Gruppo di Lavoro

“Sedimenti nei serbatoi artificiali possibilità di riutilizzo”

2026

Gruppo di lavoro
"Sedimenti nei serbatoi artificiali Possibilità di riutilizzo"

Gruppo di lavoro

Coordinatore:

Roberto Saccone, ITCOLD

Componenti principali

Rosella Caruana, ITCOLD
Ludovica Ruggeri, Enel Green Power
Valentina Passeri, Cesi
Andrea Terret, Consorzio Bonifica Piacenza
Daniele Faggin, Alperia
Lorenzo Cappietti, Università di Firenze
Chiara Zanelli, CNR-ISSMC

Componenti aggiunti

Bruno Molino, Università del Molise
Paolo Manfredi, MCM Ecosistemi
Enrico Lupi, Confindustria Ceramica
Marco Trevisan, Università Cattolica Piacenza
Marco Zerbinatti, Politecnico Torino
Federico Vecchio, Politecnico Torino
Bartolomeo Mongiardino, Hydro Maintenance Service
Eleonora Longo, Gruppo Marazzato
Alice Zenone, Gruppo Marazzato

Indice

0. **Premessa**
1. **Analisi geografica degli invasi artificiali**
2. **Iter autorizzativo del Progetto di gestione degli invasi artificiali**
3. **Valutazione tecnico-economica della gestione dei sedimenti**
4. **Valutazione del potenziale di riutilizzo dei sedimenti nel settore delle costruzioni**
5. **Impieghi in agricoltura**
6. **Ripascimento costiero**
7. **Ripascimento fluviale**
8. **Riutilizzo dei sedimenti in aree estrattive**
9. **Analisi delle caratteristiche e delle proprietà chimico-fisiche dei sedimenti**
10. **Linea Guida propedeutica all'avviamento di un progetto pilota rivolto alla riutilizzazione dei sedimenti per scopi industriali, ambientali e agricoli**

0. Premessa

Il presente rapporto illustra l'attività svolta dal Gruppo di Lavoro (GdL) ITCOLD "Sedimenti nei serbatoi: possibilità di riutilizzo", sviluppatasi tra 2024 e 2025 con riferimento ai Terms of Reference assegnati da ITCOLD al GdL e di seguito riportati

Terms of references

Fase 1 (Studio preliminare)

- Analisi per regioni geografiche degli invasi artificiali esistenti e delle attività industriali presenti;
- Valutazione delle destinazioni industriali di potenziale riutilizzo dei sedimenti, dei loro effettivi consumi e dei requisiti tecnici richiesti;
- Individuazione di invasi artificiali interessanti per il riutilizzo dei sedimenti da parte delle attività industriali localmente presenti con definizione degli impatti quantitativi;
- Individuazione di possibilità d'uso alternative alle applicazioni industriali (rilascio nei fiumi a valle diga, ripascimento dei litorali, uso agricolo, argini fluviali, ecc.);
- Studio dei dati e delle informazioni contenuti nei Progetti di Gestione (PdG) degli invasi individuati con particolare riferimento a: recupero della capacità idrica, rilievi batimetrici recenti e dati storici, apporto annuo dei sedimenti, caratterizzazione fisico-chimica ed eco-tossicologica dei sedimenti, geomorfologia del bacino idrografico dell'invaso e del territorio di pertinenza. L'obiettivo è di poter verificare la vocazione a specifici riutilizzi dei sedimenti recuperabili.

Fase 2 (Verifica)

- Presentazione dello studio preliminare al gestore dell'invaso scelto e ai potenziali utilizzatori finali del sedimento. La condivisione dello studio preliminare indirizzerà il Gruppo di Lavoro, allargato con altre specifiche competenze, a preparare la guida necessaria per avviare un Progetto Pilota completo sotto gli aspetti tecnici ed economici;
- Redazione di un eventuale progetto pilota, di concerto con il gestore e l'utilizzatore interessati;

Fase 3 (Conclusioni)

- Redazione di un report che contenga e descriva gli elementi raccolti nelle fasi precedenti;
- Descrizione dell'eventuale progetto pilota
- Iniziative di divulgazione dei risultati, della riflessione e del progetto alla comunità tecnica di settore, alle amministrazioni pubbliche, etc. (seminari o altra forma, articoli, etc.).

NOTA

Le informazioni, analisi e conclusioni contenute nel presente bollettino sono rivolte a tecnici in grado di comprenderne significato, portata e limiti. Malgrado l'attenzione impiegata nella redazione di questo testo, non è ovviamente possibile garantirne la completezza e l'esaustività. Si declina pertanto qualsiasi responsabilità derivante dall'interpretazione o dalla possibile applicazione del contenuto del presente documento. I contenuti sono stati liberamente forniti dai componenti del GdL.

1. Analisi geografica degli invasi artificiali esistenti

E 'stata condotta un'analisi per regioni relativamente all'attuale situazione di interrimento dei bacini artificiali. Qui di seguito è rappresentata schematicamente la localizzazione geografica delle grandi dighe in Italia.

Figura 1: Distribuzione degli invasi artificiali in Italia

In Italia il volume invasabile complessivo delle 522 grandi dighe di competenza statale è di 11,800 miliardi di metri cubi *(Rif. Ministero delle Infrastrutture dicembre 2025).*

Il numero di grandi dighe in Italia per regione è espresso dal grafico qui sotto riportato.

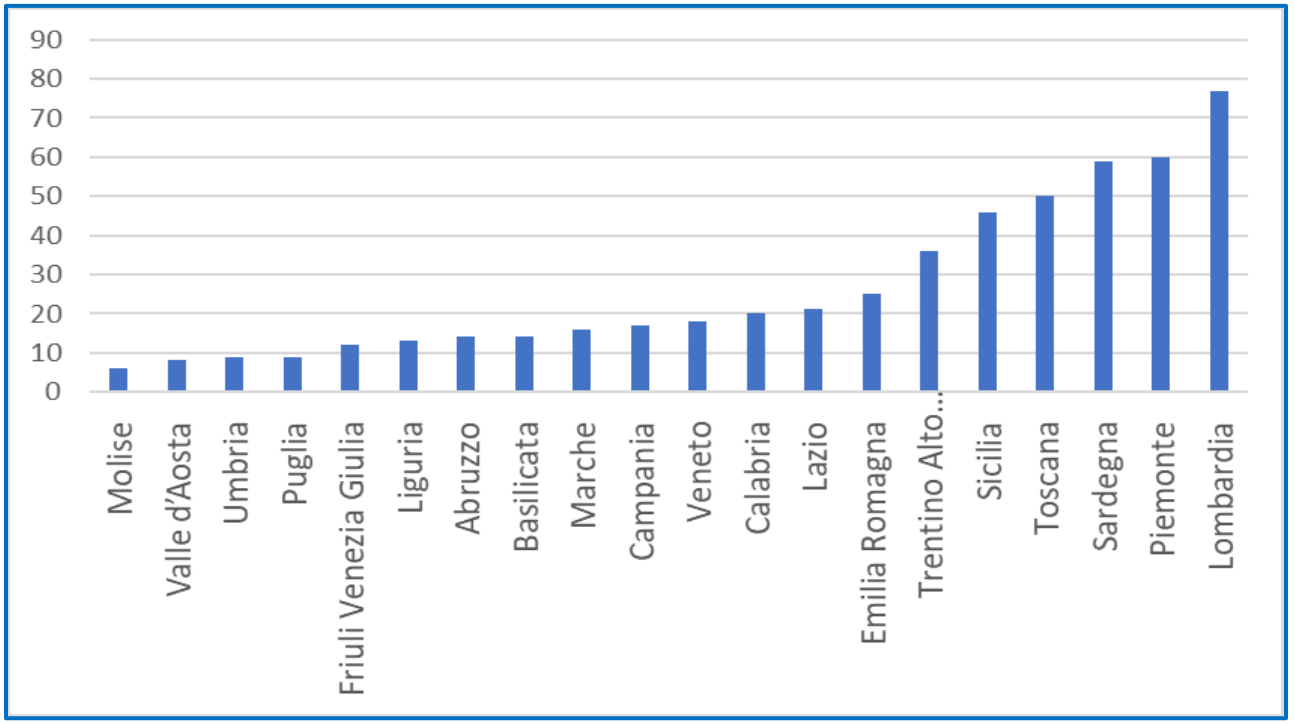


Figura 2: Numero delle grandi dighe per Regione

1.1 Quadro riassuntivo di interrimento dei serbatoi esaminati

Per questo studio abbiamo raccolto le informazioni relative a 300 serbatoi pari a circa il 57% del parco totale corrispondenti ad un volume complessivo di invaso stimato pari a 6,726 miliardi di m3.

Stima sedimenti nel volume utile

Sono stati considerati privi di interrimento i serbatoi per i quali è stata stimata una variazione del volume utile di invaso inferiore al 5% del volume originario e ciò per i motivi di incertezza della stima di questo valore. Risulta innanzitutto che al netto dei dati incerti e quindi su un totale di 282 serbatoi più della metà (53%) dei serbatoi analizzati (149 su 282) sono privi di un apprezzabile interrimento.

Figura 3: Stato dell'Interrimento

In particolare, nella regione delle Alpi su 126 serbatoi il 54% non hanno interrimento significativo e nella regione degli Appennini su 156 serbatoi il 52% non hanno interrimento significativo
Nelle due regioni mediamente si rileva una situazione equilibrata.

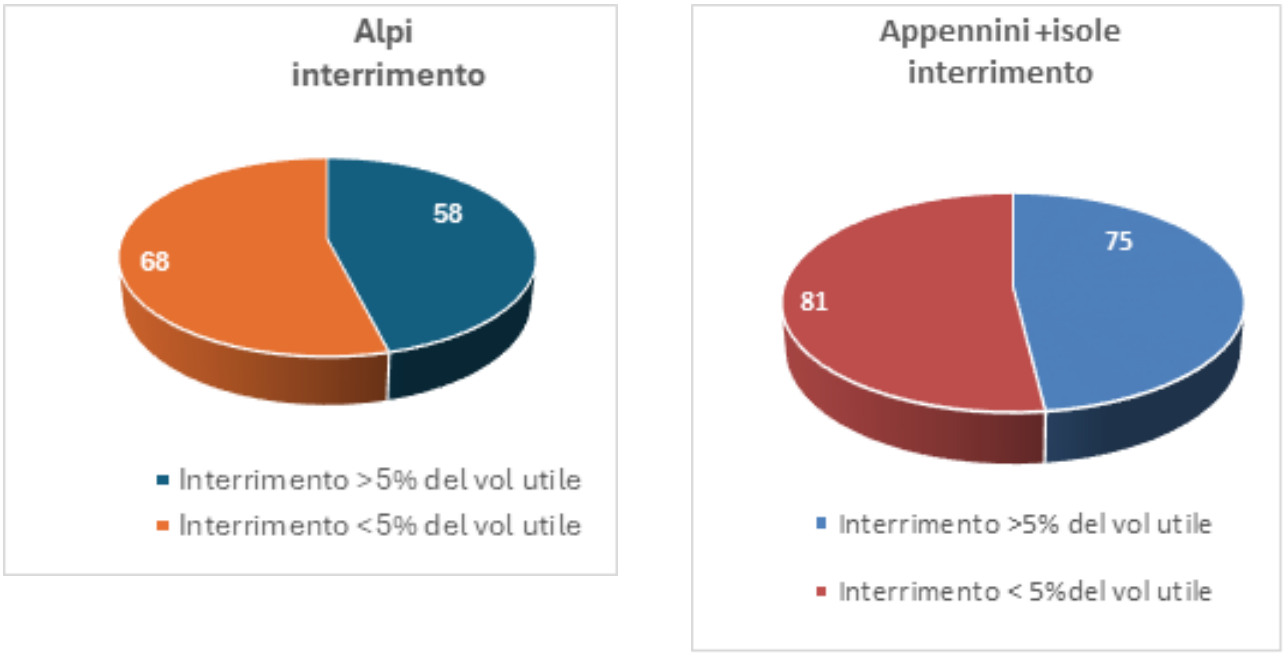


Figura 4: Interrimento Alpi, Appennini

Sono stati raccolti i dati in merito alla redazione /approvazione dei progetti di gestione degli invasi ed il risultato della analisi è riportato qui di seguito facendo riferimento a maggio 2023. In sintesi, totale redatti circa 94% approvati 54%.

Totale redatti 266 circa 94%
Alpi redatti 131 - Appennini 135
Alpi approvati 75 % Appennini approvati 34%

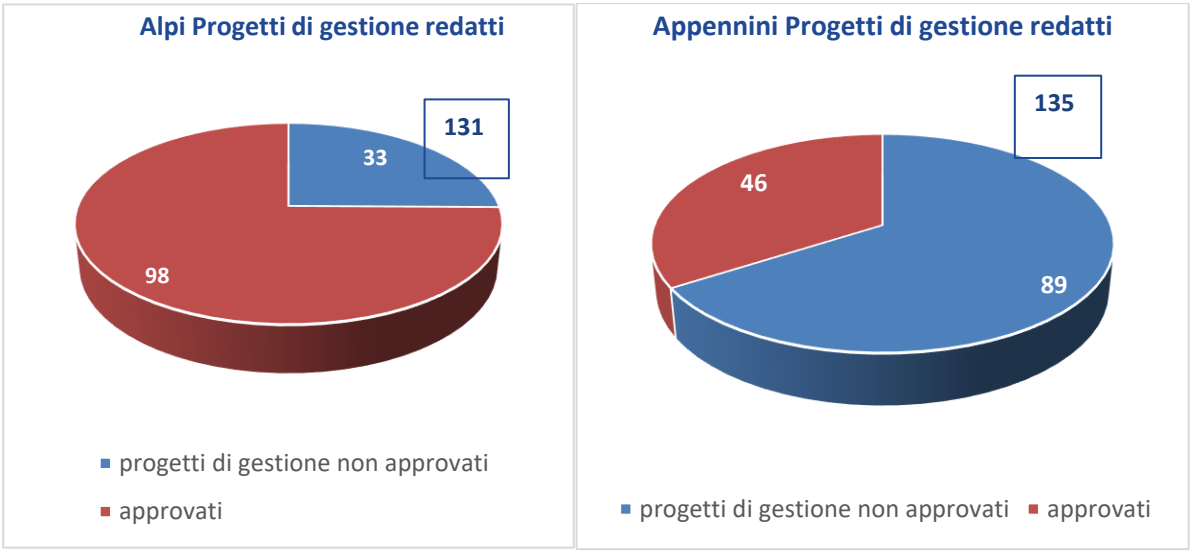


Figura 5: Progetti di gestione redatti

2. Iter autorizzativo del Progetto di gestione degli invasi artificiali

Il progressivo e naturale accumulo dei sedimenti trasportati dai corsi d'acqua nei bacini artificiali rappresenta una criticità ambientale e operativa per la diminuzione del volume utile di invaso, per il mantenimento della funzionalità e dell'efficienza degli organi di scarico della diga, per assicurare gli usi plurimi della risorsa idrica.

L'art. 114 del D.Lgs. 152/06 prevede che il Gestore esegua operazioni di gestione del materiale sedimentato nell'invaso (svaso, sfangamento/sghiaiamento e spurgo), necessarie per assicurare il mantenimento della capacità di invaso e la salvaguardia sia della qualità dell'acqua invasata sia del corpo ricettore, sulla base di un Progetto di Gestione redatto per ciascun invaso.
Il Progetto di Gestione, e gli eventuali Piani Operativi di dettaglio ad integrazione del progetto stesso, sono predisposti dal Gestore secondo i criteri di cui al D.M. 205/2022 e approvati entro 6 mesi dalla Regione, anche attraverso il ricorso ad apposita Conferenza dei Servizi, previo parere preventivo dell'amministrazione competente a vigilare sulla sicurezza dell'invaso e dello sbarramento e sentiti, ove necessario, gli enti gestori delle aree protette direttamente interessate. Con l'approvazione del Progetto e, se presentati, dei Piani Operativi, il gestore è autorizzato ad eseguire le operazioni di svaso, sfangamento e sghiaiamento.

Una volta approvato, il documento e' trasmesso al Registro italiano dighe per l'inserimento come parte integrante del FCEM.

Le attività di gestione dei sedimenti oggetto del progetto di gestione non rientrano nella tipologia di progetti elencati negli Allegati alla parte II del D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii. (procedure di Valutazione di Impatto Ambientale).

Sebbene la normativa preveda un periodo di 6 mesi per l'approvazione del Progetto di gestione e, quindi, per l'autorizzazione all'esecuzione delle operazioni in esso descritte, l'iter autorizzativo si protrae spesso più a lungo, anche per alcuni anni, a causa delle complessità normative e del coinvolgimento di diversi Enti e Autorità che devono esprimere il proprio parere. Tali ritardi possono interferire in modo significativo con la gestione dell'invaso, determinando un aggravio delle problematiche di interrimento e aumenti dei costi di progetto per mutate condizioni o perdita di eventuali finanziamenti.

2.1 Art. 184-bis - Sedimenti da invasi artificiali e da corpi idrici superficiali

Questo articolo, introdotto dal Decreto Legislativo n. 121 del 2020, ha risolto una lunga incertezza normativa, stabilendo che i sedimenti rimossi durante le operazioni di **svuotamento e manutenzione** di bacini artificiali (dighe, laghi artificiali, invasi) non sono automaticamente da considerarsi rifiuti.
Il comma 1 dell'art. 184-bis stabilisce che:

"I sedimenti provenienti dalle operazioni di svuotamento e manutenzione degli invasi artificiali, nonché dai corpi idrici superficiali, **non si qualificano come rifiuto** ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), purché siano destinati al recupero in coerenza con la gerarchia dei rifiuti e nel rispetto delle condizioni di cui al presente articolo."

In pratica, i sedimenti non sono più visti come un "rifiuto di cui il detentore si disfi o abbia l'obbligo di disfarsi", ma come una **risorsa da recuperare**.

Affinché i sedimenti non siano classificati come rifiuto, devono essere rispettate una serie di condizioni stringenti:

1. **Assenza di Inquinamento**: I sedimenti non devono essere contaminati. Devono essere esclusi da qualsiasi attività che li abbia potuti inquinare (es. scarichi industriali, sversamenti accidentali).

2. **Caratterizzazione**: È obbligatorio effettuare una **caratterizzazione** (analisi chimico-fisiche) dei sedimenti secondo specifici parametri e limiti stabiliti dalla legge (Allegato 2 alla parte quarta del D.Lgs. 152/2006,

integrato dal DM 173/2016 per il riutilizzo in bonifica). Questo per dimostrare che non superano le concentrazioni soglia di contaminazione (CSC).

3. **Piano di Utilizzo**: Deve essere predisposto un **Piano di Utilizzo dei Sedimenti (PUS)**che descriva in dettaglio:

- La provenienza e la quantità dei sedimenti.
- I risultati della caratterizzazione.
- La destinazione d'uso finale (es. ripristino cave, opere di ingegneria civile, riqualificazione di aree degradate).
- Le modalità di trasporto, movimentazione e messa in opera.

4. **Tracciabilità**: Tutte le fasi (prelievo, trasporto, recupero) devono essere tracciate attraverso un sistema di registri e formulari.

5. **Comunicazione all'Autorità**: Il gestore dell'invaso deve comunicare l'inizio delle attività di escavo e recupero all'autorità competente (in genere l'**ARPA** - Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente e/o l'**Autorità di Bacino**), allegando il Piano di Utilizzo e i risultati delle analisi.

Vantaggi dell'Art. 184-bis

- **Semplificazione Amministrativa**: Evita la lunga e costosa procedura di classificazione e smaltimento come rifiuto.
- **Economia Circolare**: Promuove il **recupero** di grandi quantità di materiale (sabbia, ghiaia, limo) che può essere riutilizzato in sostituzione di risorse naturali vergini.
- **Sostenibilità Ambientale**: Facilita la manutenzione degli invasi, contrastando l'interrimento e garantendo la sicurezza idraulica e la capacità di accumulo idrico.
- **Riduzione dei Costi**: Abbatte significativamente i costi di gestione per i consorzi di bonifica e i gestori delle dighe.

Se le analisi di caratterizzazione rivelano che i sedimenti superano i limiti di contaminazione (CSC), **perdono la deroga dell'art. 184-bis** e devono essere gestiti come **rifiuti speciali**. In questo caso, si applica tutta la normativa sui rifiuti:

- Classificazione con codice CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti).
- Trasporto con formulario di identificazione rifiuti (FIR).
- Smaltimento o recupero in impianti autorizzati (es. discariche per rifiuti non pericolosi o pericolosi).

L'art. 184-bis rappresenta un importante passo avanti nella legislazione ambientale italiana, allineandosi ai principi dell'economia circolare. Trasforma un potenziale "problema" (lo smaltimento dei sedimenti) in un'**opportunità di recupero di materia**, a patto che vengano seguite scrupolosamente le procedure tecniche e amministrative per garantire la protezione dell'ambiente e della salute umana.

3. Valutazione tecnico-economica della gestione dei sedimenti

Per quanto riguarda una preliminare e speditiva valutazione tecnico- economica su quale soluzione di intervento adottare per la rimozione dei sedimenti, la scelta deve sicuramente essere ponderata e basata su un'analisi di dettaglio in funzione della tipologia di gestione del serbatoio e sulla base del regime idrologico e idraulico di monte, nonché delle caratteristiche, degli elementi sensibili e delle potenzialità del territorio in cui è localizzato il bacino. Tale analisi non può prescindere, inoltre, dalla valutazione della qualità chimico-fisica ed ecotossicologica dei sedimenti e dalla tipologia di materiale da estrarre (granulometrie fini o grossolane), ma anche dall'ubicazione delle aree di scavo (coda o centro bacino o presso lo sbarramento) e dalla logistica dei siti.

Di seguito si forniscono indirizzi di carattere generale per aiutare il gestore nella definizione del piano di intervento da adottare, sulla base di pregresse esperienze sul tema (diga di Mignano).

3.1 Metodologie per attività di recupero del volume utile

La presenza di uno sbarramento artificiale altera la naturale condizione di equilibrio dei corsi d'acqua, creando un'area caratterizzata da velocità idriche basse e, di conseguenza, da un'elevata capacità di sedimentazione del materiale solido trasportato dalla corrente.
A causa dell'interrimento determinato dalla sedimentazione del materiale solido trasportato dalle acque che affluiscono al serbatoio, alcuni laghi artificiali possono perdere, col passare del tempo, parte della propria capacità utile (Fig.6).

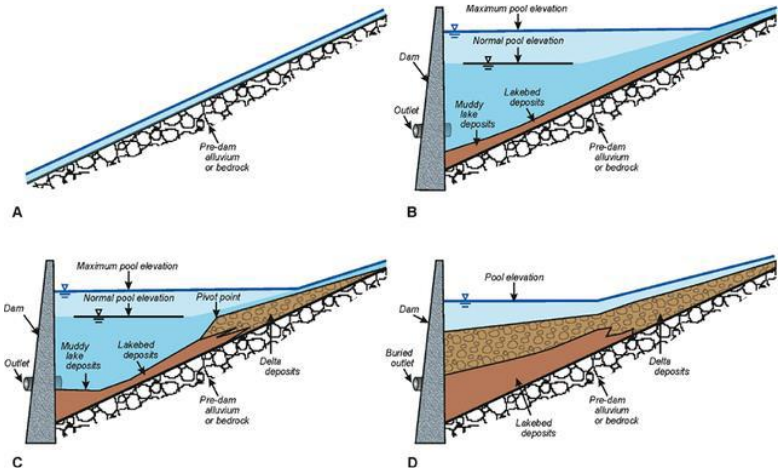


Figura 6

La quantità di sedimenti che si deposita annualmente sul fondo dell'invaso non è costante ma dipende dall'uso del suolo, dal regime idrico del corso d'acqua intercettato, dal regime pluviometrico dell'areale e dalle caratteristiche idrogeologiche del bacino. La tipologia del materiale trasportato dalla corrente dipende poi dal processo erosivo dei terreni afferenti alla rete di drenaggio che confluisce al lago artificiale.
Per quanto riguarda le metodologie per la rimozione dei sedimenti depositati ed accumulati nei serbatoi artificiali finalizzate ad ottenere un corrispondente recupero della capacità di invaso persa per interrimento, le due soluzioni più facilmente percorribili sono rappresentate dall'estrazione meccanica dei sedimenti e da operazioni di fluitazione controllata mediante dragaggio con rilascio di sedimenti a valle.

3.2 Attività di estrazione meccanica dei sedimenti

L'applicazione di questa metodologia può essere distinta in tre fasi: lo scavo dei materiali, il loro trasporto ed infine il loro allocamento/riutilizzo in un luogo appropriato o, in taluni casi, il loro riutilizzo all'interno di un ciclo produttivo o all'interno del bacino stesso, come materiale di ripristino di zone poste al di sopra della quota di massima regolazione o massimo invaso (Fig.7).

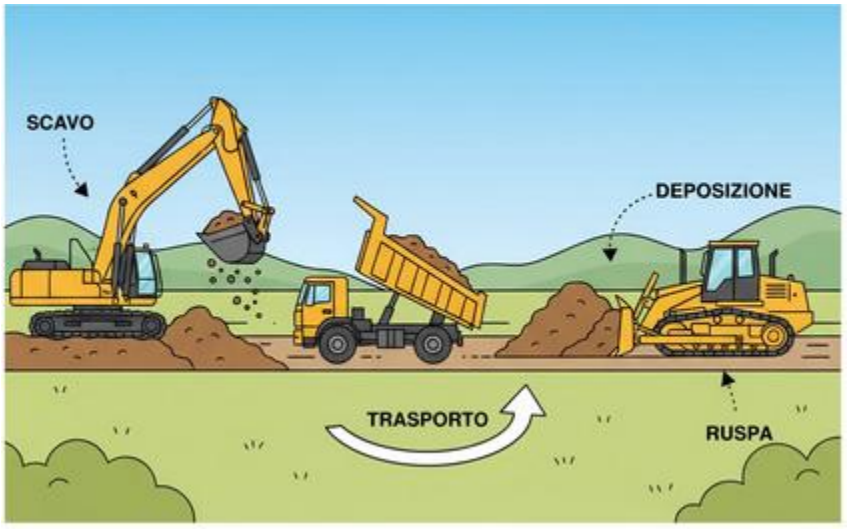


Figura 7

La scelta delle aree di escavazione deve essere dettata da diversi criteri, allo scopo di garantire il minor impatto possibile sulle condizioni di stabilità e di equilibrio idrogeologico delle sponde di invaso e del fondo d'alveo, nonché idonei accessi ai mezzi meccanici (escavatori e camion). L'identificazione delle aree di escavazione deve inoltre tenere conto, al fine di poter definire un cronoprogramma realistico delle attività, della necessità che tali aree debbano essere messe in asciutto con congruo anticipo rispetto all'inizio dei lavori al fine di poter accedere agevolmente con i mezzi meccanici.
E' necessario inoltre considerare che in alcuni bacini tali attività di scavo non sono programmabili nelle aree di invaso più prossime alla diga, caratterizzate dalla presenza di accumuli di materiali fini non idonei alla presenza di mezzi in alveo.
Scavando all'interno dell'invaso e solitamente su strati depositati a seguito della realizzazione della diga, spesso è escluso il rischio di intercettare depositi di interesse archeologico. Di contro si ritiene sempre opportuno considerare una preventiva fase di bonifica da ordigni bellici, condivisa con il competente 5° Reparto Infrastrutture del Ministero della Difesa.
Per poter operare un piano scavi si rende comunque sempre necessario in prima istanza procedere a una caratterizzazione chimico-fisica del materiale al fine di valutarne la compatibilità con lo scopo prefissato, secondo le norme vigenti di riferimento (Fig.8).

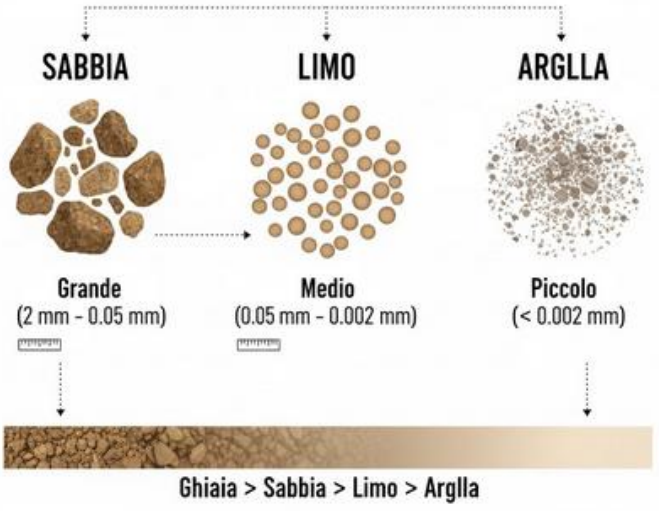


Figura 8

L'efficienza delle operazioni di escavazione di materiale sedimentato sul fondo dell'invaso con successivo allontanamento dello stesso e i quantitativi di volume utile recuperato giornalmente dipendono principalmente dal numero di mezzi impiegati ma devono comunque tenere sempre conto della distanza del sito di allocamento o delle destinazioni finali rispetto alle aree di escavazione nonché del tessuto infrastrutturale viario esistente

che, se sovraccaricato, potrebbe rappresentare un elemento vincolante alla produttività giornaliera delle attività di estrazione.
Per garantire la possibilità di operare in sicurezza, è necessario gestire le quote idriche operando svasi parziali o totali del serbatoio al fine di mettere in asciutta i siti di escavazione. Tale aspetto potrebbe non essere vincolante in invasi regolati con cicli di riempimento annuali o pluriennali, tipicamente invasi irrigui o idropotabili, mentre potrebbe rappresentare un elemento di criticità in quei bacini non solitamente sottoposti a variazioni significative del livello di invaso (bacini idroelettrici). È comunque necessario porre particolare attenzione all'impatto ambientale che potrebbe generarsi sulle componenti biologiche e chimico fisiche delle acque di invaso, soprattutto considerando che il periodo idrologicamente più favorevole per eseguire tali attività è quello estivo, quando le portate da monte sono minime (e le temperature potenzialmente elevate possono determinare condizioni critiche per la sopravvivenza delle comunità biologiche).

3.3 Estrazione meccanica con tecniche di dewatering dei sedimenti

Una soluzione alternativa consiste nell'estrazione meccanica dei sedimenti mediante dragaggio e successivo dewatering dei sedimenti, generalmente mediante l'utilizzo di geotubi o il refluimento della miscela in casse di colmata e sedimentazione.
In questo caso si opera mediante l'utilizzo di un sistema dragante che solleva una miscela caratterizzata da un rapporto solido-acqua che si attesta a valori di 1:10-1:20 in funzione della tipologia e della granulometria del sedimento estratto, che viene poi convogliata mediante tubazioni a un sistema che si occupa di separare la parte solida dalla fase liquida della miscela (Fig.9).

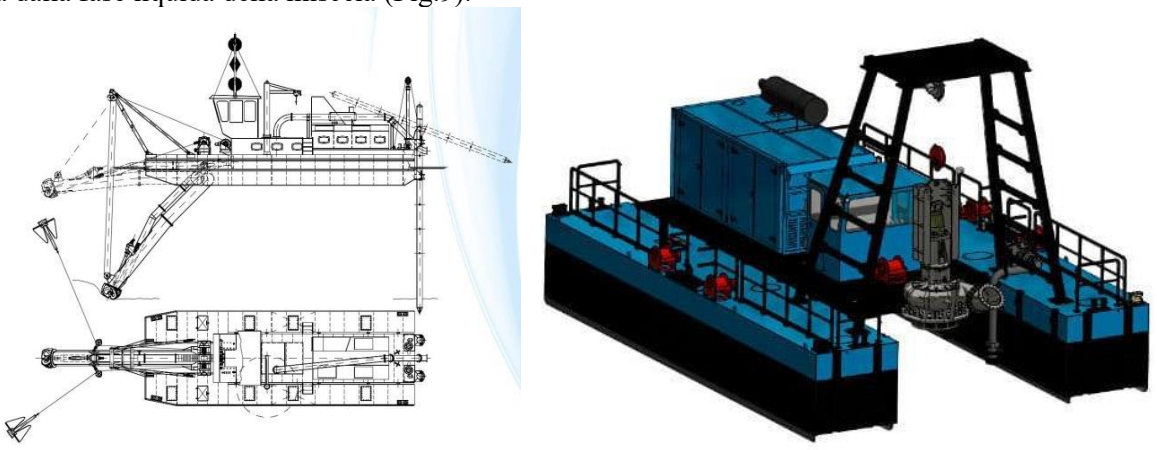


Figura 9

Nel caso di utilizzo di geotubi, per favorire il processo di sedimentazione della frazione solida, si rende spesso necessario e indispensabile additivare la miscela con flocculanti chimici studiati in funzione della tipologia di sedimento presente. L'utilizzo di sostanze di tipo chimico potrebbe però rappresentare un elemento di criticità all'aspetto ambientale e alla qualità delle acque di invaso, con particolare riferimento ai bacini utilizzati anche a scopo idropotabile.
Qualora le strutture ricettive (geotubi o casse di colmata) siano poste a monte dello sbarramento, a quote ovviamente superiori alla massima regolazione del bacino, non si ha consumo di risorsa in quanto l'acqua separata dalla miscela estratta dal sistema dragante può fluire all'interno del bacino di invaso. Se invece tali strutture sono poste in zone a valle diga, ovviamente le operazioni comportano un consumo di acque, che potrebbe anche essere non indifferente in relazione ai rapporti solido-acqua che si riescono ottenere sulla miscela (Fig.10).

Figura10

Sia che il gestore opti per una soluzione con casse di colmata o con geotubi, è necessario che le aree nelle immediate vicinanze al sito di estrazione siano morfologicamente idonee e presentino ampi spazi pianeggianti in grado di ospitare le suddette strutture.
I tempi di sedimentazione del materiale, soprattutto nel caso di un elevato contenuto di frazione fine, spesso rappresentano un elemento di criticità che viene evidenziato in particolar modo nelle casse di colmata. È possibile, infatti, che si debba far lavorare il sistema dragante al minimo delle prestazioni per evitare di sovraccaricare le vasche di sedimentazione, andando a perturbare e vanificando il processo di sedimentazione naturale in atto.
La possibilità di operare con un sistema dragante consente di eseguire le attività a lago pieno e in zone altrimenti inaccessibili con mezzi meccanici, come ad esempio nelle aree antistanti e a ridosso degli imbocchi degli scarichi di fondo.
Anche la scelta della tipologia di sistema dragante incide direttamente sulla funzionalità del sistema, in quanto draghe a braccio fisso consentono di operare con elevate precisioni ma solo con livelli di invaso compatibili con le dimensioni geometriche della macchina, mentre le draghe del tipo a funi possono operare in tutte le condizioni di invaso svincolando quindi le operazioni di dragaggio da una gestione dedicata delle quote idriche.

3.4 Ecodragaggio

Per ovviare alla necessità di ampie aree disponibili a ridosso del bacino per la fase di asciugatura dei sedimenti più fini e per aumentare la produttività del sistema, è possibile prevedere la fase di disidratazione e/o selezione granulometrica dei sedimenti direttamente su unità galleggianti, con trasbordo a terra di materiale palabile, pronto al carico e trasporto su autocarri.
Nel panorama italiano, è stata ad esempio sviluppata la tecnologia Limpidh2o® per ambienti marini ma anche per le acque interne (fiumi, laghi). Tale tecnologia prevede l'asportazione dei sedimenti a bacino pieno e implementa una peculiare modalità operativa a circuito chiuso, che consente di preservare completamente la risorsa idrica in termini di quantità e qualità. Attraverso una specifica attrezzatura, tale modalità operativa opera in un campo di depressione controllato, così da consentire l'estrazione dei sedimenti senza determinare aumenti di torbidità e senza dispersione di eventuali inquinanti nell'intorno delle aree di lavoro. Durante il processo di estrazione, il sedimento può essere selezionato granulometricamente e disidratato, a bordo di unità galleggianti multifunzionali, risultando già idoneo al trasporto a terra e, successivamente, al carico su autocarri verso il sito di destinazione finale.

3.5 Estrazione meccanica con attrezzatura residente e bacino operativo

Si tratta di utilizzare una draga di piccolissime dimensioni che utilizza una benna da circa 3 metri cubi di volume utile per rimuovere il sedimento, di qualsiasi granulometria, dal bacino a qualsiasi profondità.
La figura 11 qui sotto riportata descrive la draga residente nella versione senza pilota e con pilota.

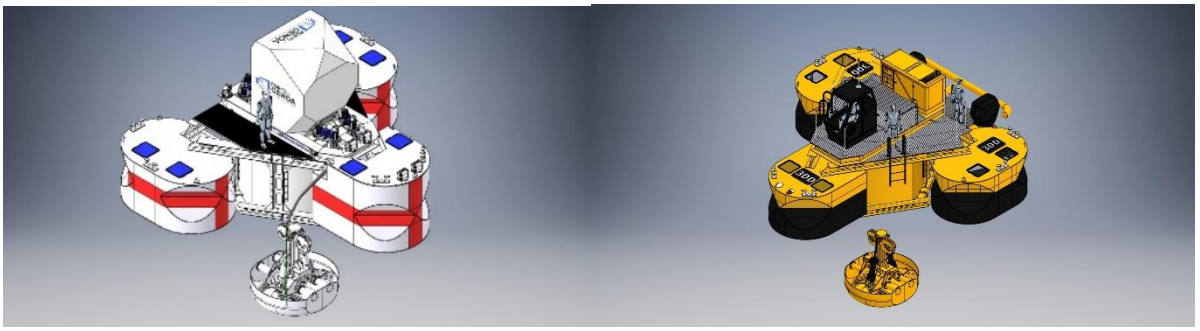


Figura 11

Questo nuovo paradigma di gestione dei sedimenti assegna al gestore l'operatività del macchinario che, per essere efficace, deve essere operativo 365/365 gg, 24/24 ore.
In questa maniera, la draga opera come un drone muove la benna nello spazio xyz del volume acqueo, trasportando il sedimento dal fondale a "bordo bacino" laddove si desidera stabilire la stazione di estrazione. La figura 12 rappresenta una possibile stazione di estrazione dove un tandem di robot estrae il sedimento rendendolo disponibile a terra.

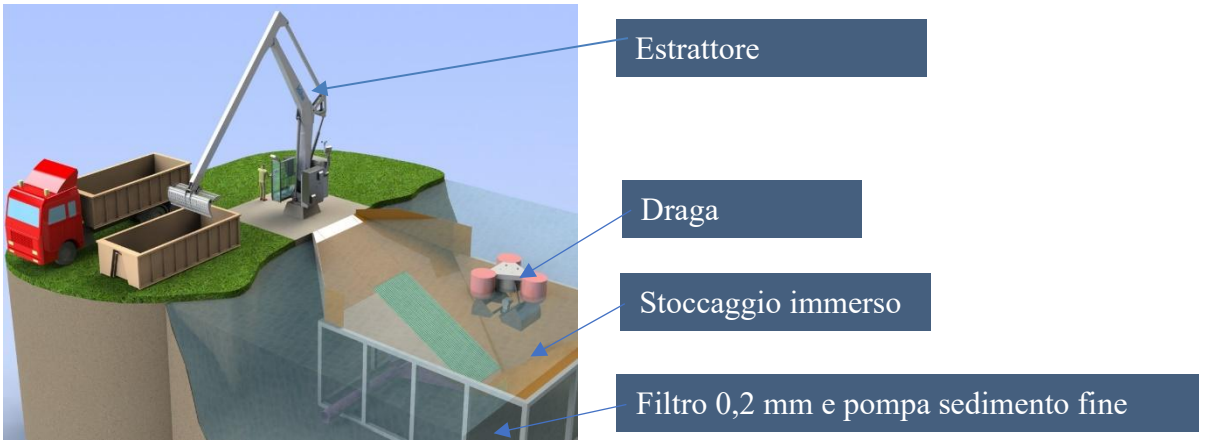


Figura 12

Ovviamente il sedimento estratto può contenere parti fini e grossolane.
Nel caso si desideri estrarre sedimenti fini per riutilizzo occorre semplicemente trasferire il sedimento a terra mediante, ad esempio, un estrattore robotizzato. In questo caso, assume particolare rilevanza il grado di umidità che è necessario far raggiungere al sedimento, che è dettato dalla destinazione finale e dalla tipologia di utilizzo dello stesso, e che quindi potrebbe introdurre un costo di asciugatura incrementando l'incidenza unitaria (euro/mc) dell'operazione.
Nel caso si desideri estrarre la parte grossolana (> 0,2 mm) per un eventuale riutilizzo, occorre avvalersi di un filtro e di una pompa per convogliare la parte fine in derivazione dove si miscelerà alla portata in condotta in pressione realizzando una fluitazione controllata . La parte grossolana viene estratta sempre con un estrattore robotizzato.
In sostanza questo nuovo approccio, che introduce una attrezzatura residente appositamente dedicata alla estrazione dei sedimenti nei bacini, consente di operare economie importanti che aprono scenari di gestione dei sedimenti intelligenti e poco impattanti.

3.6 Fluitazione controllata con rilascio di sedimenti a valle

Il sedimento estratto mediante dragaggio, invece di essere allontanato dal bacino su ruota, può essere convogliato tramite tubazioni galleggianti verso il corso d'acqua di valle in condizioni (concentrazioni, durata) controllate.

L'idrosuzione consiste nell'aspirare mediante draghe galleggianti una miscela di acqua e sedimento dal fondo dell'invaso pompando la miscela stessa in tubazioni di solito galleggianti fino ad un recapito finale, che può essere un bacino di decantazione presente nelle vicinanze del lago oppure direttamente il corso d'acqua di valle. L'utilizzo di sistemi draganti galleggianti consente di andare a operare in zone tipicamente a ridosso dello sbarramento che potrebbero risultare per gran parte dell'anno inaccessibili con mezzi meccanici e sulle quali pertanto non sarebbe possibile impostare attività di recupero volume tradizionali. Tali zone spesso coincidono con le pertinenze a ridosso degli imbocchi degli scarichi profondi dell'impianto.
Particolare attenzione è posta sull'impatto che produce il rilascio di sedimenti sull'intero ecosistema del corpo idrico di valle. L'effetto dei solidi sospesi sulla fauna acquatica dipende infatti non solo dalle concentrazioni raggiunte, ma anche dalla durata dell'esposizione, dalla sensibilità degli organismi colpiti, dal periodo di esecuzione delle operazioni e da una serie di altri parametri, quali ossigeno disciolto, temperatura, forma e granulometria del materiale in sospensione.
Si rende quindi necessario, attraverso la redazione di uno specifico Piano Operativo di fluitazione, definire un piano di monitoraggio ambientale individuando sezioni di controllo sul corso d'acqua a valle della diga, il cui numero e ubicazione dipendono dalle caratteristiche geomorfologiche del corpo idrico, dalla natura del sedimento e dalla presenza di nodi ambientali significativi (es. aree protette, confluenze).
Anche i valori soglia tipicamente di carico solido trasportato e ossigeno disciolto da rispettare a valle diga sono definiti sulla base delle torbidità naturali in caso di piena del corpo idrico e pertanto si rende spesso necessaria una campagna di monitoraggio preventiva sugli eventi naturali in ingresso al lago.
Di conseguenza, per quanto riguarda la sostenibilità ambientale dell'intervento, in una prima fase l'attenzione è posta principalmente a monte della diga al fine di caratterizzare le torbidità naturali in ingresso all'invaso, mentre durante e dopo le operazioni di fluitazione il focus viene spostato sul corpo idrico a valle dello sbarramento.
In una visione a scala di intera asta idraulica o, con più ampio respiro, di bacino idrografico, le operazioni di fluitazione controllata con rilascio di sedimenti a valle, oltre che recuperare volume utile all'interno del lago artificiale, producono indirettamente ulteriori esternalità positive volte al riequilibrio della naturale continuità del trasporto solido che viene forzatamente alterato dalla presenza di opere di intercettazione in alveo.
Per poter essere attuate, quindi, le operazioni di fluitazione controllata con rilascio di sedimenti a valle necessitano l'utilizzo di volumi d'acqua da destinare alla diluizione della miscela dragata, con quantitativi più o meno considerevoli in funzione delle soglie di rispetto di valle.
La produzione è invece influenzata dalla curva granulometrica del sedimento scavato e dal suo contenuto di materiale grossolano di natura antropica o organica (es: tronchi, rami…): più il materiale è omogeneo e maggiori sono le produzioni.

3.7 Analisi delle soluzioni d'intervento

Di seguito si forniscono indirizzi di carattere generale per aiutare il gestore nella definizione del piano di intervento da adottare, sulla base di pregresse esperienze sul tema.
Nell'insieme, la sostenibilità economica di un'operazione di escavazione meccanica con allontanamento del materiale su gomma è fortemente influenzata dalla distanza tra le aree di escavazione dei sedimenti e il sito in cui gli stessi vengono conferiti.
L'elemento economico di principale interesse per una stima preliminare di fattibilità di un intervento di tale entità è pertanto il costo di trasporto, al quale deve essere sempre associato il relativo costo di "conferimento" nel caso il materiale sia gestito come rifiuto o come sottoprodotto nell'ambito dei progetti di ripristino ambientale di aree estrattive. Altro elemento di dettaglio per quanto riguarda le volumetrie, è rappresentato dal fatto che si rende sempre necessario considerare un incremento dei volumi tra i quantitativi di volume utile recuperato in diga e i volumi trasportati a causa del naturale processo di rigonfiamento subito dal materiale una volta scavato: tali percentuali dipendono dalla tipologia di sedimento e dalla sua compattezza in sito con aumenti di volume mediamente variabili tra il 10% e il 40%.
I costi di monitoraggio ambientale sono pressoché indipendenti dalla distanza di allocamento del materiale dal sito di estrazione, fatto salvo nel caso in cui tali sedimenti siano riutilizzati in aree golenali o di pertinenza fluviale del copro idrico di valle, ad esempio per l'imbottimento di difese spondali esistenti o per il rinforzo arginale. In questo caso è prassi comune inserire almeno una stazione di monitoraggio ambientale posta idraulicamente a valle delle zone di rimpiego del materiale.

Nel caso di riutilizzo del sedimento all'interno di un processo produttivo di tipo industriale o, più in generale, qualora la destinazione finale sia differente dalla deposizione in aree demaniali di pertinenza fluviale, particolare attenzione deve essere posta al grado di umidità del materiale estratto. Anche se le operazioni di estrazione dovessero riguardare aree del bacino messe temporaneamente in asciutto, è possibile che il materiale depositato presenti, anche a basse profondità, gradi di umidità rilevanti o comunque non direttamente compatibili con la destinazione d'uso finale. Nel caso di escavazione meccanica per il successivo riutilizzo dei sedimenti potrebbe quindi essere necessario, prima dell'allontanamento del materiale dal sito di estrazione, prevedere un trattamento di asciugatura o disidratazione con un'incidenza economica diretta sull'operazione.
In questo caso, per ottimizzare il processo, si rende opportuno adeguare le operazioni di escavazione con le effettive potenzialità dell'impianto di trattamento e asciugatura in modo da poter gestire un flusso continuo di sedimenti senza eccessivi accumuli di materiale o tempi di fermo impianto.
Un altro elemento che gioca un ruolo importante nella valutazione economica dell'intervento è rappresentato dalla classificazione del sedimento presente. La possibilità di trattare i volumi scavati come sottoprodotto e non come rifiuto consente un risparmio economico non indifferente.
Altro aspetto preliminare da non trascurare, in particolare per il riutilizzo del sedimento all'interno di un processo produttivo, è rappresentato dall'eventuale canone di concessione per l'estrazione, che introduce quindi un ulteriore costo diretto. Si ricorda infatti che tutti i progetti di estrazione del materiale sedimentato sul fondo dell'invaso devono essere approvati dagli uffici delle amministrazioni regionali competenti. Tale elemento si rende solitamente non necessario nel caso in cui il sedimento estratto venga riposizionato in aree demaniali di pertinenza fluviale.
Per quanto riguarda invece le operazioni di fluitazione controllata con rilascio di sedimenti a valle, l'incidenza unitaria del costo delle operazioni per ogni m^3 di volume recuperato è di per sé dipendente dalle effettive produzioni del sistema dragante, a sua volta funzione della tipologia del sedimento su cui si va a operare e dei limiti ambientali imposti.
In questo caso, vista la grande attenzione posta ai monitoraggi ambientali con particolare riferimento alle sezioni a valle diga, il costo unitario comprensivo delle attività di monitoraggio ambientale è molto variabile e fortemente influenzato dall'estensione del periodo di dragaggio. Considerando infatti che le campagne di monitoraggio sono solitamente definite su base annuale indipendentemente dal numero di giorni di effettivo utilizzo del sistema dragante, i costi vengono maggiormente ammortizzati nel caso di prolungati periodi di dragaggio.
Un altro elemento sul quale vale la pena porre l'attenzione è rappresentato dalla necessità o meno di utilizzare la risorsa idrica stoccata in diga: se nel caso di operazioni di escavazione meccanica non è indicativamente necessario consumare risorsa idrica per eseguire i lavori (salvo la necessità di abbassare il lago per permettere l'accesso in asciutta dei mezzi alle aree di escavazione), per operazioni di fluitazione controllata è necessario utilizzare parte della risorsa idrica immagazzinata in invaso per diluire la miscela dragata nel rispetto delle soglie di vincolo ambientale imposte dalle autorità competenti. Tale consumo di acqua è tanto più alto tanto più severe sono le soglie di rispetto ambientale imposte.

Una soluzione ibrida è rappresentata dall'estrazione meccanica dei sedimenti con attrezzatura residente. Tale metodologia consente di operare in modo praticamente continuo su tutto l'anno con una estrazione costante di sedimenti, senza utilizzo di risorsa idrica.
Proprio la possibilità di operare indipendentemente dal livello di invaso consente di poter fare una programmazione su lungo periodo delle operazioni con conseguente abbattimento dei costi.
Circa la valutazione economica della metodologia con attrezzatura residente, questa è strettamente dipendente dalle condizioni specifiche dell'intervento, quali le caratteristiche dei sedimenti, i volumi da rimuovere, la profondità di giacitura, la mobilitazione/demobilitazione dei mezzi, i vincoli logistici del sito. Alcuni di questi aspetti possono incidere anche in maniera significativa sulla progettazione *ad hoc* dell'impianto.

In linea generale può essere assunta, a titolo indicativo, una valutazione compresa tra 35 e 60 €/m^3 comprensiva delle fasi di estrazione, classificazione e disidratazione. In aggiunta a tali costi è necessario prevedere i costi di trasporto. Nel caso di sedimenti con presenza di inquinanti, la possibilità di separare fin da subito le classi granulometriche consente di ridurre i volumi di sedimenti fini con presenza di inquinanti che necessitano di trattamento o conferimento in discarica, riducendone di conseguenza i relativi costi.

Quindi, sulla base di pregresse esperienze sul tema, si riporta nel grafico seguente un'indicazione di massima dei costi lordi delle tre tipologie di intervento sopra descritte, nell'ipotesi di poter considerare le operazioni di

escavazione meccanica non soggette a canone di concessione per l'estrazione, e ipotizzando che il sedimento possa essere classificato non come rifiuto e deponendo il materiale estratto in aree demaniali di pertinenza fluviale poste a valle diga (Fig.13).

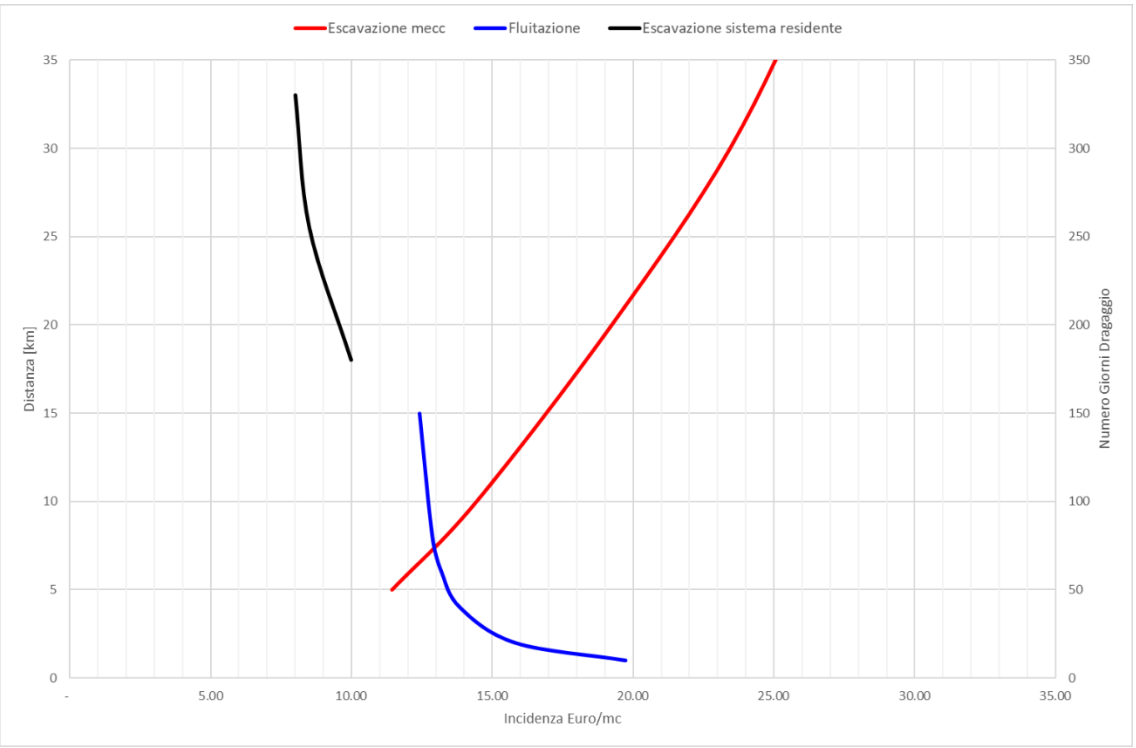


Figura 13

Sull'asse delle ascisse è riportato il costo unitario per spostare 1 m^3 di sedimento, in funzione della distanza di posa del materiale (per un intervento di escavazione meccanica – linee rosse, asse Y di sinistra) oppure in funzione del numero di giorni di dragaggio in un anno (per un intervento di fluitazione controllata con rilascio di sedimenti a valle – linea blu, asse Y di destra o per un intervento di idrosuzione con attrezzatura residente – linea nera, asse Y di destra).
Il calcolo dell'incidenza a m^3 delle operazioni di fluitazione controllata, con rilascio di sedimenti nel corpo idrico di valle, è stato definito sulla base di produzioni medie settimanali di 1000 mc di sedimento scavato, valore ordinario in caso di sedimento uniforme di tipo prevalentemente limoso-argilloso. Per rese inferiori, i costi unitari aumentano.
Dal grafico si estrapola che, considerando anche i costi per i monitoraggi ambientali:

- se il sito di allocamento è ubicato entro un raggio di 10 km dalle aree di escavazione allora la soluzione economicamente migliore è rappresentata sempre da un intervento di escavazione meccanica con allontanamento del materiale con camion;
- per distanza maggiori di 20 km tra il sito di estrazione e il sito di allocamento del materiale, risulta più economico eseguire un intervento di fluitazione controllata a patto di poter operare per un tempo almeno pari a 40 giorni lavorativi.

Nelle analisi di cui sopra non è stato considerato l'eventuale costo di investimento iniziale per l'acquisto di un sistema dragante, comprensivo di tutta la strumentazione e dell'attrezzatura necessaria per rendere il sistema funzionante e operativo.

Allo stesso tempo, nel caso di riutilizzo dei sedimenti scavati all'interno di specifici cicli produttivi, il materiale può essere valorizzato economicamente a parziale ristoro delle spese sostenute per l'estrazione e l'allontanamento, andando ad abbassare i costi unitari di intervento.

TIPOLOGIA DI INTERVENTO	VANTAGGI	CRITICITÀ
Escavazione con mezzi meccanici (escavatori)	✓ Nessun consumo di acqua ✓ Nessuna interferenza significativa sulle acque invasate e sul corpo idrico ricettore ✓ Nella maggior parte dei casi, una volta messe in asciutta le aree di scavo, il sedimento potrebbe non necessitare di ulteriori trattamenti per il controllo ed eventuale riduzione del contenuto di umidità	✓ Necessità di svasi parziali o totali del lago per mettere in asciutto le aree di escavazione ✓ Operatività spesso limitata alle aree più in coda al bacino a causa della presenza di materiale non coeso e non idoneo alla presenza di mezzi in alveo nelle aree più centrali o a ridosso dello sbarramento ✓ Necessità di avere condizioni idrologiche per un lungo periodo, idonee alla sicurezza degli operatori
Estrazione con benna subacquea residente	✓ Attività non incidente con la gestione del livello di invaso ✓ Utilizzo energia elettrica ✓ Nessun consumo d'acqua ✓ Autonomia operativa del gestore in caso di urgenti interventi di sfangamento	✓ Necessità aree spondali sommerse/emerse idonee per estrazione e allontanamento del sedimento ✓ Potenziale aumento della torbidità in presenza di sedimenti fini ✓ Gestione della distanza tra area di estrazione e area di deposito
Dragaggio + riduzione umidità residua	✓ Per draghe del tipo a funi nessuna interferenza con la gestione del livello di invaso ✓ Nessun consumo di acqua se i sistemi di disidratazione (geotubi, vasche di sedimentazione) sono posizionati a monte dello sbarramento ✓ Possibilità di operare nelle aree centrali del bacino e a ridosso dello sbarramento	✓ La presenza di materiali di varia natura nel sedimento e un elevato grado di compattezza possono compromettere il corretto funzionamento della pompa e ridurre la produttività dell'impianto ✓ Necessaria disponibilità di acqua per l'estrazione del sedimento (rapporto almeno 1:10) ✓ Ampia disponibilità di aree per la disidratazione del sedimento ✓ Elevati costi per la disidratazione del sedimento ✓ Potenziale utilizzo flocculanti e interferenza con usi potabili delle acque di invaso

		✓ Frazioni più fini di materiale sono più difficilmente riutilizzabili
Ecodragaggio	✓ Nessuna interferenza con la gestione del livello di invaso ✓ Possibilità di operare nelle aree centrali del bacino e a ridosso dello sbarramento ✓ Unico sistema che prevede estrazione, selezione granulometrica e disidratazione ✓ Non sono necessarie aree per l'asciugatura del sedimento che viene scaricato sulle sponde già palabile ✓ Nessun consumo di acqua – circuito chiuso	✓ Accurata progettazione sito-specifica dell'impianto integrato ✓ Necessario accesso idoneo per la messa in acqua del pontone e degli impianti di dragaggio e trattamento
Dragaggio + fluitazione controllata	✓ Per draghe del tipo a funi nessuna interferenza con la gestione del livello di invaso ✓ Possibilità di operare nelle aree centrali del bacino e a ridosso dello sbarramento ✓ Restituzione di sedimento al corpo idrico di valle ✓ Condizioni di rilascio controllate (concentrazioni di SS e ossigeno disciolto e durata delle attività) ✓ Possibilità di sospendere le attività in caso di superamento dei limiti imposti a valle ✓ Possibilità di operare H24 con sistemi automatizzati e coordinati con la gestione dell'impianto	✓ Necessaria disponibilità di acqua per l'estrazione del sedimento (rapporto 1:10) ✓ Interferenze sulle comunità biologiche e sugli habitat del corso d'acqua a valle ✓ Necessità di monitoraggio ambientale complesso ✓ Lunga durata delle attività per rispettare limiti ambientalmente accettabili ✓ La presenza di materiali di varia natura nel sedimento può compromettere il corretto funzionamento della pompa e ridurre la produttività dell'impianto

Tabella 1: Tipologia di intervento: vantaggi e criticità

4.**Valutazione del potenziale di riutilizzo dei sedimenti nel settore delle costruzioni**

Nel corso degli ultimi decenni, il dragaggio di porti, fiumi, canali e, in particolare, di bacini idroelettrici ha generato una quantità considerevole di sedimenti, tradizionalmente trattati come rifiuti da smaltire mediante immersione in mare o conferimento in discarica. Questa prassi è risultata insostenibile sia dal punto di vista ambientale sia sotto il profilo economico, in un contesto in cui l'economia circolare e la transizione ecologica sono divenuti principi cardine delle politiche europee. A partire dagli anni Ottanta, con il contributo pionieristico di Collins (1980), la comunità scientifica ha iniziato a considerare i sedimenti dragati non più solo come rifiuti, ma come potenziali risorse per il settore delle costruzioni, dando avvio a un filone di ricerca che ha trovato applicazione in molteplici ambiti: laterizi, calcestruzzi, leganti alternativi e materiali per riempimenti.
L'evoluzione normativa, a partire dalla Direttiva 2008/98/CE fino al *Green Deal* del 2019, ha fornito l'impulso necessario a incentivare soluzioni di *beneficial use* dei sedimenti. In Italia, il D.M. 173/2016 ha introdotto criteri per la classificazione dei sedimenti come sottoprodotti, favorendone il riutilizzo. Tali sviluppi hanno

sostenuto una crescente attività di ricerca applicata e sperimentazione, con l'obiettivo di superare le criticità legate alla contaminazione, alla variabilità litologica e ai costi di *dewatering*.

I bacini idrici delle dighe a livello globale devono affrontare sfide sempre maggiori in termini di interrimento, con i sedimenti che riducono oggi la capacità di stoccaggio in media del 13-19% con previsioni di aumento al 16-21% nel 2030 e al 23-28% nel 2050 (*Trapped Sediment Robbing World's Large Dams of Vital Water Storage Capacity,* United Nations University Publication, January 2023).

Nel contesto italiano i valori di produzione di sedimenti in media oscillano fra 120 e 600 t/km^2 per anno con una stima attuale di volume totale di sedimenti disponibili pari a 700-800 milioni di metri cubi (Dati ISPRA). Il riutilizzo di questi sedimenti in varie applicazioni offre una duplice soluzione: mitigare l'interrimento dei bacini idrici e fornire materia prima a basso costo, o addirittura a costo zero, per produrre principalmente materiali da costruzione. Chiaramente i metodi di estrazione e smaltimento tradizionali utilizzati dai gestori di dighe, come il dragaggio e la fluitazione, devono obbligatoriamente soddisfare primari vincoli ambientali ed economici. I sedimenti provenienti dagli invasi artificiali possono essere vantaggiosamente utilizzati in diversi settori industriali e in particolare nel settore delle costruzioni, purché compatibili con i requisiti tecnici necessari.
Nei primi studi europei, tra cui si ricordano i lavori di Hamer e Karius (2002) in Germania e di Lafhaj et al. (2007) in Francia, si è dimostrata la fattibilità tecnica del riutilizzo dei sedimenti in laterizi e malte cementizie, con l'immobilizzazione dei contaminanti nella matrice cementizia. Le ricerche successive, condotte in Italia da Ferone et al. (2015), Messina et al. (2017) e Lirer et al. (2017), hanno evidenziato le potenzialità dei sedimenti argillosi calcinati come precursori geopolimerici, ottenendo prodotti con resistenze meccaniche elevate e buona stabilità ambientale. Parallelamente, studi geotecnici (Zelleg et al., 2018; De Gisi et al., 2020) hanno mostrato l'utilità dei sedimenti in applicazioni stradali, specie dopo trattamenti con calce o cemento.

Non mancano tuttavia le sfide: la variabilità composizionale impone protocolli di caratterizzazione specifici e il *dewatering* dei sedimenti rappresenta ancora una voce di costo rilevante. Soluzioni promettenti includono il riutilizzo del calore di scarto e l'impiego di geotubi a basso consumo. La mancanza di uno standard europeo suggerisce la necessità di un "Eurocodice Sedimenti".
In conclusione, la ricerca condotta tra il 1980 e il 2025 dimostra come il riutilizzo dei sedimenti dragati sia passato da concetto marginale a pratica tecnologicamente matura, supportata da un corpus scientifico solido e da sperimentazioni su scala reale. Le prospettive per il futuro comprendono modelli di integrazione di sviluppo industriale, lo sviluppo di normative dedicate, l'integrazione con altre filiere di scarto e la promozione di partenariati pubblico-privati. In tale contesto, i sedimenti dragati, in particolare quelli da bacini montani, si configurano come una risorsa strategica per la decarbonizzazione del settore edilizio e la transizione verso un modello di economia circolare.

Pertanto, il riutilizzo industriale dei sedimenti dei bacini idrici offre un'alternativa sostenibile in diversi settori dell'industria delle costruzioni, in linea con i principi dell'economia circolare, come qui di seguito viene descritto.

4.1 Costruzione di sottofondi stradali

I sedimenti sia di tipo fine (limi e argille) sia di tipo grossolano (sabbie e ghiaie) possono risultare idonei alla realizzazione di sottofondi di sovrastrutture di pavimentazioni stradali, ferroviarie o aeroportuali. Il materiale costituito integralmente o parzialmente da limo e argilla dovrà necessariamente essere stabilizzato a calce e/o cemento.
A livello italiano il sedimento dovrà soddisfare i requisiti riportati nella norma UNI 11531-1 (Costruzione e manutenzione delle opere civili delle infrastrutture - Criteri per l'impiego dei materiali - Parte 1: Terre e miscele di aggregati non legati).
Di seguito, Figura 14, si riporta una sintesi estratta dalla norma citata e dalla quale si evidenziano le caratteristiche delle terre a base argilla che corrispondono alla classificazione A2-6 e A2-7 per le terre ghiaio-sabbiose e A6 e A7 per le terre limo argillose.

Classificazione generale	Terre ghiaio-sabbiose Frazione passante allo staccio 0.063 mm ≤ 35%							Terre limo-argillose Frazione passante allo staccio 0.063 mm > 35%					Torbe e terre organiche palustri
Gruppo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		A8
Sottogruppo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6	
Frazione passante allo staccio 2 mm 0.4 mm 0.063 mm	≤ 50 ≤ 30 ≤ 15	- ≤ 50 ≤ 25	- > 50 ≤ 10	- - ≤ 35	- - ≤ 35	- - ≤ 35	- - ≤ 35	- - > 35	- - > 35	- - > 35	- - > 35	- - > 35	
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0.4 mm LL (Limite liquido) IP (Indice di plasticità)	- ≤ 6	- ≤ 6	- N.P.	≤ 40 ≤ 10	> 40 ≤ 10	≤ 40 > 10	> 40 > 10	≤ 40 ≤ 10	> 40 ≤ 10	≤ 40 > 10	> 40 > 10 IP ≤ LL-30	> 40 > 10 IP > LL-30	
Indice di gruppo	0		0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia o sabbia limosa o argillosa				Limi poco compressibili	Limi molto compressibili	Argille poco compressibili	Argille molto compressibili e mediamente plastiche	Argille molto compressibili e molto plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	da eccellente a buono					Da mediocre a scadente							Da scartare
Azione del gelo sulle qualità portanti	Nessuna o lieve			Media				Molto elevata		Media	Elevata	Media	
Ritiro e rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve				Lieve o medio		Elevato	Elevato	Molto elevato	
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa						Scarsa o nulla			

Figura 14: Requisiti tecnici per le terre ad uso sottofondi

A dimostrazione della reale possibilità di impiegare i sedimenti nella realizzazione di sottofondi si segnala uno studio eseguito di recente dalla società francese EDF il cui scopo è stato quello di valutare il potenziale riutilizzo dei sedimenti fini nella composizione di sottofondi stradali.
Nove tipi di sedimenti provenienti da altrettanti invasi di dighe sono stati analizzati in base alle loro proprietà chimico-fisiche, geotecniche e ambientali. Questi sedimenti sono stati poi trattati (legati) con calce viva e un legante idraulico a base di loppa d'altoforno (rispettivamente in aggiunte del 3% e 6%).
I test hanno dimostrato che è possibile raggiungere un indice di portanza immediato pari a 15%, minimo requisito tecnico nell'ingegneria stradale, con tutti i sedimenti trattati. Tuttavia, da ulteriori test di sensibilità all'acqua (altro parametro importante nei sottofondi stradali) alcuni tipi di sedimento non si sono dimostrati idonei all'impiego.
L'aggiunta di sabbia, sia di tipo naturale che di tipo riciclato, come correttore granulare per migliorare le proprietà del sedimento ha dimostrato un significativo miglioramento di tutte le caratteristiche della miscela, in particolare quelle meccaniche, rendendo idonei tutti i sedimenti esaminati.
Si può senz'altro affermare, quindi, che il risultato di questo lavoro apre la strada a tecniche di costruzione stradale più avanzate al fine di garantire la conformità ambientale e promuovere un riutilizzo ecologico dei sedimenti.

4.2 Produzione di cemento

La produzione attuale di cemento in Italia è pari a circa 20 milioni di tonnellate con 32 centri di produzione e 21 centri di macinazione. Nello schema riportato qui di seguito viene descritto il ciclo di produzione del cemento (Fig.15).

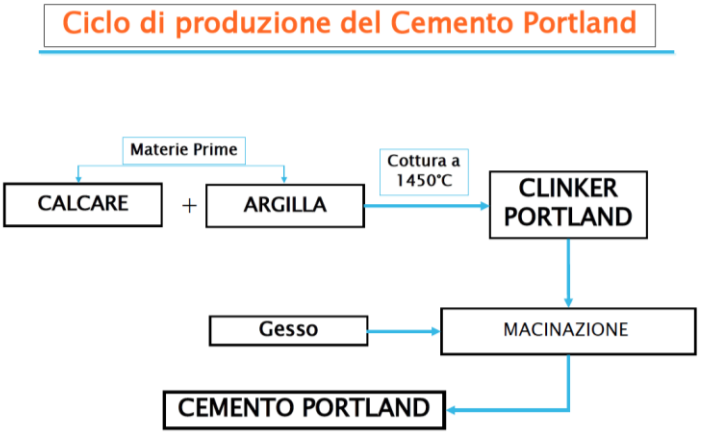


Figura 15

Come si vede, il clinker di cemento viene prodotto mediante cottura a 1450-1500°C di una farina costituita da calcare e argilla, che costituiscono quindi le materie prime. A sua volta, poi, il clinker prodotto viene raffreddato e quindi macinato all'interno di mulini a sfere insieme all'aggiunta di gesso la cui funzione è quella di regolare la presa del cemento finale prodotto. A questo punto il cemento viene insilato e consegnato nei cantieri in sacchi o sfuso tramite autocisterna.
L'industria del cemento italiana consuma annualmente milioni di tonnellate di materie prime tradizionali (calcare, argilla, sabbia), con un impatto ambientale significativo. Il riutilizzo dei sedimenti provenienti dagli invasi delle dighe rende possibile la parziale sostituzione di materie prime nella produzione del cemento, riducendo l'estrazione di risorse naturali e promuovendo un'economia circolare.
La maggior parte dei sedimenti fini provenienti dagli invasi di dighe contengono silice (SiO_2), allumina (Al_2O_3), ossidi di ferro (Fe_2O_3) e di calcio (CaO). Studi recenti dimostrano che questo tipo di sedimenti possono vantaggiosamente sostituire il calcare e l'argilla tradizionali nella produzione di clinker. Questo approccio è in linea con i principi dell'economia circolare convertendo i rifiuti in risorse da costruzione, riducendo la dipendenza dalle materie prime naturali e diminuendo le emissioni di carbonio associate alla produzione di cemento. Certamente il costo di trasporto del sedimento dall'invaso allo stabilimento di produzione impatta notevolmente e pertanto è indispensabile per un uso economicamente sostenibile che le distanze siano contenute nell'arco massimo dei 10-15 km.
A fronte di 20 milioni di tonnellate, il consumo di argilla come materia prima è pari a circa 3 milioni di metri cubi (4 milioni di tonnellate).
Ipotizzando, quindi, un impiego di sedimento fine argilloso anche solo del 10-15% sul consumo totale di materia prima argilla il risparmio economico per il singolo produttore può certamente diventare interessante.
In aggiunta a questa opportunità, poi, bisogna considerare anche la possibilità di utilizzare il sedimento argilloso, qualora i minerali silicei siano presenti in quantità sufficiente, come materiale dotato di attività pozzolanica dopo un trattamento di calcinazione a 700-800°C, ancor più se esso contiene caolino trasformandosi dopo la calcinazione in metacaolino.
Questo consentirebbe di produrre cementi a minore contenuto di clinker con corrispondente riduzione dei costi e al tempo stesso con migliori caratteristiche tecniche, i cosiddetti cementi LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). Come ulteriore riflessione, si consideri che la sostituzione del 30-40% del clinker con sedimenti di argilla calcinata può ridurre le emissioni di CO_2 fino al 40% durante il ciclo di produzione.
A conferma dell'interesse che suscita questo argomento sono state condotte parecchie sperimentazioni sia da parte di produttori di cemento che da gestori di dighe. In Francia, in particolare, la società EDF in collaborazione con il gruppo Lafarge sta conducendo un programma di ricerca sull'impiego dei sedimenti fini argillosi provenienti da diversi invasi di dighe come materia prima per la produzione di clinker.

4.3 Produzione di laterizi

In Italia le aziende produttrici di laterizi sono attualmente 62 per un totale di 90 stabilimenti attivi. La produzione totale a fine 2023 si aggira intorno a 4,5 milioni di tonnellate a cui corrisponde un consumo di argilla come materia prima pari a circa 3 milioni di metri cubi all'anno (dato stimato).
Certamente l'uso dei sedimenti di dighe rappresenta nella produzione di laterizi un'alternativa sostenibile all'argilla tradizionale, supportata da molteplici studi. Anche in questo caso, il costo di trasporto del sedimento dall'invaso allo stabilimento di produzione impatta notevolmente e pertanto è indispensabile per un uso economicamente sostenibile che le distanze siano contenute nell'arco massimo dei 10-15 km.
Tuttavia, sebbene il riutilizzo di sedimenti fini a base argilla nella produzione di laterizi offra una soluzione sostenibile, risolvendo sia il problema dello smaltimento dei sedimenti che la scarsità di materie prime, è assolutamente necessario individuare le sue caratteristiche chimico-fisiche di tali materiali per assicurarsi l'idoneità all'impiego in questo settore industriale. I sedimenti fini delle dighe sono tipicamente costituiti da limi, argille, sabbie fini e materia organica. La loro composizione varia a seconda della geografia, della geologia dei bacini idrografici e dell'attività umana. Le proprietà critiche per la produzione di laterizi includono:

- Distribuzione granulometrica: gli intervalli favorevoli sono del 20-60% di fini (<63 μm).
- Composizione chimica: Un alto contenuto di silice (SiO2) e allumina (Al2O3) è sicuramente preferibile, mentre gli ossidi di ferro contribuiscono alla colorazione.

- Materia organica: dovrebbe essere sempre inferiore al 5% per evitare rigonfiamenti durante la cottura.
- Indice di plasticità: Influenza la lavorabilità e il comportamento durante la formatura.

Diversi studi sperimentali hanno convalidato la fattibilità dell'utilizzo di sedimenti di diga permettendo di raggiungere le seguenti prestazioni su mattoni pieni:

- Resistenza alla compressione: la sostituzione dell'argilla convenzionale con una percentuale variabile tra il 20 e il 40% di sedimenti fini argillosi porta a valori sempre >15 MPa.
- Assorbimento d'acqua: <20%.
- Ritiro: valori compresi tra il 2 e il 6%.
- Durabilità: i test di gelo-disgelo confermano la stabilità a lungo termine.
- Test di lisciviazione: i metalli pesanti vengono immobilizzati dopo la cottura, rispettando gli standard ambientali.

Ci sono numerosi esempi di esperienze industriali e di laboratorio dove i sedimenti di diga sono stati riutilizzati per la produzione di laterizi. I più concreti sono i seguenti:

- Diga di Ridracoli, Emilia-Romagna: un progetto congiunto tra Romagna Acque e l'Università di Bologna ha studiato il riutilizzo dei sedimenti provenienti dall'impianto di potabilizzazione di Capaccio che alimenta il bacino idrico della diga di Ridracoli. I laterizi sono stati prodotti con il 25% di sostituzione dei sedimenti (6).
- Diga di Furore, Campania**:** I sedimenti provenienti dal bacino di Furore sono stati valutati dall'Università di Salerno. Laterizi prodotti con il 30% di sedimenti di diga sono stati fabbricati utilizzando la tecnologia del forno a tunnel (7).
- Bacino di Montedoglio, Toscana**:** Un progetto pilota condotto dalla Regione Toscana e dal CNR ha mostrato valori di resistenza alla compressione di 17 MPa e un assorbimento d'acqua inferiore al 16% (8).
- Toscana e Umbria**:** studi condotti dall'Università di Perugia e dal CNR-ICVBC hanno utilizzato miscele di sedimenti fino al 40% per mattoni estrusi e pressati (9).
- Lombardia: le Agenzie Regionali per l'Ambiente e il Gruppo Industriale Tegolaia hanno incorporato sedimenti in prodotti in muratura conformi alle norme UNI EN.

4.4 Produzione di piastrelle ceramiche

Nel 2023 sono stati prodotti in Italia quasi 374 milioni di metri quadri, nel 2024 la produzione è stata prossima ai 370 milioni di metri quadri, con una richiesta di materie prime di circa 7,6 milioni di tonnellate nel 2024 (dato stimato). L'industria della ceramica, in particolare la produzione di piastrelle, utilizza grandi quantità di materie prime naturali come argilla, feldspato e quarzo e riutilizza i suoi scarti di produzione all'interno del proprio ciclo produttivo. Il settore delle piastrelle di ceramica è costantemente impegnato alla ricerca di materie prime alternative, con la massima attenzione alla sostenibilità sotto tutti gli aspetti. Negli ultimi anni, tale esigenza si è accentuata a seguito di una repentina e forzata ristrutturazione della catena di approvvigionamento, conseguente all'interruzione delle forniture di argilla di origine ucraina, storicamente considerata un riferimento qualitativo per l'intero comparto. A partire dal 2022, a seguito del conflitto con la Russia, questa materia prima è stata necessariamente sostituita con materiali di diversa provenienza, comportando un incremento dei costi e variazioni sia nella composizione chimico-mineralogica che nelle proprietà tecnologiche delle miscele ceramiche, nell'intento di mantenere gli elevati standard qualitativi che caratterizzano la produzione ceramica italiana. Per essere idonee alla produzione di piastrelle ceramiche, le argille devono possedere specifiche caratteristiche fisiche, chimiche e mineralogiche, che influenzano le fasi di lavorazione e le prestazioni finali del prodotto. Le fasi argillose predominanti sono l'illite e la caolinite, ma la prima è preferita per le sue ottime caratteristiche di plasticità e stabilità termica. La composizione chimica indicativa dell'argilla come materia prima dovrebbe sempre rispettare i seguenti requisiti:

- SiO_2**:** 45–65% – contribuisce alla formazione della fase vetrosa.

- Al_2O_3 (allumina)**:** 15–25% – migliora la refrattarietà e la resistenza meccanica.
- Fe_2O_3 (ossido di ferro)**:** <5% – livelli più alti possono influenzare il colore (effetto rossastro) e ridurre le temperature di fusione.
- CaO, MgO, K_2O, Na_2O**:** presenti in basse percentuali; agiscono da fondenti favorendo il processo di cottura.

Tra le proprietà fisiche, invece, assumono molta importanza la plasticità che deve garantire la formatura mediante pressione o estrusione evitando cedimenti e quindi deformazioni nella piastrella, la finezza, il ritiro e il contenuto di materia organica.
I sedimenti fini limo-argillosi provenienti dagli invasi di dighe contengono, in linea generale, quarzo, feldspati e altri minerali argillosi quali illite, montmorillonite e in qualche caso caolinite (in funzione della natura geologica del bacino imbrifero). Dal punto di vista della composizione chimica, i sedimenti contengono silice e allumina mentre dal punto di vista della distribuzione granulometrica hanno dimensioni generalmente inferiori ai 63 μm.
Tutte queste caratteristiche indicano una compatibilità di massima con la produzione di alcune tipologie di piastrelle ceramiche in alternativa o come materia prima integrativa all'argilla utilizzata correntemente. Bisogna precisare, tuttavia, che l'eventuale presenza di ossidi di ferro può compromettere le caratteristiche estetiche delle piastrelle. Studi di laboratorio e prove pilota a livello industriale confermano che le piastrelle di ceramica derivate da sedimenti possono soddisfare le seguenti prestazioni:

- Resistenza meccanica: Resistenza alla flessione ≥ 20 MPa.
- Assorbimento d'acqua: <6% per le piastrelle smaltate.
- Resistenza agli shock termici: paragonabile alle piastrelle di ceramica realizzate con materie prime tradizionali.

Qui di seguito si riportano alcune applicazioni industriali sperimentali dove i sedimenti sono stati impiegati in sostituzione dell'argilla originale in diverse percentuali di aggiunta.

- Portogallo (fiume Douro): i produttori portoghesi di ceramica hanno integrato il 20-40% dei sedimenti provenienti dal dragaggio di bacini idrici nella produzione di piastrelle. I test meccanici e di lisciviazione hanno confermato la sicurezza e la durata del prodotto;
- Cina (Diga delle Tre Gole, fiume Yangtze): i sedimenti fini del dragaggio delle dighe sono stati utilizzati nelle piastrelle di ceramica. I test hanno mostrato una maggiore densificazione e una resistenza accettabile;
- Italia (Bacino di Montedoglio, Toscana): sedimento di diga miscelato (30%) con argilla per piastrelle in gres smaltato. L'Università di Siena ha riportato resistenze a flessione di circa 20 MPa;
- Austria (Verbund Reservoirs): l'Università di Vienna, in collaborazione con varie aziende di piastrelle, ha dimostrato idoneità dell'utilizzo dei sedimenti provenienti dai bacini idroelettrici fino al 40% in sostituzione dell'argilla da cava;
- Francia (Diga di Serre-Ponçon): i campioni di sedimenti trattati e testati da Céramiques Techniques hanno raggiunto la conformità ISO con una miscelazione del 25-35%.

4.5 Aggregati per calcestruzzo

Il volume totale di calcestruzzo prodotto in Italia nel 2022, comprendendo sia il calcestruzzo preconfezionato che quello prodotto in stabilimenti di prefabbricazione è stato di circa 37 milioni di metri cubi (dato stimato). A questo volume di produzione corrisponde un consumo di aggregato pari a circa 22 milioni di metri cubi (aggregato fine + aggregato grosso).
Come si vede, pertanto, parliamo di consumi estremamente elevati che impongono necessariamente una riflessione sulla sostenibilità ambientale. Infatti, ultimamente l'industria del calcestruzzo sta ricercando nuove alternative all'impiego di aggregati vergini attraverso l'utilizzo di aggregati riciclati. A questo riguardo

l'introduzione di una nuova normativa sull'impiego degli aggregati riciclati nel calcestruzzo dovrebbe incentivarne l'uso che ad oggi rimane comunque limitato.
Risulta chiaro, quindi, come la possibilità di impiegare sedimenti di tipo grossolano (ghiaie e sabbie) provenienti dagli invasi di dighe rappresenti una concreta realtà con uno sviluppo futuro sempre maggiore, diminuendo l'impatto ambientale associato all'estrazione di sabbia e ghiaia.
Dal punto di vista economico, si consideri che il sedimento grossolano costituisce una risorsa a costi base molto contenuti con l'unica limitazione legata alla distanza di trasporto tra invaso e impianto di produzione dell'aggregato. In base a valutazioni economiche si può affermare con un certo grado di precisione che la distanza ritenuta accettabile affinché il costo del sedimento grossolano sia pari al costo di un aggregato industriale sia intorno ai 15-20 km.
La normativa italiana ed europea che regola l'idoneità di un aggregato per il calcestruzzo è la UNI EN12620. Questa norma contiene tutti i parametri chimici e fisici che un aggregato per calcestruzzo deve rispettare, quindi, anche l'aggregato che proviene dai sedimenti grossolani delle dighe deve rispettare almeno gli stessi requisiti.
Qui di seguito si riporta una serie di esperienze di laboratorio documentate, focalizzate sull'utilizzo di sedimenti grossolani da dighe nella produzione di calcestruzzo:

Caratterizzazione fisico-chimica dei sedimenti

Sedimenti con granulometria 0,1-4 mm e contenuto di sali <0,1% sono risultati idonei per la produzione di calcestruzzo. L'analisi XRD (diffrazione a raggi X), l'analisi TGA (termogravimetria) e l'analisi spettrometrica hanno permesso di identificare minerali come quarzo e calcite, idonei all'impiego nel calcestruzzo.

Test di resistenza a compressione

Resistenze a compressione di 28-32 MPa, pari al 90% dei valori di riferimento sono state verificate mediante preparazione di campioni cilindrici (norma UNI EN 12390) con sostituzione del 15-30% di aggregati naturali.

Prove di durabilità (gelo-disgelo)

Risultati di perdita di massa <0.5% e riduzione del modulo elastico <10% sono stati ottenuti mediante test di esposizione a 50 cicli di gelo (-20°C) e disgelo (+20°C) secondo norma ASTM C666 (18).

Analisi di lisciviazione

Concentrazioni di Pb e Cd inferiori a 0,1 mg/L dopo trattamento con leganti cementizi (19) sono risultate da tests TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) con soluzioni acide (pH 4.93).

Verifiche prestazionali

Valori di densità di 2.300 kg/m³ e resistenza a compressione di 25 MPa si sono ottenuti mediante impiego di sedimenti grossolani (25% di sostituzione sull'aggregato vergine) in calcestruzzi a basso dosaggio di cemento.

Test di abrasione

Risultati di perdita di massa ≤1,5% contro 1,0% per aggregati naturali mediante test di abrasione (EN1338) su campioni sottoposti a 500 cicli (20).

Dal punto di vista delle applicazioni in cantiere sono state eseguite diverse sperimentazioni di cui se ne riportano alcune qui di seguito:

1.Bacino di Disueri (Sicilia)
La diga di Disueri, nella Sicilia centro-meridionale, affronta una forte sedimentazione (circa 200.000 m³/anno) che riduce notevolmente la capacità idrica. Con la collaborazione dell'Università di Palermo

i sedimenti grossolani recuperati sono stati testati in sostituzione del 15% degli aggregati nel calcestruzzo per fondazioni, con resistenze a compressione di 28 MPa a 28 giorni;

2. Diga del Liscione (Molise)
Il bacino di Guardialfiera (Lago di Liscione) accumula circa 120000 metri cubi di sedimenti all'anno, principalmente sabbie quarzose. Un progetto pilota coordinato dall'Università del Molise ha valutato la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti sabbiosi il cui modulo di elasticità (E) ha dato un risultato di 15-20 GPa, paragonabile a quello delle sabbie fluviali. La frazione più grossolana dei sedimenti (40% del totale) è stata impiegata in calcestruzzi non strutturali per opere di contenimento;

3. Bacino artificiale in Italia centrale (Umbria)
Uno studio del 2024 su un invaso nell'Appennino umbro-marchigiano ha quantificato un tasso di sedimentazione di 1.200 t/km²/anno, con sedimenti ricchi in carbonati ($CaCO_3$ > 60%). Le sperimentazioni hanno dimostrato una eccellente compatibilità con i leganti a base cementizia, grazie anche alla reattività pozzolanica residua;

Queste sperimentazioni dimostrano che, con trattamenti mirati, i sedimenti sabbioso-ghiaiosi possono sostituire efficacemente gli aggregati tradizionali, aprendo la strada a un'edilizia più sostenibile.

4.6 Impiego come geopolimeri per la produzione di calcestruzzo

La letteratura recente converge sull'idea che i sedimenti di invaso, grazie alla loro composizione chimica povera di sali e ricca di silice e allumina, rappresentano una risorsa ottimale per la produzione di leganti alternativi. L'uso combinato di sedimenti con altri sottoprodotti industriali (es. ceneri volanti, loppa d'altoforno) consente la formulazione di geopolimeri prestazionali con emissioni significativamente inferiori rispetto ai cementi tradizionali. A tal proposito, Mouaissa et al. (2025) hanno ottenuto resistenze a compressione di 25 MPa da miscele di sedimento e loppa d'altoforno granulata (GGBFS - *Ground Granulated Blast-Furnace Slag*) attivati alcalinamente, con livelli di lisciviazione ben al di sotto dei limiti UE. A livello europeo, il progetto UP-RISE (2024–2026), coordinato da Høgskolen e Østfold in Norvegia, mira alla trasformazione di sedimenti dragati in geopolimeri sostenibili, contribuendo sia alla riduzione delle emissioni di CO_2 del settore cementizio sia alla valorizzazione di rifiuti alluminosilicatici. Parallelamente, il centro SEDILAB in Francia promuove da oltre un decennio l'impiego dei sedimenti in calcestruzzi prefabbricati e malte cementizie, integrandoli in filiere locali di recupero.
In tale contesto, i sedimenti dragati, in particolare quelli da bacini montani, si configurano come una risorsa strategica per la decarbonizzazione del settore edilizio e la transizione verso un modello di economia circolare. Un contributo significativo è giunto anche da recenti ricerche italiane che hanno esaminato sedimenti di bacini come Camastra e San Giuliano (Martellotta et al., 2024), confermandone la compatibilità per usi edilizi, in virtù di una composizione favorevole e di tenori di contaminanti inferiori ai limiti normativi. In parallelo, esperimenti condotti dal 2019 dal Politecnico di Torino e Gruppo Marazzato hanno prodotto blocchi geopolimerici contenenti almeno il 40% in peso di sedimento alpino, con resistenze a flessione e compressione rispettivamente pari a 18 Mpa e 35 MPa.
Da un punto di vista di opportunità e sulla base di un'analisi tecnica, riportata in un paragrafo appositamente dedicato, su campioni di sedimenti provenienti dal caso di studio affrontato dal presente gruppo di lavoro (diga di Mignano, Consorzio Bonifica Piacenza) si può ragionevolmente ipotizzare che i settori potenzialmente più indicati al riutilizzo di sedimenti argillosi e di sedimenti sabbioso ghiaiosi siano proprio il settore delle piastrelle per ceramica, dei laterizi e degli inerti per calcestruzzo e opere stradali.

Caso studio Politecnico di Torino: valorizzazione geopolimerica dei sedimenti idroelettrici alpini

La ricerca condotta presso il Politecnico di Torino con il Gruppo Marazzato e con il gruppo CVA, dal 2019 e ancora in corso, si concentra sulla valorizzazione dei sedimenti dragati da bacini idroelettrici alpini attraverso la loro trasformazione in leganti geopolimerici innovativi. Questa attività, avviata nel contesto di un progetto di dottorato di ricerca (Vecchio, 2024) e oggi proseguita nell'ambito del progetto "GEOS DREAM" (*GEOpolymers with Sludges Dredged from Reservoirs: Engineered Applications and Materials*), ha l'obiettivo di dimostrare la fattibilità tecnica, ambientale ed economica del riuso di tali materiali in edilizia.

I sedimenti, sottoposti a caratterizzazione granulometrica e chimica, mostrano una distribuzione fine (d50 ≈ 42 µm), con contenuto prevalente di limo e argilla (Fig.16). Le analisi ICP hanno evidenziato livelli di metalli pesanti ampiamente inferiori ai limiti (Tab.2) previsti dalla normativa italiana per il riutilizzo in ambito civile (D.Lgs. 152/06).
L'analisi mineralogica effettuata tramite diffrazione a raggi X (XRD) ha rilevato la presenza prevalente di quarzo, feldspati, miche (muscovite) e fillosilicati del tipo clorite (Fig.17). Tali fasi sono compatibili con l'impiego in leganti geopolimerici, in particolare se combinate con sistemi di attivazione alcalina idonei. In parallelo, l'analisi chimica elementare tramite fluorescenza a raggi X (XRF) ha confermato la predominanza di silice e allumina nella matrice, con un rapporto Si/Al favorevole alla reattività geopozzolanica (Tab.2).
Dopo una fase di essiccazione e micronizzazione, i sedimenti sono stati utilizzati come precursori per la formulazione di geopolimeri, in combinazione con attivatori alcalini e additivi industriali. Sono state sviluppate oltre 35 formulazioni sperimentali, testate in laboratorio per valutarne le prestazioni meccaniche e fisiche. I materiali ottenuti, in forma sia densa che alleggerita, hanno raggiunto resistenze a compressione superiori a 30 MPa nei provini compatti e densità variabili tra 400 e 2400 kg/m³, con conduttività termica misurata tra 0,2 e 2,2 W/mK a seconda della formulazione.
Parallelamente è stato sviluppato il processo "Polishell", un sistema brevettato di alleggerimento fisico basato sull'inclusione di bolle d'aria controllate, adatto per applicazioni prefabbricate o gettate in opera e potenzialmente compatibile con tecniche di stampa 3D. Questo approccio permette di calibrare le proprietà termo-meccaniche dei materiali geopolimerici in funzione dell'uso finale.
Una valutazione ambientale semplificata (LCA - *Life Cycle Assessment*) ha stimato una riduzione del potenziale di riscaldamento globale (GWP – *Global Warming Potential*) fino al 70% rispetto a materiali cementizi equivalenti. In termini economici, assumendo un costo nullo del sedimento, il costo complessivo di produzione dei materiali risulta comparabile rispetto al riferimento a base cementizia.
Il progetto GEOS DREAM sta attualmente portando avanti la dimostrazione sperimentale della tecnologia su scala preindustriale, con l'obiettivo di validarne le prestazioni in contesti reali. I risultati ottenuti confermano il potenziale strategico dei sedimenti alpini come risorsa circolare per la transizione ecologica del settore edilizio.

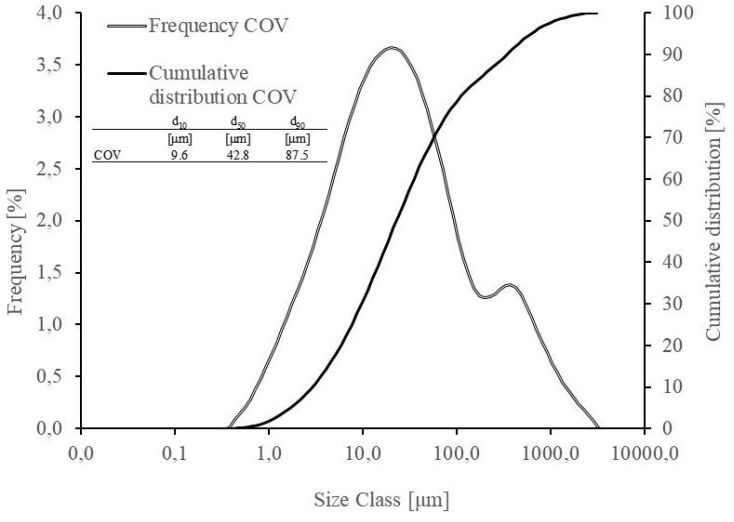


Figura16

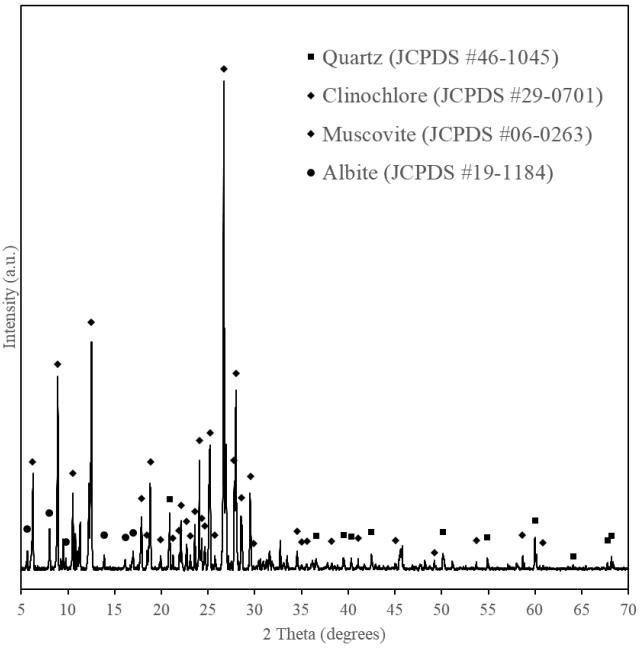


Figura 17

	Full range	0.250 - 0.125 mm	0.125 - 0.063 mm	< 0.063 mm
CODE	COV 000	COV 250	COV 125	COV 063
SiO_2	47.60	48.10	47.30	46.10
Al_2O_3	15.50	15.70	14.80	16.70
CaO	10.10	10.20	12.90	8.79
MgO	7.48	7.39	6.79	7.64
Fe_2O_3	6.54	6.48	6.93	7.41
Na_2O	1.55	1.54	1.58	1.31
K_2O	2.11	2.20	1.57	2.57
TiO_2	0.71	0.62	0.97	0.92
Others	1.00	0.89	1.10	1.01
LOI-Flux	7.40	6.88	6.06	7.55

Tabella 2

Bibliografia

Norma UNI EN 11531 parte 1

Potential reuse of fine sediment from hydroelectric dams and recycled concrete sand in road subgrades- International Journal of Sediment Research Vol.39 Issue 6 December 2024

Ability of two dam fine-graded sediments to be used in cement industry as raw material for clinker production, Antoine Faure · Agnès Smith · Coryse Coudray · Baptiste Anger Horacio Colina · Isabelle Moulin · François Thery, Waste Biomass Valor (2017) 8:2141–2163 DOI 10.1007/s12649-017-9870-8

Synthesis and Characterization of Cement Clinker Based on Tunisian Dam Sediments, Antoine Faure et al.
Journal: Cement and Concrete Research (2023)
DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107230

Beneficial Reuse of Dam Fine Sediments as Clinker Raw Material, Gineys, N.E., Abriak, D.
Journal: Cement and Concrete Composites (2021)
HAL ID: hal-02321680

Caputo, P., et al. (2020). Giornale di ingegneria e gestione ambientale, 19(12), 2173–2180.

Maffucci, R., et al. (2019). Materiali da costruzione e da costruzione, 211, 679–687.

Romani, M., et al. (2020). Scienze applicate, 10(21), 7692.

Baldassarri, C., et al. (2021). Giornale di produzione più pulita, 288, 125681.

Ricci, M., et al. (2022). Sostenibilità, 14(6), 3411.

Ferreira, H., et al. (2017). Valorization of dredged sediments from Douro River in ceramic materials. *Construction and Building Materials*, 138, 119–126.

Zhang, T., et al. (2018). Ceramic applications of Yangtze River dredged sediments. *Materials Letters*, 232, 184–187.

Rossi, D., et al. (2020). Sustainable ceramics from Montedoglio dam sediments. *Applied Sciences*, 10(6), 2012.

Huber, M., et al. (2021). Characterization and use of reservoir sediments in ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124748.

Durand, A., et al. (2022). Evaluation of sediment reuse in ceramic tile bodies. *Ceramics International*, 48(2), 1445–1452.

Test TCLP – EPA Guidelines, 2023.

Progetto SEDIBETON, 2022.

Caso studio Disueri – Ricerca italiana, 2024. Università di Palermo, *Riciclo sedimenti Disueri*, 2023.

Molino A.J., 2014.Utilizzo sedimenti lacuali, il caso dei sedimenti dell'invaso di Ponte Liscione, Tesi di laurea, Università di Napoli Federico II,

Università del Molise, *Studio sedimenti Lago di Liscione*, 2020.

Progetto Appennino umbro-marchigiano, relazione tecnica 2024.

Collins, R. J. (1980). Dredged silt as a raw material for the construction industry. Resource Recovery and Conservation, 4(4), 337–362. https://doi.org/10.1016/0304-3967(80)90039-6

Dondi, M., Mazzanti, F., Principi, P., et al. (1997). Use of industrial and urban waste in clay bricks. Applied Clay Science, 11(4), 337–355. https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00015-7

Hamer, K., & Karius, V. (2002). Brick production with dredged harbour sediments: An industrial-scale experiment. Waste Management, 22(5), 521–530. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00048-4

Lafhaj, F., Samara, M., Agostini, F., & Skoczylas, F. (2007). About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment. Cement and Concrete Composites, 29(4), 270–278. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.002

Romero, M., Rojas, A., & Moral, A. (2008). Reuse of dredged urban sediments in clay bricks with insulating properties. Environmental Engineering and Management Journal, 7(6), 593–599.

Samara, M., Lafhaj, F., & Chapiseau, C. (2009). Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks. Journal of Hazardous Materials, 163(2–3), 701–710. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.153

Bianchi, V., Masciandaro, G., Ceccanti, B., Doni, S., & Iannelli, R. (2010). Phytoremediation and biophysical conditioning of dredged marine sediments. Water, Air, & Soil Pollution, 210, 187–195. https://doi.org/10.1007/s11270-009-0240-4

Ferone, C., Liguori, B., Capasso, I., et al. (2015). Thermally treated clay sediments as geopolymer source material. Applied Clay Science, 107, 195–204. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.023

Cappuyns, V., Deweirt, V., & Rousseau, S. (2015). Dredged sediments as a resource for brick production: Possibilities and barriers from a consumers' perspective. Waste Management, 38, 372–380. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.025

Couvidat, J., Benzaazoua, M., Chatain, V., & Bouamrane, A. (2016). Reuse of contaminated marine sediments as fine aggregates in mortars. Construction and Building Materials, 112, 892–902. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.233

Özer-Ərdoğan, P., Başar, H. M., Erden, İ., & Tolun, L. (2016). Beneficial use of marine dredged materials in concrete: Turkey example. Construction and Building Materials, 124, 690–704. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143

Junaková, N., & Junak, J. (2017). Sustainable use of reservoir sediment in building materials. Sustainability, 9(5), 852. https://doi.org/10.3390/su9050852

Messina, F., Ferone, C., Colangelo, F., et al. (2017). Recycling calcined clayey sediments in geopolymer precursors. Construction and Building Materials, 133, 1–26. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.039

Lirer, S., Capasso, I., Ferone, C., et al. (2017). Composite materials made of dredged sediments in a fly ash based geopolymer. Journal of Environmental Management, 191, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.001

Zelleg, H., Bouasker, M., Khelidj, A., & Bali, A. (2018). Harbour dredged sediment in road engineering: Case of Zarzis Harbor, Tunisia. Construction and Building Materials, 180, 136–146. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.251

Faure, A., Coudray, C., Anger, B., et al. (2019). Beneficial reuse of dam fine sediments as clinker raw material. Construction and Building Materials, 218, 365–384. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.123

De Gisi, S., Todaro, F., Mesto, E., et al. (2020). Stabilization/solidification of contaminated marine sediments. Journal of Cleaner Production, 269, 122416. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122416

Slimanou, H., Eliche-Quesada, D., Kherbache, S., et al. (2020). Harbour dredged sediment as raw material in fired bricks. Journal of Building Engineering, 28, 101018. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101018

Thomas, M., Blais, J.-F., Mercier, G., et al. (2021). Influence of sediment source on the properties of sediment-based bricks. Materials, 14(7), 1803. https://doi.org/10.3390/ma14071803

Bortali, A., Fort, M., Ceravolo, R., et al. (2023). Dredged sediments as raw materials in the construction sector: A systematic review. Sustainability, 15(6), 4791. https://doi.org/10.3390/su15064791

Božić, M., Knez, M., & Vidmar, M. (2023). Circular use of river sediments in bricks: The Capodistria case. Applied Sciences, 13(11), 6488. https://doi.org/10.3390/app13116488

Yang, X., Liu, S., Zhang, Y., et al. (2024). Integrated remediation and valorization of dredged sediments: A review. Journal of Environmental Management, 336, 117729. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.117729

Martellotta, A. M. N., Levacher, D., Gentile, F., et al. (2024). A Relevant Characterization and Compatibility for Reuse the Sediments from Reservoirs in Southern Italy. Applied Sciences, 14(2), 727. https://doi.org/10.3390/app14020727

Beddaa, H., Somé, C. S., Ben Fraj, A., et al. (2024). Potential Reuse of Fine Sediment from Hydroelectric Dams and Recycled Concrete Sand in Road Subgrades. International Journal of Sediment Research, 39(3). https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.09.004

Wongvatana, N., Noorak, A., Poorahong, H., et al. (2024). Sustainable Road Construction Materials Incorporating Dam Sediment and Eucalyptus Ash Waste: A Circular Economy Framework. Case Studies in Construction Materials, 22, e04118. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04118

Mouaissa, M. S., Marouf, H., Ali-Dahmane, T., et al. (2025). Effect of Mix Design Parameters on the Properties of Dam Sediment/Slag-Based Geopolymer Mortars. Buildings, 15(6), 886. https://doi.org/10.3390/buildings15060886

Vecchio, F. (2024). Alkali-activated materials and geopolymers from wastes and secondary raw materials: Innovative and sustainable building products (PhD Thesis). Politecnico di Torino.

5 Impieghi in agricoltura

Il recupero dei sedimenti in agricoltura, o in ambiti ad essa affini (ripristino del territorio, interventi ambientali e forestali), può risultare di grande importanza in quanto vengono offerti dei potenziali di ritiro considerevoli con pianificazioni che possono svilupparsi in lunghi periodi temporali. Molte delle modalità di recupero hanno spesso la limitazione di non offrire la risposta adeguata ai grandi quantitativi richiesti; inoltre, nelle disparate attività - di tipo industriale e civile - alle quali i sedimenti dragati possono essere conferite, sono necessarie proprietà merceologiche che frequentemente non corrispondono alle esigenze normative di uniformità conformi all'industria moderna: questi aspetti incidono sulle pianificazioni delle opere di asportazione delle grandi masse presenti nelle dighe. La necessità di garantire un flusso organizzato, esige che le attività di destinazione abbiano una capacità ricettiva costante e programmabile in un lungo periodo: questi fabbisogni possono essere in conflitto con gli andamenti economici e del ciclo lavorativo delle attività produttive, soprattutto industriali, che operano nel riutilizzo: per questo motivo il comparto agrario può offrire, oltre ad un'ulteriore alternativa, una maggiore potenzialità di ricezione.
Il riutilizzo nel settore agronomico dei sedimenti mette a disposizione, in alcune sue modalità, sotto l'ottica dell'economia circolare, un importante ed evoluto modello di sostenibilità, addirittura maggiore di quello definito dal suo ideatore (W.R. Stael, 1976 – W.R. Stael, 2016), in quanto ne supera la sua stessa definizione: il riutilizzo delle matrici sedimentarie in agricoltura consente, oltre al risparmio di materie prime, la produzione di risorse non rinnovabili come, per definizione, risultano essere il suolo e le torbe; conseguentemente il recupero in agricoltura assume, oltre alla sua funzione di riduzione del consumo di risorse, il ruolo di rigeneratore delle stesse. Il riutilizzo dei materiali fini dragati nella produzione di fertilizzanti, correttivi, suoli ricostituiti, substrati di coltivazione, risulta essere un perfetto esempio di economia rigenerativa che riporta nel ciclo naturale risorse confinate e inutilizzabili. Più specificamente, a sostegno di quanto viene affermato, devono essere considerati i seguenti due casi principali:

- *l'impiego dei sedimenti come fertilizzanti*, inquadrati nelle categorie degli ammendanti, correttivi o substrati, permette un vantaggioso risparmio di risorse e di miglioramento delle terre;
- l'utilizzo dei sedimenti come principale frazione minerale nella *produzione di suoli ricostituiti – Antroposuoli* - generando terreni fertili da destinare al recupero di aree degradate, desertificate ed impermeabilizzate, riproducendo una risorsa non rinnovabile.

Il recupero dei sedimenti a vantaggio dell'agricoltura è noto da millenni. È necessario, però, tenere presente che non sempre l'utilizzo di questi comporti benefici giacché, la loro differente natura, legata alla loro diversa provenienza geologica e ambientale, e alle condizioni dei suoli riceventi, può portare a esiti anche negativi: è pertanto di fondamentale interesse che il loro riutilizzo venga imprescindibilmente legato a una valutazione delle compatibilità pedologiche, agronomiche e vocazionali con i siti destinati alle attività di recupero.
È comunque un dato di fatto, basato sui principi delle scienze del suolo, della sedimentologia e della pedologia, che i sedimenti rappresentino l'elemento basilare nella genesi dei suoli, soprattutto per quanto riguarda la componente minerale.
Le principali attività di destinazione nel settore agricolo, forestale e ambientale possono essere schematicamente suddivise, in linea potenziale, nei due seguenti comparti:

- agrario, forestale e ambientale:
    - produzione di fertilizzanti appartenenti alla categoria degli ammendanti e dei correttivi;
    - fornitura di matrici per la formazione dei substrati di coltivazione;
    - impiego dei sedimenti direttamente sul suolo;
- bonifiche e ripristini ambientali:
    - produzione di suoli ricostituiti o, più genericamente, di Antroposuoli.

Nel *comparto agrario, forestale e ambientale* la destinazione dei sedimenti può essere potenzialmente destinata a svariate attività quali: *bonifiche agrarie e forestali*, soprattutto intese come il recupero di aree degradate da eventi naturali o antropici; *miglioramenti fondiari*, per intervenire sull'incremento della profondità di terreni sottili o poco profondi soggetti ad erosione e sul miglioramento della fertilità globale; *ripristino dello strato arabile dei suoli*; *fertilizzazione dei terreni agrari* per il miglioramento e mantenimento della fertilità fisica e

chimica; *valorizzazione dei terreni marginali, degradati e desertificati e impermeabilizzati;* la formulazione di *substrati di coltivazione; produzione di ammendati e correttivi*.
Nel *comparto delle bonifiche e dei ripristini ambientali*, i sedimenti possono trovare impiego nella ricostruzione degli orizzonti di suolo fertile; nel restauro agrario e forestale dei siti compromessi da attività estrattive e minerarie, come pure nella copertura finale delle discariche.

5.1 Riutilizzo dei sedimenti nel settore agrario, forestale e ambientale

Sebbene il riutilizzo dei sedimenti nel comparto agrario offra importanti opportunità, allo stato attuale risulta pressoché limitato ad iniziative sperimentali a causa dei molteplici vincoli, incertezze e carenze legislative che ne ostacolano la realizzazione: sono infatti numerose le ricerche applicate che hanno confermato l'utilità ambientale ed economica senza però dare seguito a degli sviluppi concreti su media o vasta scala. Un'unica eccezione, che opera attualmente nel ripristino dei suoli degradati, nella produzione di Antroposuoli e nelle opere di miglioramento fondiario , attraverso l'impiego dei sedimenti (fanghi di dragaggio) o materiali di natura simile (fanghi di potabilizzazione delle acque[1] e i fanghi costituiti da inerti[2]), è quella della ricostituzione dei suoli (Manfredi et Al, 2022): un trattamento sperimentato ed oggi impiegato nelle opere di miglioramento fondiario e di ripristino delle superfici degradate e desertificate.
Le attività di ricerca svolte, a livello globale, si sono concentrate su interventi locali senza dare origine ad una procedura generale che consenta di stabilire un criterio e un metodo applicabile a seconda delle numerose variabili esistenti nei diversi sedimenti e settori del recupero agronomico: l'assenza di un metodo, di un indirizzo per gli interventi - dovuto alla grande diversità delle condizioni di tipo climatico, geologico, sedimentologico, pedologico, agronomico e ambientale - è una lacuna che risulta indispensabile colmare al fine di ottenere delle procedure finalizzate a garantire un idoneo riutilizzo.

5.1.1. Produzione di fertilizzanti

Oltre alle conoscenze tradizionali e antiche che già prevedevano l'uso dei sedimenti per il miglioramento delle terre (F. Re 1810), dalla fine degli anni '90, è stata proposta e sviluppata la possibilità di impiegare i sedimenti dei bacini come fertilizzanti (Fonseca et al., 1998), attraverso diversi studi che dimostrano come l'aggiunta di queste matrici ai suoli migliori le proprietà fisico-chimiche anche documentando la maggiore produzione agraria (Fonseca et al., 2003; Capra et Al., 2015; Braga et Al., 2017). Specifici lavori hanno dimostrato l'utilità dei sedimenti nella fertilizzazione di suoli carenti di fosforo (Kiani et al. 2020). Una carenza che si riscontra in questi studi, forse dovuta ad una scarsa visione multidisciplinare, è la mancanza di un necessario approfondimento delle opportune lavorazioni agrarie da operare sui suoli per un miglioramento dell'efficacia nelle opere di recupero sui differenti tipi di terreno.

L'utilizzo dei sedimenti nella produzione dei fertilizzanti, però, non è previsto nella legislazione Europea e nazionale. Considerando le norme riguardanti la disciplina dei fertilizzanti, le matrici sedimentarie provenienti dalle dighe potrebbero, potenzialmente, essere inquadrate nelle categorie degli ammendati, dei correttivi e dei materiali previsti per la produzione dei substrati di coltivazione. Di fatto è necessario sottolineare che, anche se la natura dei sedimenti può concordare con l'inquadramento nelle categorie sopra citate (ammendati, correttivi, substrati), non essendo la provenienza di essi contemplata dalla legge, questi non possono essere riconosciuti all'interno delle categorie se non con una specifica istanza, corredata da approfonditi moduli e relazioni tecniche, per l'inserimento di un nuovo prodotto negli specifici allegati della legge.
In ragione dell'elevata eterogeneità che posseggono le matrici sedimentarie a seconda della loro origine, risulta irragionevole considerare un inserimento che collochi tutti i sedimenti in una delle categorie previste dalla disciplina dei fertilizzanti; pertanto, è necessario definire un inquadramento specifico che esamini, per ogni sedimento, i distinti casi. Al netto delle imprescindibili verifiche relative alle compatibilità ambientali (Tab.3) per la collocazione dei sedimenti nelle categorie dei fertilizzanti previste, sono necessarie delle caratterizzazioni rappresentative sulla composizione chimica e sulle proprietà fisiche sotto l'aspetto pedologico e agronomico.

[1] Materiali limosi di sedimentazione dei corsi d'acqua naturale e dei laghi prodotti dalla prima fase di sedimentazione delle torbide
[2] Sabbie, limi e argille derivanti dai processi di sedimentazione delle acque di lavaggio degli inerti naturali

Metallo	**Limite**
Piombo totale mg/kg_{ss}	140
Cadmio totale mg/kg_{ss}	1,5
Nichel totale mg/kg_{ss}	100
Zinco totale mg/kg_{ss}	500
Rame totale mg/kg_{ss}	230
Mercurio totale mg/kg_{ss}	1,5
Cromo esavalente totale mg/kg_{ss}	0,5

Tab.3 Tenori massimi consentiti in metalli pesanti sugli Ammendanti (Allegato 2) e sui Correttivi (Allegato 3) del D. lgs. 29 aprile 2010.

I parametri principali attraverso i quali possono essere individuate le affinità orientative dei sedimenti sono:

- di tipo fisico (Tab.4), relativamente alle matrici per la produzione dei substrati di coltivazione:

Sabbia fine	Porosità
Sabbia grossa	Densità reale
Limo fine	Densità apparente
Limo grosso	Curva ritenzione idrica
Argilla	Umidità
Inerti litoidi	Torba

Tab.4 Parametri chimici orientativi per la definizione delle caratteristiche come matrici per la formulazione dei substrati

- di tipo chimico, fisico e biologico per la valutazione dell'affinità dei sedimenti per la classificazione come ammendanti o correttivi (Tab.5) oppure in ammendanti (Tab. 6 - 7 – 8):

CaO totale (%) (Carbonato di calcio)	CaO (%) solubile in acqua
MgO totale (%) (Carbonato di magnesio)	MgO (%) solubile in acqua
SO_3 (%) (Solfato di calcio)	FeS_2 (%)

Tab.5 Parametri chimici per la definizione delle proprietà chimiche nei correttivi

Sabbia fine	Limo grosso
Sabbia grossa	Argilla
Limo fine	Inerti litoidi

Tab.6 Parametri fisici per la definizione delle proprietà ammendanti

Carbonio organico (%) – Sostanza organica (%)	Na
Rapporto C/N	Carbonio umico e fulvico
Azoto totale	Azoto organico
Reazione pH	Grado di umificazione
Contenuto di torba (%)	Capacità di scambio cationico
Salinità	Tallio

Tab.7 Parametri chimici per l'individuazione delle proprietà ammendanti

Test fitotossicità e accrescimento	Salmonella spp.
Test lombrichi	Escherichia coli

Tab.8 Parametri biologici orientativi per la definizione delle proprietà biologiche

Solamente attraverso mirate procedure di caratterizzazione analitica possono essere determinate le proprietà ammendanti o correttive delle matrici interessate, ciò al fine di distinguere il loro impiego per il miglioramento dei suoli.

Per un inserimento dei sedimenti nella categoria degli ammendanti che, per definizione del Decreto Legislativo 29 aprila 2010, n° 75, sono: "*i materiali da aggiungere al suolo in situ, principalmente per conservarne o migliorarne le caratteristiche fisiche o chimiche o attività biologica, disgiuntamente o unitamente tra loro, i cui tipi e caratteristiche sono riportati nell'Allegato 2*", è necessario considerare che, secondo le conoscenze

generali della natura dei sedimenti, la dotazione di sostanza organica risulta non sufficiente per classificarli in questa categoria: pertanto le più comuni matrici sedimentarie possono essere inquadrate solamente come una componente per la formulazione di specifici ammendanti dotati di una frazione minerale.

È sulla base di queste considerazioni che recentemente, nel 2022, è stata presentata alla Commissione Tecnico-Consultiva per i Fertilizzanti del Ministero delle Politiche agricole alimentari e forestali, un'istanza relativa all'approvazione e registrazione di due ammendanti prodotti con sedimenti senza che, ad oggi, sia ancora stata formulata una risposta autorizzativa o un diniego definitivo. In questo caso i due prodotti sono stati sottoposti ad una verifica sperimentale e dimostrativa (Fig.18), realizzata dal CREA GB (Montanaso Lombardo - LO)[3] , nella quale è stato dimostrato come l'impiego dei sedimenti dragati sottoposti ad uno specifico trattamento, abbia prodotto degli ammendanti con rese agronomiche superiori a quelle di un altro tipo commerciale ad alto rendimento. Gli ammendanti oggetto dell'istanza presentata al Ministero dell'Agricoltura, contengono una percentuale di sedimenti provenienti dalle attività di dragaggio del 10% (percentuale in massa). Nei due ammendanti proposti la funzione svolta dai sedimenti è quella di fornire una carica minerale conformata e complessata con la frazione organica umica e fibrosa attraverso uno specifico trattamento industriale brevettato.

Fig.18 Ammendante contenente sedimenti (fanghi di dragaggio) proposto alla Commissione Tecnico-Consultiva per i Fertilizzanti e parcelle agronomiche nei campi sperimentali del CREA di Montanaso Lombardo

Il vantaggio di questo trattamento di tipo chimico e fisico, è rappresentato dal consentire un'ampia scelta tra tipologie di sedimenti con proprietà diverse in quanto, la lavorazione, permette di regolare il dosaggio delle differenti componenti ottenendo un prodotto uniforme atto a garantire il rispetto delle norme ambientali e merceologiche unitamente alle proprietà agronomiche.
La produzione di ammendanti assume un ruolo importante soprattutto alla luce delle attuali criticità dei suoli relative ai progressivi fenomeni di declino della fertilità fisica e chimica. Il mercato degli ammendanti nel triennio 2020 – 2023 in Italia (Fonte ISPRA) è rappresentato da 1,2 milioni di tonnellate.
Nella *produzione dei substrati* i sedimenti non vengono previsti e, nel Decreto Legislativo del 29 aprile 2010 n. 75, vengono specificamente escluse le matrici non previste dall'allegato; a prescindere dall'aspetto normativo, il loro inquadramento troverebbe una complessa collocazione giacché risultano difficilmente definibili le percentuali di argilla, sabbia ed eventualmente torba, per riferirli alle specifiche proprietà richieste nei prodotti destinati al vivaismo. Anche nel caso della destinazione alla produzione dei substrati è altresì necessaria una distinzione delle caratteristiche dei sedimenti per una mirata collocazione a seconda del loro contenuto in sostanza organica, torba, sabbia, limo e argilla.

Nella produzione dei substrati la possibilità di utilizzo dei sedimenti offrirebbe delle potenzialità di rilevante interesse, anche in funzione dell'elevata richiesta sul mercato: la produzione vivaistica si basa sull'uso di substrati di coltivazione fuori suolo e l'Unione Europea rappresenta, nella produzione di piante da vaso, una quota del 44% della produzione mondiale complessiva con un aumento previsto di 2,5 volte entro il 2050 (G. Renella, 2021); il riutilizzo di sedimenti, soprattutto per quelli contenenti un'alta dotazione di sostanza organica, può rappresentare una risorsa di notevole valore. È necessario ricordare che la direttiva UE 92/43/CE dispone una progressiva riduzione nell'impiego delle torbe comportando, come conseguenza, la scarsa disponibilità di esse. Queste condizioni richiedono necessariamente la ricerca di materiali sostitutivi per garantire la disponibilità di componenti idonei per la produzione di substrati; il recupero dei sedimenti, anche sottoposti a specifici trattamenti, può rappresentare un'opportunità di particolare interesse.

[3] Documento in possesso dell'Autore: Prove sperimentali Annata Agraria 2021 svolte da CREA GB a Montanaso Lombardo (LO) "Verifica di attività ammendante su Invidia scarola e Pomodoro"

In Italia, un'esperienza specifica nel campo dei substrati è stata condotta dal gruppo Agrised[4] (2018), per delle ricerche sul riutilizzo di fanghi di dragaggio provenienti da un canale navigabile; su tali matrici sono state effettuate numerose prove di trattamento mediante la tecnologia della ricostituzione, seguite da controlli ambientali e studi agronomici di crescita su piante ornamentali.

Fig.19 Prove su lisimetri (colonne di suolo) per gli studi ambientali e agronomici sui substrati realizzati con i sedimenti (Laboratorio pedotecnica mcm Ecosistemi - Piacenza)

Il progetto ha dato esiti positivi nella produzione dei substrati di coltivazione per piante da vaso, confermando la validità dell'utilizzo dei sedimenti nella formulazione di substrati da impiegare nelle attività vivaistiche fuori suolo.

Fig.20 Esemplari di piante ornamentali coltivate con sedimenti sottoposti al trattamento di co-compostaggio e di ricostituzione (Agrivivai – Pistoia)

I risultati raggiunti in questa sperimentazione sono stati di particolare importanza in quanto le condizioni chimiche originarie del sedimento (fango di dragaggio) presentavano severe criticità relative alla molto elevata salinità ed elevato sodio scambiabile, una bassa capacità di scambio cationico e un basso contenuto di C organico. A seguito dei trattamenti la salinità è stata abbassata, la CSC e il C organico incrementati. Tutti i parametri di controllo hanno permesso di concludere che l'approccio realizzato rappresenta un utile strumento per il recupero del fango dragato rendendolo idoneo ad un utilizzo come substrato di coltivazione.

I sedimenti, nel comparto vivaistico, tenendo conto della loro variabilità, potrebbero trovare potenzialmente un loro impiego sia in forma diretta - tal quali – come componenti da addizionare per la formulazione dei substrati, oppure - in forma indiretta - come ammendanti generati attraverso la loro trasformazione.

Attualmente questo tipo di impiego non è percorribile in quanto non previsto dal Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n. 75 Allegato 4 -Substrati di coltivazione.
Anche nel caso del recupero dei sedimenti nella produzione di substrati destinati alle attività vivaistiche è necessaria la conoscenza delle specifiche proprietà al fine di individuare la compatibilità con questa tipologia di riutilizzo.

L'uso dei sedimenti come *correttivi agricoli*, ovvero, come riportato nel Decreto Legislativo 29 aprile 2010 n. 75: "*materiali da aggiungere al suolo in situ, principalmente per modificare e migliorare le proprietà chimiche*

[4] Agrised: http://www.lifeagrised.com/

anomale del suolo dipendenti da reazione, salinità, tenore di sodio …" non è previsto dalla legislazione; potenzialmente potrebbero essere interessati quei sedimenti che posseggono caratteristiche chimiche tali da poter ricadere nella definizione sopra riportata. Pertanto, quei sedimenti con concentrazioni di ossido di calcio o ossido di magnesio (carbonato di calcio o carbonato di magnesio) con specifiche caratteristiche granulometriche, potenzialmente, potrebbero essere assimilabili ai correttivi e quindi destinati al riutilizzo in agricoltura nei suoli in cui vi sia la necessità del loro impiego. In questa direzione risultano scarse le esperienze condotte e non sono note applicazioni sviluppate anche se, sul mercato dei correttivi, la presenza di prodotti di origine naturale quali i correttivi calcarei, marna, correttivi calcareo-magnesiaci, vengono commercializzati soprattutto per il miglioramento della reazione del suolo.
I sedimenti possono avere una particolare valenza nella rimediazione di altri specifici parametri chimico-fisici, non previsti dall'azione dei correttivi nelle norme vigenti, che comporterebbero un miglioramento delle condizioni di alcuni suoli quali, ad esempio, quelli caratterizzati da una tessitura grossolana, per la correzione della tessitura, e una bassa capacità di scambio cationico, per l'incremento di questa importante proprietà: il conferimento di matrici sedimentarie, per natura tessiturale fine, possono contribuire alla correzione di caratteristiche importanti per l'agricoltura a vantaggio della strutturazione dei suoli, dell'incremento di ritenzione idrica, della riduzione delle acque di percolazione e dell'incremento del trattenimento dei nutrienti. Gli aspetti citati possono certamente contribuire al miglioramento delle caratteristiche agrarie e ambientali, soprattutto alla luce delle criticità dovute ai processi di degrado, desertificazione e perdita del suolo.

5.1.2. Impiego diretto dei sedimenti in agricoltura

Nell'Unione Europea il riutilizzo diretto dei sedimenti dragati dai corpi idrici interni sui suoli agricoli è solamente consentito in Finlandia e nella Repubblica Ceca (Laakso J. 2016 - Laakso J. et Al 2023), tale riutilizzo è chiaramente vincolato al rispetto dei limiti di concentrazione degli inquinanti previsti dalla legislazione nazionale, nel resto dell'Unione Europea tale tipo di riutilizzo non è consentito.
Il recupero dei sedimenti direttamente in agricoltura offre delle opportunità di particolare interesse in quanto è stata più volte dimostrata la potenziale, ed effettiva, utilità anche alla luce delle molteplici criticità di degrado e desertificazione dei suoli non limitate solamente alle aree del Mediterraneo.

Sono numerosi gli studi e gli interventi sperimentali e dimostrativi che hanno confermato l'utilità dell'impiego delle matrici sedimentarie per il miglioramento agrario, soprattutto nel ripristino dei terreni degradati. In Spagna, i sedimenti del lago di Albufera (Canet et Al. 2003) hanno evidenziato il miglioramento dei suoli con un incremento di sostanza organica, ritenzione idrica e capacità di scambio cationico; nello studio di Leue e Lang (Leue M et Al. 2012) viene evidenziato come i sedimenti possano avere un alto valore agronomico grazie alla dotazione di macronutrienti utili in agricoltura.

Osservando tutta la serie di studi e sperimentazioni pilota si può constatare come gli interventi vengano impostati sulla base di prove di ricerca limitate all'ambito dell'opera, ovvero senza creare delle linee guida operative che consentano di prevedere la progettazione a seconda della variabilità delle caratteristiche dei sedimenti e dei suoli. Il recupero diretto in agricoltura deve considerare, per la realizzazione di opere a vantaggio dell'agricoltura e dell'ecologia, gli aspetti che sono di competenza della fisica e chimica agraria, della pedologia e dell'agronomia, esaminando la variabilità dei suoli, dei sedimenti in considerazione delle vocazioni colturali delle aree interessate al recupero. Lo schema sottostante (Fig. 21), nel quale vengono esemplificati gli equilibri di alcune relazioni chimiche presenti nei terreni agrari, raffigura quelle più importanti che devono essere prese in considerazione per agire verso il miglioramento dei suoli agricoli.

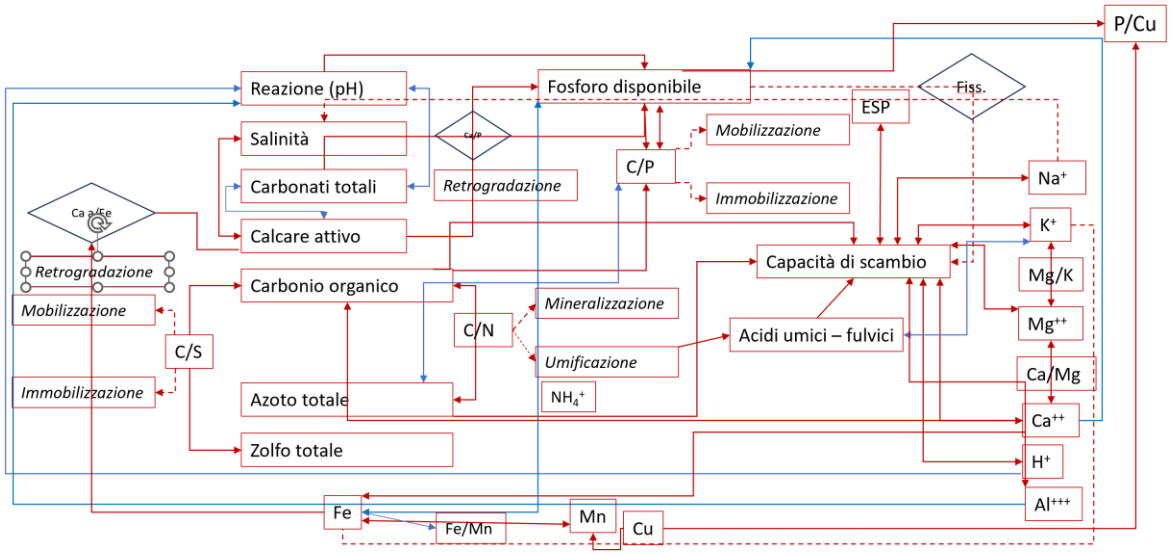


Fig.21 Schema esemplificativo dei rapporti tra i diversi parametri chimici nei suoli agrari al fine della gestione e del mantenimento della fertilità.

Pur essendo dimostrato - in diversi casi - come l'applicazione dei sedimenti possa incrementare le proprietà fisiche, chimiche (Canet et al., 2003) e la dotazione di sostanza organica (Leue e Lang, 2012), è necessario osservare che le esperienze sono state condotte in realtà localizzate e in condizioni agronomiche specifiche. Il mantenimento o il miglioramento del suolo grazie all'apporto dei sedimenti richiede una progettazione che non può prescindere dalla conoscenza delle matrici impiegate sotto l'aspetto fisico, chimico e agrario. Al fine di rendere operativa la possibilità di realizzare degli interventi che prevedono l'impiego diretto sul suolo dei sedimenti è necessario realizzare una base progettuale che possa consentire di svolgere le operazioni a vantaggio dell'agricoltura e dell'ambiente.

5.1.3. Produzione di suoli ricostituiti

Importanti possibilità di recupero dei sedimenti vengono offerte dalla tecnologia della ricostituzione, un metodo di trattamento delle matrici inerti fini per la lotta al degrado e alla desertificazione dei suoli. È un sistema riconosciuto all'interno delle pedotecnologie, ovvero quelle attività applicate delle scienze del suolo finalizzate alla modifica dei terreni e alla produzione di suoli specifici, a seconda delle vocazionalità agrarie e ambientali (C. Dazzi 2010).

Questo modello tecnologico consente di impiegare i sedimenti con un ampio potenziale di destinazione in quanto vengono convertiti in terre fertili a prescindere delle loro caratteristiche fisiche mediante il trattamento fisico-meccanico e chimico di ricostituzione. Il trattamento riproduce le fasi terminali della formazione dei suoli tra le quali: dissoluzione, disgregazione, aggregazione, carbonatazione, umificazione, complessazione e conformazione della frazione minerale ed organica.

Il processo di lavorazione consiste in un trattamento di tipo fisico meccanico e chimico e comporta la regolazione della fertilità globale dei suoli attraverso specifiche impostazioni che seguono modelli progettuali attraverso un complesso programma applicativo informatico (Pedogènia®).

La tecnologia si è sviluppata con numerose sperimentazioni ed interventi realizzando opere di ripristino agrario e forestale mediante due metodi: il *trattamento* dei terreni degradati (*in situ* ed *ex situ*) oppure la *produzione* di suoli per il ripristino di aree desertificate, impermeabilizzate e prive di orizzonte fertile.

I sedimenti, rappresentando una componente fondamentale della frazione minerale dei suoli, offrono un notevole contributo per la produzione dei terreni ricostituiti: come infatti accennato nella parte introduttiva del presente intervento, queste matrici - per loro naturale destino – partecipano prioritariamente nella costituzione dei suoli naturali: la ricostituzione reinserisce i sedimenti nel ciclo naturale ricomponendoli, mediante il trattamento che apporta le modifiche di composizione e di strutturazione fisica, in Antroposuoli (Rossi M. et Al, 2023).
Lo sviluppo del metodo verso il trattamento dei sedimenti ha avuto origine dall'impiego di matrici sedimentarie affini ai sedimenti provenienti dalle dighe, ovvero scarti di natura limo argillosa quali i fanghi prodotti dai

processi di potabilizzazione delle acque e limi di lavaggio degli inerti naturali, realizzando un intervento di ripristino - su un suolo degradato - di notevole interesse agronomico e scientifico (Manfredi et Al, 2013).

Alcune opere realizzate sono state oggetto di prove sperimentali e dimostrative: il progetto NEW LIFE (LIFE10 ENV/IT/0400)[5], finanziato dall'Unione Europea, ha verificato la riproducibilità - su vasta scala - del metodo della ricostituzione: con esso è stata ripristinata un'area fortemente degradata (Giupponi et Al 2013), dimostrando la fattibilità ambientale, agronomica ed economica della ricostituzione con la particolarità di affermare la possibilità di produrre un substrato idoneo per il ripristino agro-forestale anche senza l'impiego di terreni naturali: in questo intervento sono stati prodotti terreni fertili utilizzando, come base minerale primaria, dei sedimenti alluvionali. L'opera, che ha interessato una superfice desertificata di 10 ettari, ha restituito all'ambiente un'area rinaturalizzata con la messa a dimora di 4000 piante tra alberi e arbusti (fig.22). La fertilità dei suoli prodotti è stata valutata sia attraverso le caratterizzazioni analitiche dei parametri del suolo (Manfredi P. 2019), sia con il controllo delle crescite e dello sviluppo delle piante collocate sui terreni ricostituiti. I risultati sugli accrescimenti delle specie vegetali e le caratterizzazioni del suolo, ripetute anche a distanza di anni dall'intervento, hanno dimostrato la conservazione delle ottime proprietà dei terreni ricostituiti prodotti.

L'opera realizzata è stata sottoposta ad una verifica delle conformità della norma UNI 11235 che definisce i criteri di progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione di coperture continue a verde (Manfredi P. et Al 2014), confermandone l'idoneità.

Fig.22 - 6 Ripristino forestale realizzato con l'impiego dei sedimenti alluvionali come componente minerale primaria nella formazione dei suoli ricostituiti (NEW LIFE - LIFE10 ENV/IT/0400)

Contemporaneamente a queste attività sono state realizzate parcelle sperimentali per il confronto degli gli aspetti chimici, fisici e agronomici di suoli ricostituiti prodotti con matrici sedimentarie (Manfredi P. et Al 2014).

Successivamente, sotto il profilo sperimentale, è stato condotto uno studio sulla ricostituzione mediante un impianto pilota per verificare la possibile conversione dei sedimenti, prelevati dalla diga Rosamarina, Caccamo, Palermo, in suoli fertili. Il sedimento, che si presentava idoneo sotto l'aspetto ambientale, è stato sottoposto ad una dettagliata caratterizzazione agronomica per l'individuazione delle criticità pedologiche; sulla base delle proprietà della matrice è stato progettato il trattamento per poi effettuare la ricostituzione dei sedimenti. La ricerca è stata oggetto di una tesi magistrale con l'Università di Bologna (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari AGRI-06/C Pedologia) e i laboratori di ricerca della società m.c.m. Ecosistemi. Lo studio ha dimostrato la conversione in suoli fertili dei sedimenti della diga con il loro possibile impiego nel settore agrario e forestale (Fazio G.I. 2019). Un'ulteriore tesi di laurea magistrale, realizzata con m.c.m. Ecosistemi e il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari dell'Università di Bologna, ha effettuato delle prove di ricostituzione per valutare il riutilizzo del sedimento dello Scolo Dosolo, Calderara di Reno, Bologna (Devincenzi L. 2018); anche in questa sperimentazione il sedimento, sottoposto al trattamento per la produzione di suoli ricostituiti, ha assunto le proprietà di fertilità necessarie per l'utilizzo in agricoltura. Altre sperimentazioni sul riutilizzo dei sedimenti nella produzione di suoli ricostituiti sono state condotte sui depositi dragati in alcune dighe lombarde per conto di ENEL. Le ricerche, effettuate dalla società m.c.m. Ecosistemi e

[5] https://www.lifeplusecosistemi.eu/news.php

dalla Facoltà di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali di Piacenza, sono state condotte effettuando le preliminari verifiche ambientali ed agronomiche per poi progettare il trattamento sulla base di specifici parametri pedologici e tecnici che hanno consentito il trattamento dei sedimenti per l'effettuazione di prove su frumento in vaso (Cassinari C. et Al 2023) (fig.23), prima, e, quindi, su parcelle sperimentali (Cassinari C. et Al 2024) (fig.24).

Fig.23 Prove in serra: confronto delle crescite di frumento tra sedimenti tal quali e i suoli ricostituiti (Laboratori mcm Ecosistemi).

Gli esiti della sperimentazione in vaso hanno confermato sia la validità del metodo di trattamento che la particolare valenza agronomica con l'ottenimento di suoli ricostituiti a partire da matrici sedimentarie dotati di una fertilità fisica e chimica superiore a quella del sedimento tal quale. La sperimentazione sulle parcelle, che confrontava il suolo ricostituito prodotto da sedimenti con un suolo naturale di media fertilità, ha dato conferma degli esiti ottenuti nelle prove in vaso dando informazioni maggiori sulle caratteristiche idrologiche di particolare importanza per la gestione idrica.

Fig.24 Allestimento parcelle sperimentali – prove comparative parcelle con suolo naturale, sedimenti e suoli ricostituiti (sedimenti ricostituiti) (Area sperimentale m.c.m. Ecosistemi – Piacenza)

La tecnologia della ricostituzione, operativa nel settore delle bonifiche agrarie e forestali, opera sul miglioramento delle proprietà dei terreni unitamente alla produzione di terre destinate alla realizzazione di interventi di recupero di superfici agricole e ambientali perdute. L'attività svolta è coerente con le disposizioni dell'Unione Europea riguardanti la riduzione del consumo del suolo e il suo azzeramento entro il 2050 (COM (2021) 699), fornendo la materia prima (suolo fertile) per proteggere e ripristinare lo stato dei suoli degradati. L'approccio della ricostituzione con l'utilizzo dei sedimenti assume quindi un valore di pubblica utilità per il recupero delle aree compromesse in modo permanente o reversibile da coperture, impermeabilizzazioni, discariche, attività estrattive, minerarie, cantieri dismessi e tutti quegli usi del suolo che hanno compromesso la sua funzionalità ambientale, agraria e paesaggistica. La disponibilità di suolo fertile per la realizzazione di opere di ripristino delle superfici agrarie perdute mette a disposizione uno strumento per realizzare opere che, senza questa tecnologia, non possono essere realizzate a causa della mancanza della materia prima.
La produzione di suolo mediante la conversione dei sedimenti consente l'avanzamento del modello di economia circolare realizzando un nuovo concetto che può essere definito di "economia co-generativa" in quanto con l'impiego dei sedimenti per la produzione di Antroposuoli si realizza l'immissione di una risorsa non rinnovabile quale è il suolo.

Bibliografia

Stahel W.R., Reday G., 1976. The potential for substituting manpower for energy. Ginevra: Battelle Geneva Research Centre

Stahel, W.R., 2016. The circular economy. Nature 531 (7595), 435–438

Manfredi P., Cassinari C., M. Trevisan M. The reconstitution pedotechnique: Applications Environmental Technology & Innovation Volume 25, February 2022.

Fonseca R., Barriga F.J.A.S., Fyfe W.S. Reversing desertification by using dam reservoir sediments as agriculture soils International Union of Geological Sciences Episode Journal of Intenational Geoscience 1998

Filippo Re *Dei letami e delle altre sostanze adoperate in Italia per migliorare i terreni e del come profittarne* - Mira, 1810

Fonseca R.., F. Barriga, W.S. Fyfed Dam Reservoir Sediments as Fertilizers and Artificial Soils. Case Studies from Portugal and Brazil 2003

Capra G.F. Lake-dredged material (LDM) in pedotechnique for the restoration of Mediterranean soils affected by erosion/entisolization processes (2015)

B.B. Braga *et al.* Biomass production and antioxidative enzyme activities of sunflower plants growing in substrates containing sediment from a tropical reservoir J. Agric. Sci. (2017)

Kiani M., P. Tammeorg , J. Niemistö , A. Simojoki , O. Tammeorg Internal phosphorus loading in a small shallow Lake: Response after sediment removal Science of The Total Environment Volume 725, 10 July 2020

Renella G., 2021. "Recycling and Reuse of Sediments in Agriculture: Where Is the Problem?," Sustainability, MDPI, vol. 13(4), pages 1-12, February

Laakso J., Risto Uusitalo, Markku Yli-Halla Phosphorus speciation in agricultural catchment soils and in fresh and dried sediments of five constructed wetlands Geoderma 271 (2016) 18 – 26

Laakso J. Tom Jilbert, Timo Saarinen Sedimentary phosphorus burial in three contrasting boreal lakes in Finland. Limnology 2023

Canet R., Chaves C, Pomares F, Albiach R Agricultural use of sediments from the Albufera Lake (eastern Spain); Agriculture, Ecosystems & Environment Volume 95, Issue 1, April 2003, 29-36.

Martin Leue, F. Lang Recycling soil nutrients by using channel deposits as fertilizers? Nutrient Cycling in Agroecosystems; Volume 93, 75–88, (2012)

Manfredi P. La ricostituzione: esperienze e sviluppi della pedotecnica - Soil Conservation and Environmental Protection (Imola, Italy) September 6-10, 2021

Rossi M., Manfredi P., Cassinari C. Pedological approach to the study of reconstituted soils - *SOIL AND WATER HEALTH* Workshop 4-6 July/Luglio 2023 -Palazzo Sersanti–Imola

Manfredi P., Cassinari C., Tassi D., Trevisan M. *Comparison between production data of corn grown in natural and reconstituited soils* - Biochars, Composts and Digestates. Production, Characterization, Regulation,

Marketing, Uses and Environmental Impact" (BCD 2013), 17---20 October 2013 Bari, Italy.

Giupponi L., Manfredi P., Cassinari C. Application of the floristic-vegetational indexes system for the evaluation of the environmental quality of a semi-natural area of the Po Valley (Piacenza, Italy); Plant Sociology, Vol. 50, No. 2, December 2013, pp. 47-56.

Manfredi P., Salvi R., Cassinari C., Bosoni A., Trevisan M. Terre ricostituite nella progettazione ed esecuzione di coperture a verde in una ex discarica nel piacentino, secondo la norma UNI 11235 Workshop World Soil Day 2014

Manfredi P, Cassinari C., Salvi R., Baffi C, Fricano G, Trevisan M Parametri chimici e vegetazione spontanea in parcelle di suoli naturali e ricostituiti: primo anno di osservazioni *Workshop World Soil Day 2014, Alghero 5-6 Dicembre.*

Fazio G.I. Applicazione della tecnologia di ricostituzione dei suoli sui fanghi di dragaggio - Caso di studio "Diga Rosamarina" Relatore: Prof.ssa Livia Vittori Antisari Anno Accademico 2018-2019 Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Corso laurea Magistrale in Progettazione e Gestione degli Ecosistemi Agro-territoriali forestali e del paesaggio.

Devincenzi L. Progetto di riqualificazione ambientale dello "Scolo Dosolo" Relatore Prof.ssa Livia Vittori Antisari Anno Accademico 2017-2018 Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Corso laurea Magistrale in Progettazione e Gestione degli Ecosistemi Agro-territoriali forestali e del paesaggio.

Cassinari C., Manfredi P., Trevisan M. Sediments accumulation in Dams: dredging sediments can become raw materials to produce new soils through reconstitution. Preliminary feasibility trials *La Salute del Suolo e delle Acque, Giornate Scientifiche e Culturali di Imola, Palazzo Sersanti 4-6 luglio 202*

Cassinari C., Manfredi P. Sediments accumulation in Dams, part II: dredging sediments can become raw materials to produce new soils through reconstitution. Field trials FROM THE FLOODS IMPACT TO ALLUVIAL SOILS RECLAMATION*, Giornate Scientifiche e Culturali di Imola, Palazzo Sersanti 2-4 luglio 2024*

6 Ripascimento artificiale delle coste

Il ripascimento artificiale delle coste consiste nel portare sedimenti per creare nuove spiagge o per ricostituire quelle soggette a erosione. Tale pratica permette di difendere dalle inondazioni le strutture e infrastrutture poste dietro le spiagge e di ricostituire l'ambiente costiero naturale con i suoi servizi ecosistemici.
Nel caso delle spiagge esistenti, le caratteristiche granulometriche, mineralogiche e colorimetriche dei sedimenti, oltre ovviamente alla mancanza di agenti inquinanti, rappresentano elementi di fondamentale importanza ed è preferibile che siano più simili possibile a quelli del litorale in esame. Più in generale, nel caso di costruzione di spiagge artificiali, granulometria e mineralogia sono determinanti per poter progettare gli interventi sulla base di modelli morfodinamici che forniscono previsioni sull'esito dell'intervento. In Tabella10 è riportato lo stato dei litorali italiani in termini di lunghezza e percentuali di spiagge in erosione.

Stato dei litorali italiani

Regione	Lunghezza totale [km]	Coste alte e aree portuali [km]	Coste basse [km]	Tratti in erosione [km]	% spiagge in erosione
Liguria	350	256	94	31	33,0
Toscana	442	243	200	73	36,3
Lazio	290	74	216	117	54,2
Campania	480	256	224	95	42,4
Calabria	736	44	692	300	43,4
Sicilia	1623	506	1117	438	39,2
Sardegna	1897	1438	459	165	35,9
Basilicata	68	32	36	28	77,8
Puglia	865	563	302	195	64,6
Molise	36	1	35	19	54,0
Abruzzo	125	26	99	60	60,5
Marche	172	28	144	78	54,2
Emilia Romagna	130	0	130	32	24,6
Veneto	140	0	140	25	17,9
Friuli-Venezia Giulia	111	35	76	10	13,2
Italia	7466	3515	3951	1657	41,9

Tabella 9 – Lo stato dei litorali italiani: fonte GNRAC, Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, pubblicato sulla rivista Studi Costieri, Vol. 10, 2006, www.gnrac.it

L'ambiente costiero è prevalentemente caratterizzato da due tipologie di coste, le coste alte formate da pareti rocciose più o meno dure e da coste basse formate da spiagge sabbiose o ghiaiose più o meno ampie. Sotto l'azione persistente dei moti ondosi, le coste alte e rocciose evolvono in scale temporali di centinaia o migliaia di anni mentre le spiagge hanno una morfodinamica molto più accelerata tanto che possono arretrare o avanzare di molti metri nell'arco di una mareggiata della durata della decina di ore.
Le differenti scale temporali di evoluzione implicano differenti gradi di interazioni tra i processi naturali e le opere o le attività antropiche. Nel caso delle coste alte queste interazioni sono relativamente limitate mentre nel caso delle spiagge la loro elevata dinamicità impatta significativamente con gli interessi dell'uomo che ha da sempre utilizzato le aree costiere come sede di centri abitati, produttivi, infrastrutture strategiche. In questi casi le spiagge, oltre a garantire servizi ecologici fondamentali per l'ambiente, oppure essere la sede di servizi turistici, fungono anche da sistema naturale che protegge dalle inondazioni costiere e così evitano i danni alle strutture e infrastrutture retrostanti. La necessità di garantire la salvaguardia delle spiagge è quindi doppiamente motivata, ragione per cui studiare la loro dinamica le interconnessioni e le dipendenze tra vari sistemi naturali e antropici per operare correttamente la loro gestione è di fondamentale importanza.
Le spiagge sono prevalentemente alimentate dall'apporto dei sedimenti che provengono dai fiumi. I sedimenti giunti alle foci vengono poi distribuiti lungo la fascia costiera dall'azione delle correnti litoranee generate dai moti ondosi frangenti incidenti a costa. In condizione di parità tra l'apporto fluviale e il trasporto costiero si instaura un equilibrio dinamico delle spiagge caratterizzato da una loro larghezza mediamente costante attorno alla quale la larghezza effettiva oscilla di mareggiata in mareggiata. Sulle spiagge i sedimenti fini non sono stabili perché l'azione persistente dei moti ondosi e la relativa circolazione costiera indotta li tiene in sospensione allontanandoli da costa dove depositano su alti fondali.

6.1 Alterazione dell'equilibrio sedimentario

L'equilibrio dinamico può essere alterato o per modifiche dell'apporto fluviale o per modifiche della capacità di trasporto costiero. Se l'apporto fluviale è maggiore del trasporto costiero le spiagge si espandono e viceversa si erodono.
Quando l'apporto fluviale viene drasticamente interrotto come avviene per numerose cause, tra le quali e di interesse citare in questo lavoro la costruzione di dighe di sbarramento dei fiumi per la creazione dei bacini artificiali, in assenza di strutturali sistemi di bypass dei sedimenti, le spiagge iniziano un processo di persistente arretramento che inizia a manifestarsi prima nell'intorno delle foci dei fiumi per poi diffondersi via via più lontano in direzione litoranea.
L'alterazione del bilancio tra apporti sedimentari e trasporto litoraneo può essere anche una conseguenza dei cambiamenti climatici i cui segnali si manifestano in modo particolarmente evidente nell'alterazione delle dinamiche marino-costiere. L'incremento del livello medio del mare è un fatto non una previsione.
Le misure condotte fino ad oggi mostrano anche per il Mar Mediterraneo un incremento dell'ordine di grandezza del millimetro/anno in media sul periodo degli ultimi cento anni. Indagini più recenti che prendono in considerazione gli aumenti misurati del livello medio del mare negli ultimi anni mostrano un notevole aumento del tasso di innalzamento annuo che si attesta sui 3.5 millimetri anno e prevedono scenari futuri con incrementi medi annui anche dell'ordine del centimetro. Oltre all'eustatismo, numerose zone costiere del Mediterraneo sono soggette anche ad importanti fenomeni di subsidenza tanto che in questi casi l'aumento locale del livello medio relativo del mare nei prossimi anni può superare anche alcuni centimetri all'anno nei casi più critici (Vecchi et al., 2024).
Le spiagge hanno una pendenza di equilibrio che cresce al crescere della dimensione granulometrica dei sedimenti che le costituiscono ma in prima approssimazione possiamo considerala variabile tra 1:10 e 1:100. Il solo effetto dell'innalzamento relativo del livello medio del mare di qualche millimetro all'anno causa arretramenti della linea di riva che in una decina di anni variano da qualche metro a qualche decina di metri. Oltre all'aumento del livello del mare, i cambiamenti climatici determinano anche variazioni nella frequenza, intensità e direzione delle mareggiate i cui connotati sono ancora poco conosciuti e oggetto di correnti attività di ricerca (Simonetti et al., 2024) ma che certamente altereranno la capacità di trasporto sedimentario lungo i litorali per azione delle correnti formate dai moti ondosi frangenti e quindi anche questo effetto determina una ulteriore alterazione dell'equilibro tra apporto sedimentario dei fiumi e trasporto solido litoraneo.

6.2 Il ripascimento dei litorali come misura strategica per la protezione e l'ecologia dell'ambiente costiero

Nei casi di spiagge già oggi relativamente basse e in erosione dove non sarà comunque ritenuto accettabile lasciare avanzare ulteriormente il mare, per la presenza di urbanizzazioni o infrastrutture strategiche o aree naturali da difendere comunque, la protezione dalle inondazioni richiederà la costruzione di argini costieri e/o l'innalzamento di tutta la fascia costiera. In altri casi, dove le spiagge hanno ancora berma emerse relativamente alte ma comunque non sufficiente a garantire l'inondazione in occasione di eventi particolarmente intensi, un modo per garantire la protezione è quello di investire in massivi ripascimenti artificiali delle spiagge per guadagnar spazio verso il mare e ricostruire il sistema dunale così da controllare le inondazioni di territori retrostanti, naturali o urbani che siano. Le spiagge, oltre a costituire una difesa dalle inondazioni e dei danni relativi ai centri abitati o alle infrastrutture costiere, offrono anche fondamentali servizi ecologici ben noti e documentati come per esempio per la riproduzione delle tartarughe marine o dell'avifauna come il Fratino e proteggono l'ambiente retrodunale dell'ingressione del cuneo salino. Inoltre, i sedimenti che arrivano al mare svolgono un ruolo importante nel ciclo del carbonio e possono contribuire a mitigare l'aumento dell'anidride carbonica atmosferica. L'erosione delle rocce montuose, in particolare quelle calcaree, porta al rilascio di sedimenti ricchi di ioni di calcio che sequestrano l'anidride carbonica disciolta nell'acqua marina, formando sedimenti ricchi di carbonato di calcio. La frazione fine di questi sedimenti che hanno sequestrato anidride carbonica si disperde fino agli alti fondali dove una volta che si è deposita al fondo intrappola il carbonio per periodi geologici. La quantità di carbonio sequestrata in questo processo ovviamente dipende da vari fattori, come il tipo di rocce, il clima e l'attività biologica marina ed è sicuramente un processo molto lento rispetto alle emissioni di anidride carbonica causate dalle attività umane ma a scala geologica ha avuto un ruolo fondamentale nella formazione della atmosfera che ha permesso lo sviluppo della vita sulla terra (Asphaug, 2019).
Infine, le spiagge sono anche la sede di importanti attività economiche del settore del turismo balneare. In questo settore si stima che i soli servizi di spiaggia creino un valore aggiunto di circa 1 miliardo di euro all'anno (Nomisma, 2024). Tale valore aggiunto non sarebbe facilmente sostituibile da altri settori se dovesse venire a mancare nello scenario di totale scomparsa delle spiagge nei prossimi anni.

6.3 Necessità strategica di sedimenti per i ripascimenti e sinergia con il recupero della capacità d'invaso

Per gli specifici casi citati, i.e. agglomerati urbani locati in coste relativamente basse rispetto alle proiezioni del prossimo livello medio del mare, aree costiere di nursery per differenti nicchie ecologiche, coste basse soggette a ingressione del cuneo salino, spiagge a servizio del turismo balneare, non c'è alternativa per la difesa dei litorali, all'uso massivo di sedimenti per la costruzione strategica di argini costieri o per rialzare la quota dell'intera fascia costiera o per il ripascimento artificiale di spiagge ormai erose o anche costruire ampie spiagge artificiali come misure di adattamento al cambiamento climatico anche la dove queste non fossero già state presenti.
I sedimenti necessari possono essere cercati in siti marini o nell'entroterra. Quando possibile si dovrebbe evitare di alterare un ambiente naturale per prelevare i sedimenti a favore di un altro ambiente, come nel caso di cave marine o terrestri dove i sedimenti presenti non creno problemi e offrono servizi ecologici a differenti comunità. Si dovrebbero selezionare quei siti di prelievo presso i quali gli stock sedimentari creano un problema così da lavorare in sinergia con l'utilità che invece questi avrebbero per i ripascimenti. Il caso dei sedimenti accumulati nei bacini artificiali è esemplare. È l'eccesso dei sedimenti nei bacini che crea il problema della perdita della capacità di invaso mentre è la mancanza di questi che crea il problema dell'erosione de litorali. È urgente sbloccare l'enorme potenziale di sedimenti accumulati nei bacini artificiali da destinare prioritariamente alla difesa dei litorali presso i quali questi sedimenti sarebbero naturalmente arrivati se gli sbarramenti costruiti dall'uomo sui fiumi non li avessero trattenuti.
La soluzione da preferire è quella basata sulla natura, ovvero riattivare il trasporto solido ad opera del fiume mediante l'approntamento di strutturali sistemi di bypass dei sedimenti sotto gli sbarramenti. In alternativa si può operare con i dragaggi a bacino pieno ma in questo caso occorre sostituirsi alla natura per:
1) selezionare dal volume dragato i sedimenti utili al ripascimento dei litorali
2) trasportarli i sedimenti selezionati fino ai litorali.
Il lettore interessato ad una breve presentazione degli aspetti tecnici che caratterizzano il progetto di un ripascimento e rimandato alla pubblicazione Cappietti et. al 2025a.

Dopo circa cento anni dalla costruzione dei primi grandi bacini, quasi sempre a servizio di impianti idroelettrici, la maggior parte di questi soffre di importanti problemi di interrimento. Il tasso medio annuale di interrimento è variabile ma in prima approssimazione anche considerandolo dell'ordine di grandezza dell'1% all'anno e tenuto conto che l'età media delle grandi dighe e di diverse decine di anni allora è possibile affermare che entro poche ulteriori decine di anni la maggior parte della capacità di invaso sarà perduta se non si interviene con interventi per il recupero.
Questi sedimenti intrappolati nei bacini sarebbero arrivati naturalmente alle foci e da qui sarebbero stati ridistribuiti ad opera delle correnti litoranee sulle spiagge delle relative unità fisiografiche. L'interruzione di questa alimentazione di sedimenti per l'ambiente costiero ha sicuramente contribuito all'erosione dei litorali delle unità fisiografiche tributarie. In Italia la lunghezza delle spiagge in erosione è stimata dell'ordine di grandezza di 1000 km sul totale di circa 7.000 km di coste e l'arretramento medio dell'ordine di 1 m/anno. Non mancano casi di erosione con punte anche di 10 m/anno nell'arco degli ultimi cento anni come la costa in destra idraulica della foce del fiume Arno dove si misura un arretramento di quasi 1400 m negli ultimi 130 anni circa (GNRAC, 2006).
È dunque certa la necessità di enormi quantità di sedimenti per sostenere la gestione strategica delle aree costiere e, d'altra parte, è altrettanto certa la contemporanea disponibilità di enormi quantità di sedimenti trattenuti nei bacini artificiali.
La frazione limo argillosa dei sedimenti nei bacini non è utile al ripascimento dei litorali ma, d'altra parte, abbiamo visto che potrebbe essere valorizzabile nel settore industriale se le caratteristiche chimico fisiche soddisfano quanto richiesto per la produzione cementi, laterizi o piastrelle. Una ipotetica catena produttiva basata sul dragaggio dei serbatoi e la separazione degli inerti potrebbe valorizzare le frazioni fini sui settori industriali e quelle più grossolane per il ripascimento dei litorali.
L'eliminazione di limi e argille per preparare un volume di sedimenti con un fuso granulometrico compatibile per il ripascimento di una determinata spiaggia necessita di tempistiche ed è molto probabile che non si riesca a conciliare i tempi tra dragaggio e lavorazione del prodotto con l'immediato conferimento al ripascimento perché possono intervenire numerose problematiche, per esempio meteo o amministrative, che disallineano i tempi delle due attività (i.e. preparazione dei volumi necessari e conferimento alla spiaggia in oggetto).
Si pone quindi il problema di dover individuare grandi aree di lavorazione e stoccaggio temporaneo degli enormi volumi prodotti dal dragaggio in attesa di poterli trasportare al ripascimento di spiagge. Considerando che il volume necessario per un ripascimento strutturale, i.e. che duri una decina di anni almeno, è dell'ordine di grandezza di almeno 100 metri cubi per ogni metro lineare di costa e che i tratti costieri sono dell'ordine di lunghezza del chilometro, i volumi da gestire risultano almeno dell'ordine di grandezza del centinaio di migliaia di metri cubi a intervento.
Le aree di stoccaggio temporaneo di questi volumi dovrebbero essere individuate e autorizzate in via programmatica in prossimità dei bacini da dragare e delle relative coste da ripascere, mediante appositi piani redatti dalle amministrazioni competenti.

Evidentemente, se da un punto di vista di sinergia tra l'obiettivo di riguadagnare volume invasabile sui bacini artificiali interriti e quello di difendere i litorali mediante il ripascimento è evidente il vantaggio di unire i due interventi in un unico intervento sistemico è altrettanto evidente che per l'effettiva realizzabilità di questa prospettiva strategica sia necessario garantire la sostenibilità dell'intero ciclo economico.

Tra le voci di costo quelle che maggiormente incidono sono i costi di lavorazione del sedimento dragato per preparare materiale idoneo al ripascimento e i costi di trasporto. L'economia dell'intero processo migliorerebbe se si lavorassero grandi quantità di sedimenti potendo preparare materiali idonei per differenti riusi, e.g. nel settore produttivo che può valorizzare la frazione fine e in quello del ripascimento dei litorali che può valorizzare la frazione medio-grossolana. Simili impianti dovrebbero necessariamente essere di riferimento per il territorio interregionale che sovrintende le unità fisiografiche costiere e a tal fine è necessario che le normative e il processo amministrativo sia uniformato.

6.3 Ipotesi di intervento pilota in Toscana

I sedimenti necessari per il ripascimento dei litorali nella maggior parte delle regioni costiere italiane provengono da cave terrestri che, non raramente, sono distanti decine e a volte centinaia di chilometri dal litorale in esame. Per esempio, in Toscana gli ultimi interventi di ripascimento dei litorali sono stati realizzati attingendo da cave terresti talvolta anche localizzate sul bacino del fiume Po e al costo fino ad oltre le 50 euro

e metrocubo per conferimento al sito, stesa e spianamento (Tabella 10). Nei casi più fortunati di altre regioni italiane, per esempio in Emilia-Romagna, è possibile ricorrere a cave marine prossime alle spiagge da ripascere. In entrambi i casi, il prelievo di sedimenti da un ambiente e il conferimento ad un altro potrebbe alterare i due rispettivi ecosistemi e, se questi sono molto differenti, l'ecologia di quello di conferimento può risentirne significativamente. Per esempio, ripascere una spiaggia chiara con sedimenti scuri o una spiaggia di materiale medio-grossolano con materiale medio-fino, influisce sul servizio ecosistemico offerto dalla spiaggia per la deposizione delle uova delle tartarughe marine. Nel primo caso, l'eccesso di calore trattenuto dai sedimenti scuri altera il processo di incubazione delle uova e nel secondo caso l'effetto di compattazione indotto dai sedimenti fini nella perta non raggiunta dall'azione d'onda potrebbero rendere impraticabile la costruzione del nido.

Tabella 10: Esempi di recenti interventi di ripascimento dei litorali toscani e relativi costi attualizzati al 2026 considerando sommariamente il tasso medio di inflazione negli anni successivi alla data dell'intervento. Dati originali, fonte: START (Sistema Telematico Acquisti Regionale della Toscana) e documenti online di pubblico accesso dei Genio Civile della Regione Toscana.

Luogo Intervento	**Anno**	**Volume (m3)**	**Provenienza**	**Costo Attualizzato (€/m3)**	**Note Tecniche**
Massa (Ronchi/Poveromo)	2018	25.000	Fiume Po	**€ 46,00 – 52,00**	Fornitura via terra (camion). Il costo è salito causa carburante e logistica.
Marina di Carrara	2021	15.000	Cave Marmo/Locali	**€ 34,00 – 38,00**	Materiale granulare di recupero, stesa e profilatura meccanica.
Piombino (Sterpaia)	2024	12.000	Cave Terrestri	**€ 35,00 – 42,00**	Prezzi recentissimi già influenzati dai nuovi prezzari regionali.
Litorale Apuano (Lotto 4)	2016	40.000	Mix Fiume Po / Cave	**€ 42,00 – 48,00**	Intervento strutturale pesante con trasporto su gomma.
San Vincenzo	2022	8.000	Cave Selezionate	**€ 38,00 – 44,00**	Alta specificità granulometrica per resilienza costiera.

L'alternativa di attingere, quando presenti, dagli invasi realizzati con sbarramenti artificiali che hanno trattenuto quei sedimenti che sarebbero arrivati naturalmente alla costa in esame non viene normalmente presa in considerazione. Premesso che, la miglior pratica da promuovere dovrebbe essere quella di veicolare sotto gli sbarramenti i sedimenti per lasciarli trasportare e selezionale all'ambiente fluviale fino al naturale conferimento a costa, un'alternativa potrebbe essere quella di prelevarli, selezionarli e conferirli via strada o ferrovia quando presente. Nonostante questa alternativa di usare i sedimenti stoccati negli invasi sia sinergica per il raggiungimento dei tre seguenti obiettivi strategici:

i) il mantenimento del volume di invaso
ii) il reperimento dei volumi necessari al ripascimento dei litorali,
iii) la preservazione dell'ecologia naturale della spiaggia, poiché utilizza i sedimenti che naturalmente vi sarebbero comunque arrivati,

essa non è inquadrata in un altrettanto sinergico e strategico corpo normativo. Tale mancanza, determina di fatto un oggettivo ostacolo alla sua attuazione sistematica come sarebbe auspicabile.

Infatti, per l'attuazione di questa azione strategica è necessario soddisfare prescrizioni sparse all'interno di numerose differenti fonti normative di livello nazionale che, intervenendo a varo titolo, si sono stratificate negli anni, i.e. solo per citarne alcuni: D.lgs. 152/2006, D.M. 12 ottobre 2022, n. 205, D.M. 15 luglio 2016, n. 173, DPR n. 120/2017, D.M. 16/12/2025. Tale parcellizzazione di prescrizioni in un quadro troppo aspecifico e complesso ha determinato difficoltà di interpretazione al punto che l'esito della traduzione nel processo amministrativo è stato la creazione di differenti percorsi autorizzativi da regione a regione e non raramente differenti anche all'interno della stessa regione nel passaggio ai differenti geni civili competenti. Non è questa la sede nella quale questo quadro amministrativo può essere approfondito ma è certo la sede nella quale si può e si deve auspicare una presa d'atto del legislatore e delle amministrazioni regionali che se condividono la necessità strategica di mantenere il volume di invaso e la protezione dell'ambiente costiero, anche considerando gli scenari dei cambiamenti climatici, siccità, alluvioni, inondazioni e il valore della produzione idroelettrica per fronteggiare le crisi ambientali ed energetiche, allora è urgente un nuovo strumento normativo nazionale specifico e la cui traduzione nella attuazione amministrativa dei territori regionali sia semplificata e velocizzata.

Al fine di valutare anche alcuni aspetti economici di queste potenziale azione strategica, nella parte rimanente di questo breve capitolo dedicato al riuso dei sedimenti accumulati negli invasi ai fini del ripascimento dei litorali, viene svolto un semplice esercizio in cui si ipotizza una realizzazione in Toscana. Si ipotizza di realizzare un piccolo ripascimento sperimentale su un tratto di costa lungo 1 km nell'intorno alla foce del fiume Morto Nuovo sulla costa del Gombo nella tenuta di San Rossore (nella provincia di Pisa tra la foce del fiume Serchio a Nord e del fiume Arno a Sud) mediante il prelievo dei sedimenti accumulati da un invaso sul Serchio, la selezione di un volume di sedimenti idonei pari a 20.000 metri cubi, il trasporto via gomma e lo stendimento a costa. Evidentemente, si sceglie di ipotizzare un simile piccolo intervento ritenendolo preferibile al fine di promuovere un'effettiva applicazione sperimentale volta ad individuare i colli di bottiglia normativi e del processo amministrativo per poi proporre le necessaria modifiche al quadro legislativo volte a promuovere l'applicazione di questa misura strategica.

Il bacino del fiume Serchio e dell'allacciato Lima è intensamente sfruttato per la produzione idroelettrica. Fin dai primi del 1900 si costruirono i primi impianti con sbarramento e derivazione. Attualmente si contano 9 grandi dighe e 2 sbarramenti nel bacino del Serchio, altre 3 grandi dighe nell'allacciato Lima e 13 centrali idroelettriche relativamente grandi, oltre ad altre 20 di piccole dimensioni. La capacità totale utile di invaso originaria è quasi 50 milioni di metri cubi. La potenza totale efficiente è pari a quasi 250 MW e la produzione media annua è pari a circa 500 GWh. Dopo più di cento anni dalla costruzione delle prime dighe (e.g. Corfino nel 1914, Gangheri nel 1921, Pontecosi nel 1924), i relativi invasi sono parzialmente interriti e il volume totale dei sedimenti trattenuti è dell'ordine della decina di milioni di metri cubi. Il Serchio sfocia a Marina di Vecchiano in Provincia di Pisa su una costa sabbiosa e segna il confine del parco naturale di Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli. Bocca di Serchio, è una delle zone costiere più selvagge e integre della Toscana caratterizzata da dune costiere e una fitta vegetazione retrodunale ed ha un rilevante valore ambientale. Poco più a Sud, sulla stessa unità fisiografica costiera sfocia anche il fiume Arno che ha un bacino imbrifero circa cinque volte più grande di quello del Serchio e sul quale sono presenti le tre grandi dighe di Levane e La Penna in provincia di Arezzo e Bilancino sul Sieve in provincia di Firenze.

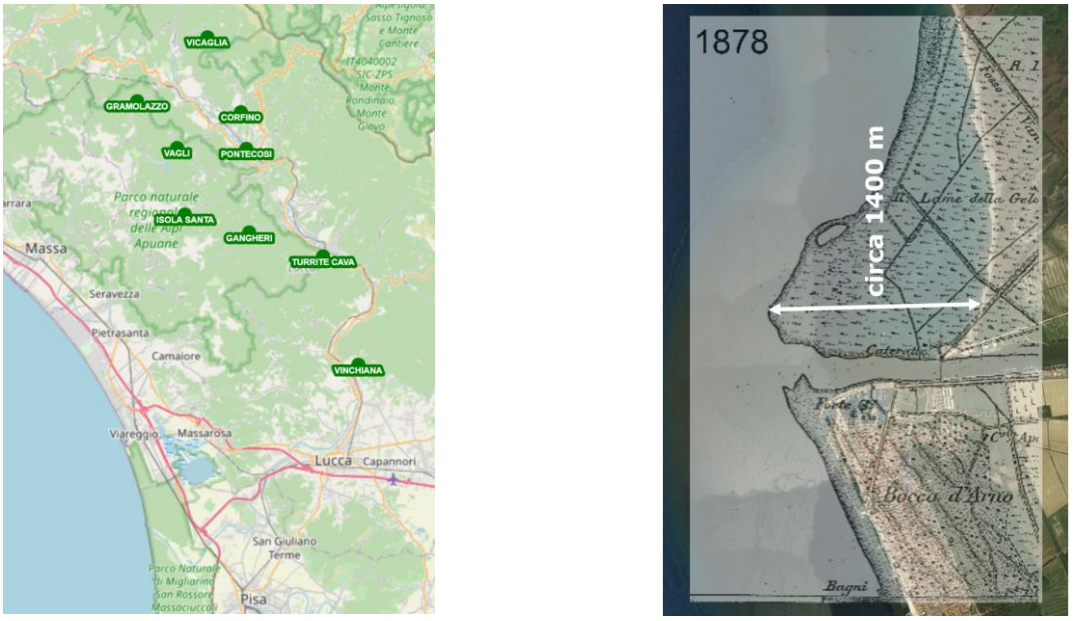


Figura 25 - Localizzazione delle 9 grandi dighe sul bacino imbrifero del fiume Serchio in Toscana (a sinistra); costa alla foce del fiume Arno e visualizzazione dell'erosione per sovrapposizione di immagini del 1878 (rilievo IGM) e del 2025 (fonde Google maps).

La spiaggia da ripascere è caratterizzata da sabbie medie con un D_{50} approssimativamente pari a 0.25mm. Il clima meteomarino della costa in esame è fortemente caratterizzato da un settore di traversia principale centrato sul Libeccio dal quale provengono le mareggiate più frequenti e più intense. L'azione dei moti ondosi frangenti induce una circolazione litoranea con correnti dirette prevalentemente da Sud verso Nord e un relativo trasporto di sedimenti netto che è stimato dell'ordine di alcune decine di miglia di metricubi ogni anno. In mancanza degli input sedimentari dei fiumi Anno e Serchio questo volume di sedimenti non viene reintegrato nella fascia costiera e tale deficit determina l'erosine..

Fatto sta che, da fine '800 questa costa è soggetta ad una strutturale tendenza erosiva che ha determinato l'impressionante arretramento di circa 1400 metri in riva destra della foce dell'Arno e questa si estende a Nord fino ad oltre la foce del Serchio determinando la scomparsa di molto territorio del parco di Migliarino San Rossore e Massaciuccoli.

A Sud della foce dell'Arno, la presenza dell'abitato di Marina di Pisa, sorto prima della completa erosione delle spiagge al tempo larghe un centinaio di metri, si imposero opere costiere per la difesa dalle inondazioni. Marina di Pisa fu difesa con opere rigide a scogliera, sia radenti la strada litoranea che scogliere distaccate. Il sistema di protezione costruito tra la prima e la seconda metà del 1900 ha stabilizzato la costa, bloccando l'arretramento e quindi salvando l'abitato ma l'erosione è continuata approfondendo i fondali che al piede lato mare delle scogliere oggi arrivano anche alla profondità di 9 m là dove erano originariamente di 4m. Si stima la perdita di oltre 50 milioni di metricubi di sabbia, ad oggi, dalla fascia costiera nel solo tratto intorno della foce dell'Arno e quella del Serchio.

Attualmente, l'erosione costiera sta proseguendo, se pur con tassi annuali minori, e orami si rischia che l'azione delle mareggiate arrivi a colpire anche le strutture del parco come la Villa del Gombo nella Tenuta di San Rossore, un gioiello dell'architettura contemporanea costruita sulla tenuta già di proprietà dei Savoia, passata poi dal 1946 alla Presidenza della Repubblica che costruì la villa e nel 1999 la donò alla Regione Toscana.

In generale, le cause dell'insufficiente input sedimentario fluviale sono numerose, tra le quali: il ridotto apporto dei sedimenti ai fiumi dovuto alla cementificazione dei territori, alla riforestazione dovuta all'abbandono delle campagne, il prelievo di inerti per il settore delle costruzioni (per fortuna oggi fortemente ridotto), la stabilizzazione dei versanti per la difesa dalle frane e, infine, le opere che trattengono i sedimenti in alveo come briglie e traverse per il riequilibrio dei fiumi o la costruzione di dighe per la costruzione di invasi come quelli al servizio degli impianti idroelettrici, comprensori irrigui o per la laminazione delle piene.

Nel caso in esame è ovvio che i sedimenti trattenuti negli invasi del sistema Serchio, stimati nell'ordine della decina di milioni di metricubi, se fossero arrivati nella costa avrebbero contribuito all'attenuazione della forte erosione registrata negli ultimi cento anni. Più in generale, qualsiasi ipotesi di masterplan finalizzato a gestire l'erosione dei litorali che prevedesse i ripascimenti come misura prioritaria per la lotta all'erosione nel quadro dei cambiamenti climatici e nel più generale obiettivo di riqualificazione dei servizi ecologici dell'ambiente costiero dovrebbe anche preoccuparsi della individuazione degli stock sedimentari necessari. In questa prospettiva, il caso Toscano è esemplare per la mancanza di altre fonti di sedimenti marini o terresti e per l'abbondanza di sedimenti accumulati negli invasi del sistema Serchio. Liberare gli invasi potrebbe essere l'unica alternativa sostenibile per disporre di sedimenti necessari per la protezione costiera e per recuperare il volume di invaso necessario per mantenere e continuare a operare con l'importante sistema idroelettrico.

Tra tutti gli invasi idroelettrici nel bacino del fiume Serchio, quello di Pontecosi è uno dei più vecchi. Lo sbarramento fu costruito nel 1924 il volume di invaso di originale di circa 3 milioni di metricubi si è ridotto attestandosi nel 2021 a meno di 1 milione di metri cubi (DICEA 2021). I circa 2 milioni di metri cubi di sedimenti accumulati in circa 100 anni indicano un trasporto fluviale, alla sezione di Pontecosi, di almeno 20.000 metri cubi ogni anno. Molti sedimenti, soprattutto quelli relativamente grossolani, si sono accumulati nella parte apicale del bacino dove si è costituita un'isola affiorante. Le analisi granulometriche fatte su campioni estratti da carote lunghe 2 m e distribuite nell'intorno di questo affioramento (si veda la Tabella 11 e la Figura 26) indicano una percentuale media di sabbia pari al 44%.

Tabella 11 - Analisi granulometriche. Valori medi su tutti i campioni prelevati dalle carote e relativi a differenti profondità (DICEA 2021)

Carota	C1	C2	C3	C4	C5
% Ghiaia	6	0	0	0	0
% Sabbia	50	41	52	37	39
% Fraz. fine	44	59	48	63	61

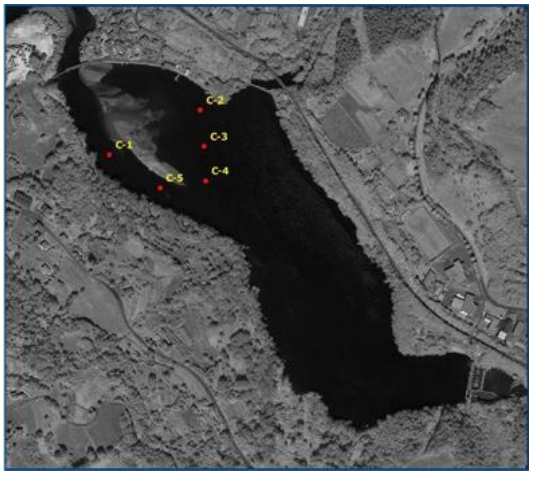


Figura 26: Posizione delle carote prelevate nell'invaso di Pontecosi (DICEA 2021)

In prima approssimazione si può quindi ipotizzare che per produrre 20.000 metri cubi di sabbia compatibile con la costa da ripascere (sabbia con D_{50} di circa 0.25 mm) sia necessario recuperare dall'invaso almeno 46.000 metri cubi di sedime. Recuperati i sedimenti sarà poi necessario lavorarli per separare ghiaia, sabbia e fine, conferire la sabbia alla spiaggia da ripascere e stenderla per il ripascimento. Ghiaia e frazione fine si ipotizza che possano essere riutilizzati in altri contesti, tra i quali quelli descritti in questo documento. La ghiaia in particolare potrebbe essere valorizzata ancora nel ripascimento die litorali in contesti specifici (Cappietti e al., 2025b).

Si ipotizzano tre alternative per il recupero di questo volume di sedimenti, delle quali due a bacino pieno e una a bacino vuoto e che l'area da dragare disti circa 500 metri dall'aria di bordo invaso dove depositare i sedimenti in attesa di essere successivamente lavorati:

- utilizzo di pontoni che montano pompe che calate sul fondale aspirano una miscela da acqua e sedimenti e la refluiscono su un'area di cantiere all'interno di una vasca di sedimentazione;
- utilizzo di pontoni che montano un escavatore con braccio sufficientemente lungo che accumula sedimenti che poi vengono depositati su un'area di cantiere;
- svuotatura dell'invaso e uso di escavatori. In questo caso ovviamente la svuotatura del bacino dovrebbe essere prevista più in generale per altri obiettivi oltre al solo obiettivo di recuperare una così ridotta quantità di sedimenti. Nel caso specifico l'invaso di Pontecosi è stato recentemente svuotato per necessari lavori di consolidamento della diga.

Per la stima dei costi relativi alle 3 citate ipotesi di lavoro viene utilizzato il prezziario ufficiale della Regione Toscana riferendosi all'ambito specifico della provincia di Lucca. Vengono quotate solo alcune delle principali voci di costo ben coscienti della somma approssimazione che tuttavia giustifichiamo idonea per l'obiettivo di una valutazione comparativa tra le tre alternative e per la valutazione relativa del costo in confronto a quello sostenuto da Regione Toscana per interventi simili ma basati su sedimenti provenienti da cave terrestri (vedi tabella 10). Nel prosieguo si stimano i costi per: 1) produrre i 46.000 metri cubi di sedimenti con le tre alternative di estrazione, 2) per separare i 20.000 metri cubi di sabbia, 3) per trasportare il 20.000 metri cubi e stenderli per il ripascimento della spiaggia alla foce del fiume Morto Nuovo; 4) i costi per progettazione direzione lavori e sicurezza e costi per analisi e rilievi

Si ipotizza che i lavori necessari alla produzione dei 20.000 metri cubi si sedimenti idonei al ripascimento possono durare al massimo 4 mesi (al netto del tempo eventualmente necessario per svuotare e riempire il

bacino). Si ipotizza cautelativamente che si riesca ad operare con i mezzi di cantiere per solo il 50% del tempo e che si possa lavorare per 8 ore al giorno escludendo i sabati e le domeniche. Con queste ipotesi è necessario produrre 129 metri cubi di sedime ogni ora per 44 giornate di lavoro.

Spese per la produzione di 46.000 metri cubi di sedimento e stoccaggio in area di cantiere a bordo invaso.

Nello scenario di utilizzo di pontoni e pompe aspiranti-refluenti, considerando che la frazione di sedimenti nella miscela sia pari a circa il 20%, che tra i sedimenti ci siano anche ghiaia e ciottoli fino a 100mm, e che la lunghezza della condotta sia al massimo 1 km (per evitare la necessità di utilizzo di stazioni di rilancio), si ipotizza di utilizzare due pompe da circa 350-400 metri cubi ora di portata e dotate di un disgregatore di sedimenti all'imbocco, di tipo idraulico o meccanico (es. modello Dragflow HY85). Si calcolano i seguenti costi:

- allestimento del cantiere e mobilitazione (area, trasporto eccezionale, varo e montaggio pontone condotte e pompe): 78.000 euro
- escavazione e pompaggio 670.000 euro (circa 15 euro a metro cubo comprensivo di utile di impresa spese generali e rischio professionale)
- oneri per la sicurezza 42.000 euro
- totale: 790.000 euro

È il metodo più efficiente se il materiale è molto fluido perché la pompa può lavorare in continuo, riducendo i tempi morti ma ha la criticità di richiede una gestione complessa delle acque di ritorno dalla vasca di sedimentazione.

Nello scenario di utilizzo di pontoni ed escavatori si ipotizzano pontoni autolivellanti del tipo spud barges (i.e. dotati di "gambe retrattili" che possono essere appoggiate al fondo durante le fasi in lavoro) ed un escavatore da 45-60 tonnellate (es. CAT 352 LRE) con bracci a tre sezioni che raggiunge una lunghezza di 25m, sufficiente per il caso in esame. Si calcona i seguenti costi:

1) allestimento del cantiere e mobilitazione (area, trasporto eccezionale, varo e montaggio pontone ed escavatore): 48.000 euro
2) Dragaggio meccanico in presenza di acqua da pontone 890.000 euro (circa 19,40 euro a metro cubo comprensivo di utile di impresa spese generali e rischio professionale)
3) Movimentazione dei sedimenti estratti fino all'area di deposito a bordo invaso: 180.000 euro (3.9 euro a metro cubo)
4) Oneri Sicurezza 42.000 euro
5) totale: 1.160.000 euro

È la soluzione più flessibile se il fondo dell'invaso presenta detriti ingombranti (tronchi, rocce) che bloccherebbero le pompe ma ha la criticità di essere costosa a causa del doppio passaggio (scavo su chiatta e scarico a riva).

Nello scenario che si possa lavorare ad invaso vuoto si ipotizza di utilizzare 2 escavatori da 25-30 tonnellate (uno nella zona di scarico e uno nella zona di cantiere), una flotta di circa 4 dumper articolati. Si calcolano i seguenti costi:

1) Allestimento di cantiere e mobilitazione: 50.000 euro
2) Scavo di materiali sciolti con mezzo meccanico: 221.000 euro (4,85 euro a metro cubo)
3) Carico su dumper: 55.000 euro (1,20 euro a metro cubo)

4) Trasporto a deposito entro 10 km: 112.000 euro 2.5 euro/metro cubo

5) Approntamento di piste e rampe 15.000 euro

6) Oneri per la sicurezza: 32.000 euro

7) totale: 495.000 euro

È l'opzione economicamente vincente (risparmio di circa € 800.000 rispetto al pontone con escavatore) ma dipende totalmente dalla possibilità tecnica di svuotare il bacino e dalla portanza del terreno per i dumper.

Spese per la produzione di 20.000 metri cubi di sabbia con le caratteristiche idonee al ripascimento lavorando i 46.000 metri cubi di sedimenti stoccati nell'area di cantiere

Si suppone di utilizzare una vagliatura meccanica a umido quella a secco sarebbe ostacolata dell'impaccamento delle reti ad opera della frazione fine e sabbia con D_{50} pari a circa 0.25 mm. È necessario quindi un impianto di lavaggio e riciclaggio sabbie (alimentazione, sfaldamento sabbie e limi con getto d'acqua, vaglio vibrante per rimuovere ciottoli e materiale organico, idrociclone per separare la sabbia, drenaggio). Si stimano i seguenti costi:

1) Alimentazione impianto e logistica 65.000 euro

2) Lavaggio e vagliatura: 390.000 euro (8,5 euro a metro cubo)

3) Oneri per la sicurezza: 25.000 euro

4) Totale 480.000 euro

Si ipotizza che la ghiaia e la frazione fine possano essere riutilizzati in altre applicazioni tra quelle citate in questo documento. Vale la pena aggiungere anche la ghiaia potrebbe essere valorizzata per le costruzioni di spiagge artificiali in paraggi ad alta energia per proteggere dalle inondazioni strutture e infrastrutture retrostanti (si veda per esempio Cappietti et. Al 2025b). In particolare, deve necessariamente essere trovata la soluzione per gestire la frazione fine perché se fosse necessario portarla a discarica allora i costi per questa sola necessità sarebbero insostenibili. Reimmetterla nel corso d'acqua diluendola in modo tale che si mantenga la torbidità a valori tollerabili in termini di ore e concentrazione potrebbe essere una opzione da valutare nell'attuale quadro legislativo, fatta salva la qualità chimica ed eco-tossicologica.

Trasporto della sabbia fino alla spiaggia in esame e stendimento per il ripascimento

La spiaggia in esame si trova alla foce del fiume Morto Nuovo nella costa del Gombo della tenuta di San Rossore (PI) che dista circa 80 km dall'invaso di Pontecosi dove si è immaginato di dragare e produrre i sedimenti necessari. Si ipotizza di trasportare i sedimenti in circa 60 giorni all'interno della finestra dei 4 mesi di lavoro ipotizzati. Considerando una sabbia bagnata dal peso di circa 1800 kg a metro cubo, si tratta di trasportare 36.000 tonnellate. Ipotizzando di utilizzare come mezzo di riferimento un mezzo d'opera a 4 assi con carico utile di 26 tonnellate, sono necessari 1385 viaggi. Ipotizzando 24 viaggi al giorno, per 58 giorni, e che per l'andata e il ritorno siano necessarie 4 ore, sono necessari 12 mezzi costantemente operativi o 6 mezzi su due turni. Si calcolano i seguenti costi:

1) Trasporto stradale (mezzo a 4 assi per 80 km): 594.000 euro (16.50 euro a tonnellata)

2) Oneri per le interferenze con il Parco di Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli: 12.000 euro

3) Totale 606.000 euro

Questi 20.000 metri cubi di sabbia simile a quella nativa e stesi su un tratto di spiaggia lungo 1000m (20 metri cubi su ogni metro di spiaggia) determinano un profilo di equilibrio di spiagge emersa e sommersa caratterizzato da un avanzamento della linea di riva di qualche metro (si veda Cappietti et al 2025a per dettagli

sul Progetto del ripascimento). Si ipotizza di allestire una area prossima alla spiaggia dove i camion possano scaricare, un escavatore da 20-25 tonnellate per il carico di 2 Dumper per il trasporto della sabbia lungo i 1000 metri di litorale e un bulldozer per la stesa finale secondo il progetto. Si calcolano i seguenti costi:

1) Allestimento area di scarico e altre opere provvisionali: 25.000 euro
2) Movimentazione e stesa meccanica: 110.000 euro (5.5 euro a metro cubo)
3) Maggiorazione del lavoro per area parco: 12.000 euro (0.6 euro a metro cubo)
4) Oneri sicurezza: 15.000 euro
5) Totale: 162.000 euro

Sintesi delle voci di costo e comparazione tra alternative

In tabella 12 si confrontano le tre differenti opzioni per l'escavazione/estrazione dei sedimenti dall'invaso considerando le voci di costo sopra esposte e comprendendo anche i costi per:

1) progettazione lavori, direzione lavori e sicurezza (10% sui lavori);
2) analisi e rilievi (50.000 euro)
3) imprevisti (10% sui lavori)

Tutti i valori sono calcolati sui 46.000 metri cubi totali escavati, con recupero di 20.000 metri cubi di sabbia trasportata per 80 km e stesa su 1 km di spiaggia.

Si nota che il costo totale varia tra i 104 euro a metro cubo di sabbia stesa a ripascimento se estratta dall'invaso vuoto con mezzi terrestri ai 121 euro a metro cubo o 143 euro a metro cubo se estratta a invaso pieno con pontone galleggiante che alloggia una pompa aspirante-refluente o un escavatore, rispettivamente.

Tale costo è maggiore del costo sostenuto per la fornitura e stesa di sedimenti per i ripascimenti eseguiti negli ultimi anni in Regione Toscana, pari a circa 50 euro a metro cubo quando fatti arrivare addirittura da case terrestri sul fiume Po lontane centinaia di km dalle coste toscane. Tale pratica ha una grossissima impronta di carbonio dovuta al trasporto su gomma e porta sedimenti da altri ecosistemi. Viceversa, l'uso dei sedimenti accumulati negli invasi relativamente vicini alle spiagge da ripascere e localizzati nei bacini imbriferi che naturalmente alimenterebbero le alimenterebbero ha numerosi vantaggi, quali:

1) minore impronta di carbonio legata al traporto su gomma
2) non altera la qualità della spiaggia perché utilizza le sabbie che avrebbero naturalmente ripasciuto le spiagge se non fossero state trattenute delle dighe
3) permette di recuperare volume di invaso e di mantenere una capacità utile sostenibile

Il vantaggio elencato al punto 3 è di grande interesse per i concessionari degli impianti idroelettrici che potrebbero inquadrare questa pratica nell'ambito dei progetti di gestione degli invasi al fine di mantenere la capacità utile di invaso sostenibile. In questo caso i costi di questa misura strategica per recuperare volume di invaso e ripascere le spiagge potrebbero essere suddivisi tra i concessionari dell'impianto e l'amministrazione regionale che realizza i ripascimenti. Nel caso in esame, se i costi fossero suddivisi al 50% allora il gestore dell'impianto e l'amministrazione regionale spenderebbero ciascuno circa 50 euro a metro cubo di sabbia stesa. Ovviamente va trovata la sinergia anche per la gestione della frazione fine per gli altri usi esplorati in questo documento.

Tabella 12 – Sintesi delle voci di costo e comparazione tra le tre differenti opzioni per escavazione / estrazioni dei sedimenti dall'invaso.

Voce di Spesa	Opzione A Pontone e Pompe	Opzione B Pontone e scavatore	Opzione C Mezzi terrestri ad Invaso vuoto
1. Escavazione / Estrazione	€ 790.000	€ 1.160.000	€ 495.000
2. Vagliatura e Selezione	€ 320.000	€ 320.000	€ 320.000
3. Trasporto (80 km – mezzi a 4 assi)	€ 689.600	€ 689.600	€ 689.600
4. Stesa in spiaggia	€ 180.000	€ 180.000	€ 180.000
5. Progettazione, DL e Sicurezza	€ 197.960	€ 234.960	€ 168.460
6. Analisi chimiche e Rilievi	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000
7. Imprevisti (10% sui lavori)	€ 197.960	€ 234.960	€ 168.460
COSTO TOTALE INTERVENTO	€ 2.425.520	€ 2.869.520	€ 2.071.520
Costo al metro cubo di sabbia stesa	€ 121	€ 143	€ 104

Bibliografia

Vecchi, A., Anzidei, M., Serpelloni, E., 2023. Sea level rise projections up to 2150 in the northern Mediterranean coasts. Environ. Res. Lett. 19 014050.

Simonetti, I. and Cappietti, L., 2024. Projected Trends in Wave Energy Potentials along the European Coasts and Implications for Wave Energy Exploitation (1976–2100). Journal of Marine Science and Engineering, 12(2), 239.

GNRAC – Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, 2006. Lo stato dei Litorali Italiani. Studi Costieri N.10, 2006, https://www.gnrac.it/it/rivista/10/dettaglio.

Asphaug, E., 2019. Quando la terra aveva due lune, Biblioteca Scientifica, 65. Adelphi.

NOMISMA, 2024. Gestione e Valorizzazione del demanio costiero: i modelli gestionali. Executive Summary. https://www.assoimmobiliare.it/wp-content/uploads/2023/04/Gestione-e-Valorizzazione-del-demanio-costiero_Executive-Summary_20_2_23.pdf, consultato in marzo 2025.

Cappietti L., Caruana R., Saccone, R., 2025a, Sedimenti Accumulati nei Bacini Artificiali, da problema a risorsa, L'ACQUA, 4, 2025.

Cappietti L., Esposito A., Simonetti I., Pedroncini A., Torretta S. 2025b, Spiagge artificiali in ghiaia per la difesa dalle inondazioni costiere e il caso di studio del litorale di Chiavari, Studi Costieri, Vol 32, p. 57 – 74.

DICEA – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze, 2020. Convenzione di ricerca tra DICEA-UNIFI ed Enel Green Power: Studio per il ripristino del ripascimento dei litorali per via fluviale tramite sistemi di bypass artificiale degli sbarramenti degli impianti idroelettrici, Responsabile Prof. Cappietti

7.0 **Ripascimento fluviale**

Il D.M. 205/2022 sottolinea l'importanza della restituzione dei sedimenti trattenuti a monte degli sbarramenti al corpo idrico di valle, a scopo di ripascimento, tramite operazioni di rilascio o di riutilizzo, soprattutto in quei corpi idrici in deficit sedimentario dei sedimenti grossolani. A tal proposito devono essere definite modalità, tempistiche e localizzazione degli eventuali interventi di restituzione del sedimento a valle dell'invaso previa verifica della non pericolosità e della coerenza con il Piano di Gestione dei sedimenti, con il Piano di gestione del rischio alluvioni e con il Piano di gestione del distretto idrografico, evidenziandone i vantaggi in termini di qualità idromorfologica. A tal fine è necessario definire i volumi e la curva granulometrica del sedimento, da restituire in base alle caratteristiche del corpo idrico di valle e alle sue alterazioni. Nel caso di eventuali interventi di ricollocazione del sedimento a monte o valle dell'invaso, le aree di deposito del materiale rimosso devono essere poste in condizioni di sicurezza idraulica sia per quanto riguarda la stabilità dei depositi, sia per quanto riguarda l'esposizione a fenomeni erosivi. Per tali operazioni sarebbe utile instaurare un proficuo scambio di informazioni con le Autorità competenti in materia idraulica relativamente ai tratti fluviali in deficit sedimentario o con necessità di ripristini/rinforzi delle sponde o del fondo d'alveo. Il Decreto prevede, inoltre, tra le finalità del Progetto di Gestione, il mantenimento o il ripristino della continuità del trasporto solido, sia fine che grossolano, a valle degli sbarramenti, tramite ad esempio operazioni di fluitazione (classica o controllata) o l'utilizzazione degli scarichi profondi in corrispondenza degli eventi caratterizzati da condizioni idrauliche favorevoli.

7.1 Esempio di ripascimento fluviale – Diga di Mignano

La diga di Mignano sbarra il torrente Arda in località denominata "Stretta di Mignano", circa 7 km a monte del nucleo abitato di Lugagnano Val d'Arda, in comune di Vernasca in provincia di Piacenza (Fig.25)

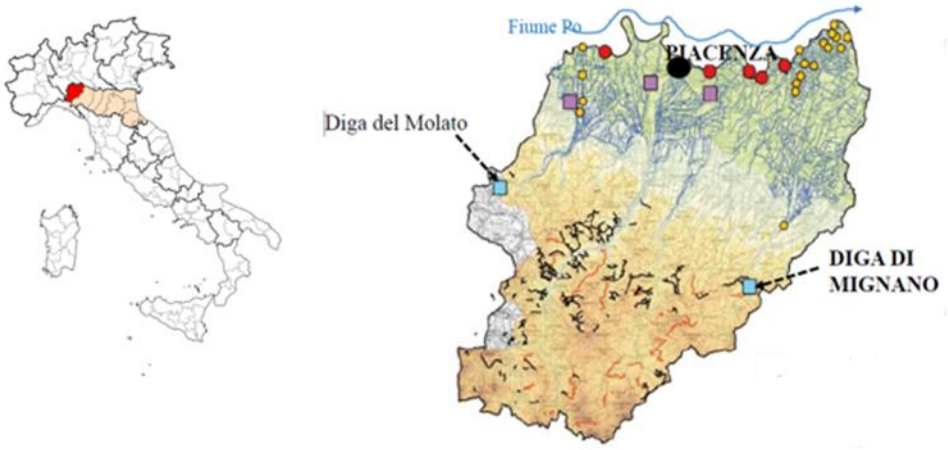


Figura 27

L'opera fu realizzata tra il 1926 e il 1934, anno in cui fu inaugurata alla presenza dell'allora Ministro Sottosegretario alla Bonifica il Senatore Arrigo Serpieri
La diga, tracimabile nella parte mediana, è del tipo a gravità massiccia e presenta in pianta una forma arcuata con raggio di curvatura di 500 m e sviluppo, misurato sull'asse del coronamento, di 341 m circa. Il coronamento è a quota 342,00 m s.m. (Fig.26)

Figura 28

La diga assolve oggi a funzioni irrigue e idropotabili, nonché, in virtù delle limitazioni imposte dall'allora Genio Civile di Piacenza nel 1969-1970, funge da presidio a salvaguardia della sicurezza idraulica dei territori di valle. Il volume di invaso massimo autorizzato è di quasi 10 milioni di mc e ha un bacino imbrifero direttamente sotteso di circa 84 kmq.
Dalla messa in funzione dell'impianto al 2020 è stato possibile osservare una perdita di volume a causa dell'interrimento del materiale proveniente naturalmente dal bacino di poco superiore a 2 milioni di mc, di cui 1,5 milioni di mc osservato negli ultimi 70 anni. Il tasso di interrimento si attesta circa al 10% del volume originario.
Dall'analisi e confronto delle ultime batimetrie condotte si è potuto stimare un apporto solido annuo di circa

25.000-30.000 mc di sedimento. Tali valori sono poi dipendenti dalle forzanti climatiche annue e in particolare dal regime pluviometrico e dall'intensità dei fenomeni di precipitazione che si verificano.
Tra il 2018 e il 2020 è stato redatto e approvato un progetto volto al "Recupero volume utile alla diga di Mignano mediante rimozione dei materiali decantati sul fondo dell'invaso e manutenzione straordinaria degli organi di scarico profondi (PC)" che prevedeva il recupero complessivo di circa 200.000 mc con due lotti diversi di intervento.

Il lotto A del progetto di recupero volume utile della diga di Mignano ha previsto, nel corso dell'anno 2022, l'escavazione meccanica di oltre 140.000 m^3 di materiale palabile sedimentato nella zona caudale dell'invaso e successivo ricollocamento in tre aree di deponia a protezione delle infrastrutture esistenti in un tratto distante tra i 6 e 10 km dall'area di estrazione (Figg.27,28,29).

Figura 29

Figura 30

Figura 31

Le deponie hanno riguardato esclusivamente aree demaniali di pertinenza fluviale del corpo idrico di valle che erano state soggette a fenomeni di erosione negli anni precedenti e nelle quali l'ente regionale competente aveva realizzato opere di difesa quali pennelli, burghe e scogliere. Il ripascimento delle sponde fluviali ha quindi creato un imbottimento con materiale "erodibile" a protezione delle opere di difesa esistenti e più in generale del tessuto infrastrutturale presente (strada provinciale, acquedotto, linee elettriche, metanodotto…) (Fig.30).

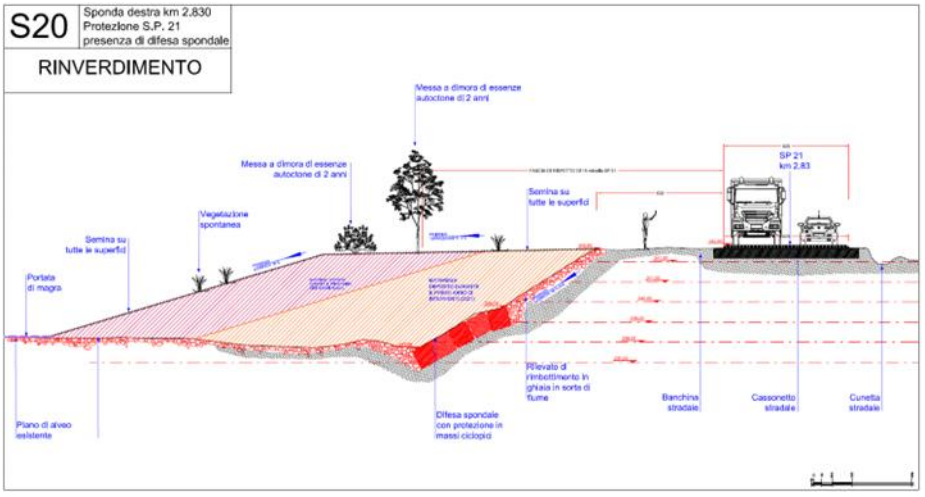


Figura 32

Il materiale scavato era stato preventivamente analizzato e classificato come non pericoloso ai sensi dell'art. 185 comma 3 del D.Lgs 152/06 e ss.mm.ii. e pertanto non rientranti nel campo di applicazione della Parte Quarta di tale decreto.

La definizione delle geometrie e della conformazione delle aree di deponia è stata valutata, in sede progettuale, al fine di non interferire con l'officiosità del corpo idrico e quindi tali da rendere compatibile il transito in sicurezza della piena con tempo di ritorno ducentennale (Figg.31,32).

Figura 33

Figura 34

La definizione delle geometrie e della conformazione delle aree di deponia è stata valutata, in sede progettuale, al fine di non incidere negativamente sul transito della piena duecentennale di riferimento.
Il trasporto dalle aree di escavazione ai siti di deponia è avvenuto su gomma mediante camion quattro assi che hanno compiuto circa 8.400 viaggi. Nella medesima giornata, sono stati utilizzati al massimo 7 camion contemporaneamente. Il numero di mezzi adoperati per il trasporto è stato calcolato in funzione dei tempi di carico, di transito e scarico al fine di ottimizzare la produttività degli escavatori limitando quanto più possibile i fermi macchina. La sistemazione del materiale nelle aree di deponia è stata eseguita mediante l'impiego di una ruspa al fine di ottenere le sagome di progetto (Figg. 33,34).

Figura 35

Figura 36

La gestione del contenuto di umidità nel terreno non ha rappresentato un limite in quanto il sedimento non subiva alcun trattamento. Nelle aree di escavazione si è comunque riscontrato un profilo ad umidità crescente lungo la profondità del terreno anche se le aree risultavano emerse anche già da qualche mese. Tale

comportamento è dovuto alla natura prevalentemente limosa del sedimento con tempi di drenaggio maggiori rispetto a una matrice ghiaiosa. Per quanto riguarda invece il fenomeno del rigonfiamento del materiale tra la condizione iniziale in sito e il materiale movimentato, si è misurato un aumento di volume di circa 7,5%.
In progetto erano previsti anche interventi di vegetalizzazione dei rilevati, semine e messe a dimora di piantine, ma, in virtù della spiccata predisposizione del materiale alla spontanea vegetalizzazione, non è risultato necessario procedere ad interventi di vegetalizzazione indotta.
In adempimento a quanto prescritto durante i lavori della conferenza di servizi di approvazione del progetto, al presente intervento è stato affiancato un programma di monitoraggio ambientale che ha previsto attività ante opera, durante tutta la durata dei lavori e per tre anni al termine dei medesimi. Il monitoraggio si è articolato su 3 stazioni di monitoraggio sul corpo idrico, di cui 1 a monte dell'invaso e 2 a valle, e 1 stazione di monitoraggio in invaso. In particolare:

- sulle stazioni sul corpo idrico, attività con cadenza semestrale per tutta la durata del monitoraggio, con campionamenti di tipo biologico e chimico a cui è stato affiancato un monitoraggio geomorfologico con drone delle stazioni di monitoraggio;

- sulla stazione in invaso è stata installata una sonda multiparametrica con registrazione in continuo dei principali parametri chimici dell'acqua a cui è stato affiancato un monitoraggio delle acque di invaso con cadenza bisettimanale durante i lavori e trimestrale nella fase di post-opera (Fig.35).

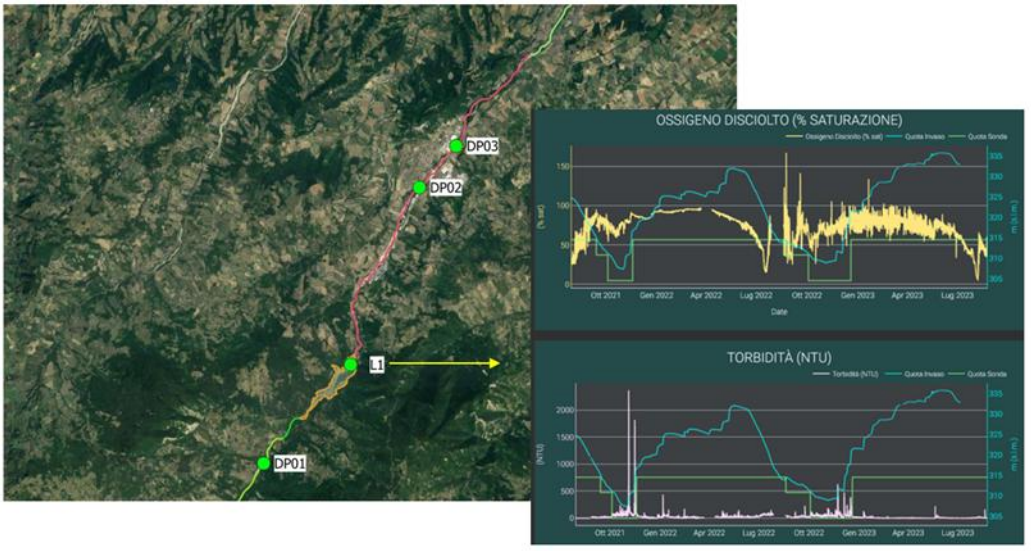


Figura 37

Oltre a tutto quanto sopra descritto, è stato eseguito un rilievo geomorfologico di tutta l'asta idraulica a valle della diga sia al termine dei lavori di deponia e sia dopo 3 anni dalla conclusione degli stessi al fine di valutare eventuali fenomeni locali di erosione.

8.0 **Riutilizzo dei sedimenti in aree estrattive**

Nel panorama normativo nazionale, già a partire dal D.M. 161/2012 e, attualmente, secondo il D.P.R. 120/2017, come modificato dal D.L. 39/2023, e le successive Linee Guida SNPA n° 54/2019, i sedimenti rimossi dagli invasi artificiali, che rispettano i requisiti stabiliti dalla norma stessa, possono essere riutilizzati come sottoprodotto (art. 184, D.Lgs. 152/06) e trovare impiego, ad esempio, tra gli altri annoverati dal Decreto, per opere di ripristino ambientale quali il riempimento dei vuoti di cava in aree estrattive dismesse o in fase di recupero o anche in processi produttivi, in sostituzione di materiali di cava stessi. Tale approccio non solo contribuisce alla riqualificazione del territorio, ma risolve anche in parte l'annoso problema dell'individuazione di aree dove riallocare i materiali derivanti dalla pulizia degli invasi artificiali, promuovendo una gestione più

efficiente delle risorse, in un'ottica di economia circolare, dove i materiali vengono riutilizzati e valorizzati.
In tale ambito, dal confronto con i proprietari di poli estrattivi sono emersi elementi di potenziale criticità a cui porre attenzione nella fase di pianificazione e progettazione delle attività:

- verifica della compatibilità dei sedimenti estratti dal bacino con le autorizzazioni del sito: il materiale può essere accettato se rispetta i requisiti fissati dal Piano di Coltivazione della cava;
- verifica della distanza tra il sito di scavo e il sito di riutilizzo: per distanze superiori ai 15÷20 km i tempi e gli oneri di trasporto aumentano in modo significativo, incidendo notevolmente sul costo dell'intera attività;
- verifica della compatibilità granulometrica: in caso di riutilizzo in sostituzione dei materiali di cava non possono essere accettati materiali che presentino più del 30% di frazione limoso-argillosa per garantire costi di lavorazione confrontabili a quelli normalmente sostenuti dall'impianto.

Come esempio di riutilizzo dei sedimenti in aree estrattive, di seguito sono descritte le attività di rimozione effettuate nei bacini di San Lazzaro e Tavernelle (PU) sul fiume Metauro. Le attività sono state eseguite nel 2013 e nel 2016, secondo la normativa di settore, sia nazionale che regionale, allora in vigore.
La diga di S. Lazzaro è ubicata nel territorio del Comune di Fossombrone (PU), mentre la diga di Tavernelle, ubicata circa 10 km più a valle, è localizzata nel territorio del Comune di Colli al Metauro (PU). Entrambi gli invasi sono stati ottenuti mediante lo sbarramento dell'alveo del fiume Metauro per la regolazione giornaliera delle acque del fiume per la produzione di energia elettrica rispettivamente nella centrale di San Lazzaro e di Tavernelle. Ad oggi, i bacini assolvono a numerose funzioni di rilevante interesse pubblico, sia sul piano sociale che economico, che comprendono, oltre all'idroelettrico, i seguenti aspetti:

- costituiscono una riserva principale per uso potabile (convenzione tra Enel e le società Marche Multiservizi e AATO - Autorità di Ambito Territoriale Ottimale);
- contribuiscono alla laminazione del fiume Metauro in occasione degli eventi di piena, mitigando il rischio idraulico nelle zone a valle mediante la riduzione dei picchi di piena;
- possono essere utilizzati ai fini di protezione civile, per l'antincendio boschivo;
- garantiscono il rilascio del Deflusso Minimo Vitale del corso d'acqua, previsto dalla Regione Marche.

I bacini, fin dai primi anni di esercizio, sono stati interessati da diverse piene alluvionali, che hanno portato a fenomeni di erosione e a un processo di interrimento degli invasi. I bassi deflussi dei fiumi Metauro e Candigliano (a valle della diga del Furlo), soprattutto nei periodi di magra, hanno ulteriormente contribuito alla formazione di aree di deposito nell'alveo fluviale. Il confronto tra le ortofoto storiche realizzate tra la fine degli anni '70 e '80 e quelle più recenti dimostra come gli invasi abbiano parzialmente ridotto la propria estensione, soprattutto nelle aree in coda al bacino. Di conseguenze anche i volumi di invaso risultano essere significativamente inferiori rispetto alle condizioni originarie.
Entrambi i bacini sono stati oggetto di un intervento di rimozione parziale dei sedimenti previsto nell'ambito del "Progetto 3.1.1.2 - Pulitura degli invasi del fiume Metauro e miglioramento dello stato di qualità delle acque" previsto dal PAR FAS Marche 2007-2013.
Le attività sono state svolte nel periodo settembre÷dicembre 2013 nell'invaso di S. Lazzaro e nel periodo giugno÷agosto 2016 nell'invaso di Tavernelle, ai sensi del D.M. n° 161 del 10 Agosto 2012, allora vigente, in seguito alla presentazione e all'approvazione del relativo Piano di Utilizzo.
Nell'invaso di San Lazzaro i sedimenti sono stati asportati tramite mezzi meccanici (escavatori ed autocarri) nelle aree in coda al bacino previo abbassamento del livello di invaso fino alla quota di minima regolazione. Nell'invaso di Tavernelle, dove gli scavi hanno interessato sia un'area in coda al bacino che nei pressi della diga, si è reso necessario lo svuotamento completo del bacino per gran parte dei lavori e il conseguente fuori servizio dell'impianto.
Preliminarmente all'esecuzione delle attività, è stata eseguita una caratterizzazione chimico-fisica dei

sedimenti, prelevando numerosi campioni da diverse trincee omogeneamente distribuite all'interno delle aree di rimozione, che ha evidenziato concentrazioni di inquinanti conformi alle CSC ("Concentrazioni Soglia di Contaminazione") stabilite dalla normativa vigente per l'uso a verde pubblico, privato e residenziale (colonna A) (Fig.36).

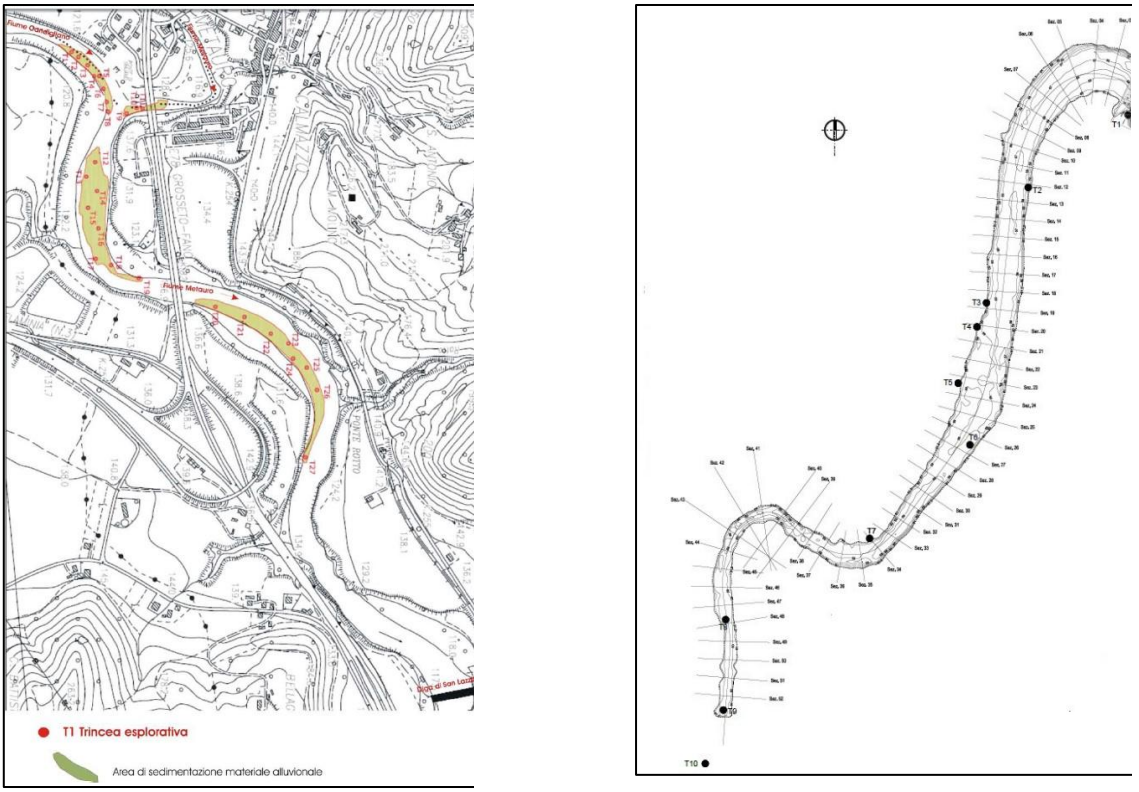


Figura 38 Ubicazione dei punti di campionamento negli invasi di San Lazzaro (a sinistra) e Tavernelle (a destra)

Una parte del materiale rimosso, costituita da pietrisco e ghiaia, è stata valorizzata e riutilizzato ai sensi dell'art. 2, comma 9 della L.R. n° 31 del 12.11.2012, mentre la parte di sedimenti costituita da sabbia e limo, è stata impiegata per il ripristino ambientale di alcune zone di cava, ai sensi del D.M. n° 161 del 10 Agosto 2012.

	Invaso di San Lazzaro	Invaso di Tavernelle
Volume* di materiale valorizzato ai sensi della L.R. 31/2012	80'000 m^3	29'500 m^3

Volume* di materiale destinato al ripristino ambientale	120’000 m^3	43’500 m^3
Totale volume* asportato dal bacino	200’000 m^3	73’000 m^3
Volume di materiale asportato dal volume utile di invaso	144’000 m^3	50’000 m^3

* in banco

Tabella 13

Nel territorio circostante l’invaso, nel raggio di circa 30 km, sono stati presi in considerazione alcuni poli estrattivi individuati nell’ambito del PPAE (Programma Provinciale delle Attività Estrattive), idonei al tipo di materiale e con adeguata capacità di stoccaggio.
In particolare, relativamente al bacino di San Lazzaro, il materiale estratto è stato trasportato e riutilizzato nel polo estrattivo limitrofo all’invaso, dove si trova anche un impianto di frantumazione inerti, utilizzando le piste di cantiere interne all’area. La vicinanza del sito ha consentito un abbattimento significativo dei costi di trasporto del materiale, di ridurre i tempi di attività, di evitare interferenze sulla viabilità ordinaria e di limitare gli impatti ambientali associati, con particolare riferimento alla qualità dell’aria (Fig.39).

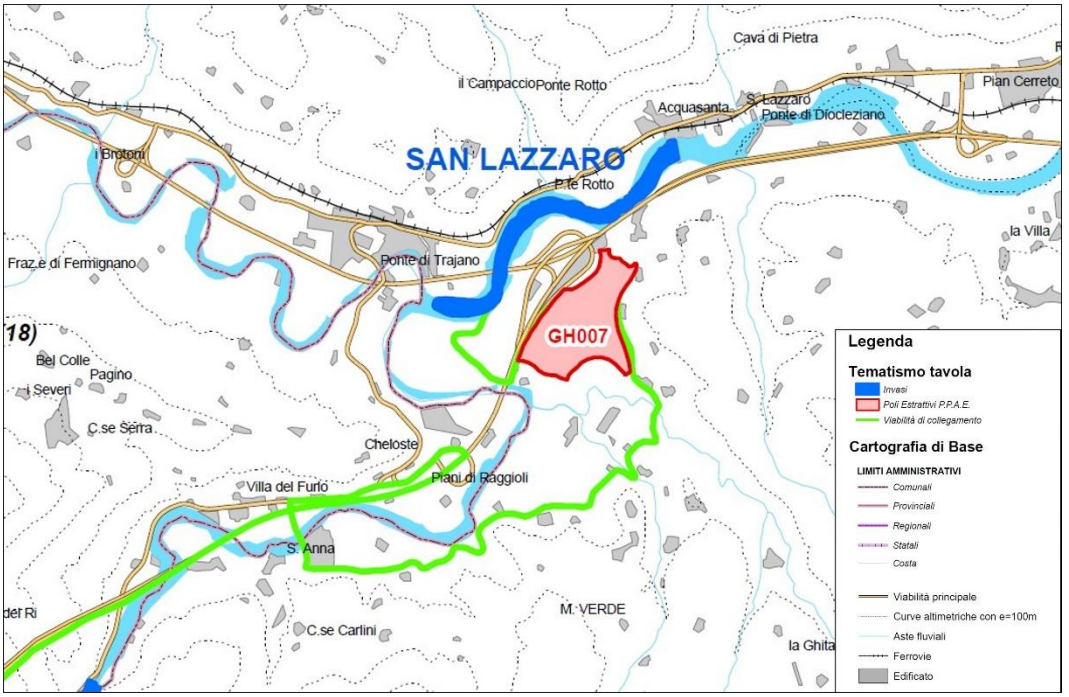


Figura 39: ubicazione del Polo Estrattivo P.P.A.E. “Il Barco -GH007”, distante circa 1.2 km dall’invaso di San Lazzaro. Estratto da: cartografia del P.P.A.E. redatto dall’amministrazione provinciale di Pesaro e Urbino, anno 2012

Per il bacino di Tavernelle il materiale è stato riutilizzato in un polo estrattivo ubicato in località Piano di Sant’Antonio, nel Comune di Montemaggiore al Metauro (PU), a una distanza di circa 6 km dall’invaso, raggiungibile sia attraverso la viabilità secondaria, sia tramite SS73bis (E78). Le frazioni più grossolane sono state destinate ai frantoi presenti nell’intorno del bacino di Tavernelle (Fig.38).

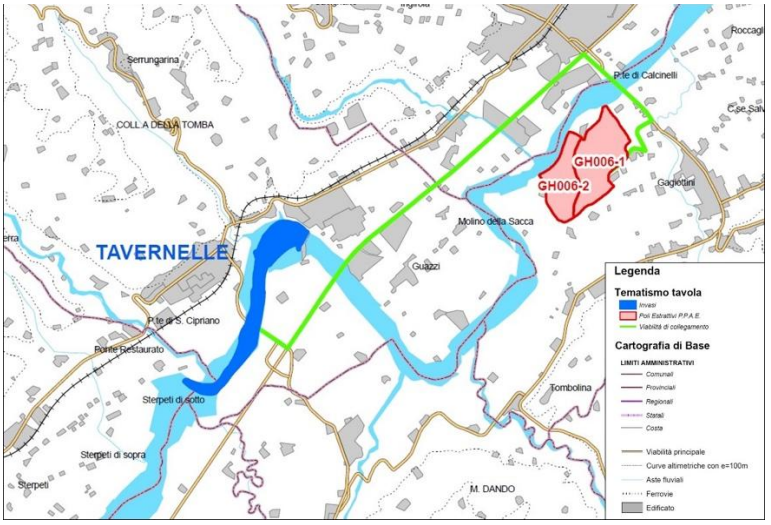


Figura 40: ubicazione del Polo Estrattivo P.P.A.E. “Piano di Sant’Antonio – GH006”, distante circa 5.5 km dall’invaso di Tavernelle. Estratto da: cartografia del P.P.A.E. redatto dall’amministrazione provinciale di Pesaro e Urbino, anno 2012

9.0 Analisi delle caratteristiche e delle proprietà chimico-fisiche dei sedimenti

Il presente studio si inserisce nel solco delle attività di ricerca condotte dal CNR ISSMC nell'ambito dell'economia circolare applicata ai materiali ceramici. In particolare, la ricerca si è focalizzata sulla caratterizzazione dei sedimenti accumulatisi presso la Diga di Mignano, nella Val d'Arda (PC), con l'obiettivo di valutarne il potenziale riutilizzo in vari settori dell'industria ceramica e delle costruzioni. Scopo dello studio è quello di dimostrare con un caso pratico la reale possibilità di impiego dei sedimenti provenienti da uno specifico invaso artificiale, sviluppando un approccio e una metodologia comune ad altri gestori/utilizzatori (Fig.39).

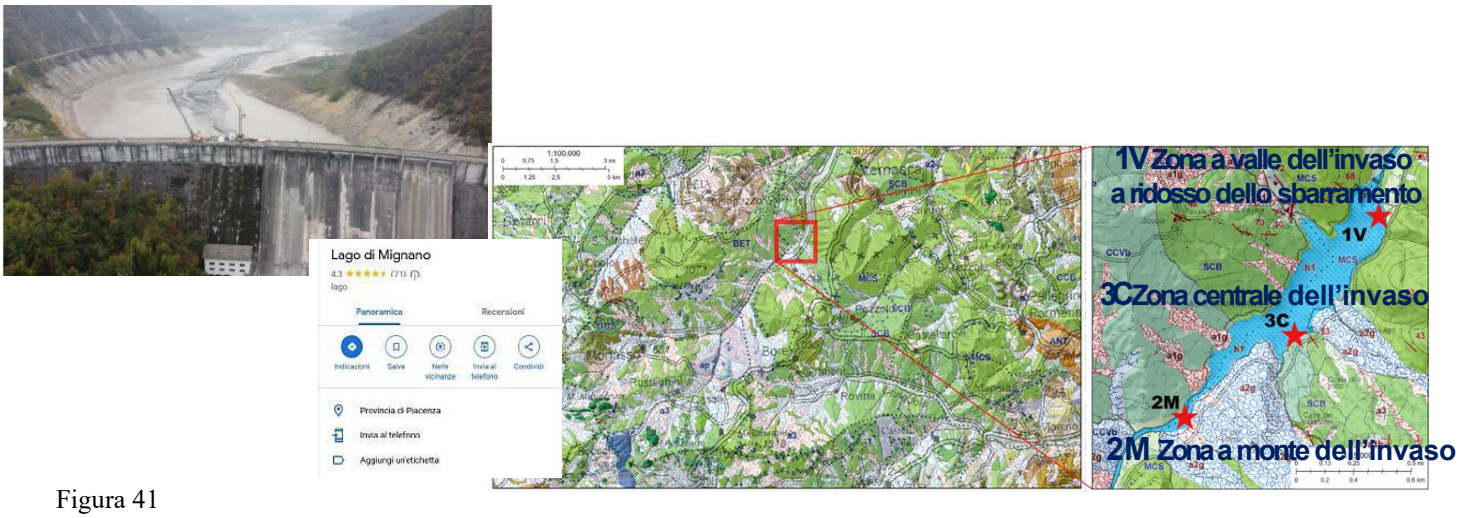


Figura 41

L'approccio metodologico ha previsto la definizione di un protocollo di caratterizzazione standardizzato, applicabile a diversi sedimenti di diga, che presentano spesso caratteristiche granulometriche e composizionali estremamente variabili.

9.1 Metodologia di caratterizzazione e analisi chimico-fisiche eseguite

Il protocollo di caratterizzazione adottato ha previsto una sequenza articolata di analisi. Dopo una prima fase di preparazione del campione, comprendente omogeneizzazione, determinazione dell'umidità, essiccamento e frantumazione, sono state condotte analisi di base fondamentali per stimare il potenziale applicativo. Qui di seguito si riportano le fotografie delle campionature di sedimento prelevate da varie zone del bacino idrico della diga di Mignano (valle, monte, centro) (Fig.40).

Figura 42

Analisi chimica

	SD-C1V	SD-C2M	SD-C3C
SiO_2	45.04	44.92	44.51
Al_2O_3	13.24	13.12	12.75
Fe_2O_3	6.01	5.90	5.18
MnO	0.13	0.13	0.10
MgO	3.96	3.85	3.70
CaO	12.01	12.45	11.79
Na_2O	0.60	0.58	0.57
K_2O	2.14	2.09	2.15
TiO_2	0.67	0.67	0.63
P_2O_5	0.13	0.10	0.11
L.O.I.	15.76	15.91	18.20

Total Carbon (TC) from Elemental Analysis
Total Inorganic Carbon (TIC) from XRPD
Total Organic Carbon (TOC) as TC-TIC

TC (wt.%)	3.1	3.2	3.9
TIC (wt.%)	2.7	2.7	3.0
TOC (wt.%)	0.4	0.5	0.9

	SD-C1V	SD-C2M	SD-C3C
F	269	297	294
S	1158	584	1141
Cl	60	56	63
Sc	18	18	20
V	122	121	116
Cr	216	201	134
Co	22	22	17
Ni	141	138	97
Cu	49	49	41
Zn	97	95	91
Ga	18	19	17
As	7	7	6
Rb	115	110	110
Sr	344	348	324
Y	25	24	23
Zr	134	136	117
Nb	13	13	12
Cd	4	6	-
Sn	-	-	5
Cs	7	8	-
Ba	252	257	234
Pb	20	22	20
La	30	31	28
Ce	65	67	62
Nd	32	27	25
Th	9	10	9

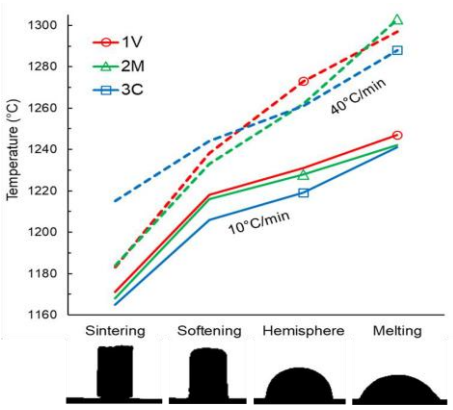
Tabella 14 Analisi chimica

Analisi mineralogica

	SD-C1V		SD-C2M		SD-C3C	
Phases (wt.%)	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.
kaolinite	**4.4**	0.2	**4.5**	0.2	**4.0**	0.2
mica	**9.2**	0.2	**9.4**	0.2	**9.3**	0.2
IS mixed layer clay	**13.6**	0.6	**14.4**	0.5	**14.3**	0.5
smectite	**6.8**	0.6	**4.4**	0.2	**4.7**	0.2
serpentine	**3.9**	0.3	**4.0**	0.3	**3.1**	0.3
chlorite	**7.0**	0.2	**7.4**	0.2	**7.2**	0.2
quartz	**21.0**	0.2	**22.2**	0.2	**22.4**	0.2
k-feldspar	**4.5**	0.3	**2.6**	0.3	**2.8**	0.3
plagioclase	**6.2**	0.2	**8.0**	0.2	**6.7**	0.2
calcite	**18.3**	0.2	**17.8**	0.2	**19.3**	0.2
dolomite	**4.0**	0.1	**4.2**	0.1	**5.3**	0.1
anatase	**1.1**	0.1	**1.1**	0.1	**0.9**	0.1
Rietveld agreement indices						
Rwp	7.38		7.56		7.69	
Rexp	3.30		3.30		3.34	
c^2	5.00		5.25		5.30	
carbonates	22.3		22.0		24.6	
quartz+feldspars	31.7		32.8		31.9	
clay minerals	44.9		44.1		42.6	

Tabella 15 Analisi mineralogica

Comportamento termico

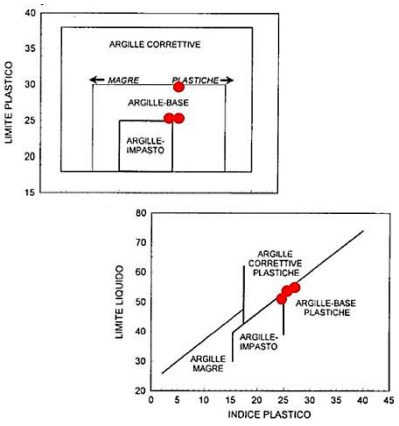


	1V	2M	3C
Temperature caratteristiche (°C) 10°C/min	SD-C1V	SD- C2M	SD- C3C
Fine di sinterizzazione	1171	1168	1165
Rammollimento	1218	1216	1206
Sfera	-	-	-
Mezza-sfera	1231	1228	1219
Fusione	1247	1242	1241

Temperature caratteristiche (°C) 40°C/min	SD-C1V	SD- C2M	SD- C3C
Fine di sinterizzazione	1183	1294	986
Rammollimento	1184	1185	1217
Sfera	-	-	-
Mezza-sfera	1273	1262	1261
Fusione	1257	1300	1288

Figura 43: Comportamento termico

Comportamento plastico (limiti di Atterberg)



	1V		2M		3C	
	Media	ds	Media	ds	Media	ds
Limite Plastico (WP)	26.0	0.5	26.0	1.7	29.0	0.5
Limite Liquido(WL)	52.3	12.2	50.5	6.4	55.6	1.0
Indice di plasticità (IP)	26.3	6.3	24.5	4.0	26.6	0.7

Figura 44: Comportamento plastico

Analisi granulometrica

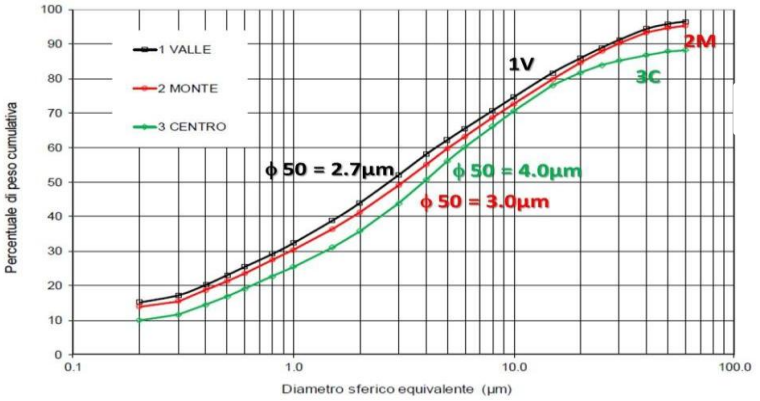


Figura 45: Analisi granulometrica

Classificazione tipologica dei sedimenti

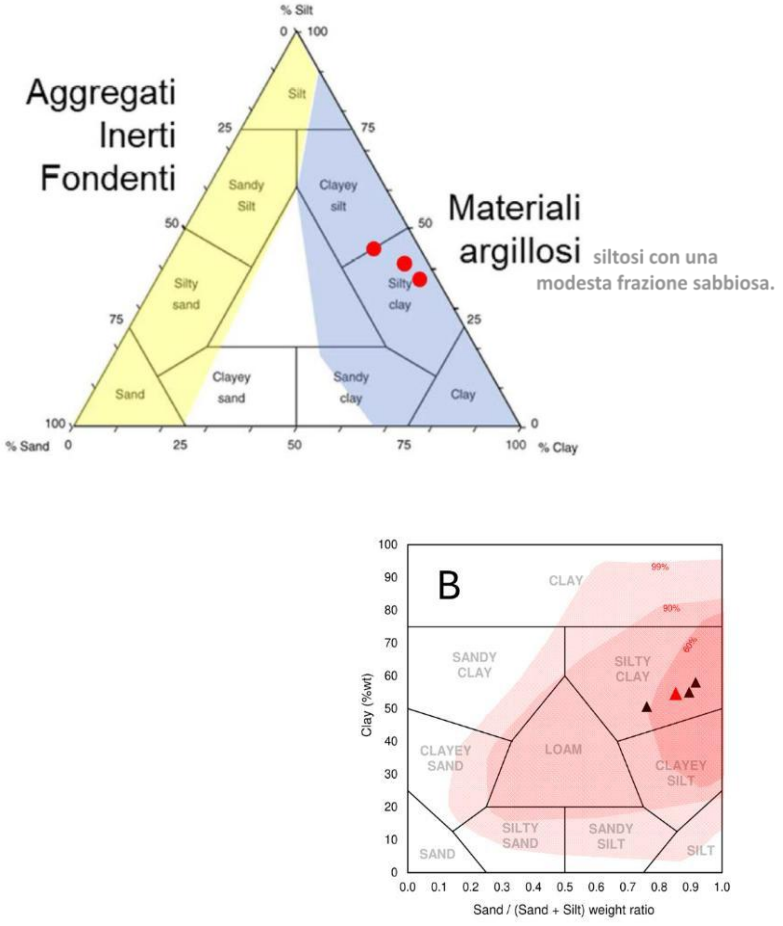


Figura 46: Classificazione tipologica

9.2 Risultati delle caratterizzazioni

I tre campioni prelevati dalla diga - corrispondenti alle zone a valle (1V), a monte (2M) e centrale (3C) dell'invaso - hanno rivelato una composizione mineralogica sostanzialmente comparabile. L'analisi XRD ha evidenziato la presenza predominante di quarzo (21-22,4%), minerali argillosi (42,6-44,9%) e carbonati (22-24,6%). Tuttavia, sono emerse alcune differenze significative: il campione 1V presenta un contenuto più elevato di K-feldspato, mentre il campione 2M mostra valori superiori di plagioclasio e il 3C di dolomite.
L'analisi dei limiti di Atterberg ha rivelato valori di indice di plasticità compresi tra 24,5 e 26,6 caratteristici di materiali con buona lavorabilità plastica.
La distribuzione granulometrica ha classificato i sedimenti come materiali limosi con modesta frazione sabbiosa, caratteristica che influenza direttamente le potenziali applicazioni.

9.3 Valutazione delle potenziali applicazioni

Piastrelle in Gres Porcellanato

La simulazione del ciclo industriale ha dimostrato che i sedimenti possono essere incorporati negli impasti per gres porcellanato in **percentuali fino al 4%** senza compromettere significativamente le proprietà del prodotto finito.

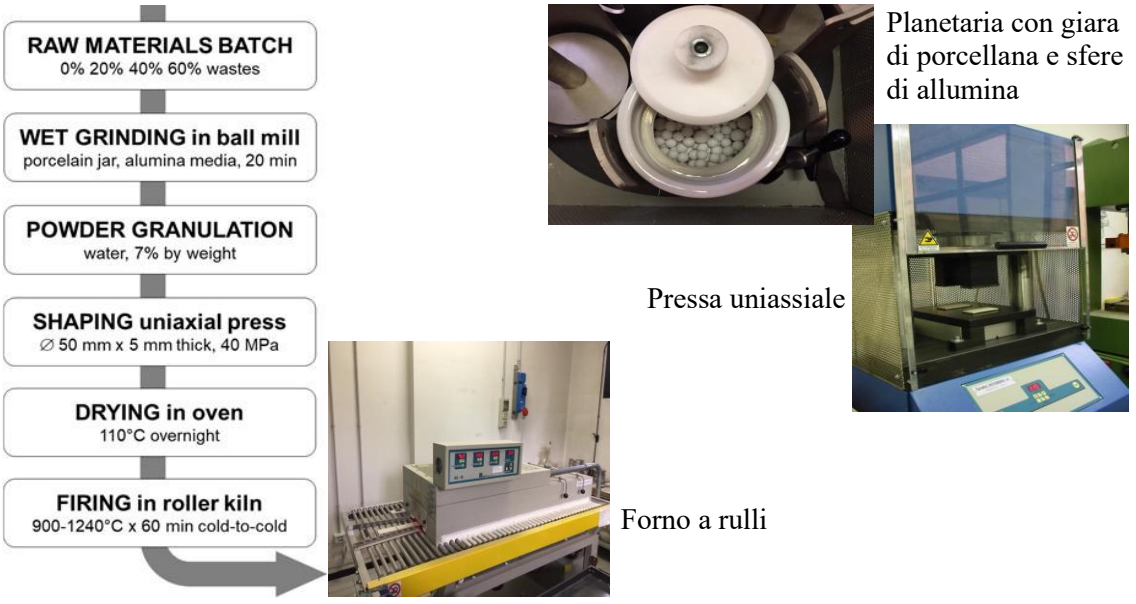


Figura 47: Formulazione impasti e composizione chimica (% in peso)

Primary materials	SM-B0	SM-B2%	SM-B4%	SM-B6%
Sediments mixture	0.00	0.02	0.04	0.06
Clay	0.40	0.39	0.38	0.37
Feldspar	0.55	0.52	0.49	0.45
Sand	0.05	0.07	0.09	0.12
SiO_2	70.90	70.85	70.80	70.89
TiO_2	0.61	0.61	0.60	0.60
Al_2O_3	20.09	19.89	19.70	19.44
Fe_2O_3	1.19	1.27	1.35	1.43
MgO	0.57	0.64	0.72	0.80
CaO	0.39	0.70	1.01	1.34
Na_2O	4.56	4.34	4.12	3.83
K_2O	1.71	1.70	1.69	1.68

Tabella 16

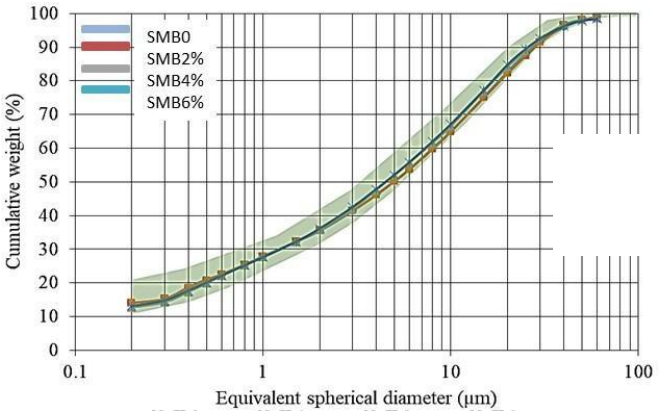


Figura 48: Distribuzione granulometrica

Batches	Restistenza meccanica in verde (MPa)	Densità in verde (g/cm³)	Ritiro lineare (cm/m)	Restistenza meccanica in secco (MPa)	Densità in secco (g/cm³)
SM-B0	1.34 ± 0.01	2.011 ± 0.00	0.02 ± 0.03	1.61 ± 0.40	1.916 ± 0.438
SM-B2%	0.99 ± 0.05	2.031 ± 0.022	0.01 ± 0.02	1.62 ± 0.81	1.888 ± 0.007
SM-B4%	1.07 ± 0.04	2.049 ± 0.022	0.00 ± 0.01	1.04 ± 0.02	1.868 ± 0.035
SM-B6%	1.09 ± 0.01	2.097 ± 0.007	0.04 ± 0.01	1.32 ± 0.16	2.000 ± 0.125

Tabella 17 Proprietà tecnologiche prodotti crudi

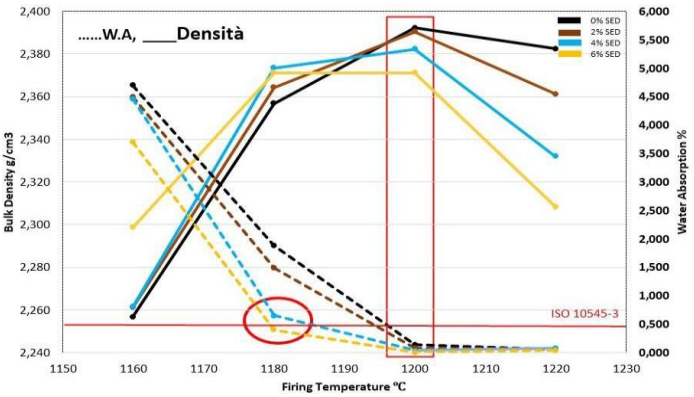


Figura 49 Proprietà tecnologiche prodotti cotti

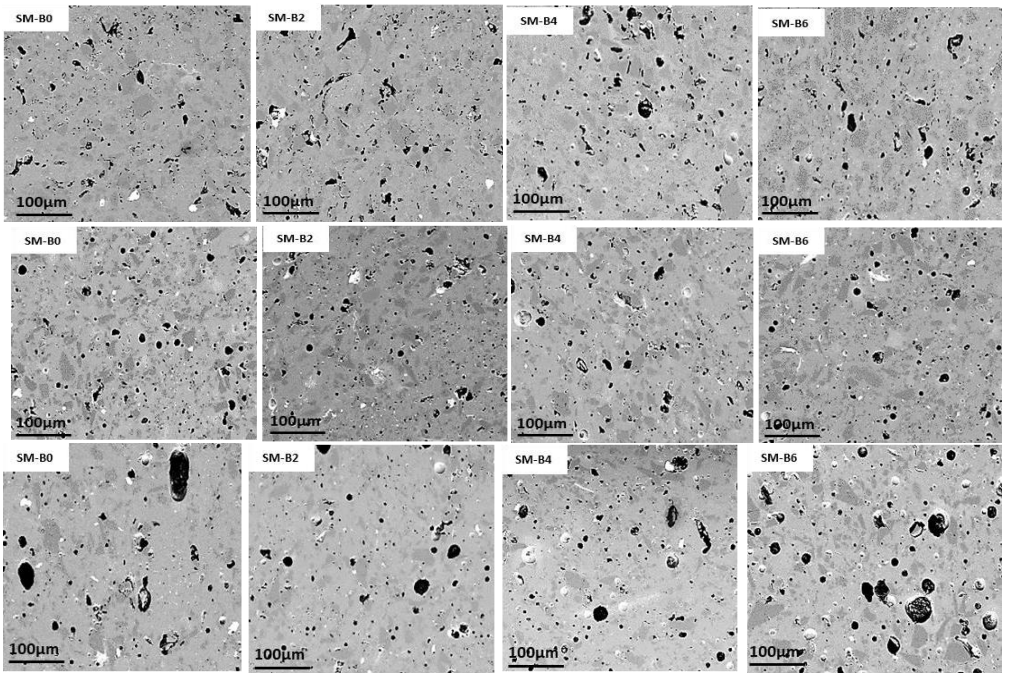


Figura 50: Microstruttura dei prodotti cotti

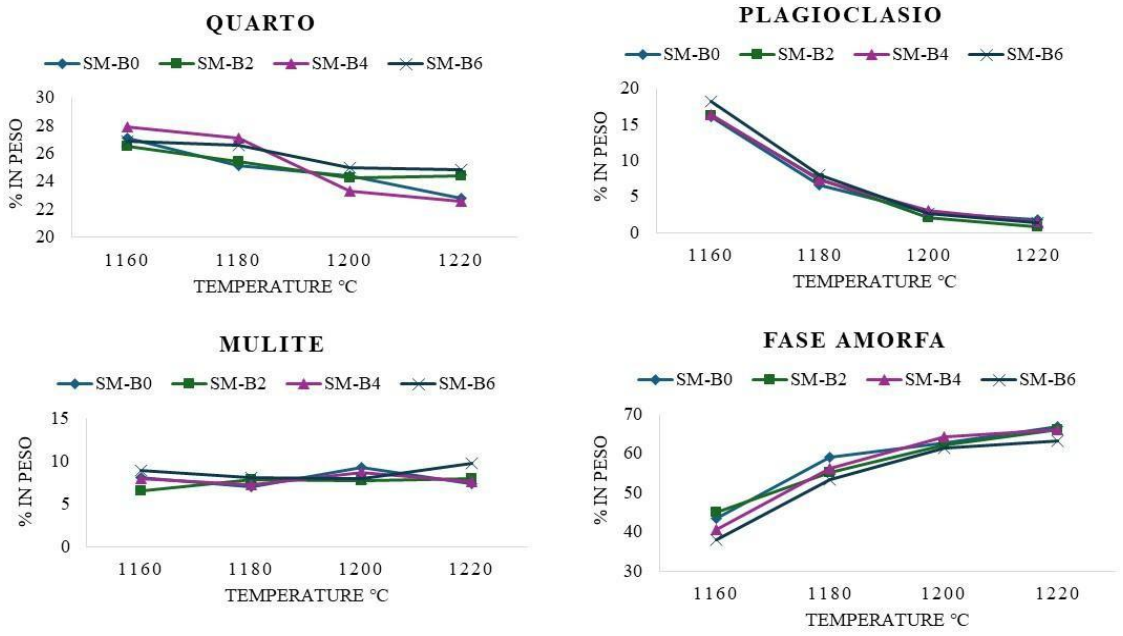


Figura 51: Composizione mineralogica

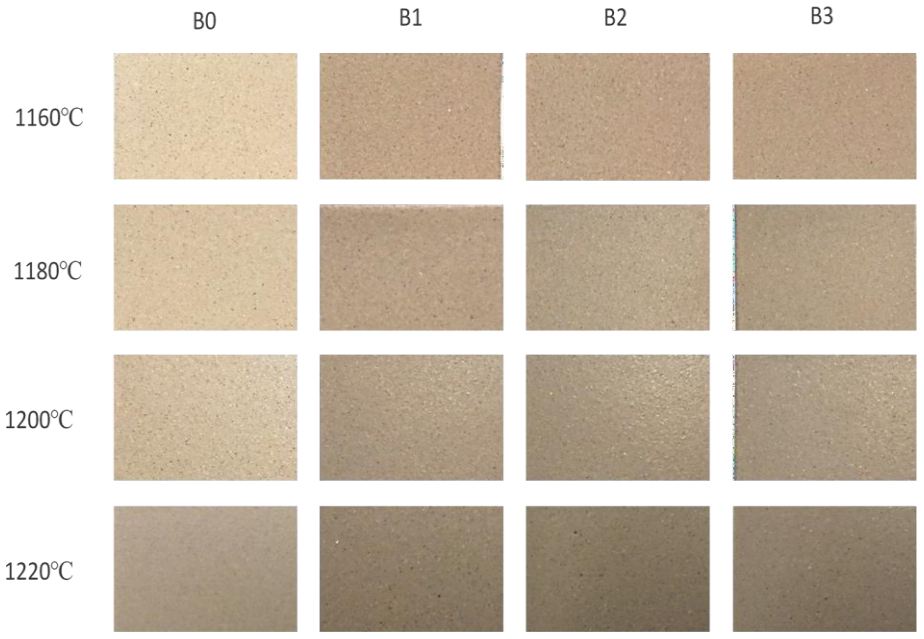


Figura 52 Impatto sulla colorazione

Sulla base delle sperimentazioni condotte si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Bilanciamento chimico

  E' stato sviluppato un approccio innovativo per ottimizzare l'introduzione dei sedimenti di diga negli impasti di gres porcellanato, garantendo il raggiungimento delle proprietà tecnologiche in linea con i requisiti normativi;

- Compatibilità con i processi industriali

  La metodologia proposta è pienamente compatibile con i cicli produttivi standard, operando efficacemente a temperature di cottura comprese tra 1180 °C e 1220 °C;

- Intervallo ottimale di aggiunta

  Con le percentuali del 2% e 4% si osservano valori ottimali per le principali proprietà del materiale, senza incidere negativamente sulla qualità del prodotto finito;

- Stima approssimativa

  Ad una sostituzione del 4% di sedimento argilloso proveniente dal bacino della diga di Mignano in uno stabilimento che produce 10000 tonnellate di impasto ceramico all'anno corrispondono 400 tonnellate di sostituzione di materia prima.

Laterizi

I sedimenti dimostrano caratteristiche particolarmente promettenti per la produzione di laterizi. I valori di plasticità rientrano nei range ottimali per la produzione di mattoni forati a parete sottile.

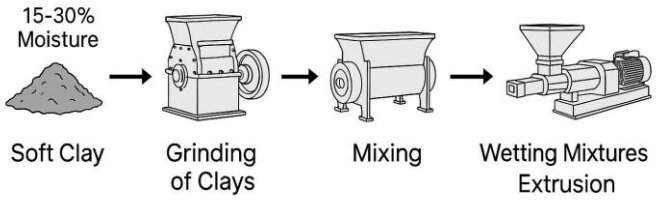


Figura 53: Ciclo di produzione

25% H2O	Ref-A	B-5	C-10	D-15
Clay-1	50	47.5	45	42.5
Clay-2	50	47.5	45	42.5
SED mix 1+2+3	0	5	10	15

Figura 54: Percentuali di sostituzione sedimenti/argilla

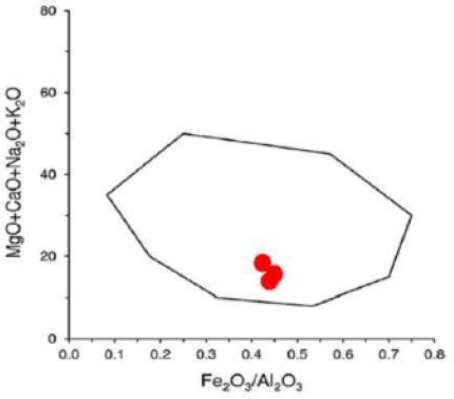
Technological parameter	Unit	Optimal	Tolerable	Unsuitable	Mignano 15% (900C)
Atterberg Plastic Index	% wt.	15-25	10-35	>40	25.5
Atterberg Plastic Limit	% wt.	18-25	18-30	>38	27
Working moisture for extrusion	% wt.	20-28	18-36	>36	25
Drying shrinkage, linear	cm/m	5-8	3-10	>10	6.2
Bending strength, dry	MPa	3-10	2-15	<2	6.6-7.3
Firing shrinkage, linear	cm/m	<1.4	<3	>3	0.5
Water absorption	% wt.	12-24	10-30	>30	20.6
Bulk density, fired	g/cm^3	1.65-1.90	1.55-2.10	<1.50	1.751
Bending strength, fired	MPa	14-22	4-30	<4	19.4

Tabella 18 Controllo dei parametri tecnologici della materia prima argilla dopo sostituzione del 15% di sedimenti

I parametri indicano l'assoluta idoneità dei sedimenti ad essere impiegati nella miscela cruda di argilla come materia prima per la produzione di laterizi.

Aggregati Leggeri

Lo studio del comportamento termico ha evidenziato che i sedimenti possiedono caratteristiche compatibili con la produzione di aggregato leggero a base di argilla espansa (Fig.53).



I tre punti rossi rappresentano i tre campioni di sedimenti che cadono all'interno del dominio di idoneità per la produzione di argilla espansa

Figura 55: Dominio di idoneità per l'impiego in argilla espansa

	1V	SD-C2M	SD- C3C
Parameter	1 VALLE	2 MONTE	3 CENTRO
Temperature of maximum expansion	1245°C	1260°C	1265°C
Bloating index	1.67	1.61	1.38
Temperature of maximum rate of expansion	1225°C	1230°C	1230°C

Tabella19 Temperatura di massima espansione e indice di bloating compatibile con aggregati leggeri

	1220C			1230C			1240C		
12-14mm	SED-1	SED-2	SED-3	SED-1	SED-2	SED-3	SED-1	SED-2	SED-3
Water absorption (%)	0.23	0.14	0	0.54	0.14	0.16	4.85	0.31	1.56
Apparent porosity (%)	0.35	0.26	0	0.76	0.24	0.31	7.14	0.53	2.77
Apparent Density (g/cm3)	1.535	1.828	2.053	1.391	1.74	1.904	1.471	1.675	1.771

Tabella 20 Caratteristiche fisiche del prodotto finale argilla espansa dopo impiego dei sedimenti nella materia prima

Le analisi condotte e i risultati ottenuti confermano che i sedimenti sono potenzialmente utilizzabili nella produzione di argilla espansa per migliorare la miscela di materia prima.

Cemento Portland

Per quanto riguarda i cementi Portland, i sedimenti provenienti dall'invaso di Mignano presentano limitazioni significative dovute principalmente all'elevato contenuto di alcali equivalenti ($Na_2O+0,658K_2O=1,98$) ben maggiore dello 0,6%, limite ammesso nel cemento per contrastare la reazione alcali silice di aggregati ritenuti potenzialmente reattivi.

10. Conclusioni e linea guida

Il presente documento nasce con l'obiettivo di fornire gli elementi utili allo sviluppo di una linea guida per definire un quadro di riferimento tecnico, normativo e operativo utile all'avvio di un progetto pilota dedicato alla valorizzazione e al riutilizzo dei sedimenti provenienti da attività di dragaggio e manutenzione dei corpi idrici.
Questo documento intende fornire indicazioni metodologiche per la caratterizzazione dei sedimenti, la valutazione della loro idoneità al riutilizzo in ambiti industriali, ambientali e agricoli, nonché per la definizione di procedure di monitoraggio e controllo che garantiscano la sicurezza e la sostenibilità delle pratiche adottate.

In un contesto di crescente attenzione verso l'economia circolare e la gestione sostenibile delle risorse naturali, il recupero dei sedimenti rappresenta un'opportunità strategica per ridurre i volumi di materiale destinato a smaltimento, limitare l'impatto ambientale delle operazioni di dragaggio e promuovere nuove filiere produttive basate sul riuso.

In modo schematico la linea guida può essere sviluppata secondo le seguenti fasi:

1. Pianificazione

- Identificazione della diga e dei volumi di sedimento da gestire.
  - Raccolta di dati storici e ambientali del bacino.
  - Definizione degli obiettivi del progetto.

2. Caratterizzazione e classificazione dei sedimenti

- 2.1 Analisi granulometrica e chimica:
  - Prelievo di campioni rappresentativi.
  - Analisi granulometrica.
  - Analisi chimiche per metalli pesanti e contaminanti.
  - Valutazione della materia organica.
- 2.2 Classificazione normativa (D.L. 152/2006, D.M. 205/2022, D.M. 152/2022):
  - Classificazione secondo art. 184-bis.
  - Determinazione del riutilizzo diretto o necessità di autorizzazioni.

3. Valutazione della compatibilità ambientale

- 3.1 Studio di Impatto Ambientale (SIA):
  - Valutazione degli impatti ambientali e biologici.
  - Presentazione del SIA agli enti competenti.

- 3.2 Piano di gestione ambientale:
  - Misure preventive e correttive.
  - Monitoraggio ambientale.
  - Cronoprogramma delle attività.

4. Processi di trattamento e preparazione

- 4.1 Essiccazione e stabilizzazione:
  - Essiccazione naturale.
  - Aggiunta di additivi per stabilizzazione.
- 4.2 Rimozione di materiali indesiderati:
  - Vagliatura e lavaggio.
  - Separazione di detriti e rifiuti.

5. Possibilità di riutilizzo

- 5.1 Produzione di materiali da costruzione:
  - Laterizi, malte, aggregati.
  - Conformità alle normative tecniche di settore
- 5.2 Utilizzo come materiale di riempimento:
  - Riempimenti stradali, rilevati, bonifiche.
  - Verifica compatibilità geotecnica.
- 5.3 Utilizzo come legante geopolimero
- 5.3 Utilizzo come materiale per il ripascimento costiero e fluviale
  - Verifica idoneità tecnico-economica
- 5.4 Utilizzo in agricoltura
- Collaborazioni con aziende e consorzi industriali

6. Conformità normativa e autorizzazioni

- 6.1 Ottenimento delle autorizzazioni:
  - Presentazione del progetto tecnico.
  - Iscrizione al Registro dei sottoprodotti.
- 6.2 Monitoraggio e reportistica:
  - Monitoraggio ambientale continuo.
  - Report periodici agli enti di controllo.

11. Sviluppi futuri

Alla luce delle analisi svolte nei capitoli precedenti, appare evidente come il tema della gestione dei sedimenti negli invasi artificiali debba essere affrontato secondo un approccio integrato, nel quale le esigenze di recupero della capacità utile, di tutela ambientale e di valorizzazione della materia siano considerate in modo unitario.

Le evidenze raccolte nel presente lavoro confermano infatti che i sedimenti, qualora opportunamente caratterizzati sotto il profilo chimico, fisico ed ecotossicologico e gestiti nel rispetto del quadro normativo vigente, possono rappresentare una risorsa potenzialmente utilizzabile in differenti ambiti applicativi, tra cui il settore delle costruzioni, gli impieghi ambientali, il ripascimento costiero e fluviale e gli usi agricoli.

In tale prospettiva, gli sviluppi futuri dovranno essere orientati, in primo luogo, al consolidamento di procedure tecniche e amministrative che consentano di semplificare e rendere maggiormente omogeneo il percorso di approvazione dei Progetti di Gestione e dei relativi Piani Operativi. In particolare, l'applicazione delle disposizioni introdotte dall'art. 184-bis e delle altre norme di settore potrà favorire il passaggio da una logica di mera rimozione del materiale sedimentato a una logica di recupero e riutilizzo, purché supportata da criteri chiari di classificazione, tracciabilità e destinazione d'uso finale.

Sotto il profilo tecnico, sarà necessario approfondire ulteriormente la relazione tra caratteristiche dei sedimenti, metodologie di estrazione, trattamenti di disidratazione o selezione granulometrica e possibili destinazioni finali del materiale. Le esperienze richiamate nel presente documento mostrano infatti che la sostenibilità complessiva degli interventi dipende in misura determinante non soltanto dalla qualità del sedimento, ma anche dagli aspetti logistici, dalla distanza dai siti di impiego, dalla disponibilità di aree di trattamento, dai vincoli ambientali e dalla continuità operativa delle tecnologie adottate.

Un ulteriore sviluppo di particolare interesse riguarda l'avvio di progetti pilota su scala significativa, costruiti attorno a casi reali nei quali sia possibile mettere a sistema il rapporto tra gestore dell'invaso, soggetti utilizzatori finali, enti di controllo e strutture di ricerca. Tali progetti potranno consentire di verificare in condizioni operative reali la fattibilità tecnica, ambientale ed economica delle diverse filiere di riutilizzo, nonché di definire criteri replicabili per il trasferimento delle esperienze ad altri contesti territoriali.

Particolare rilievo potrà assumere, nei prossimi anni, anche il rafforzamento delle attività di ricerca applicata e di standardizzazione tecnica, finalizzate alla definizione di protocolli di prova, criteri prestazionali e modalità di qualificazione dei sedimenti in funzione degli specifici impieghi. In questo senso, la costruzione di banche dati condivise sulle caratteristiche dei sedimenti degli invasi italiani e la raccolta sistematica dei risultati delle sperimentazioni potranno costituire un supporto utile sia per i gestori sia per i potenziali utilizzatori del materiale.

Nel complesso, il lavoro svolto dal Gruppo di Lavoro evidenzia come il riutilizzo dei sedimenti non debba essere considerato soltanto come una soluzione alternativa allo smaltimento, ma come una componente potenzialmente stabile delle future strategie di gestione degli invasi. Il proseguimento delle attività dovrà pertanto mirare alla definizione di strumenti operativi, casi dimostrativi e riferimenti tecnici condivisi, idonei a favorire una gestione dei sedimenti sempre più efficace, sostenibile e coerente con i principi dell'economia circolare.

Il caso analizzato, relativo alla diga di Mignano, può essere considerato senz'altro come un esempio reale di riutilizzo dei sedimenti in diversi settori industriali ed ambientali favorendo lo sviluppo di una reale economia circolare indispensabile ad una crescita economica e sociale di un paese avanzato.