et al.*, 2017), redatte da ISPRA in collaborazione con l'Università dell'Aquila e DHI Italia, per la corretta impostazione degli studi modellistici in bacini portuali a supporto della gestione di interventi di dragaggio in bacini semichiusi e portuali, generalizzabili per le applicazioni modellistiche nelle diverse tipologie portuali dell'area transfrontaliera.

In particolare sono stati ripresi, rimodulati e generalizzati i contenuti salienti delle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) da considerare per la corretta implementazione di un Approccio Modellistico Integrato (AMI) (par. 2.1), mettendo in evidenza:

- 1) i criteri a supporto dell'identificazione delle forzanti e delle condizioni al contorno per la modellazione idrodinamica (e.g. batimetriche, climatiche, idrologiche, sedimentologiche, idrodinamiche);
- 2) i criteri per la caratterizzazione del termine sorgente di rilascio dei sedimenti durante le operazioni di dragaggio (e.g. analisi delle modalità di dragaggio, del flusso dei sedimenti risospesi in colonna d'acqua e delle modalità di rilascio per ogni fase del ciclo di dragaggio);
- 3) le modalità di introduzione del termine sorgente nel modello di trasposto per lo studio della dinamica del pennacchio dei sedimenti (trasporto e deposizione dei sedimenti sospesi);
- 4) le modalità di analisi e sintesi dei risultati sulla base delle finalità ambientali e progettuali e della conoscenza dell'area di intervento (e.g. presenza e tipologia di obiettivi sensibili da tutelare, quali, P. oceanica, formazioni coralligene, tipologia e

volumi dei sedimenti da movimentare) coerentemente con le indicazioni europee ed internazionali e riportate nelle LL.GG. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017).

Infine, sempre riprendendo i criteri contenuti nelle LL.GG. ISPRA, nel presente Manuale sono schematizzate le necessarie interazioni tra gli studi modellistici e le attività di monitoraggio ambientale (cfr. par. 3).

In particolare, ai fini della corretta pianificazione degli studi modellistici e dell'ottimizzazione delle attività di monitoraggio (dei progetti in essere e futuri) si raccomanda la raccolta delle informazioni ambientali e operative mediante la compilazione di Schede Informative di Progetto (SIP). La compilazione di tali schede è considerata di ausilio, sia per facilitare e guidare la raccolta dei dati e delle informazioni necessarie per la corretta implementazione e verifica dei risultati degli studi modellistici ottenuti nell'ambito degli studi di compatibilità ambientale dei progetti in essere, sia per arricchire i database dei dati di campo disponibili utilizzabili nell'ambito delle fasi di progettazione iniziale dei progetti futuri.

5 BIBLIOGRAFIA

- Aarninkhof S.G.J., Rosenbrand W.F., Van Rhee C., Burt T.N., 2008. The day after we stop dredging: a world without sediment plumes?. *Terra et Aqua*, 110 – March 2008, 15-24.
- Anchor Environmental C.A. L.P., 2003. Literature review of effects of resuspended sediments due to dredging operations. Prepared for Los Angeles Contaminated Sediments Task Force - Los Angeles, California, June 2003, pp. 140.
- APAT-ICRAM, 2007. Manuale per la movimentazione di sedimenti marini. Versione aggiornata 2007, pp. 72.
- ARPAL e ISPRA, 2019. “Documento di sintesi della sperimentazione dell'applicazione modellistica all'interno di un bacino portuale pilota”. Task T1.6, prodotto T1.6.6, progetto Se.D.Ri.Port.
- Bai Y., Wang Z., Shen H., 2003. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56(1), 175-186.
- Becker J.H., van Eekelen E., van Wiechen J., De Lange W., Damsma T., Smolders T., van Koningsveld M., 2015. Estimating source terms for far field dredge plume modelling. *J. Environ. Manag.*, 149, 282–293.
- Bilgili A., Proehl J., Lynch D., Smith K., Swift M.R., 2005. Estuary/Ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: A Lagrangian modeling study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 65(4), p. 607-624.
- Blumberg A.F., Mellor G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-dimensional Coastal Ocean Models* (N. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, DC, 1-16.
- Bridges T.S., Ellis S., Hayes D., Nadeau S., Palermo M.R., Patmont C., Schroeder P., 2008. The Four Rs of environmental dredging: Resuspension, Release, Residual, and Risk. Technical Report ERDC/EL TR-08-4, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, January 2008, pp. 64.
- Burt T.N., Roberts W., Land J.M., 2000. Assessment of sediment release during dredging - A new initiative called TASS. In: *Proceedings of the Western Dredging Association (WEDA XX) and 32nd Texas A&M Annual Dredging Seminar (TAMU)*, USA, June 2000. Pub. Texas A&M University, Texas 77843-3136 (CDS Report No 72).
- CEDA, 2015. Environmental Monitoring Procedures. Central Dredging Association-CEDA, Aprile 2015, Rotterdamseweg-The Netherlands, pp. 24.
- CEDA/IADC, 2018. Dredging for Sustainable Infrastructure. CEDA/IADC, The Hague, The Netherlands. Revision no. 1021 logged at 2017-10-05 13:35.
- Chorin A.J., Marsden J.E., 2000. *A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics*, 3rd edition, Springer, New York. pp. 172.
- Clarke D.G., Wilber D.H., 2000. Assessment of potential impacts of dredging operations due to sediment resuspension. DOER Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-E9), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, pp. 14 www.wes.army.mil/el/dots/doer.
- Collins M., 1995. Dredging Induced Near Field Resuspended Sediment Concentration and Source Strengths. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, pp. 232.
- Cutruneo L., Castellano M., Pieracci A., Povero P., Tucci S., Capello M., 2012. The use of a combined monitoring system for following a turbid plume generated by dredging activities in a port. *J. Soils Sediments*, 12 (5), 797–809.

- Davies A.M., Xing J., Huthnance J.M., Hall P., Thomsen L., 2002. Models of near-bed dynamics and sediment movement at the Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 52 (2-4), 373-397.
- De Marchis M., Freni G., Napoli E., 2014. Three-dimensional numerical simulations on wind- and tide-induced currents: The case of Augusta Harbour (Italy). *Computers & Geosciences*. 72, 65–75.
- De Wit L., 2010. Near field 3D CFD Modelling of overflow plumes. In: Proceedings of WODCON XIX, Beijing, China, p. 712-723. http://www.svasek.com/news/WODCON_paper_LdeWit.pdf.
- De Wit L., Talmon A.M., Van Rhee C., 2014. 3D CFD simulation of trailing suction hopper dredge plume mixing: a parameter study of near field conditions influencing the suspended sediment source flux. *Mar. Pollut. Bull.*, 88 (1-2), 47-61.
- DHI, 2017. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module – Scientific documentation. Release 2017. pp. 2.
- Di Risio M., Pasquali D., Lisi I., Romano A., Gabellini M., De Girolamo P., 2017. An analytical model for preliminary assessment of dredging-induced sediment plume of far-field evolution for spatial non homogeneous and time varying resuspension sources. *Journal: Coastal Engineering*
- Eisma D., 2006. *Dredging in Coastal Water*. Published by Taylor & Francis plc., London, UK, ISBN: 978-0-415-39111-5, pp. 244.
- EPA, Environmental Protection Agency, 1993. *Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediment*. Office of water WH 585, EPA-823-B93-C81, pp. 226
- Erftemeijer P.L.A., Lewis R.R., 2006. Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. *Marine Pollution Bulletin* 52 (12), p. 1553-1572.
- Erftemeijer P.L.A., Riegl B., Hoeksema B.W., Todd P.A., 2012. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 64 (9), 1737-1765.
- Erm A., Soomere T., 2006. The impact of fast ferry traffic on underwater optics and sediment resuspension. *Oceanologia*, 48 (S), 283–301.
- Feola A., Lisi I., Venti F., Salmeri A., Pedroncini A., Romano E., 2015. A methodological modelling approach to assess the potential environmental impacts of dredging activities. In Proc. Of CEDA. *Dredging Days, Innovative Dredging Solutions for Ports*, Rotterdam.
- Feola A., Lisi I., Salmeri A., Venti F., Pedroncini A., & Romano E., 2016. Platform of integrated tools to support environmental studies and management of dredging activities, *J. Env. Manag.* 166.
- Fisher R., Walshe T., Bessell-Browne P., Jones R., 2017. Accounting for environmental uncertainty in the management of dredging impacts using probabilistic dose– response relationships and thresholds. *Journal of Applied Ecology*; 00: 1–11.
- Fraser M.W., Short J., Kendrick G., McLean D., Keesing J., Byrne M., Caley M.J., Clarke D., Davis A.R., Erftemeijer P.L.A., Field S., Gustin-Craig S., Huisman J., Keough M., Lavery P.S., Masini R., McMahon K., Mengersen K., Rasheed M., Statton J., Stoddart J., Wu P., 2017. Effects of dredging on critical ecological processes for marine invertebrates, seagrasses and macroalgae, and the potential for management with environmental windows using Western Australia as a case study. *Ecological indicators*, vol. 78, 229-242.
- Hadfield M.G., 2014. *South Taranaki Bight Sediment Plume Modelling: the Effect of Revised Source Particle-Size Distributions*. Report prepared for Trans-Tasman Resources Ltd, submitted to EPA, pp. 11.

- Hayes D.F., Engler R.M., 1986. Environmental Effects of Dredging. Technical Notes, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 11.
- Hayes D., Crockett T.R., Ward T.J., Averett D., 2000. Sediment resuspension during Cutterhead dredging operation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 126 (3), ASCE.
- Hayes D., Wu P.Y., 2001. Simple Approach to TSS Source Strength Estimates. In: *Proceedings of Western Dredging Association WEDA XXI*, Houston.
- Hayes D.F., Borrowman T.D., Schroeder P.R., 2007. Process-based estimation of sediment resuspension losses during bucket dredging. *Proceedings of the World Dredging Congress 2: 1191-1208*. World Dredging Congress; WODCON XVIII
- Herbich J.B., Brahme S.B., 1991. Literature Review and Technical Evaluation of Sediment Resuspension during Dredging. Contract Report HL-91-1 U.S. Army. Corps of Engineers. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Hydraulics Laboratory (U.S.), pp. 152.
- HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003. Protocol for the Field Measurement of Sediment Release from dredges. Produced for VBKO TASS, Issue 1, August 2003, pp. 83.
- IADC, International Association of Dredging Companies, 1998. Environmental Aspects of Dredging – Guide 4: Machines, Methods and Mitigation. International Association of Dredging Companies (IADC), The Netherlands, pp. 80.
- Jiang J., 2014. Investigation of Key Parameters for 3-D Dredging Plume Model Validation. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 4, p. 129-139.
- John S.A., Challinor S.L., Simpson M., Burt T.N., Spearman J., 2000. Scoping the assessment of sediment plumes arising from dredging. CIRIA Report C547, London 2000, pp. 192.
- Johnson B.H., Pachure T.M., 1999. Estimating Dredging Sediment Resuspension Sources. DOER Technical Notes Collection, TN DOER-E6, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. pp. 9.
- Jones R., Bessell-Browne P., Fisher R., Klonowski W., Slivkoff M., 2016. Assessing the impacts of sediments from dredging on corals. *Marine Pollution Bulletin*. 102, 9-29.
- Jouon A., Douillet P., Ouillon S., Fraunie P., 2006. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*. 26(12-13), 1395-1415.
- Kemps H., Masini R., 2017. Estimating dredge source terms - a review of contemporary practice in the context of Environmental Impact Assessment in Western Australia. WAMSI Dredging Science Node Report Theme 2, Project 2.2. Western Australian Marine Science Institution, pp. 23.
- Lisi I., Taramelli A., Di Risio M., Cappucci S., Gabellini M., 2009. Flushing efficiency of Augusta Harbour (Italy). – *Journal of Coastal Research*, SI 56, vol.1, 841–846.
- Lisi I. 2012. Development of an integrated system to the estimation and the environmental management of resuspension induced by dredging activities. [Tesi in italiano]. Univ. of L'Aquila, Italy.
- Lisi I., Di Risio M., De Girolamo P., Gabellini M., 2016. Engineering tools for the estimation of dredging-induced sediment resuspension and coastal environmental management, In: Intech, (Ed), *Applied Studies of Coastal and Marine Environment*.
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D. & Romano E., 2017. La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere. *Manuali e Linee Guida ISPRA*, 169/2017, pp.144
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D., Romano E. & Maurizio Ferla, 2018. Il nuovo manuale per l'utilizzo della modellistica matematica

- nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere. XXXVI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche Ancona, 12-14 Settembre 2018
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D., Ferla M., 2019(a). L'utilizzo dei modelli matematici nella valutazione degli effetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere: il manuale ISPRA, proceeding del "Workshop Se.D.Ri.Port sulla valutazione degli effetti fisici dovuti alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere: strumenti e metodologie di approccio. Livorno, Aprile 2019
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Pedroncini A., Pasquali D., Di Risio M., 2019(b). Mathematical modeling framework of physical effects induced by sediments handling operations in marine and coastal areas. *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 149.
- Liu J.T., Chao S., Hsu R.T., 2002. Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume. *Continental Shelf Research*, 22 (11-13), 1745–1773.
- Lumborg U., 2005. Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund. *Journal of Marine Systems* 56 (1-2), 179–193.
- Manzanera M., Pérez M., Romero J., 1998. Seagrass mortality due to oversedimentation: an experimental approach. *Journal of Coastal Conservation*, 4: 67-70.
- Mei C.C., 1989. *The applied dynamics of ocean surface waves*, World Scientific. pp. 768
- Mendedel. Landbomvhogedrool, Wegeningera, pp. 98. OMOE, Ontario Ministry of the Environment and Energy, 1994. Evaluating construction activities impacting on water resources - Part III B - Handbook for dredging and dredged material disposal in Ontario - Dredging Transport and Monitoring. Report prepared by Standards Development Branch Ontario Ministry of the Environment, ISBN 0-7778-3292-5, pp. 31.
- Nakai O., 1978. Turbidity generated by dredging projects. In management of bottom sediments containing toxic substances. In: Proceedings of the 3rd U.S.–Japan Experts Meeting. US Army Engineer Water Resources Support Center.
- Nicoletti L., Paganelli D., Gabellini M., 2006. Environmental aspects of relict sand dredging for beach nourishment: proposal of monitoring protocol. Quaderno ICRAM n.5, pp.155.
- Nota D.J.G., 1958. Sediments of the western Guyana shelf. Report of Orinoco shelf expedition, 2.
- Olsen E., Fay G., Gaichas S., Gamble R., Lucey S., Link J.S., 2016. "Ecosystem Model Skill Assessment. Yes We Can!". *PLoS ONE* 11(1): e0146467, pp. 1-24.
- Oreskes N., Shrader-Frechette K., Belitz K., 1994. Verification, Validation and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, vol 263. pp.641-646.
- Paganelli D., La Valle P., Ercole S., Lisi I., Teofili C., Nicoletti L., 2014. Guidelines for environmental studies related to the construction of coastal defence works. ISPRA, Handbooks and Guidelines 105-bis/2014, pp. 69.
- Palermo M.R., Averett D.E., 2003. Environmental dredging – a state of the art review. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, Management Strategy Performance, Quebec City, Canada, pp. 12-17.
- Palermo M.R., Schroeder P.R., Estes T.J., Francingues N.R., 2008. Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments. ERDC/EL TR-08-29. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, USA, pp. 302.
- Pasquali D., Di Risio M., De Girolamo P., 2015. A simplified real time method to forecast semienclosed basins storm surge. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 165, 61–69.
- Pedlosky J., 1996. *Ocean Circulation Theory*, Springer, Berlin, pp. 456.
- Pedlosky J., 2003. *Waves in the Ocean and Atmosphere*, Springer, Berlin, pp. 264.
- Pellegrini D., Mugnai C., Simona Macchia¹, Lisi I., Feola A., Bruschi A., Mumelter E., 2019a. "La normativa italiana in vigore sulla movimentazione dei sedimenti marini e

- spunti applicativi”, proceeding del “Workshop Se.D.Ri.Port sulla valutazione degli effetti fisici dovuti alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere: strumenti e metodologie di approccio. Livorno, Aprile 2019
- Pellegrini D., Bertolotto R., Lisi I., Feola A., Salmeri A., Venti F., Macchia S., Piccione M.E., Bruschi A., Magri S., De Gaetano P., Quagliati M., Di Risio M., Pasquali D., Pedroncini A., Ferla M., 2019b. Sinergia tra modellazione matematica e monitoraggio ambientale a supporto della gestione ambientale delle operazioni di movimentazione di sedimenti in ambito portuale e costiero: standardizzazione di metodi a partire da casi applicativi. Rapporto SNPA edizione 2018, Report di Sistema SNPA/07 2019, pag. 75. ISBN 978-88-448-043-0.
- Pennekamp J.G.S., Eskamp R.J.C., Rosenbrand W.F., Mullie A., Wessel G.L., Arts T., Decibel I.K., 1996. Turbidity caused by dredging; viewed in perspective. *Terra et Aqua*, 64, 10-17.
- PIANC, Permanent International Association of Navigation Congresses, 2006. Environmental risk assessment of dredging and disposal operations. Report of Working Group 10 of the Environmental Commission. pp.40
- Shao D., Purnama A., Sun T., 2015. Modeling the temporal evolution of dredging-induced turbidity in the far field. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* 117, 610–623.
- Shao D., Gao W., Purnama A., Guo J., 2016. Modeling dredging-induced turbidity plumes in the far field under oscillatory tidal currents. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* Vol. 143, Issue 3 May 2017.
- Shepard F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios: *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 151-158.
- SKM, Sinclair Knight Merz Pty Ltd, 2013. Improved dredge material management for the Great Barrier Reef Region, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville.
- Sofonia J.J., Unsworth R.K., 2010. Development of water quality thresholds during dredging for the protection of benthic primary producer habitats. *Journal of Environmental Monitoring* 12(1), 159-163.
- Stow C.A., Jolliff J., McGillicuddy D.J. Jr., Doney S.C., Allen J.I., Friedrichs M.A.M., Rose K.A., Wallhead P., 2009. Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems. *J. of Marine Systems*, 76, 4-15.
- Sunstein C.R., 2003. Beyond the precautionary principle. *U. Penn. Law Rev.* 151, 1003-1058.
- Taylor K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, pp. 7183-7192.
- USACE, US Army Corps of Engineers, 2002. Field Evaluation of Hopper Dredge Overflow for the Delaware River. Technical Note Erdc/EI-Tr 02/17. 178 pp.
- USACE, US Army Corps of Engineers, 2003. A review of environmentally improved techniques for dredging contaminated mud. TECHNICAL NOTE TN 3/2003. Fill Management Division GEO, pp. 29.
- Van Koningsveld M., De Boer G.J., Baart F., Damsma T., Den Heijer C., Van Geer P., De Sonnevile B., 2010. OpenEarth - inter-company management of: data, models, tools & knowledge. In: Proceedings of WODCON XIX, Beijing, China, p. 14.
- Van Koningsveld M., Damsma T., Van der Hout R., Van Wiechen J., De Boer G.J., 2013. Openearth: a knowledge management workflow for dredging projects. *Terra Aqua*, 131 (1), 3-14.
- Van Rhee C., 2002. On the Sedimentation Process in a Trailing Suction Hopper Dredger. Delft University of Technology. Ph.D. Thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:c16d25e7-7b02-43ff-8ec8-e6069f8a1ce2/>
- VBKO, 2003. Protocol for the Field Measurements of Sediment Release from Dredgers, 1, pp. 1e83.
- Wilber DH., Clarke DG., 2001. Biological Effects of Suspended Sediments: A Review of Suspended Sediment Impacts on Fish and Shellfish with Relation to Dredging Activities in Estuaries. *North American Journal of Fisheries Management* 21(4). 855-875.

APPENDICE 1: ESEMPIO DI SCHEDE INFORMATIVE DI PROGETTO

tratte dalle LL.GG. ISPRA (Lisi et al., 2017)

ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO ANTE OPERAM (SIP-AO)

-- Informazioni e indagini ambientali utili per l'implementazione degli studi modellistici preliminari alle operazioni di movimentazione --

COMPARTI AMBIENTALI SEDIMENTO DA MOVIMENTARE		CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI							Note
		Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento				
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità del battente	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio	
		Tipologia e resistenza al taglio							
		Densità /contenuto d'acqua							
		Distribuzione granulometrica							
		Diametro medio							
		% di fine							
		Velocità critica risospensione (misurata o stimata) in relazione alle correnti locali							
		Contaminanti							
		Rilievo batimetrico							
		Tassi di deposizione							
		Altro:							

PARTI AMBIENTALI NNA D'AC	CONDIZIONI METEOMARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA
---------------------------------	---

Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento					Note
			Strumentazione utilizzata	N. stazioni di campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità del battente	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio	Frequenza e durata dei campionamenti	
Dati meteomarini e idrodinamici	Vento (direzione e intensità)							
	Onde (altezza, direzione, periodo)							
	Livello marino							
	Pressione atmosferica							
	Correnti (direzione e intensità)							
Altro								
Parametri chimico-fisici	Profondità							
	Temperatura							
	Salinità							
	Densità							
	Ossigeno disciolto							
	Clorofilla							
	PH							
	Torbidità							
Altro								
Sedimenti in sospensione	SSC (valori background)							
	Diametro medio							
	Altro							
Contaminanti:								
Altro:								

ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO IN CORSO D'OPERA (SIP-IC) (*)

-- Informazioni e dati ambientali e operativi utili per la verifica degli studi modellistici del progetto in esame durante l'esecuzione delle attività e per l'implementazione di studi modellistici per progetti futuri --

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE E SEDIMENTOLOGICHE NEI FONDALI DELLE AREE INTERESSATE E PROSSIME A QUELLE INTERESSATE DALL'INTERVENTO									
COMPARTI AMBIENTALI	SEDIMENTO	Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Note
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio	
		Tipologia e resistenza al taglio							
		Densità							
		Distribuzione granulometrica							
		Diametro medio							
		% di fine							
		Velocità critica risospensione (misurata o stimata)							
		Contenuto d'acqua							
		Contaminanti:							
		Altro							
NA	D'ACQUA	CONDIZIONI METEOMARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA (*)							

Parametri misurati	Valore o riferimento allegato con le serie dei dati	Unità di misura	Metodiche di campionamento					Note
			Strumentazione utilizzata	N. stazioni di campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza dal mezzo di lavoro e da ulteriori sorgenti di risospensione/rilascio	Frequenza e durata dei campionamenti	
Dati meteomarini e idrodinamici	Vento (direzione e intensità)							
	Onde (altezza, direzione, periodo)							
	Livello marino							
	Pressione atmosferica							
	Correnti (direzione e intensità)							
	Altro							
Parametri chimico-fisici	Profondità							
	Temperatura							
	Salinità							
	Densità							
	Ossigeno disciolto							
	Clorofilla							
	PH							
	Torbidità							
Contaminanti:	SSC in prossimità dei mezzi di lavoro (Termine Sorgente)							
	SSC in aree non disturbate dai lavori (verifica dei valori background)							
	Diametro medio							
	Altro							

	Altro:				
INFORMAZIONI SULLE MODALITÀ TECNICHE E OPERATIVE (*)					
CONDIZIONI DI UTILIZZO	Parametri operativi	Valore - range di variabilità	Unità di misura	Descrizione	Note
	Tipologia draga/mezzo				
	Modalità di carico/trasporto				
	Profondità di lavoro (max-min)				
	Potenza pompe o capacità della benna				
	Produttività				
	Profondità di taglio dichiarata (in caso di escavo)				
	Spessore di ricoprimento dichiarato (in caso di sversamento)				
	Densità del sedimento movimentato				
	Flusso di rilascio/risospensione in prossimità della condotta/benna				
	Modalità di rilascio (al fondo, sulla colonna, etc.)				
	Altro				
CICLO DI LAVORO	Data di inizio della sessione del ciclo dei lavori				
	Data di fine della sessione del ciclo dei lavori				
	Eventuali anomalie/interruzione dei lavori				
	Velocità di spostamento della draga				
	Posizione della draga				
	Volumi movimentati				
	Superficie di escavo				
	Altro				
MISURE CORRETTIVE E DI MITIGAZIONE					
Z - D -	Caratteristica	Descrizione	Localizzazione, profondità, estensione	Note	

	Tipologia misura			
	Data installazione			
	Data rimozione			
	Altro			
<p>(*) Da compilare auspicabilmente ad ogni cambio della sessione dei lavori (e delle modalità operative) e di rilevanti cambiamenti delle condizioni meteo-marine al fine di massimizzare l'utilità dei dati ambientali acquisiti (per il progetto in esame e per progetti futuri)</p>				

ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO POST OPERAM (SIP-PO) (**)

-- Informazioni e dati ambientali al termine delle operazioni utili per la verifica degli studi modellistici al termine delle operazioni di movimentazione --

COMPARTI AMBIENTALI		CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI NELLE AREE INTERESSATE E PROSSIME AL SITO D'INTERVENTO								
		SEDIMENTO	Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Note
						Strumentazione utilizzata	N. stazioni di campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio	
		Tipologia e resistenza al taglio								
		Densità								
		Distribuzione granulometrica								
		Diametro medio								
		% di fine								
		Velocità critica risospensione (misurata o stimata)								
		Contenuto d'acqua								
		Contaminanti								
		Tasso di deposizione								
		Rilievo batimetrico (verifica spessore escavo/ricoprimento)								
		Altro								
NNA D'AC		CONDIZIONI METEOMARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA								

Parametri misurati	Valore o riferimento allegato con le serie dei dati	Unità di misura	Metodiche di campionamento					Note
			Strumentazione utilizzata	N. stazioni di campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio	Frequenza e durata dei campionamenti	
Dati meteomarini e idrodinamici	Vento (direzione e intensità)							
	Onde (altezza, direzione, periodo)							
	Livello marino							
	Pressione atmosferica							
	Correnti (direzione e intensità)							
	Altro							
Parametri chimico-fisici	Profondità							
	Temperatura							
	Salinità							
	Densità							
	Ossigeno disciolto							
	Clorofilla							
	PH							
	Torbidità							
Lettura dei solidi sospesi	SSC							
	Diametro medio							
	Altro							
Contaminanti:								
Altro:								

(**) Da compilare se previsto monitoraggio degli effetti nel *post operam* in funzione delle finalità ambientali e progettuali delle operazioni e dei risultati degli studi.