



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA, ALIMENTI, RISORSE
NATURALI, ANIMALI E AMBIENTE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

**CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER
L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**METODO SPERIMENTALE PER IL MONITORAGGIO
ACUSTICO DEL CARICO DI FONDO NEI TORRENTI MONTANI**

Relatore: Prof. Jacopo Boaga

Laureando: Federico Scapin
(nr. 2087461)

Anno Accademico 2023/2024

ABSTRACT

L'importanza di poter monitorare il trasporto solido di fondo dei torrenti montani è legata al ruolo chiave che esso svolge nel modificare la morfologia fluviale e alle implicazioni che assume per la gestione dei corsi d'acqua. Negli ultimi anni la necessità di monitorare efficacemente tale fenomeno è stata evidenziata da diversi studi condotti per migliorare o implementare nuove tecniche di monitoraggio passivo, ma si tratta spesso di opere costose e che difficilmente possono essere diffuse nei vari torrenti montani.

Nel lavoro di questa tesi assumono particolare importanza proprio gli aspetti di economicità e praticità di un sistema di monitoraggio che possa essere applicato senza la necessità di elevati investimenti e lavori sul sito. Il metodo sperimentato è basato sull'utilizzo di un idrofono "HydroMoth" allacciato al di sotto di una piastra in acciaio per registrare i segnali generati dall'impatto dei sedimenti contro la superficie metallica. Sono stati svolti una serie di test in laboratorio utilizzando una canaletta e un sistema di misurazione in scala ridotta per valutarne l'efficacia in un contesto sperimentale controllato. I segnali registrati sono stati successivamente isolati e analizzati tramite il software MATLAB per verificare la possibilità di distinguere l'inizio del trasporto dal semplice flusso d'acqua.

Considerando i risultati positivi ottenuti, a proseguimento del lavoro, è stata effettuata un'installazione del sistema in una stazione di monitoraggio sul torrente Cordon (Belluno) per valutare l'efficacia del metodo in un contesto naturale e poter continuare gli sviluppi del progetto sul campo.

INDICE

Introduzione.....	1
1. Motivi e scopo della tesi.....	3
1.1. Direttiva Alluvioni	3
2. Trasporto fluviale dei sedimenti	7
2.1. Movimento incipiente.....	7
2.2. Trasporto solido.....	10
2.3. Carico di fondo (bed load).....	12
2.3.1. Importanza del trasporto del carico di fondo	14
2.3.2. Impatto dei cambiamenti climatici sul trasporto del carico di fondo.....	16
3. Monitoraggio del carico di fondo	19
3.1. Metodi diretti.....	21
3.1.1. Campionatori a rete.....	22
3.1.2. Trappole a fessura	23
3.2. Metodi indiretti.....	24
3.2.1. Geofono Svizzero (piastre d’impatto).....	26
3.2.2. Microfono a tubo giapponese (tubi d’impatto)	28
3.2.3. Idrofoni	30
3.2.4. Sismologia ambientale	31
3.3. Considerazioni e valutazioni sui moderni metodi di monitoraggio	33
4. Descrizione del metodo sperimentale di monitoraggio acustico	37
4.1. Registratore acustico HydroMoth	38
4.2. Test in laboratorio	41
5. Risultati ottenuti	45
5.1. Segnale del flusso d’acqua	46
5.2. Segnali dei gruppi di sedimenti	48
5.3. Segnali dei singoli clasti.....	52
6. Conclusioni.....	57
6.1. Prospettive future	58
6.2. Primi dati reali sul campo.....	60
Bibliografia.....	63

INTRODUZIONE

Il trasporto del carico di fondo (o di base), cui più comunemente ci si riferisce con il termine inglese “bed load”, è il fenomeno di movimentazione dei sedimenti presenti sul letto dei fiumi ad opera della corrente che comporta quindi uno spostamento di materiale solido all’interno dei bacini idrici. Il processo ha particolare rilevanza nei torrenti montani in cui entrano in gioco elevate pendenze del fondo, elevate energie delle correnti d’acqua e buona disponibilità di sedimenti grossolani. Nonostante si tratti di un fattore che ricopre un ruolo chiave per una corretta gestione dei corsi idrici e che influenza direttamente la morfologia fluviale e il potenziale rischio alluvioni, il suo monitoraggio continuo nel tempo risulta tutt’ora particolarmente complesso a causa della variabilità temporale che lo caratterizza e della difficoltà nel raccogliere dati sul campo.

Negli ultimi anni, anche grazie allo sviluppo e all’innovazione tecnologica, diversi studi hanno affrontato il problema legato alla difficoltà di monitorare il bed load, introducendo nuovi sistemi di misurazione indiretta in sostituzione dei semplici campionatori tradizionali. Tali metodi in genere sfruttano sensori passivi come idrofoni, geofoni e accelerometri, ma il più delle volte si pongono l’obiettivo di quantificare le portate solide o rivelare le granulometrie dei materiali trasportati, portando conseguentemente allo sviluppo di sistemi complessi, che necessitano di importanti infrastrutture e lavori in alveo invasivi per la loro installazione; ne è un esempio lampante il cosiddetto “Geofono Svizzero”, ampiamente studiato e testato negli ultimi anni, ma ancora molto lontano da un’applicazione diffusa e pratica, nonostante la sua dimostrata efficacia.

La scrittura di questa tesi si colloca nell’ambito del progetto “BE.R.G.” (BEd load of mountain Rivers Grabbed by low-cost acoustic sensors) avviato a inizio 2024 presso il Dipartimento di Geoscienze dell’Università degli Studi di Padova. Il progetto prende il suo nome dall’obiettivo che intende perseguire, ovvero riuscire a captare l’attività del trasporto di fondo nei torrenti montani tramite metodi acustici passivi a basso costo. Il sistema che si vuole adottare è composto da una piastra in Acciaio Inox (con una particolare forma a dosso) al di sotto della quale è allacciato un idrofono per registrare il rumore prodotto dagli impatti dei sedimenti contro la struttura metallica; il sensore acustico utilizzato è il registratore “HydroMoth”, un dispositivo sviluppato da Open Acoustic Device e presente in commercio a basso prezzo.

Nelle sue fasi iniziali, il lavoro per testare il funzionamento del metodo sperimentale ha previsto delle prove in laboratorio tramite l'impiego di una canaletta, presente presso i laboratori del Dipartimento, e di una lastra di acciaio in scala ridotta alla quale allacciare il registratore subacqueo. I test condotti consistevano nella registrazione del flusso d'acqua e degli impatti di clasti con diverse granulometrie, sia in gruppi, che come singole particelle. I segnali registrati sono stati quindi isolati e analizzati mediante un codice in MATLAB e il tool Signal Analyzer integrato nel software. Il focus delle prove effettuate era verificare se risultasse possibile distinguere i segnali del solo flusso d'acqua rispetto a quelli in cui avvenivano impatti e vi era bed load, così da poter monitorare l'attivazione del fenomeno in modo semplice, pratico ed economico. Il sistema sviluppato intende infatti proporre un metodo di monitoraggio la cui implementazione non sia limitata da eventuali investimenti o lavori in alveo, ma che possa essere diffuso nei torrenti montani per monitorare l'attivazione dei processi di trasporto e mettere in atto le eventuali azioni preventive ritenute necessarie.

I risultati positivi ottenuti suggeriscono l'efficacia del metodo in condizioni di laboratorio e in continuazione del progetto è stata effettuata un'installazione del sistema sul campo, presso una stazione di monitoraggio sul torrente Cordon (Belluno), nell'ottica di un'acquisizione di dati reali prevista indicativamente per la seconda metà del 2024.

La tesi nel suo complesso può essere strutturata in tre grandi sezioni che comprendono gli argomenti principali di cui è composta:

- a. la prima parte (Capitoli 1 e 2), oltre a descrivere i motivi e gli obiettivi principali alla base del lavoro svolto, intende fornire una visuale sul trasporto solido fluviale, concentrandosi in particolare sul carico di fondo e sull'importanza che riveste tale processo nella gestione dei corsi d'acqua;
- b. la seconda parte della tesi (Capitolo 3) fornisce invece una panoramica sullo stato dell'arte dei sistemi di monitoraggio del trasporto di base, partendo dai metodi diretti più tradizionali fino alle attuali tecniche surrogate;
- c. l'ultima parte (Capitoli 4, 5 e 6) è dedicata infine al lavoro svolto nell'ambito del progetto BE.R.G. per l'implementazione di un metodo economico di monitoraggio acustico passivo. Viene quindi presentato il metodo e gli strumenti utilizzati, sono descritte le modalità con cui sono stati condotti i test in laboratorio e sono presentati i risultati conseguiti nell'ottica di una prosecuzione del progetto sul campo.

1. MOTIVI E SCOPO DELLA TESI

Il progetto BE.R.G. (BEd load of mountain Rivers Grabbed by low-cost acoustic sensors), da cui nasce la scrittura di questa tesi, si interfaccia con la problematicità del trasporto solido di base dei sedimenti fluviali e in particolare con le difficoltà di monitorare tale fenomeno. Il trasporto del carico di fondo svolge un ruolo rilevante nella dinamica dei fiumi e nelle loro variazioni morfologiche, ma è un'importante variabile anche per quanto riguarda i possibili rischi di inondazione e gli impatti alle infrastrutture antropiche presenti all'interno o in vicinanza dell'alveo.

L'obiettivo che si pone a questo lavoro è l'introduzione di un metodo di monitoraggio che riesca a rivelare il movimento solido al fondo con modalità comparabili ai moderni sistemi indiretti, ma che basi il proprio valore sull'economicità e sulla conseguente praticità e facilità di poter essere installato in molti torrenti montani. La misurazione acustica passiva su cui si basa, infatti, consentirebbe di monitorare quando il processo si attiva e di poterlo relazionare alle portate d'acqua presenti in quei momenti.

Negli ultimi anni i progressi in questo campo hanno sviluppato diverse tecniche di monitoraggio capaci di fornire misure continue e quantificazioni del bed load, infatti, si è potuti passare dai campionatori tradizionali a sistemi di misurazione più articolati e precisi, ma con importanti investimenti e lavori impiantistici necessari. Se valutati nell'ottica di una loro diffusione si tratta quindi di sistemi dalla ridotta praticità, casi piuttosto isolati per applicazioni su stazioni sperimentali. Al momento, infatti, nessuno dei moderni metodi di misurazione sviluppati è ampiamente accettato per l'utilizzo in programmi su larga scala e l'importanza di avere sistemi diffusi in grado di fornire informazioni in merito al trasporto di fondo è sottolineata anche all'interno della Direttiva Alluvioni emanata nel 2007.

1.1. Direttiva Alluvioni

Tra il 1998 e il 2004 l'Europa è stata colpita da una serie di alluvioni che hanno causato circa 700 vittime, mezzo milione di persone evacuate e perdite economiche per almeno 25 miliardi di euro. A seguito di tali alluvioni e delle enormi conseguenze negative che hanno comportato in termini di vite umane, ambiente, attività economiche e patrimonio

culturale, l'Unione Europea è intervenuta emanando la Direttiva 2007/60/CE (“Direttiva Alluvioni” o “Floods Directive”) relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni. La Direttiva è stata proposta il 18/01/2006 ed è entrata in vigore il 06/11/2007 con lo scopo di ridurre e gestire il rischio e i danni che le alluvioni causano alla salute umana, all'ambiente, al patrimonio culturale e all'attività economica e sociale (Regione Veneto, 19/12/2023).

La Direttiva Alluvioni in Italia è stata recepita con il D.Lgs. 49/2010 e, come per tutti gli Stati membri dell'Unione Europea, la sua attuazione ha previsto l'individuazione preliminare delle unità di gestione (Unit of Management) e delle relative autorità competenti (Competent Authority). Durante ciascun ciclo di gestione, della durata di sei anni, devono essere poi realizzati, a livello di distretto idrografico (unità di gestione):

1. studi e valutazioni preliminari volti ad individuare le aree soggette a rischio alluvionale;
2. mappe della pericolosità e del rischio alluvionale per ciascuna zona individuata;
3. Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) basati sull'utilizzo integrato di misure di prevenzione, protezione e preparazione, comprese le previsioni dei fenomeni alluvionali e i relativi sistemi di allertamento (Bussettini et al., 2011).

La Floods Directive delinea quindi un percorso attuativo definito da una serie di stadi di implementazione con specifici obblighi e scadenze, e che ha come punto di arrivo la redazione dei Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni. All'interno dei PGRA devono essere definiti adeguati obiettivi per la gestione del rischio e per la riduzione delle potenziali conseguenze negative sulla salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche, privilegiando iniziative di tipo non strutturale e che agiscano sulla riduzione della probabilità di inondazione. I Piani devono tenere in considerazione svariati aspetti rilevanti quali costi e benefici, estensione e percorsi delle possibili inondazioni, aree con elevata capacità di trattenimento delle acque, nonché gli obiettivi ambientali della Direttiva 2000/60/CE (“Direttiva Quadro sulle Acque” o “Water Framework Directive”) (ISPRA, 16/09/2015).

La Direttiva Quadro sulle Acque, infatti, introduce gli aspetti idromorfologici fra gli elementi da valutare, oltre a quelli fisico-chimici e biologici, per poter classificare lo stato ecologico dei corsi d'acqua. Attualmente non vi è ancora una piena comprensione di quali

siano gli aspetti e i parametri morfologici più strettamente correlati con lo stato di salute dei corsi d'acqua, e la stessa componente idromorfologica rappresenta quella con una più insufficiente considerazione nella classificazione dello stato ecologico; tuttavia, esiste un ampio consenso sul fatto che il funzionamento dei processi geomorfologici di un corso idrico e le sue condizioni di equilibrio dinamico promuovano la diversità di habitat e il funzionamento degli ecosistemi acquatici (Rinaldi et al., 2011).

Per il raggiungimento degli obiettivi prefissati dai PGRA devono essere definite idonee misure riguardanti tutti gli aspetti della gestione del rischio alluvioni, ovvero:

- prevenzione: misure che diminuiscono la vulnerabilità degli elementi esposti preesistenti (politiche di gestione e pianificazione del territorio, politiche di delocalizzazione, ecc.);
- protezione: misure che riducono la probabilità di inondazione (misure per ridurre il deflusso in alveo, misure per il miglioramento del drenaggio delle acque superficiali, programmi di manutenzione delle opere di difesa, ecc.);
- preparazione: misure che migliorano la capacità di risposta della popolazione e del sistema di protezione civile ad eventi alluvionali (sistemi di allerta e previsione di piena, misure per migliorare la pianificazione d'emergenza e la capacità di risposta delle istituzioni, ecc.);
- ricostruzione e valutazione post-evento: misure che prevedono di superare le condizioni di criticità derivanti da un'alluvione (attività di messa in sicurezza e ripristino cui si aggiungono attività di acquisizione di informazioni e dati relativi agli eventi avvenuti) (ISPRA, 16/09/2015).

Nell'effettuare le analisi di rischio previste dalla Direttiva Alluvioni non si può prescindere dallo studio delle variazioni di quota del fondo dei corsi d'acqua, dovute al trasporto di sedimenti da parte della corrente, ovvero al trasporto solido di fondo. Un aumento della quota del fondo, infatti, causa conseguentemente un innalzamento della superficie dell'acqua e soprattutto per i fiumi montani tale necessità diventa indispensabile per via della notevole quantità di sedimenti a disposizione e dell'elevata intensità della corrente (Colombo & Giuriani, 2010).

Nell'ambito del lavoro descritto in questa tesi ci si interfaccia in parte con quelle che sono le necessità di prevenzione e preparazione agli eventi di piena. L'implementazione di un

sistema di monitoraggio del bed load, a monte di quelli che sono gli elementi antropici potenzialmente a rischio ed esposti, permette di essere a conoscenza dell'attivazione del fenomeno, anticipare gli effetti dovuti a potenziali alluvioni e adottare le adeguate misure di preparazione e protezione. Gli stessi PGRA adottati nell'ambito della Direttiva Alluvioni prevedono l'utilizzo di misure di prevenzione, protezione e preparazione, con riferimento a sistemi di allertamento. Risulta quindi fondamentale la sperimentazione di nuovi metodi di monitoraggio che risultino efficaci e soprattutto economici, affinché sia possibile un'implementazione più capillare possibile, cioè proprio ciò su cui intendono concentrarsi gli sforzi di questo progetto.

2. TRASPORTO FLUVIALE DEI SEDIMENTI

Il trasporto di sedimenti attraverso i canali fluviali è un fenomeno che ha importanti conseguenze sotto diversi punti di vista; dalla gestione delle risorse idriche alla sicurezza pubblica con la gestione del rischio alluvioni e dall'evoluzione del paesaggio alla sostenibilità ambientale e il ripristino dei fiumi.

Gli elevati flussi di sedimenti che si verificano durante gli eventi più estremi destabilizzano i corsi d'acqua, aumentano i rischi e i problemi legati alle inondazioni, compromettono la qualità delle acque, compromettono gli habitat acquatici e possono arrivare a minacciare direttamente la sicurezza e la vita umana. Risulta evidente quindi che il trasporto dei sedimenti influenza svariati elementi sia ambientali, che prettamente antropici, e la comprensione delle dinamiche e dei processi che lo caratterizzano sono aspetti di grande importanza pratica (Frey & Church, 2011) (Bonilla Porras, 2022).

2.1. Movimento incipiente

L'inizio del movimento dei sedimenti è un processo complesso e associato alle diverse forze agenti sulla singola particella che giace inizialmente sul letto fluviale, ovvero: resistenza o spinta idrodinamica, peso della particella, portanza e attrito (Fig. 1). Tuttavia, anche altri parametri materiali, come le forze di contatto particella-superficie, e le caratteristiche del flusso hanno un importante ruolo nel descrivere il movimento incipiente e nell'influenzare il processo di trascinarsi delle particelle solide (Bonilla Porras, 2022).

Il materiale presente nell'alveo si mette in moto nel momento in cui le forze idrodinamiche di resistenza (o spinta) e portanza prevalgono su quelle che si oppongono al movimento, cioè le forze dovute al peso e all'attrito (Colombo & Giuriani, 2010).

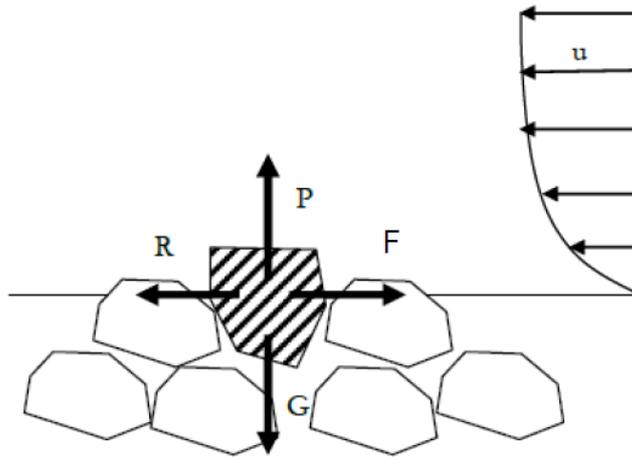


Figura 1: Schema delle forze agenti su una particella che giace sul letto fluviale secondo la teoria di Shields. P è la forza di portanza, G è la forza peso, R è la forza di resistenza o spinta idrodinamica, F è la forza di attrito e u è la velocità dell'acqua (Colombo & Giuriani, 2010).

L'approccio più diffuso per descrivere il trascinamento delle particelle è l'approccio di Shields (1936), basato sull'equilibrio delle forze stabilizzanti e destabilizzanti che agiscono sulle particelle sotto le ipotesi di flusso uniforme, materiale solido omogeneo e non coesivo, letto del canale quasi orizzontale ed elevata sommersione. L'analisi studia l'equilibrio tra la forza esercitata dal flusso parallelo al letto e la forza di attrito. Dall'approccio di Shields ne deriva quindi il parametro adimensionale di mobilità di Shields (θ), definito come:

$$\theta = \frac{u_*^2}{g\Delta d}$$

in cui: u_* è la velocità di taglio, g è l'accelerazione di gravità, Δ è la densità relativa del materiale del letto e d è la dimensione media delle particelle.

Le condizioni di inizio del movimento dipendono però anche da un altro parametro adimensionale, ovvero il numero di Reynolds del grano (Re_*), definito come:

$$Re_* = \frac{du_*}{\nu}$$

in cui ν è la viscosità cinematica dell'acqua (Bonilla Porrás, 2022).

La dipendenza del movimento incipiente dai due parametri può essere espressa mediante il diagramma di Shields (Fig. 2) in cui le due variabili sono legate da una funzione determinata sperimentalmente che identifica la curva di separazione tra la zona di mobilità e immobilità delle particelle nel piano $Re_*-\theta_{cr}$ (Colombo & Giuriani, 2010). L'equazione per il parametro di mobilità di Shields può essere quindi espressa come:

$$\theta = \frac{u_*^2}{g\Delta d} = fct\left(\frac{du_*}{v}\right)$$

in cui *fct* rappresenta la funzione determinata sperimentalmente da Shields.

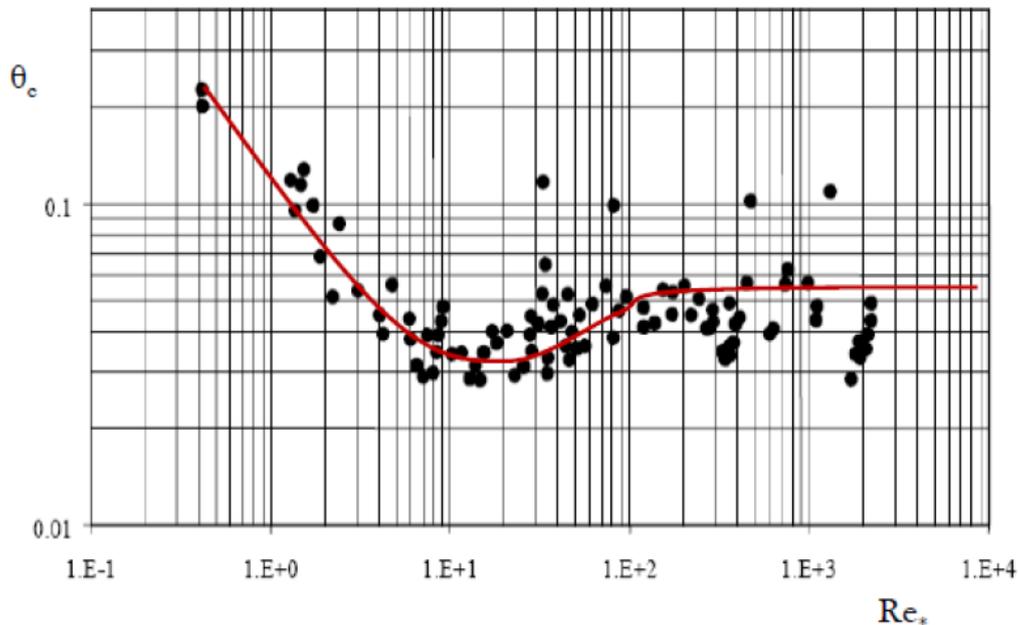


Figura 2: Diagramma di Shields per le condizioni di inizio del movimento dei sedimenti (Colombo & Giuriani, 2010).

La curva sperimentale descrive i punti di inizio del movimento identificando quindi due regioni: quella sotto la curva, in cui non vi è nessuna mobilità dei sedimenti, e quella sopra, in cui invece vi è trasporto del materiale. Per bassi valori del numero di Reynolds la viscosità prevale sulla velocità e la particella si muove solo in caso di diametri sufficientemente piccoli, mentre per valori elevati di Re_* allora la mobilità delle particelle diventa indipendente dalla viscosità del fluido.

È bene tener presente però che la teoria di Shields è stata ricavata partendo da ipotesi molto restrittive, che spesso non rispecchiano le situazioni reali, e le condizioni di movimento incipiente possono essere molto diverse da quelle teoriche. La definizione del valore critico di Shields è stata studiata nel tempo e diversi autori hanno trovato valori significativamente diversi per identificare l'inizio del movimento, ritenendo quindi tale approccio inaffidabile a causa della sua semplicità e considerando invece coefficienti correttivi e variabili aggiuntive, come ad esempio: pendenza del letto, pendenza laterale, sommersione relativa, eterogeneità del materiale, corazzamento dell'alveo, geometria della sezione trasversale o flussi secondari nelle anse dei canali (Bonilla Porrás, 2022). Soprattutto per i corsi d'acqua montani, per determinare le condizioni di moto incipiente nell'alveo, si utilizza spesso la pendenza critica, cioè la pendenza del fondo per cui l'alveo è in equilibrio. La pendenza critica viene calcolata nelle ipotesi di moto turbolento (Re_* alti) e uniforme, ed è espressa come:

$$(i_f)_{cr} = 0,057 \frac{\Delta d}{h}$$

in cui Δ è la densità relativa del materiale del letto, d è la dimensione media delle particelle e h è il tirante idrico (Colombo & Giuriani, 2010).

2.2. Trasporto solido

Il trasporto solido di un corso d'acqua naturale può essere classificato in diverse modalità (Fig. 3) che nel loro complesso rappresentano il trasporto solido totale:

- *Trasporto solido in sospensione (suspended load).*

Il trasporto solido in sospensione comprende le particelle che vengono sollevate dal letto del fiume e mantenute in sospensione grazie alla turbolenza della corrente, che le fa percorrere tratti più o meno lunghi prima di ritornare al fondo. Durante il trasporto il peso del materiale è sostenuto quindi da fluttuazioni di velocità dirette verso l'alto che fanno muovere le particelle all'interno della colonna d'acqua. Generalmente si tratta della componente più importante del trasporto solido totale e può essere suddivisa a sua volta in due classi: il trasporto per dilavamento (wash load)

e il trasporto in sospensione in senso stretto (suspended load) (Rinaldi et al., 2011) (Frey & Church, 2011).

Il trasporto per dilavamento rappresenta la frazione più fine del trasporto in sospensione che si origina dall'erosione del terreno dei versanti durante gli eventi piovosi e si muove direttamente verso le zone di sedimentazione senza mai entrare a far parte del materiale del letto; si tratta quindi di particelle di ridotta granulometria, come limi e argille. Il meccanismo di trasporto dipende solo debolmente dalle caratteristiche del flusso, come la velocità della corrente, la pendenza del letto o le proprietà dei sedimenti; infatti, la quantità di carico di dilavamento all'interno del corso d'acqua dipende principalmente dall'approvvigionamento di materiale a monte. Tuttavia, è importante considerarne la rilevanza all'interno del sistema fluviale a causa delle implicazioni ecologiche associate alla torbidità, al trasporto di nutrienti o al possibile adsorbimento di contaminanti.

Il trasporto in sospensione in senso stretto può essere invece sedimentato nell'alveo in zone o in periodi con minor capacità di trasporto da parte della corrente e dipende dalla capacità del flusso di trascinare e trasportare il materiale che quindi viaggia in sospensione con circa la stessa velocità del fluido. Poiché anche il materiale trasportato per dilavamento viaggia sospeso nel flusso potrebbe risultare difficile distinguere correttamente i due processi. La differenza del trasporto in sospensione in senso stretto rispetto a quello per dilavamento riguarda:

- a. l'origine – il carico di dilavamento non ha origine dal letto fluviale;
- b. la granulometria – il trasporto per dilavamento comprende limo e argilla;
- c. la coesione – il materiale del carico di dilavamento è per lo più coeso;
- d. la dipendenza dalle condizioni del flusso – il trasporto per dilavamento dipende principalmente dall'offerta di materiale e solo debolmente dalle caratteristiche e condizioni del flusso (Bonilla Porras, 2022).

- *Trasporto solido al fondo (bed load).*

Il trasporto solido al fondo, o di base, comprende tutti i sedimenti che si muovono sul letto fluviale, o poco distanti da esso, sia come singoli elementi, sia come movimento generale di più particelle con varie dimensioni. Durante il trasporto il peso del materiale grava quindi principalmente sul letto del fiume, in cui scivola o rotola in contatto più o meno costante con altre particelle. Nonostante si tratti quasi sempre di

un trasporto quantitativamente inferiore rispetto a quello in sospensione, rappresenta comunque una frazione molto importante del trasporto totale direttamente connessa alle variazioni morfologiche dell'alveo.

- *Trasporto solido in soluzione.*

Il trasporto solido in soluzione è il trasporto di sostanze disciolte nell'acqua del fiume in seguito a processi di dissoluzione delle rocce che affiorano nel bacino idrico. Difficilmente rappresenta una frazione significativa del trasporto solido totale, ma può assumere una certa importanza nei corsi d'acqua che drenano rocce particolarmente solubili.

- *Trasporto solido per flottazione.*

Il trasporto solido per flottazione (o fluitazione) è costituito prevalentemente da materiali legnosi galleggianti (tronchi e rami) o, in particolari regioni, da blocchi e frammenti di ghiaccio (Rinaldi et al., 2011).

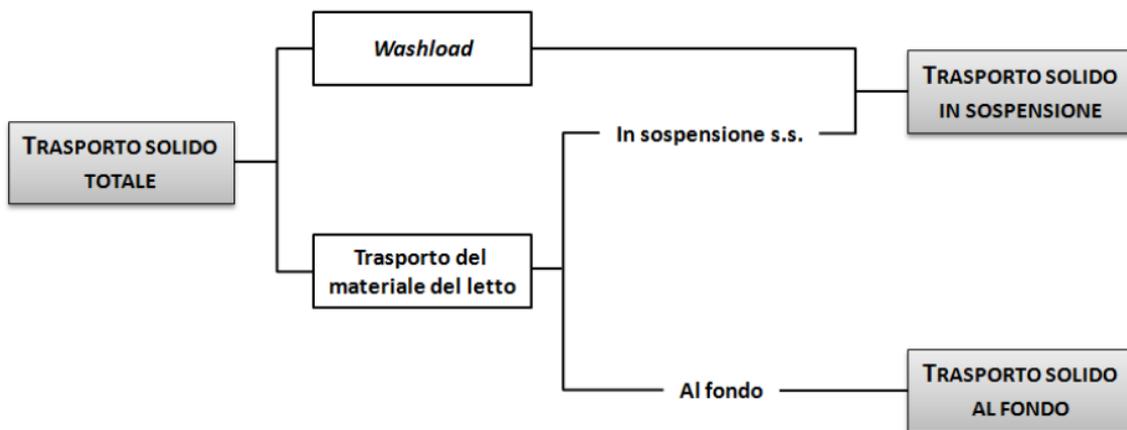


Figura 3: Modalità di trasporto solido (Rinaldi et al., 2011).

2.3. Carico di fondo (bed load)

Il carico di fondo, cui spesso ci si riferisce con il termine “bed load”, rappresenta la frazione del carico totale di sedimenti che si muove verso valle con un contatto costante, o quantomeno frequente, con il letto fluviale (Wyss et al., 2016). Durante il trasporto, ad opera della corrente, i clasti possono muoversi mediante scorrimento, rotolamento o saltazione (o saltellamento) (Fig. 4). Scorrimento e rotolamento prevedono che le particelle si muovano senza perdere quasi mai il contatto con la superficie del letto,

mentre la saltazione avviene quando le particelle si spostano attraverso una serie di balzi staccandosi periodicamente dal fondo e percorrendo un piccolo tratto prima di tornare a contatto con la superficie solida (Antoniazza, 2023).

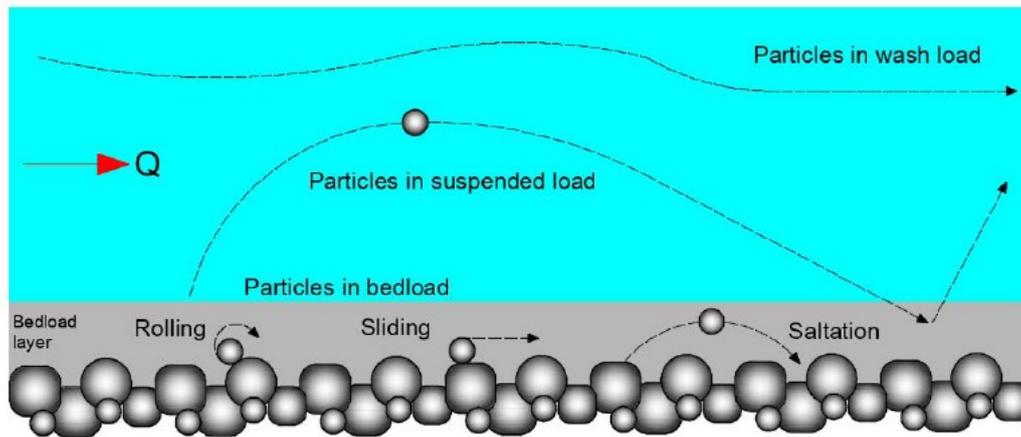


Figura 4: Schematizzazione dei meccanismi di trasporto dei sedimenti (Bonilla Porras, 2022).

Il trasporto di base ha inizio nel momento in cui la forza di taglio del flusso d'acqua supera la forza di resistenza della matrice del letto. Se le componenti di portanza e degli stress turbolenti in gioco non sono abbastanza forti da mantenere la particella sospesa, ma abbastanza da metterla in movimento, allora è probabile che il materiale solido si sposti scivolando o rotolando sulle altre particelle. Se invece la velocità del flusso continua ad aumentare allora i clasti possono essere trasportati per saltazione, compiendo salti più o meno regolari lungo il letto del fiume.

Il bed load si differenzia dal trasporto di sedimenti sospesi (suspended load) in quanto durante la sospensione i moti turbolenti della corrente sono in grado di mantenere le particelle all'interno della colonna d'acqua senza contatto con il fondo su lunghe distanze. Sulla base di questo però può risultare poco chiara la differenza fra il trasporto in sospensione e quello per saltazione e sono stati infatti sviluppati diversi criteri per distinguere ciascuna modalità di movimento. Einstein (1950), ad esempio, ha distinto le due modalità introducendo uno spessore dello strato di fondo, pari a due volte il diametro medio dei grani, al di sopra del quale il trasporto può definirsi sospeso; tuttavia, i successivi lavori sperimentali di Abbot e Francis (1977) hanno dimostrato che tale spessore poteva essere considerato fino a dieci volte il diametro medio dei grani. Rouse (1938), anziché definire dei limiti di spessore dello strato di fondo, ha definito invece le modalità di

trasporto attraverso il rapporto fra velocità di caduta del materiale (ω_s) e velocità di taglio (u_*), moltiplicato per la costante di von Karman ($k \cong 0,4$). A seconda dell'intervallo all'interno del quale ricade la relazione allora si può determinare se il materiale del letto viene trasportato come carico di fondo (bed load), carico sospeso (suspended load) o carico di dilavamento (wash load) (Bonilla Porras, 2022):

$$\begin{aligned} \frac{\omega_s}{ku_*} > 2,5 & \quad \text{Bed load} \\ 2,5 > \frac{\omega_s}{ku_*} > 0,8 & \quad \text{Suspended load} \\ \frac{\omega_s}{ku_*} < 0,8 & \quad \text{Wash load} \end{aligned}$$

Il trasporto del carico di fondo è nel suo complesso un fenomeno complicato che dipende da diversi parametri idraulici e geometrici, oltre che da proprietà fisiche proprie del mezzo di trasporto e del materiale movimentato. I parametri idraulici includono la velocità media del flusso, la profondità media dell'acqua e lo sforzo di taglio sui sedimenti, mentre i parametri geometrici riguardano generalmente la pendenza del letto e il diametro caratteristico del materiale del fondo. Le proprietà fisiche relative all'acqua e i sedimenti includono invece le densità e la viscosità del fluido (Carrillo et al., 2022).

Le interazioni tra i diversi parametri contribuiscono inoltre ad aumentare l'incertezza delle stime dei tassi di trasporto di un fenomeno che già di per sé presenta considerevoli fluttuazioni spaziali e temporali; tali fluttuazioni sono particolarmente rilevanti soprattutto nei torrenti montani, in cui anche la disponibilità di sedimenti rappresenta una variabile fondamentale in relazione alla velocità di trasporto del materiale solido (Wyss et al., 2016).

Importanza del trasporto del carico di fondo

Il trasporto solido di base rappresenta un fattore chiave da tenere in considerazione per la gestione dei sistemi fluviali, soprattutto per quanto riguarda i corsi d'acqua nelle aree montane. Esso contribuisce in modo determinante alla deposizione di sedimenti e influenza quindi direttamente le variazioni morfologiche degli alvei, lo sviluppo delle forme dei canali, ma anche gli ecosistemi dei fiumi, sia positivamente che negativamente.

Proprio per la sua capacità di influenzare l'alveo e la morfologia dei tratti fluviali, il trasporto del carico di fondo può essere correlato anche al rischio inondazioni; in generale può indurre l'incisione o l'aggradazione del letto, l'erosione delle sponde e la migrazione laterale del canale, avendo a sua volta un impatto sulle eventuali infrastrutture antropiche che possono essere coinvolte da tali eventi (Antoniazza et al., 2020).

Il bed load, soprattutto nei bacini idrografici montani, rappresenta quindi un possibile problema naturale, costoso in termini non solo economici, ma anche di salute umana. Nei quattro decenni dal 1970 al 2010, in Svizzera, è stato stimato un costo medio relativo al trasporto di base di circa 120 milioni di franchi all'anno, con quattro singoli anni che da soli hanno prodotto più di 500 milioni di franchi di danni. Essendo che il trasporto solido è anche una conseguenza dell'erosione fluviale, alti tassi di erosione dai bacini idrografici a monte portano conseguentemente ad alti tassi di apporto di sedimenti verso valle e all'abrasione delle infrastrutture, costando in alcuni casi anche fino al 20-30% dei costi operativi annuali delle centrali idroelettriche per interventi di mitigazione. Sotto il punto di vista della salute umana invece, dal 1946 al 2015, sempre in Svizzera, si sono contate più di 120 persone morte durante eventi di inondazioni aggravate dal carico di fondo (Antoniazza, 2023).

I principali problemi fluviali associati al bed load sono legati a squilibri nei tassi di trasporto del materiale, che possono portare a diverse situazioni critiche:

- quando i tassi di trasporto, o di approvvigionamento, del carico di fondo diminuiscono (ad esempio in seguito ad operazioni di dragaggio), oppure se il trasporto viene accelerato, si può andare incontro ad un'erosione del letto del fiume con conseguente destabilizzazione di strutture idrauliche (cedimento di piloni dei ponti e argini) e modifica degli habitat acquatici (perdita del letto di deposizione delle uova);
- quando i tassi di trasporto, o di approvvigionamento, del carico di fondo aumentano, e se esso viene depositato come materiale del letto, vi è invece un maggior apporto di sedimenti con conseguente riduzione della capacità dei bacini idrici, compromissione degli habitat acquatici, aumento del rischio di inondazioni e, in casi estremi, di eventuali avulsioni dei canali (Gray et al., 2010) (Geay et al., 2020).

Il monitoraggio con misure di campo locali, possibilmente a lungo termine, costituisce un fattore essenziale per la pianificazione fluviale e per prendere decisioni gestionali

informate che possono influenzare la dinamica di un fiume. Il trasporto di fondo è quindi un aspetto importante per molti ecosistemi e attività umane in prossimità dei corsi d'acqua, in particolare negli ambienti montani dove il riscaldamento climatico sta portando ad una rapida recessione dei ghiacciai e ad un aumento della frequenza di eventi idrologici estremi (Antoniazza et al., 2020).

Impatto dei cambiamenti climatici sul trasporto del carico di fondo

Alcuni processi idrologici possono determinare importanti variazioni nel deflusso dei corsi d'acqua all'interno dei bacini idrografici montani e innescare attraverso di essi il trasporto del carico di fondo (nel caso vi sia una capacità di trasporto sufficiente e sedimenti disponibili); tali processi includono in modo particolare:

- lo scioglimento del ghiaccio e della neve;
- le precipitazioni;
- la simultaneità di eventi di precipitazioni e di scioglimento (Antoniazza et al., 2022).

Attraverso l'effetto che ha sull'idrologia alpina, il cambiamento climatico in atto avrà sicuramente un ulteriore impatto sui fattori che regolano il bed load. Si prevede infatti che il periodo di scioglimento dei ghiacciai e della neve inizierà prima, all'inizio della primavera, mentre il contributo e il volume delle nevicate diminuirà portando probabilmente ad un maggior trasporto di base durante l'inverno e la primavera, con portate più elevate, e un minor carico durante l'estate e l'autunno, più secchi. Inoltre, la tempistica delle forti precipitazioni e la loro intensità, nonostante siano già fondamentali nel determinare la capacità di trasporto dei bacini idrografici, diventeranno ancora più importanti considerando il previsto aumento della magnitudo e della frequenza degli eventi di precipitazione estremi in condizioni di cambiamento climatico. Si teme quindi che il trasporto del materiale di fondo possa aumentare in relazione all'entità e alla frequenza di portate elevate indotte dalle precipitazioni. Tuttavia, non è ancora chiaro come i fattori idrologici e la loro interazione temporale evolveranno con le attuali condizioni di cambiamento climatico (Antoniazza, 2023).

Nei diversi lavori condotti da Antoniazza et al. (2022 e 2023) nel bacino idrografico Vallon de Nant, ad esempio, si è potuto constatare che probabilmente il cambiamento climatico comporterà una transizione da un deflusso dei corsi d'acqua principalmente

regolato da eventi misti di scioglimento della neve e precipitazioni, verso un dominio di soli eventi piovosi. Potrebbero esserci in tal caso periodi più lunghi di flussi non competenti intervallati da brevi periodi dominati dalle precipitazioni e con elevata capacità di trasporto solido. Data la relativa inefficienza dei bacini idrografici alpini di convogliare il materiale grossolano durante i singoli eventi di deflusso, tale situazione di cambiamento climatico si potrebbe tradurre in un tasso di trasferimento di materiale complessivamente più lento e in una graduale aggradazione dei fondivalle a lungo termine. In un contesto di cambiamento climatico, i progressi nei modelli idrologici dei torrenti montani possono quindi aiutare la previsione delle variazioni nella capacità di trasporto, anche se probabilmente la sfida più grande rimane prevedere quando e dove verranno forniti i sedimenti ai corsi d'acqua montani in un clima in cambiamento.

3. MONITORAGGIO DEL CARICO DI FONDO

Nonostante si tratti di un aspetto rilevante per la gestione dei fiumi e dei bacini idrografici, il trasporto solido di fondo rimane un processo difficile da misurare con precisione, in particolar modo per i torrenti montani. Conoscere il modo in cui il materiale solido viene movimentato e i momenti in cui tale fenomeno si attiva all'interno dei corsi d'acqua risulta fondamentale per comprendere l'evoluzione e le dinamiche dei canali, per quantificare i carichi di sedimenti trasportati, per eventuali progetti ingegneristici, per il ripristino dei fiumi, ma anche per la gestione del rischio alluvioni e la pianificazione o attuazione di misure di protezione dalle inondazioni (Carrillo et al., 2022) (Rickenmann, 2017). Come riportato da Møen (2010), ad esempio, la necessità di avere dati precisi sul carico di fondo è strettamente legata anche alla costruzione di centrali idroelettriche e alla valutazione dei relativi impatti ambientali sui tratti fluviali a valle. Durante il periodo di costruzione è necessario stimare il carico di fondo delle diverse prese che deviano l'acqua in modo da selezionare il posizionamento dei dissabbiatori e dei bacini di sedimentazione all'interno del sistema idroelettrico.

Il monitoraggio del carico di fondo nel lungo periodo risulta quindi di particolare importanza per diversi aspetti della gestione fluviale e l'assenza di dati nella maggior parte dei corsi d'acqua evidenzia la necessità di migliorare e sviluppare nuovi metodi di misurazione che siano semplici e facilmente implementabili (Møen, 2010). Proprio la mancanza di sistemi di monitoraggio sul campo affidabili ed economici ha in parte limitato i progressi in quest'ambito, anche se negli ultimi anni alcuni miglioramenti metodologici nelle tecniche acustiche e sismiche hanno consentito importanti sviluppi applicativi nelle misurazioni continue (Antoniazza, 2023).

La difficoltà di prevedere e misurare il trasporto del carico di fondo deriva dal fatto che si tratta di un processo molto complesso a causa delle interazioni multiple tra l'acqua corrente, la natura eterogenea dei materiali del letto, l'instabilità idraulica e il trasporto stesso dei sedimenti. Inoltre, si tratta di un fenomeno tipicamente molto variabile in quanto deriva dal bilancio tra il cambiamento della capacità di trasporto di materiale solido (in funzione del cambiamento del flusso) e il cambiamento della disponibilità di sedimenti (nel letto del torrente o come alimentazione dalla rete idrografica). Negli ambienti montani si aggiungono poi ulteriori elementi di complessità a causa di gradienti

energetici elevati e spazialmente variabili, associati alla rugosità grossolana del fondo, all'idraulica turbolenta e instabile che ne deriva e alle frequenti modifiche dell'alveo del torrente in seguito a processi di erosione e deposizione (Antoniazza et al., 2020).

L'elevata variabilità e complessità dei parametri coinvolti nel trasporto solido rendono discutibile anche l'affidabilità delle equazioni del carico di fondo, sviluppate per ottenere delle stime dei tassi di trasporto attraverso modelli teorici o semi-empirici; da una parte vi è la difficoltà di includere tutte le variabili spazio-temporali in un modello semplificato, dall'altra vi è l'assenza di supporto empirico sul campo (Carrillo et al., 2022). In generale, l'assenza di dati e l'imprecisione delle equazioni predittive, ha limitato la comprensione del modo in cui i bacini idrografici montani producono, trasportano e immagazzinano materiale grossolano durante gli eventi di elevata magnitudo. Si ritiene che gli eventi di deflusso più intensi siano importanti per fornire materiale dalle aree meno collegate dei bacini e per rielaborare il letto fluviale, mentre gli eventi di deflusso bassi e intermedi potrebbero essere responsabili della progressiva mobilitazione ed evacuazione del materiale reso disponibile nella rete di canali principale. Tuttavia, queste assunzioni non sono ancora state effettivamente testate proprio a causa della difficoltà di ottenere dei set di dati sul trasporto di fondo continui e distribuiti spazialmente; quindi, non si ha ancora una certezza scientifica su dove e quanto materiale venga mobilitato e immagazzinato durante gli eventi di elevata magnitudo, e nemmeno sulla proporzione esportata allo sbocco dei bacini montani (Antoniazza, 2023).

Come riportato da Rinaldi et al. (2011) all'interno del *Manuale tecnico – operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d'acqua*, il trasporto solido (in particolare quello al fondo) non rientra nell'elenco dei parametri da monitorare in quanto la sua misura è molto onerosa e richiede tempi relativamente lunghi, nonostante sia riconosciuta la sua importanza per un'adeguata comprensione della dinamica fluviale. Tuttavia, viene incoraggiata ogni possibilità di includere la misurazione di tale processo nel programma di monitoraggio ritenendo sufficiente un punto di monitoraggio all'interno di un bacino (esclusi bacini di grandi dimensioni nei quali potrebbero essere necessari più punti) in corrispondenza o in prossimità di una stazione idrometrica delle portate. La misura del trasporto potrebbe essere quindi realizzata in un'ottica di monitoraggio strumentale in corrispondenza di tratti a rischio o per investigare particolari problemi e monitorare gli effetti di determinati impatti (Rinaldi et al., 2011). Anche in

vista di ciò si evince la particolare importanza che assume il fattore economico in relazione a sistemi che possano essere implementati in modo pratico su vari contesti montani.

I metodi di monitoraggio del carico di fondo possono essere suddivisi in metodi diretti e indiretti. Ogni tecnica può essere utile per raccogliere importanti dati sulla mobilitazione del materiale fluviale, ma presenta anche particolari condizioni d'uso e limitazioni relative all'efficienza idraulica e di campionamento, alla funzionalità durante portate elevate, alla durata del campionamento, alla dimensione dei grani e a ulteriori criteri tecnici, operativi ed economici dei dispositivi utilizzati (Habersack et al., 2017).

L'impiego dei campionatori più tradizionali (campionamento diretto dei materiali del carico di fondo), ad esempio, è applicato da molti anni, ma richiede tempo, può essere costoso ed è rischioso in caso di forti flussi d'acqua. Misure continue e affidabili del bed load sono quindi difficili e impegnative da ottenere, ma i progressi nelle tecnologie e gli sviluppi di sistemi alternativi per integrare o sostituire l'uso dei metodi tradizionali sembrano promettenti, soprattutto negli ultimi anni (Geay et al., 2020).

3.1. Metodi diretti

I metodi di monitoraggio diretto del trasporto del carico di fondo comprendono sistemi di campionamento tradizionali che il più delle volte si basano sulla semplice raccolta fisica del materiale movimentato per misurarne il volume o il peso trasportato in un certo intervallo temporale. Le prime misurazioni dirette del bed load nei corsi d'acqua prevedevano infatti l'utilizzo di dispositivi mobili di raccolta dei sedimenti tramite campionatori a sacca, a rete, cestelli, trappole fisiche o campionatori a fessura (Nicollier et al., 2022). Questo tipo di metodi però permettono solo delle misurazioni puntuali che non forniscono informazioni sulla variabilità spaziale (attraverso la sezione fluviale) e temporale (durante gli eventi di mobilitazione del materiale) tipica del trasporto di base. I campionamenti diretti sul campo infatti sono rari, in particolare nei corsi d'acqua montani, perché si tratta di misurazioni laboriose, talvolta costose e tecnicamente impegnative, che implicano notevoli investimenti in termini di sforzi umani e tempo. Inoltre, le trappole e i sistemi di raccolta vengono spesso riempiti rapidamente, influenzano le condizioni idrauliche e, nei casi di campionamenti manuali da parte di

personale in piedi sul letto del fiume o vicino ad esso, possono essere potenzialmente pericolosi da intraprendere, soprattutto a portate elevate o in corsi d'acqua grandi e ripidi (Antoniazza, 2023) (Rickenmann, 2017).

I metodi di monitoraggio diretto possono comunque fornire delle misure accurate sulla velocità di trasporto del carico di fondo, ma la loro principale carenza rimane quella di non poter svolgere delle misurazioni continue; a livello pratico esistono dispositivi sofisticati in grado di campionare continuamente il materiale solido sull'intera lunghezza del fiume, come carrelli mobili o nastri trasportatori, ma sono costosi e tecnicamente impegnativi da realizzare (Wyss et al., 2016). I metodi diretti più diffusi sono i campionatori portatili a rete e le trappole a fessura sul fondo.

Campionatori a rete

I campionatori a rete, o a sacca, comprendono un insieme piuttosto generale di sistemi portatili che vengono utilizzati manualmente, sospesi tramite cavi o fissati sul fondo del canale per raccogliere il materiale solido all'interno di una rete o di un contenitore con l'apertura a favore di corrente. A seconda delle possibilità operative, delle dimensioni del campionatore e delle difficoltà derivanti da flussi troppo elevati, questo tipo di strumenti possono essere calati sul letto del fiume direttamente da guado oppure da ponti e passerelle con il supporto di verricelli e gru mobili. Grazie al costo relativamente basso, l'elevata gamma di esperienze e la facilità di gestione, i metodi diretti con trappole a rete sono stati spesso utilizzati per il campionamento dei sedimenti, consentendo di determinare la portata specifica del carico di fondo, l'intensità di trasporto e la granulometria del materiale movimentato (Habersack et al., 2017).

Nonostante i campionamenti vengano generalmente ripetuti ed effettuati in più punti lungo la sezione trasversale dei corsi d'acqua, le misure ottenute con questi sistemi rimangono comunque molto limitate per quanto riguarda la copertura temporale e spaziale del trasporto solido (Rickenmann, 2017). L'efficienza di campionamento inoltre diminuisce con il progressivo riempimento del sistema di raccolta ed è influenzata dal volume del campionatore, dalla granulometria superficiale e dalla presenza di possibili ostruzioni (Mao, 2011).

Esempi di sistemi di raccolta a rete sono il campionatore Helley-Smith e la trappola di Bunte (Fig. 5), il primo è portatile, mentre il secondo è fisso al fondo e non necessita la presenza di operatori sul campo durante l'evento di trasporto.



Figura 5: Campionatore Helley-Smith (a sinistra) (Geay et al., 2020) e trappola di Bunte (a destra) (Mao, 2011).

Trappole a fessura

Le trappole a fessura sono costituite da una serie di contenitori per la raccolta del materiale solido inseriti in fosse di cemento nell'alveo fluviale e coperti da piastre fessurate posizionate a livello del letto. Le particelle del carico di fondo trasportate dalla corrente vengono quindi catturate cadendo attraverso le fessure e in alcuni sistemi, dotati di apposita apparecchiatura in situ, possono venire direttamente pesate. A seconda della loro configurazione i campionatori a fessura possono essere distinti in due tipologie: quelli in cui la fessura di misurazione è perpendicolare alla direzione del flusso e quelli in cui invece è parallela. I campionatori con la configurazione perpendicolare (detti anche campionatori vortex) sono spesso dotati di un'unica fessura che copre l'intera larghezza dell'alveo e consentono quindi di ottenere migliori informazioni in merito alla variabilità spaziale e alla distribuzione granulometrica delle particelle trasportate lungo la sezione trasversale del letto del fiume (Habersack et al., 2017).

Nonostante le limitazioni legate al volume di raccolta, alla dimensione massima dei grani (dettata dalla dimensione delle fessure) e alla necessità di frequenti svuotamenti, i metodi di campionamento a fessura tendono a fornire dati sul carico di fondo più affidabili rispetto a quelli dei campionatori a rete. È bene tener presente però che in base alle

dimensioni delle trappole, alla sezione che si vuole ricoprire e alle varie implementazioni possibili, come nel caso di trappole sollevabili idraulicamente (Fig. 6), i sistemi di campionamento a fessura possono comportare installazioni anche molto costose e che richiedono importanti interventi in alveo (Gray et al., 2010).

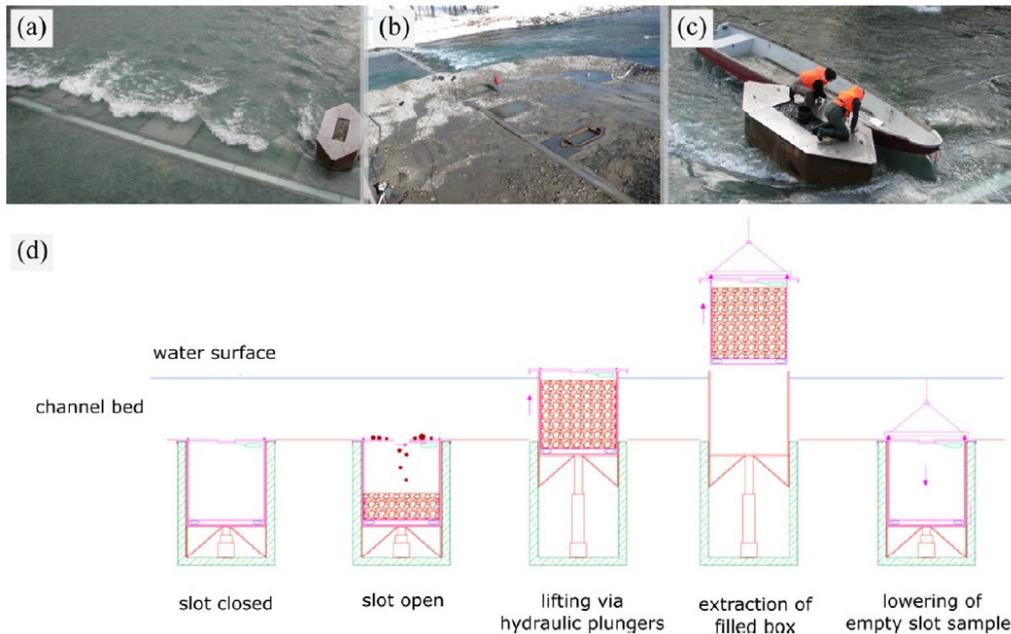


Figura 6: Campionatore a fessura sollevabile durante il sollevamento (a), campionatori a fessura durante la manutenzione (b), campionatore a fessura sollevabile durante l'estrazione del contenitore pieno (c) e modalità di funzionamento del campionatore a fessura sollevabile (d) (Habersack et al., 2017).

3.2. Metodi indiretti

Negli ultimi decenni i progressi tecnologici hanno permesso lo sviluppo di tecniche surrogate per la misurazione del carico di fondo, alimentate anche dalla necessità di avere a disposizione dati di monitoraggio ad alta risoluzione temporale e procedure di misurazione automatiche per sopperire ai limiti dei metodi tradizionali. I nuovi sistemi, infatti, non hanno lo scopo di campionare fisicamente i sedimenti, ma misurano un sottoprodotto dell'attività del trasporto con l'aiuto di un sensore, consentendo quindi di effettuare misurazioni meno invasive e continue, anche in corrispondenza di portate elevate dove l'utilizzo manuale di un dispositivo diretto sarebbe difficile o impossibile (Wyss et al., 2016).

I sensori utilizzati nei moderni metodi di misurazione del bed load possono essere distinti a seconda che il loro funzionamento si basi su principi attivi o passivi.

- Le tecniche che impiegano l'utilizzo di sensori attivi rivelano le caratteristiche del letto tramite l'emissione di segnali (onde elettromagnetiche o acustiche) e la registrazione di proprietà selezionate del segnale riflesso per ottenere delle stime del movimento dei sedimenti. Negli ultimi anni sono in fase di sviluppo numerosi dispositivi dotati di sensori attivi utilizzabili come tecnologie surrogate per il carico di fondo, tra cui profilatori di corrente Doppler (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler), sonar, radar e traccianti intelligenti (tag di identificazione a radiofrequenza e micro-trasmettitori radio).
- I sistemi di monitoraggio basati su sensori passivi invece sfruttano i segnali naturali generati dall'attività diretta del trasporto e registrano quindi gli impatti dei sedimenti (impatti contro i dispositivi di registrazione oppure impatti tra le particelle e con il letto). I sensori possono essere utilizzati sia in modalità autonoma, come gli idrofoni che registrano l'energia acustica delle collisioni tra i clasti, sia in combinazione con dispositivi di impatto, come geofoni, sensori piezoelettrici e microfoni abbinati a tubi o piastre metalliche di cui registrano le vibrazioni (Gray et al., 2010).

I principali risultati ottenuti dagli sforzi degli ultimi anni hanno riguardato in particolare i metodi di monitoraggio indiretti il cui elemento principale è costituito da un sensore passivo in grado di misurare continuamente il suono (onde acustiche) o le vibrazioni (onde elastiche) indotti dallo spostamento delle particelle solide (Wyss et al., 2016). Oltre a fornire serie temporali continue del trasporto di base senza interferire con il flusso o con il movimento dei sedimenti, tali sensori permettono di ottenere quantificazioni robuste del carico di fondo movimentato, velocità di trasporto e, in alcuni casi, anche informazioni sulla granulometria del materiale. Tuttavia, per convertire i segnali registrati e arrivare a questo tipo di misurazioni con una ragionevole precisione, è necessario che i sensori vengano calibrati sul campo mediante campionamento diretto del carico di fondo nello stesso sito e sincronizzato con il metodo surrogato. Anche nel caso in cui non sia possibile o disponibile alcuna calibrazione diretta, però, il monitoraggio indiretto del bed load può fornire comunque importanti informazioni in merito all'inizio e la fine del fenomeno o sulla dinamica temporale delle variazioni di intensità del trasporto (Rickenmann, 2017).

Di seguito sono riportati i principali metodi di monitoraggio indiretto che prevedono l'impiego di sensori passivi, in particolare si tratta di piastre di impatto, tubi di impatto, idrofoni e metodi di sismologia ambientale.

Geofono Svizzero (piastre d'impatto)

Il sistema "Swiss Plate Geophone" (SPG), o Geofono Svizzero (Fig. 7), è un metodo di misurazione acustica passivo sviluppato dall'Istituto federale di ricerca svizzero WSL. Tale sistema vanta diversi studi e un'esperienza diffusa che negli ultimi anni hanno portato alla sua implementazione in più di 20 stazioni di misurazione tra Svizzera, Austria, Italia, Israele e Stati Uniti, dimostrandosi particolarmente efficace per il monitoraggio del trasporto del carico di fondo nei torrenti montani (Antoniazza, 2023).

Il Geofono Svizzero è costituito da una serie di piastre in acciaio inossidabile incorporate in una struttura di cemento a filo con il letto del fiume, per non influenzare il trasporto e le condizioni idrauliche del flusso. Sul lato inferiore di ciascuna piastra è fissata una custodia di alluminio contenente un geofono, quindi, le particelle che vengono trasportate come carico di fondo scivolano, rotolano o saltano sulla piastra in acciaio che trasmette le vibrazioni indotte al sensore. Il geofono utilizza come elemento induttivo un magnete che si muove all'interno di una bobina assieme alla piastra d'acciaio generando un potenziale elettrico proporzionale alla vibrazione provocata dall'impatto (Rickenmann et al., 2014). Tipicamente le piastre d'acciaio vengono montate in linea una accanto all'altra per coprire l'intera larghezza del canale e vengono isolate acusticamente tra loro mediante elementi in gomma per ridurre al minimo la registrazione delle vibrazioni provocate dagli impatti sulle piastre vicine (Rickenmann, 2017).

Durante il monitoraggio, i dati registrati dai geofoni vengono riassunti come numero di impulsi al minuto, che corrispondono al numero di volte in cui il segnale elettrico grezzo supera una soglia predefinita; tale soglia viene normalmente fissata a 0,1 V in modo da includere le frazioni granulometriche più piccole rivelabili (circa 10-20 mm), ma rimanere allo stesso tempo almeno un ordine di grandezza superiore al livello di rumore in condizioni di flusso senza trasporto di base (Antoniazza et al., 2022). Gli esperimenti condotti da Wyss et al. (2016) hanno inoltre rivelato che anche le frequenze con cui le piastre vibrano possono fornire indicazioni sul bed load e in particolare la combinazione

delle informazioni sulla frequenza e sull'ampiezza del segnale possono permettere una stima relativamente affidabile della granulometria delle particelle su un'ampia gamma di dimensioni.

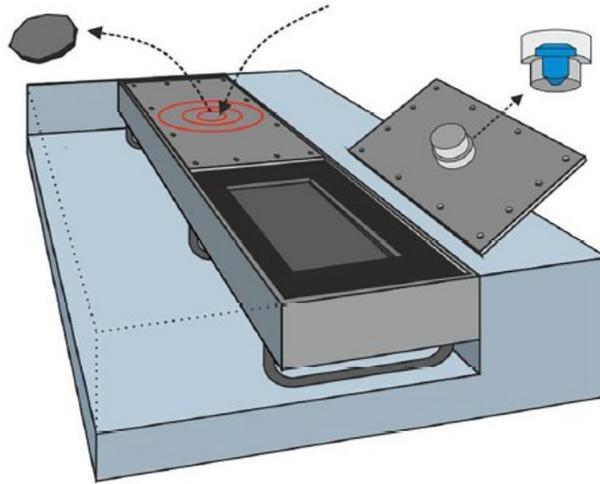


Figura 7: Schema del Geofono Svizzero dotato di piastre di impatto, geofoni e materiale gommoso per isolare le diverse sezioni (Nicollier et al., 2022).

I sistemi SPG sono stati utilizzati in diversi studi per quantificare la massa del carico di fondo trasportato, per determinare l'inizio e la fine del fenomeno e valutarne la variabilità su scale temporali più o meno lunghe, per stimare la distribuzione granulometrica del materiale movimentato e per studiare la variabilità spaziale lungo la sezione del fiume. Tuttavia, come in qualsiasi altro sistema di misurazione indiretto, per poter trasformare il segnale registrato in una massa effettiva è necessaria una calibrazione approfondita tramite campionamenti diretti e simultanei del bed load, da poter correlare con il segnale misurato (Fig. 8). Tali campionamenti però sono spesso molto impegnativi in termini di sforzi sul campo, infrastrutture, costi e tempo, soprattutto nei corsi d'acqua montani e durante le portate elevate. Ne sono una testimonianza i diversi articoli, in merito all'impiego e al miglioramento dei metodi di calibrazione del Geofono Svizzero, pubblicati da Antoniazza et al. (2022), Nicollier et al. (2022), Antoniazza et al. (2020), Rickenmann (2017) e Wyss et al. (2016). Inoltre, l'utilizzo di sistemi SPG richiede la realizzazione di sezioni trasversali stabili che possono comportare notevoli costi di installazione e possibili impatti ecologici (Antoniazza, 2023).



Figura 8: Stazione di monitoraggio in Vallon de Nant (Svizzera) in cui si può osservare la struttura in cemento che ospita il sistema SPG costituito da dieci piastre (a sinistra) e l'implementazione di una rotaia per spostare il campionario mobile di sedimenti sopra le singole piastre ai fini della calibrazione (a destra) (Antoniazza et al., 2022).

Microfono a tubo giapponese (tubi d'impatto)

Il microfono a tubo giapponese, o idrofono a tubo (Fig. 9), è al momento un metodo ampiamente utilizzato per il monitoraggio del carico di fondo in molti fiumi del Giappone e si è dimostrato un mezzo efficace per captare il trasporto del materiale solido anche nei torrenti montani. Il sistema è costituito da un tubo in acciaio, riempito d'aria, all'interno del quale è fissato un sensore (microfono) in grado di misurare gli impulsi acustici generati dall'impatto delle particelle contro la superficie metallica (Tsutsumi et al., 2018). Le vibrazioni registrate vengono in genere amplificate da un preamplificatore interno al tubo e trasmesse ad un convertitore che elabora il segnale. Gli impulsi generati dalle collisioni vengono quindi conteggiati ogni volta che viene superata una determinata soglia e memorizzati in un data logger ad intervalli regolari (Mao et al., 2014).

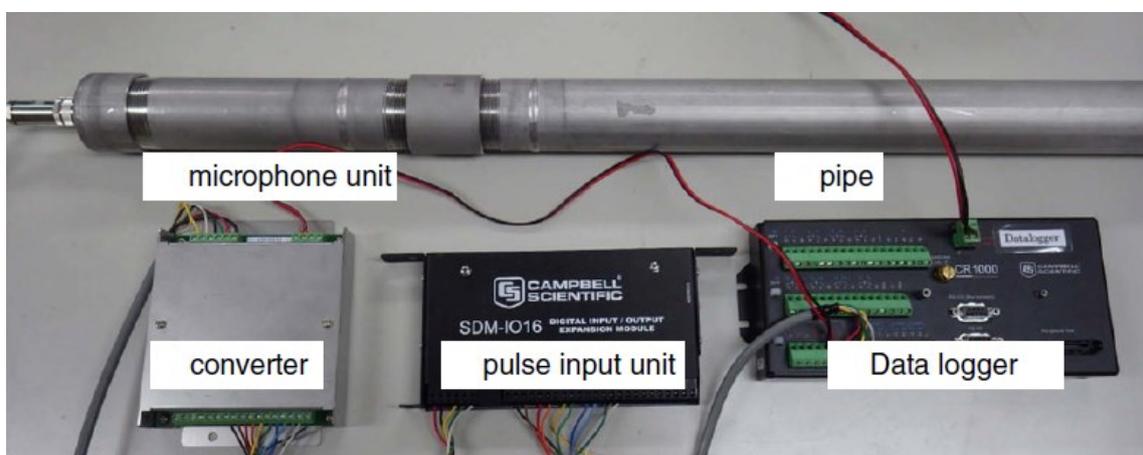


Figura 9: Microfono a tubo giapponese con le varie componenti (Tsutsumi et al., 2018).

Il tubo, di lunghezza variabile, viene tipicamente installato perpendicolare alla direzione del flusso e parzialmente interrato per metà del diametro in una sezione del letto stabile, una zona cementata o in un alveo rigido. Proprio per la possibilità di poter essere fissato direttamente sul letto del torrente, senza elaborate infrastrutture, tale metodo di monitoraggio risulta più facilmente utilizzabile rispetto al Geofono Svizzero e i suoi costi di installazione sono più bassi. Tuttavia, i tubi di misurazione possono essere danneggiati dal movimento di grandi massi e venir spazzati via durante eventi di trasporto di elevata magnitudo. Ulteriori svantaggi possono essere dovuti anche all'assenza di collisioni dei sedimenti con la superficie di acciaio a causa della saltazione delle particelle o al loro deposito sul tubo. In risposta a questi possibili problemi, ad esempio, Tsutsumi et al. (2018) hanno proposto un metodo di misurazione utilizzando la combinazione di un microfono a tubo orizzontale ed uno a tubo verticale (Fig. 10), nel canale Ashi-arai-dani, situato nella catena montuosa di Hodaka (Giappone). Si è ipotizzato infatti che un microfono a tubo verticale, installato sulla parete del canale, potesse rivelare le particelle che saltavano il tubo orizzontale posto sul letto, in modo da poter captare una proporzione maggiore di sedimenti trasportati come carico di fondo attraverso la sezione trasversale formata dai due strumenti. Con tale approccio è stato possibile ottenere una stima più accurata del bed load e una correlazione più solida tra gli impulsi registrati e i dati ottenuti da campionatori diretti. Anche nel caso degli idrofoni a tubo, infatti, per poter ottenere una relazione tra il segnale acustico e la portata solida di base, è necessario calibrare il sistema mediante metodi di campionamento diretto.



Figura 10: Microfono a tubo verticale (a sinistra) e microfono a tubo orizzontale (a destra) utilizzati da Tsutsumi et al. (2018) nel canale Ashi-arai-dani, nella catena montuosa di Hodaka (Giappone).

Idrofoni

Gli idrofoni (Fig. 11) vengono utilizzati per varie applicazioni in ambiente marino, identificando fonti di rumore ambientale subacqueo sia antropiche che naturali. Nonostante negli ultimi decenni vi siano state poche applicazioni di microfoni subacquei per monitorare il trasporto del carico di fondo nei corsi d'acqua, essi possono essere in grado di registrare le onde acustiche emesse dagli ambienti fluviali e fornire informazioni utili sul bed load. Il principio di misurazione è simile a quello delle tecniche acustiche passive (come i tubi di impatto); tuttavia, invece di registrare il suono prodotto dagli impatti delle particelle su una struttura di acciaio, gli idrofoni captano il rumore generato naturalmente dalle collisioni interparticellari o tra le particelle e il letto fluviale, segnali che rappresentano di fatto la principale fonte di rumore correlato al movimento dei sedimenti.

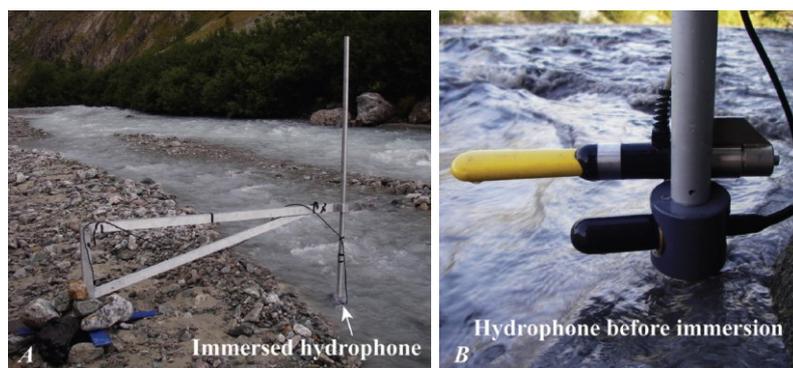


Figura 11: Idrofono sostenuto da un telaio fisso (a) e idrofono prima di essere immerso (b) (Gray et al., 2010).

Quando i sensori acustici vengono utilizzati per il monitoraggio continuo vengono generalmente fissati con una struttura di supporto (ad esempio vicino ad una sponda) in una posizione fissa e rilevano l'attività di trasporto relativa ad una determinata area del fondale in prossimità del microfono. I sensori però sono sensibili anche a qualsiasi altro rumore di fondo presente nel fiume, come ad esempio quello idrodinamico dovuto alle turbolenze, e se posizionati in un punto fisso la loro capacità di registrare suoni nell'intera sezione trasversale è discutibile (Rickenmann, 2017).

In riferimento anche a questi problemi, Geay et al. (2020) hanno sperimentato un protocollo innovativo per effettuare misurazioni lungo l'intera sezione trasversale con un

idrofono montato su un dispositivo galleggiante (tavola fluviale Carlson) (Fig. 12). Con tale modalità di dispiegamento, infatti, i suoni del bed load possono essere misurati con sensori che si muovono alla stessa velocità delle onde superficiali, evitando rumori indesiderati dovuti agli impatti delle onde contro i sistemi fissi e ottimizzando il rapporto segnale/rumore. Il metodo presentato è stato applicato in Francia, su 14 diversi siti, effettuando misurazioni dei segnali acustici in vari punti della sezione fluviale e campionamenti simultanei del carico di fondo con campionatori diretti, per calibrare le registrazioni. La potenza acustica media della sezione è stata quindi correlata ai flussi di fondo per quantificare il carico di base medio tramite una curva di calibrazione. Nel loro lavoro Geay et al. (2020) concludono che una misurazione continua del bed load potrebbe essere ottenuta utilizzando quasi solo gli idrofoni, anche se ritengono necessarie ulteriori misurazioni per testare la robustezza della calibrazione.

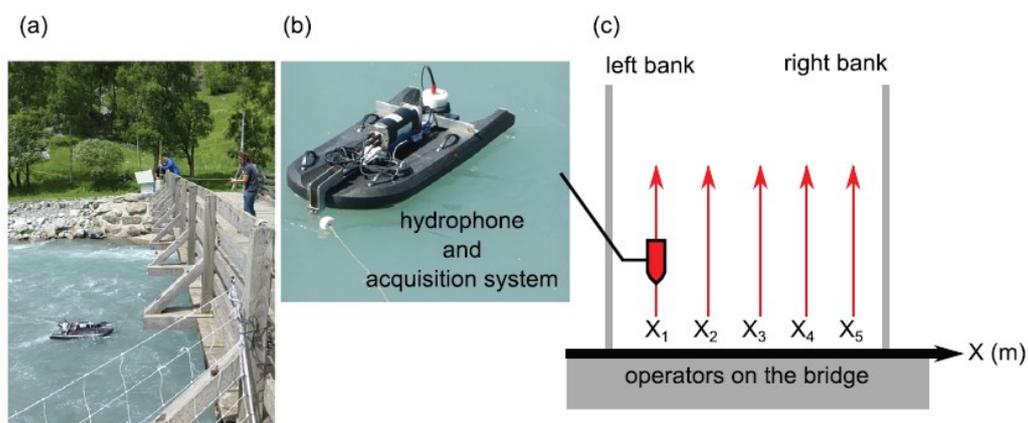


Figura 12: Utilizzo sul campo del metodo adottato da Geay et al. (2020) (a), idrofono e sistema di acquisizione durante le misure (b) e posizioni delle registrazioni lungo la sezione con spostamento dell'idrofono in direzione del flusso (freccie rosse) (c).

Sismologia ambientale

Altri esempi di dispositivi di monitoraggio indiretto del carico di fondo sono i sismometri installati vicino ad un fiume. Il segnale sismico registrato in prossimità di un corso d'acqua, infatti, è influenzato sia dal flusso idrico, che dall'attività di trasporto del carico di base (particelle grossolane che impattano sul letto), ed è stato dimostrato che i sismometri installati in prossimità delle sponde fluviali sono in grado di registrare

l'energia emessa dal bed load in una banda di frequenza specifica. Poiché tale frequenza è normalmente diversa da quella associata ad altri processi fluviali, è possibile ricavare serie temporali del trasporto del carico di fondo attraverso opportuni modelli di inversione fisica. La sismica ambientale inoltre ha un grande potenziale in quanto i sensori richiedono poca manutenzione, sono economici, non invasivi e facilmente installabili in campo, tanto da poter essere utilizzati come reti distribuite nello spazio per fornire informazioni continue sulle dinamiche di trasporto dei sedimenti in più punti a livello di bacino idrografico (Antoniazza, 2023).

Antoniazza et al. (2023), ad esempio, hanno presentato un'applicazione della sismica ambientale per monitorare un evento di trasporto del carico di fondo di elevata magnitudo avvenuto all'interno del bacino idrografico Vallon de Nant, nell'agosto 2020. L'evento è stato catturato simultaneamente da una rete di 24 geofoni (Fig. 13) installati per acquisire il segnale dal canale principale (Avançon de Nant) e dagli ingressi dei suoi affluenti più importanti, coprendo un totale di 9800 m di lunghezza con una media di un geofono ogni 400 m circa. Ciascun sensore era posizionato a 5-30 m dal canale, sepolto a 30 cm per essere isolato da interferenze superficiali (come pioggia e vento), orientato verso Nord e livellato orizzontalmente.

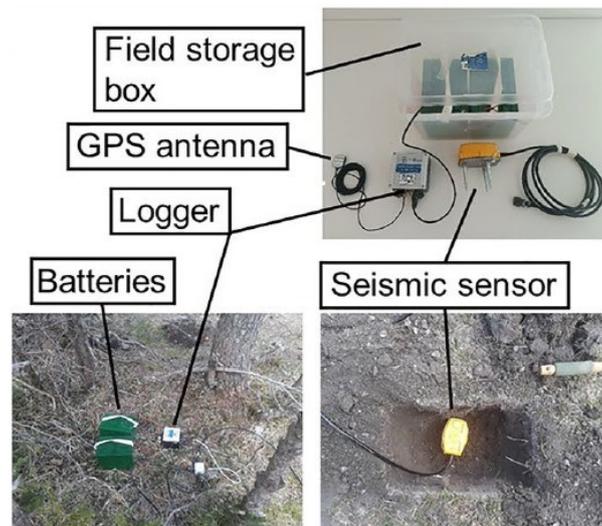


Figura 13: Attrezzatura sismica utilizzata nello studio di Antoniazza et al. (2023) con un esempio di installazione sul campo.

Le serie temporali del segnale registrato da ciascun sensore sono state poi invertite mediante un apposito modello fisico, tenendo in considerazione che lo spettro sismico

registrato in prossimità di un fiume è dominato da una combinazione di segnali dovuti alla turbolenza e al trasporto, quindi a bande di frequenza diverse, ma sovrapposte. I risultati ottenuti da Antoniazza et al. (2023) hanno mostrato quindi la possibilità di ottenere stime relativamente affidabili sul trasporto del carico di fondo tramite la sismologia ambientale; tuttavia, il gruppo di lavoro considera il modello di inversione ancora soggetto a varie fonti di incertezza (corretta ripartizione delle bande di frequenza, precisione dei parametri richiesti, possibile contaminazione del segnale da parte di rumore esterno al fiume), in particolare dove non sono disponibili dati di controllo simultanei, e ritiene necessaria ulteriore ricerca futura per testare e convalidare le prestazioni del metodo in una gamma di diverse condizioni di flusso e trasporto solido.

3.3. Considerazioni e valutazioni sui moderni metodi di monitoraggio

A causa della significativa variabilità spaziale e temporale del trasporto solido di fondo, la scelta del sistema più accurato da implementare per un piano di monitoraggio è spesso difficile e dipende da molti parametri; generalmente, infatti, solo la combinazione di diversi dispositivi può assicurare risultati che riflettono i reali processi di trasporto così come si verificano in natura.

È interessante, a tal proposito, il lavoro condotto da Habersack et al. (2017) in cui viene presentato un sistema integrato di monitoraggio automatico e continuo del bed load nel fiume Drava, presso il sito di misurazione di Dellach, in Carinzia (Austria), e viene mostrata l' idoneità dei diversi dispositivi per determinare i parametri del trasporto di base, oltre alle loro capacità e limiti rispetto a criteri tecnici, operativi ed economici. Le limitazioni specifiche dei singoli metodi di monitoraggio sono state integrate con dispositivi di misurazione aggiuntivi e il metodo complessivo ha compreso l' utilizzo di un campionatore mobile a rete (campionatore Helley-Smith), tre campionatori a fessura sul fondo, di cui uno sollevabile idraulicamente sopra la superficie dell' acqua (Fig. 6), e un sistema di 40 geofoni a piastre lungo l' intera sezione del fiume. Oltre ai sistemi di monitoraggio utilizzati nello studio, sono stati poi inclusi nella valutazione anche altri metodi grazie all' analisi e il supporto di ulteriori lavori scientifici, fra cui bacini di ritenzione monitorati, sensori acustici a tubo, idrofoni e traccianti.

La Fig. 14 fornisce un confronto visivo della capacità dei vari dispositivi di monitoraggio di misurare i parametri di interesse del trasporto del carico di fondo, distinguendo i metodi diretti (campionatore a cestello mobile, campionatori a fessura e bacino di ritenzione monitorato) in Fig. 14-a, e quelli indiretti (geofoni a piastre, idrofono a tubo, idrofono e traccianti) in Fig. 14-b.

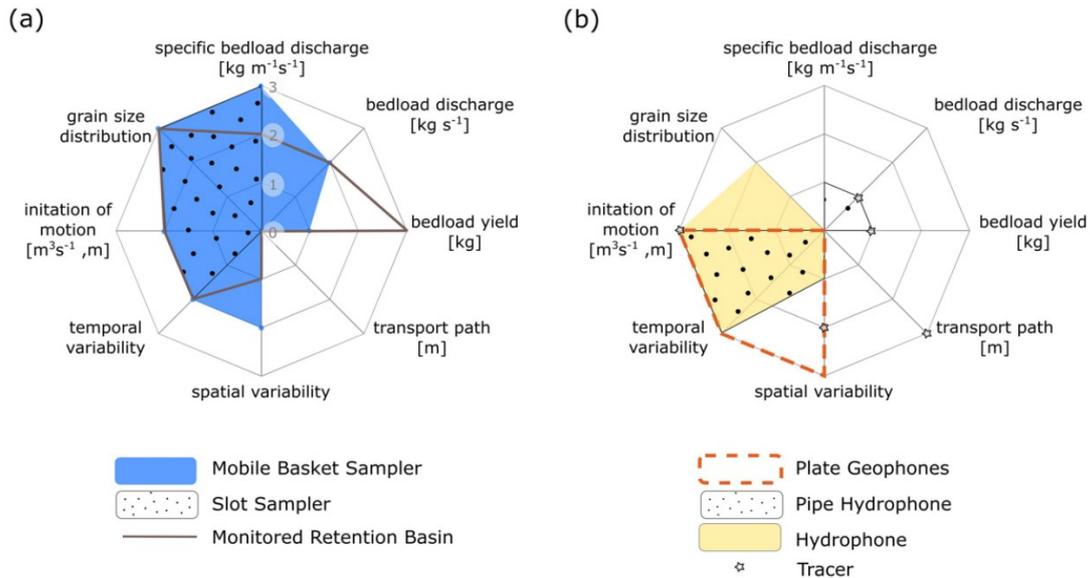


Figura 14: Idoneità dei singoli metodi di monitoraggio del bed load, distinti in metodi diretti (a) e metodi indiretti (b), rispetto ai principali parametri specifici. La scala di idoneità è: 3 = altamente idoneo alla misurazione del parametro; 2 = idoneo; 1 = parzialmente idoneo; 0 = non idoneo (Habersack et al., 2017).

Si può osservare da subito come nessuna tecnica di misurazione presa singolarmente permetta di ottenere informazioni su tutti i parametri considerati, ma che solo la combinazione e l'integrazione di più metodi può rappresentare un approccio ottimale. La scelta della tecnica può dipendere quindi dagli obiettivi dello studio, dal tipo di fiume, dal budget disponibile, dalla durata della misurazione e dai parametri di interesse.

La Fig. 15 mostra invece la potenziale idoneità del sistema di monitoraggio integrato per la misurazione del carico di fondo adottato presso il sito di Dellach, che ha combinato le informazioni ottenute da un campionatore a sacca mobile, tre campionatori a fessura e i geofoni a piastre.

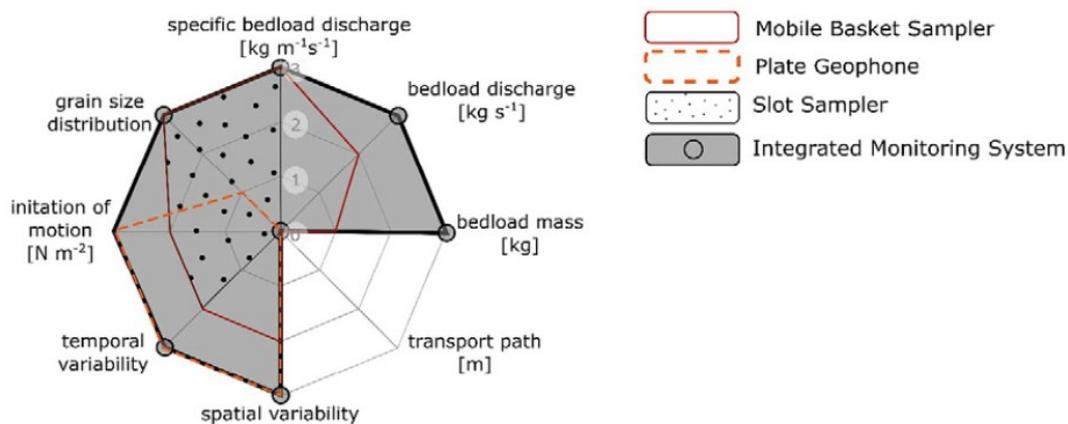


Figura 15: Idoneità del sistema di monitoraggio integrato e continuo del bed load adottato per il fiume Drava, presso la stazione di Dellach (Austria), rispetto ai principali parametri specifici. La scala di idoneità è: 3 = altamente idoneo alla misurazione del parametro; 2 = idoneo; 1 = parzialmente idoneo; 0 = non idoneo (Habersack et al., 2017).

Combinando i singoli metodi di misurazione del carico di fondo, il sistema di monitoraggio integrato ha consentito la stima della maggior parte delle informazioni sul bed load, permettendo un monitoraggio completo del processo di trasporto. In particolare, l'applicazione congiunta delle tre modalità di misura ha fornito informazioni sull'inizio e la cessazione del movimento, sui tassi specifici di trasporto, sulla distribuzione granulometrica e sulla variabilità spaziale e temporale del fenomeno.

Habersack et al. (2017), oltre a valutare i sistemi di monitoraggio sulla base dei principali parametri del trasporto di base in grado di determinare, hanno anche valutato le capacità e i limiti dei tre metodi applicati nella stazione di Dellach rispetto a criteri tecnici, operativi ed economici secondo una scala a sette valori, da molto positivo a molto negativo. La valutazione è riportata in Tab. 1 e gli otto criteri considerati sono rispettivamente: operabilità, applicabilità a differenti livelli dell'acqua, automazione, durata del campionamento, mobilità/flessibilità, disturbo del flusso, efficienza idraulica e di campionamento e costo.

		<i>Metodo</i>		
		Campionatori a sacca	Campionatori a fessura	Geofoni a piastra
<i>Criteri operativi</i>	Operabilità	—	++	+++
	Applicabilità a diversi livelli dell'acqua	---	+++	+++
	Automazione	---	++	+++
	Durata del campionamento	--	++	+++
	Mobilità/flessibilità	+++	---	---
<i>Criteri che influenzano le misurazioni</i>	Disturbo del flusso	---	+/-	+/-
	Efficienza idraulica e di campionamento	--	+++	+/-
<i>Criteri economici</i>	Costo	—	---	--

Tabella 1: Vantaggi e svantaggi dei tre metodi di monitoraggio del carico di fondo implementati sul fiume Drava, nella stazione di Dellach (Austria), sulla base di criteri tecnici, operativi ed economici. La scala di valutazione è: molto positivo (+++), positivo (++), leggermente positivo (+), neutro (+/-), leggermente negativo o costi contenuti (-), negativo o costi medi (- -) e molto negativo o costi elevati (- - -) (Habersack et al., 2017).

Il principale vantaggio dei metodi di monitoraggio indiretto è la possibilità di fornire registrazioni continue e automatiche del bed load, mentre i metodi diretti si prevede verranno sempre più utilizzati come tecniche di riferimento per la calibrazione dei sistemi surrogati. Le moderne tecnologie di monitoraggio, infatti, nonostante la continua necessità di calibrazioni specifiche, si stanno dimostrando molto promettenti per consentire delle misurazioni sicure, quantificabili e continue. Inoltre, sebbene in questo momento nessuna delle tecniche descritte sia ampiamente accettata per l'utilizzo in programmi di monitoraggio su larga scala, alcune sono in fase di valutazione. L'importanza che si sta attribuendo al fenomeno del trasporto del carico di fondo è testimoniata anche dai diversi Workshop internazionali tenutisi negli ultimi anni su aspetti specifici della ricerca sul trasporto dei sedimenti e sulle esigenze di monitoraggio.

4. DESCRIZIONE DEL METODO SPERIMENTALE DI MONITORAGGIO ACUSTICO

Il metodo sperimentale che si è interessati a sviluppare nell'ambito del progetto BE.R.G. riprende le dinamiche di monitoraggio indiretto delle moderne tecniche di misurazione, ma mantiene come linea di principio l'obiettivo di ottenere un sistema di monitoraggio economico, che possa essere facilmente implementato nei torrenti montani senza la necessità di elevati costi di installazione o interventi e lavori invasivi nell'alveo. Si tratta di un metodo di misurazione acustica passivo, basato quindi sulla registrazione di segnali sonori, che non necessita della presenza di personale sul campo e che consente di eseguire misurazioni più o meno continue nel tempo.

Il sistema di monitoraggio è costituito da una piastra in acciaio inossidabile al di sotto della quale è presente un microfono per la registrazione dei segnali acustici. La struttura di acciaio ha una forma a dosso, con due fori per poter allacciare la custodia con il registratore nella parte inferiore, ed è dotata di flange laterali per l'installazione sul letto del torrente; il posizionamento della struttura sul fondo si prevede venga fatto su sezioni che permettano un ancoraggio stabile con bulloni, quali opere idrauliche e briglie, o eventualmente tramite una zavorra interrata per tenere la piastra salda a livello con il letto. In ogni caso le modalità di installazione più convenienti, sicure ed efficaci potranno essere valutate durante la futura applicazione sul campo. In Fig. 16 sono mostrati i progetti per le strutture in acciaio con dimensioni variabili, fra cui quella utilizzata per i test in laboratorio (Fig. 16-b) e quelle previste per le prove in campo. Il funzionamento del sistema di monitoraggio è basato sul rumore generato dall'impatto del materiale solido trasportato contro la piastra metallica; gli impatti sonori dei clasti vengono infatti registrati dal microfono e si prevede di riuscire a distinguere i picchi generati dal trasporto dei sedimenti rispetto al rumore di fondo dovuto allo scorrimento dell'acqua.

Il lavoro svolto e il relativo sistema di misurazione al momento non hanno tanto l'obiettivo di arrivare a quantificare i tassi di trasporto o rivelare le granulometrie del materiale movimentato, ma piuttosto di riuscire a distinguere il momento in cui si attiva il fenomeno di trasporto e di poterlo eventualmente relazionare con le portate d'acqua presenti. Il sistema si prevede possa poi fornire dati in tempo reale in modo da tenere monitorato l'inizio del processo e mettere in atto le relative misure di prevenzione ritenute

più adatte. Anche in tal caso, le possibilità e le modalità di trasmissione diretta dei dati saranno valutate con l'evoluzione del progetto e durante la sua applicazione in campo.

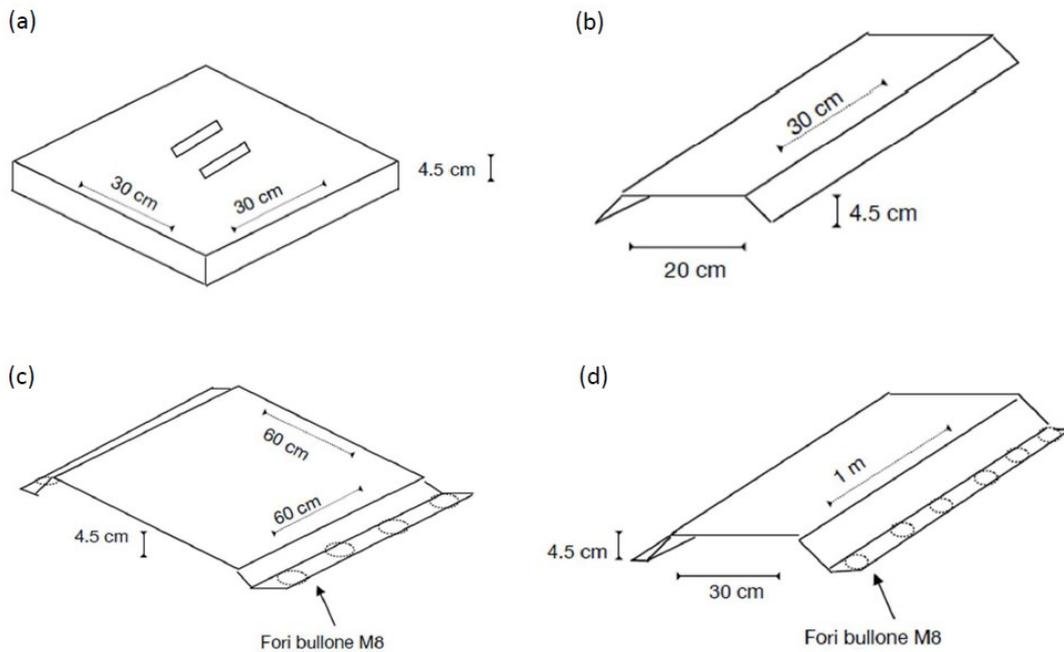


Figura 16: Progetti per le diverse piastre realizzate. Piastra quadrata in Acciaio Inox (a), piastra allungata in Acciaio Inox utilizzata per i test in laboratorio (b), piastra quadrata in Acciaio Inox flangiata per l'ancoraggio con bulloni (c) e piastra allungata in Acciaio Inox flangiata per l'ancoraggio con bulloni (d).

4.1. Registratore acustico HydroMoth

Il dispositivo utilizzato per la registrazione del rumore provocato dal trasporto dei sedimenti contro la piastra di acciaio è il registratore subacqueo “HydroMoth”, che rispecchia in modo ottimale il concetto di economicità adottato per il metodo di monitoraggio.

Come analizzato da Lamont et al. (2022), infatti, il monitoraggio acustico passivo negli ambienti acquatici è in gran parte limitato da vincoli finanziari legati agli alti costi dei registratori subacquei. Da una loro revisione sistematica della letteratura di studi recenti in merito alla registrazione sul campo di animali selvatici o paesaggi sonori naturali hanno evidenziato la considerevole disparità di costo fra le attrezzature per il monitoraggio

acustico terrestre e acquatico (Fig. 17). Il prezzo medio delle unità di registrazione subacquee autonome disponibili in commercio (4000 \$) è circa cinque volte superiore a quello dei dispositivi terrestri (849 \$) e la differenza di costo aumenta considerevolmente se si considera solamente la fascia di prezzo bassa; l'unità subacnea più economica, ad esempio (SoundTrap 300 STD, Ocean Instruments NZ, Auckland, Nuova Zelanda: 3000 \$), è 40 volte più costosa di quella più economica terrestre (ICD-PX240, Sony Corporation, Tokyo, Giappone: 69 \$). Per unità di registrazione autonome si intendono in genere dispositivi indipendenti con una fonte di alimentazione integrata, componenti elettronici per l'acquisizione e la memorizzazione dei suoni e un orologio interno per la marcatura temporale o la pianificazione dei dati.

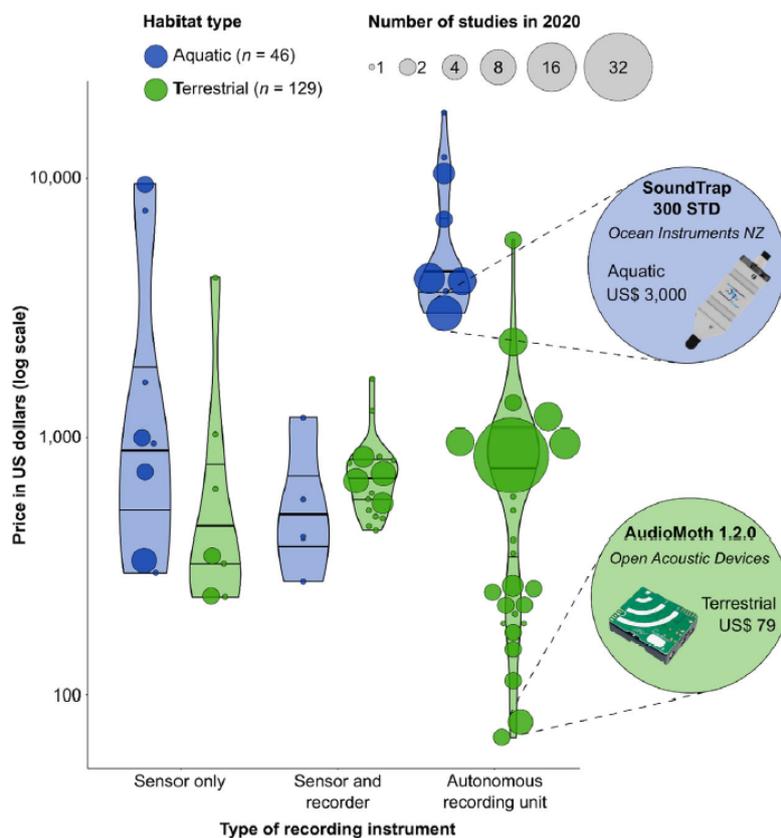


Figura 17: Prezzi degli strumenti di registrazione utilizzati negli studi di monitoraggio acustico terrestre (in verde) e acquatico (in blu) pubblicati nel 2020. Ogni punto rappresenta un diverso modello di strumento, mentre le dimensioni dei punti sono proporzionali al numero di studi in cui è stato utilizzato. I due modelli in evidenza sono SoundTrap 300 STD e AudioMoth 1.2.0, cioè i due strumenti confrontati nello studio di Lamont et al. (2022).

Il motivo dell'elevato prezzo dei registratori subacquei è dovuto al fatto che si tratta spesso di strumenti ad alte prestazioni, con caratteristiche tecniche avanzate e alti livelli di precisione che includono calibrizioni di fabbrica, memorie estese, batterie con durata prolungata e alloggiamenti in grado di resistere ad elevati livelli di profondità. La disparità di costo inoltre è in parte dovuta anche alla differente domanda di mercato. Molte applicazioni utili del monitoraggio acustico passivo negli ambienti acquatici però non richiedono caratteristiche così specifiche e costose, ma possono essere condotte anche con registrazioni non calibrate, di breve durata o a profondità poco elevate. In tali casi vi sarebbero quindi notevoli benefici dallo sviluppo di sistemi di registrazione con capacità ridotte, ma ad un prezzo nettamente inferiore.

Il sistema "HydroMoth" (Fig. 18) è un prototipo di registratore subacqueo economico recentemente realizzato da Open Acoustic Device. Si tratta di una versione modificata del modello terrestre "AudioMoth 1.2.0", cioè un dispositivo di registrazione open source a basso costo già ampiamente utilizzato per il monitoraggio acustico terrestre. Il nuovo prototipo HydroMoth è costituito dal dispositivo AudioMoth 1.2.0 con una custodia impermeabile, un firmware modificato per renderlo compatibile all'uso subacqueo a lungo termine e livelli di guadagno di registrazione variabili. Grazie alla nuova custodia impermeabile, già presente in AudioMoth per l'uso sotto la pioggia, ma adattata per l'impiego subacqueo, i dispositivi sono stati utilizzati con successo ad una profondità massima di 30 metri (per 9 giorni) e per un tempo massimo di 2 mesi (a 20 metri).

Nel loro studio, inoltre, Lamont et al. (2022), hanno anche testato le prestazioni di HydroMoth rispetto ai due registratori acquatici meno costosi disponibili in commercio (SoundTrap 300 STD a 3000 \$ e SoundTrap 300 HF a 4100 \$) registrando suoni artificiali e naturali (vocalizzazioni di mammiferi o pesci marini e paesaggi sonori della barriera corallina) sia in acquario che in condizioni di campo. I dispositivi sono simili nei metodi di implementazione (dispositivi piccoli che richiedono il fissaggio ad un supporto) e hanno tempi di registrazione massimi comparabili (10 giorni continui per HydroMoth e 13 per SoundTrap). Confrontando le registrazioni subacquee il gruppo di lavoro è arrivato alla conclusione che, sebbene HydroMoth abbia generalmente mostrato prestazioni inferiori rispetto a SoundTrap, la sua qualità di registrazione è probabilmente adeguata a molti scopi di monitoraggio, conservazione e ricerca nel campo subacqueo.

Il costo totale di HydroMoth è attorno ai 140 \$ e include il dispositivo di registrazione AudioMoth (79 \$), la custodia protettiva (40 \$), una scheda SD (19 \$) e le batterie (1 \$); quindi si tratta di uno strumento estremamente più economico rispetto alle altre unità di registrazione autonome subacquee presenti in commercio e perfettamente in linea con gli obiettivi perseguiti dal progetto BE.R.G.



Figura 18: Registratore subacqueo “HydroMoth” senza custodia (a sinistra) e all’interno della custodia allacciata nella parte inferiore della piastra in Acciaio Inox (a destra).

4.2. Test in laboratorio

Prima di una futura applicazione del sistema di monitoraggio sul campo sono state effettuate delle prove sperimentali in condizioni di laboratorio controllate. L’obiettivo dei test è stato quello di verificare l’effettivo funzionamento del metodo e la possibilità di distinguere i segnali prodotti dal bed load.

Per svolgere le prove è stata utilizzata un’apposita canaletta presso i laboratori del Dipartimento di Geoscienze (Università degli Studi di Padova); si tratta di una struttura con pendenza regolabile, lunga 4-5 m, con larghezza di 30 cm e dotata di un misuratore di portata e un sistema di pompe idrauliche che permette il ricircolo dell’acqua. Durante gli esperimenti è stata applicata un’inclinazione di $1,9^\circ$ e per simulare le condizioni di attrito presenti nel fondo dei torrenti naturali è stato realizzato un letto ruvido tramite dei pannelli in compensato fenolico ricoperti con una resina epossidica (E-30 “effetto acqua”

Fast A+B miscelati in rapporto 2:1) e cosparsi con della sabbia prima di essere lasciati asciugare (Fig. 19).



Figura 19: Pannelli in compensato sabbiati e posizionati sul fondo della canaletta per simulare delle condizioni di attrito naturali.

Per il sistema di registrazione è stata realizzata su misura una piastra in Acciaio Inox di dimensioni ridotte (Fig. 20 e Fig. 16-b) al di sotto della quale è stata allacciata la custodia contenente il sensore acustico HydroMoth. L'acquisizione del segnale è stata impostata con una frequenza di campionamento di 48 kHz e un livello di guadagno basso.

Durante i primi test si è notato come la forma della piastra potesse rappresentare una possibile ostruzione al flusso d'acqua diminuendo la forza della corrente e ostacolando l'impatto dei ciottoli, infatti, i pannelli sabbiati sono stati avvitati ad un supporto in legno quasi a livello con la parte superiore della struttura in acciaio. Va tenuto conto però che le prove condotte in laboratorio sono ad una scala ridotta, ma l'altezza della piastra non può essere diminuita mantenendo lo stesso rapporto con le altre dimensioni perché deve poter alloggiare il registratore acustico; nelle prove sul campo si prevede invece che l'ostacolo generato dalla forma a dosso non provochi problemi rilevanti e che lo spazio iniziale venga invece velocemente riempito dalla granulometria più fine, portando il fondo a livello con la parte superiore della struttura.



Figura 20: A sinistra, piastra in Acciaio Inox utilizzata durante le prove in laboratorio. La parte superiore misura 30cm x 20cm e l'altezza della struttura è di 4,5cm per consentire l'alloggio del sensore. A destra, sistema di registrazione durante i test in canaletta. Si riesce ad osservare la piastra con il registratore HydroMoth allacciato nella parte inferiore e il movimento dei ciottoli che passano sopra la struttura in acciaio.

Con le prime prove di allestimento delle varie componenti sono sorti fin da subito due importanti problemi in grado di influenzare la corretta registrazione acustica: il rumore generato dal motore della pompa idraulica e gli impatti dei ciottoli contro il fondo metallico della canaletta una volta superata la piastra di misurazione. Per risolvere il primo problema si è deciso di utilizzare una paratoia all'inizio del canale per riempire d'acqua la camera iniziale e far fluire il flusso alzando manualmente lo sbarramento solo dopo aver spento la pompa di alimentazione. Per evitare l'interferenza causata da impatti secondari sul fondo metallico invece è stato posizionato del materiale gommoso antivibrazione e dei tappetini lungo tutto il tratto a valle della piastra di registrazione.

La configurazione finale, visibile in Fig. 21, era quindi composta da: una paratoia per bloccare il flusso d'acqua prima di spegnere il motore della pompa, un settore con i pannelli sabbiati sopra i quali venivano posizionati e movimentati i ciottoli, la piastra in Acciaio Inox dotata di sensore HydroMoth allacciato alla parte inferiore e un settore finale con materiale gommoso antivibrazione per evitare il rumore del materiale solido contro il fondo metallico della canaletta.



Figura 21: Configurazione della canaletta adottata durante le prove in laboratorio. Da sinistra verso destra si possono osservare: la paratoia verticale, i pannelli sabbiati, la piastra in Acciaio Inox e i tappeti in gomma.

I vari test condotti hanno previsto in totale tre tipologie di registrazioni:

1. flusso d'acqua senza alcun materiale di trasporto per registrare il segnale base generato dal semplice scorrimento;
2. flusso d'acqua con più clasti suddivisi secondo tre classi di diversa granulometria (piccoli, medi e grandi);
3. flusso d'acqua con singoli clasti di diversa granulometria (piccoli, medi e grandi).

Il sensore HydroMoth veniva acceso manualmente, allacciato al di sotto della piastra e posizionato all'interno della canaletta per registrare le "corse" in totale silenzio. Durante i test quindi si è sempre preso nota del tempo delle varie azioni (accensione della pompa, spegnimento della pompa e apertura della paratoia) grazie ad un timer attivato simultaneamente all'accensione del registratore, così da poter individuare e isolare i singoli eventi di trasporto durante la successiva analisi dei dati.

5. RISULTATI OTTENUTI

Il dispositivo HydroMoth ha registrato un segnale continuo dal momento della sua accensione manuale fino al suo spegnimento, sempre effettuato manualmente. Il sensore ha quindi registrato tutti i rumori durante il suo posizionamento in canaletta e le voci degli operatori fra le diverse corse, condotte invece in assoluto silenzio. Per individuare e isolare i momenti in cui venivano effettuate le prove, cioè i pochi secondi in cui il flusso d'acqua passava sopra la piastra e i sedimenti impattavano contro di essa, sono stati annotati i tempi in cui il motore della pompa idraulica veniva spento, la paratoia veniva alzata e il flusso d'acqua passava al di sopra del sistema di registrazione.

Le registrazioni totali sono state analizzate utilizzando un codice scritto in MATLAB che ha permesso di isolare i momenti di interesse e tracciare l'ampiezza del segnale acustico in funzione del tempo. I segnali isolati sono stati quindi confrontati fra loro e ne sono stati analizzati gli spettri in frequenza e gli spettrogrammi nel tempo prodotti sfruttando il tool Signal Analyzer presente nel software. Oltre i tempi annotati visivamente, anche le immagini dei video, accesi in sincronia con il sensore HydroMoth, sono state utili per isolare e identificare gli esatti istanti in cui avvenivano gli impatti contro la piastra all'interno del segnale acustico globale. La Fig. 22 mostra un esempio del momento di impatto dei sedimenti catturato in video durante le prove.



Figura 22: Momento dell'impatto dei sedimenti ricavato dalle registrazioni video dei test.

5.1. Segnale del flusso d'acqua

In Fig. 23 sono riportati 3 secondi della registrazione del flusso d'acqua al di sopra della piastra e un suo ingrandimento di 1 secondo, ovvero l'unità temporale considerata in seguito per i vari confronti dei segnali. Date le modalità per far scorrere l'acqua adottate durante l'esperimento, ovvero accumulandola nella camera iniziale e facendola fluire alzando la paratoia, il segnale è stato riportato evitando di selezionare la prima parte in modo da escludere una sorta di effetto onda dovuto all'impatto provocato dall'arrivo del flusso contro la piastra di acciaio e il registratore.

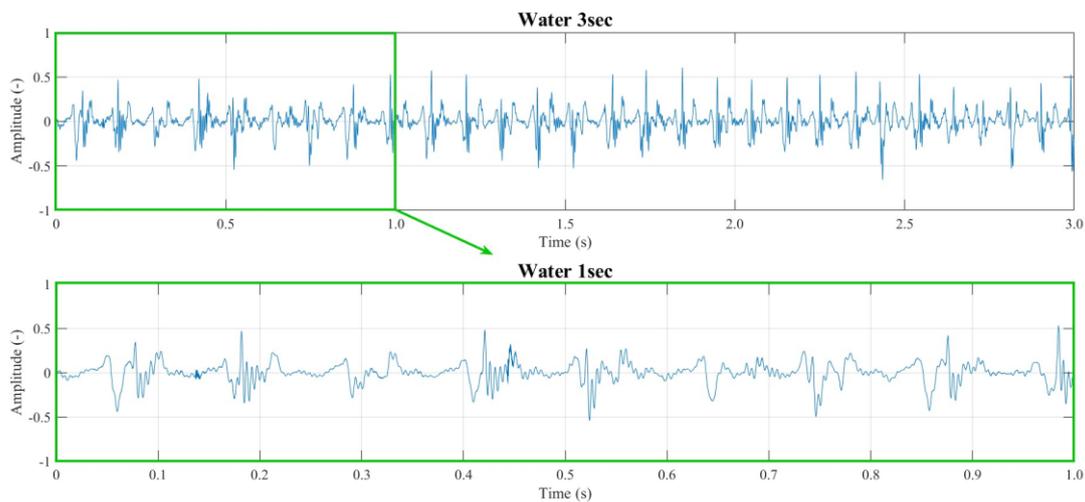


Figura 23: Segnale acustico del flusso d'acqua della durata di 3 secondi (in alto) e ingrandimento del primo secondo (in basso).

Il segnale acustico prodotto dal passaggio dell'acqua non satura il microfono e vengono registrati invece dei valori che si prevedono sufficientemente grandi da poter essere distinti rispetto al silenzio, cioè l'assenza di acqua, ma sufficientemente bassi per venire differenziati dagli impatti del trasporto solido.

Confrontando il segnale acustico generato dal passaggio dell'acqua con quello ottenuto in una condizione di silenzio, senza flusso (canale in secca), è possibile distinguere le due misurazioni sia dall'ampiezza del segnale grezzo registrato dal microfono, che da quella delle frequenze ricavate mediante trasformata di Fourier (Fig. 24). Il segnale del flusso si mantiene in valori massimi di ampiezza tra 0,5 e -0,5, con basse frequenze che si

concentrano fra 0-50 Hz e in parte attorno ai 200 Hz. Il rumore di fondo invece è caratterizzato da ampiezze estremamente ridotte sia del segnale acustico, con valori contenuti fra 0,02 e -0,02, sia delle sue frequenze, distribuite su un range più ampio; si noti infatti che le scale dei grafici sono ridotte di un fattore 10. Se confrontate alla stessa scala, come in Fig. 25, le due registrazioni sono estremamente differenti e si può affermare che il rumore prodotto dallo scorrimento dell'acqua può essere correttamente acquisito e distinto dalle condizioni di secca.

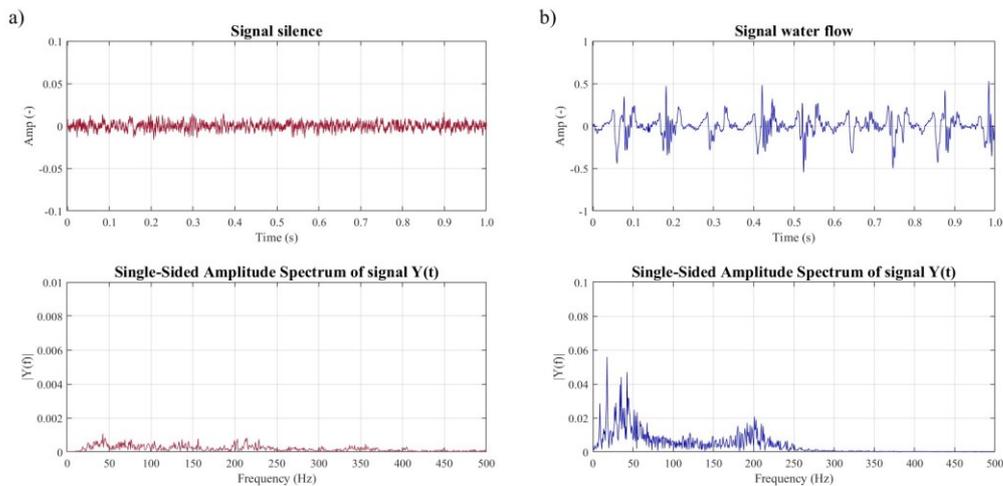


Figura 24: Confronto fra il segnale registrato in silenzio, senza scorrimento (a), e quello prodotto dal flusso d'acqua (b) con relativi spettri in frequenza.

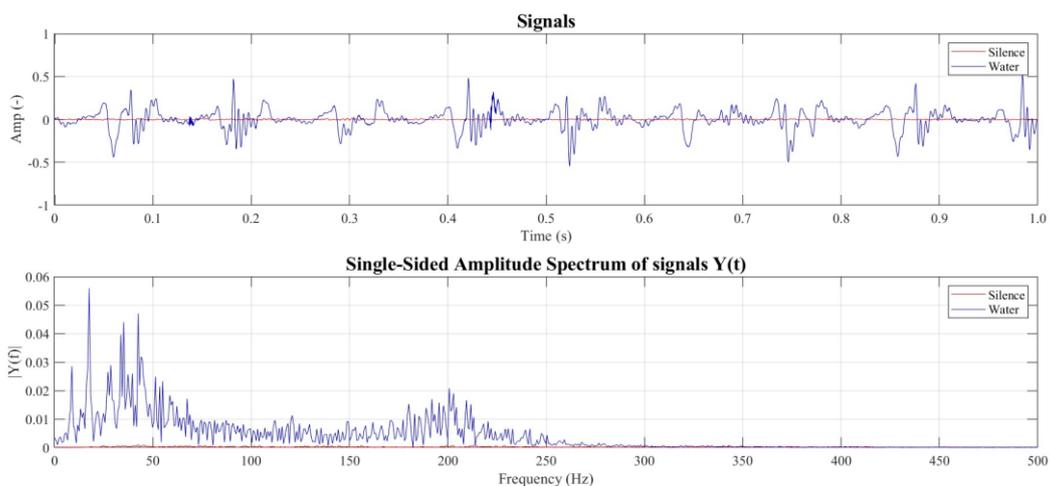


Figura 25: Confronto delle registrazioni e degli spettri in frequenza del rumore di fondo acquisito in condizioni di silenzio (in rosso) e del segnale generato dal flusso d'acqua (in blu) posti alla stessa scala di misura.

5.2. Segnali dei gruppi di sedimenti

Per valutare eventuali differenze nei segnali prodotti da diverse granulometrie, i clasti utilizzati durante i test sono stati suddivisi in tre classi dimensionali: “piccoli”, “medi” e “grandi”. Per ciascuna corsa sono state utilizzate una decina di particelle annotandone le informazioni medie in merito a peso e diametro (Tab. 2).

<i>Classe dimensionale</i>	<i>Range di diametro (mm)</i>	<i>Peso medio (g)</i>
Piccoli – Small stones	18-22	14,6
Medi – Medium stones	25-30	26,4
Grandi – Big stones	45-50	84,5

Tabella 2: Classi dimensionali dei sedimenti utilizzati durante i test con gruppi di clasti.

In Fig. 26 sono riportati i segnali registrati nel momento dell’impatto dei sedimenti contro la piastra e quello prodotto dal flusso d’acqua. Gli esatti istanti in cui avvengono le collisioni sono stati individuati grazie ai tempi annotati durante le prove, i video registrati in modo sincrono, ma anche dall’ascolto delle tracce audio selezionate durante l’analisi con il tool Signal Analyzer, nelle quali si riesce a sentire distintamente il rumore prodotto dalle particelle contro la superficie metallica.

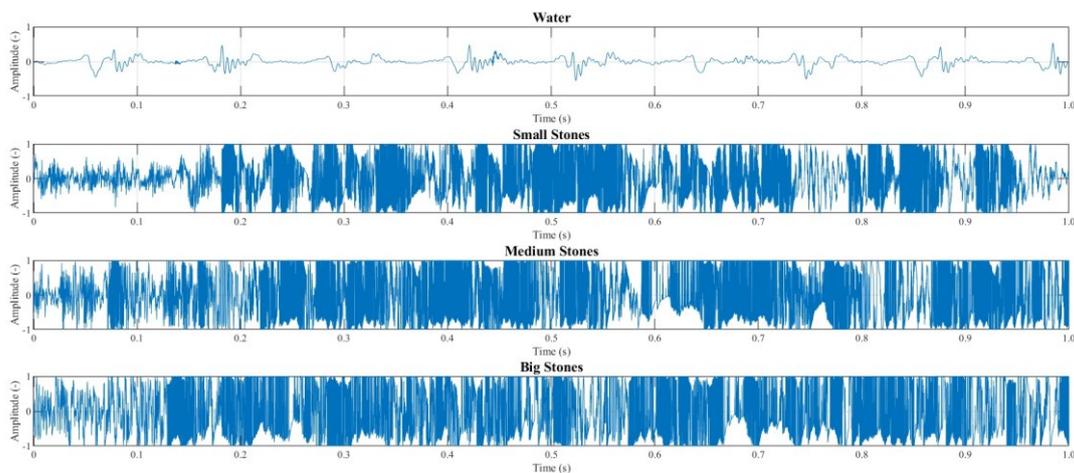


Figura 26: Confronto dei segnali registrati nel momento dell’impatto dei clasti contro la piastra di acciaio. Partendo dall’alto: flusso d’acqua, clasti piccoli, medi e grandi.

Dalle registrazioni acustiche riportate si può da subito affermare che la differenza fra il flusso d'acqua e il rumore generato dal bed load è evidente. I segnali prodotti dai sedimenti hanno una magnitudo almeno doppia, tanto che tutte e tre le classi dimensionali portano a saturazione il microfono senza permettere di individuare eventuali differenze di intensità in funzione della granulometria. Unica nota da fare è relativa alla classe dimensionale più piccola, in cui sembra esserci una minor sovrapposizione delle varie collisioni che permette in alcuni punti di distinguere abbastanza chiaramente il segnale dominato dal flusso d'acqua fra un impatto e l'altro. Diminuendo la scala temporale in un range di 0,4 secondi sono stati isolati i primi impatti provocati dalle particelle (Fig 27).

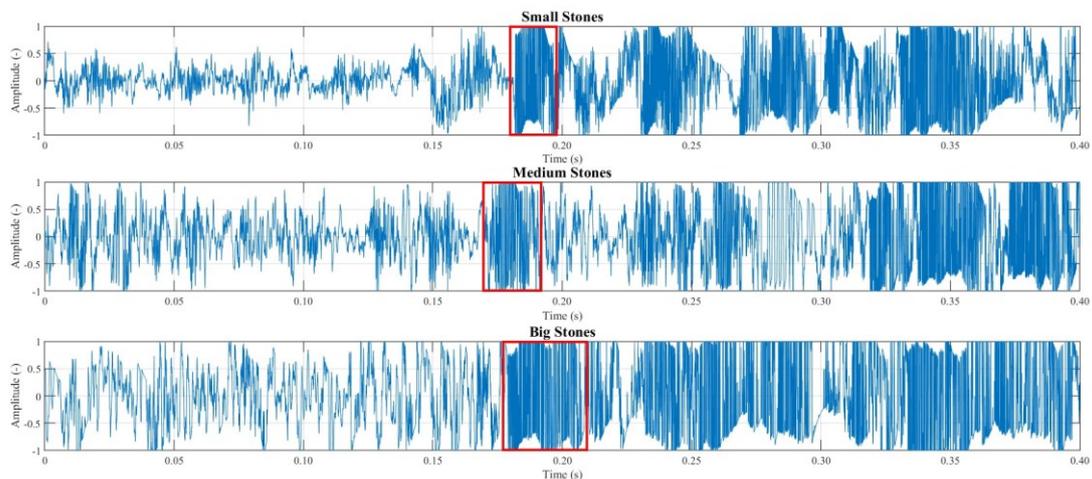


Figura 27: Segnali acustici prodotti dall'impatto (evidenziato in rosso) della prima particella contro la superficie della piastra in acciaio. Partendo dall'altro: clasti piccoli, medi e grandi.

Isolando ad una scala temporale più ristretta l'arrivo della prima particella è possibile fare alcune osservazioni. La durata del segnale nel momento dell'impatto sembra aumentare con la granulometria del materiale, ma potrebbe essere dovuto ad un insieme di variabili differenti, come l'angolo di contatto, la durata della collisione o il punto colpito sulla piastra. Se si considera invece l'ampiezza del segnale che anticipa l'impatto vero e proprio si nota un aumento in correlazione alla classe dimensionale. Probabilmente il rumore registrato prima della collisione non è dovuto unicamente al flusso d'acqua, anche perché le diverse corse sono state effettuate con le stesse modalità, ma potrebbe invece comprendere i rumori provocati dalle particelle contro il letto del canale mentre vengono

movimentate verso la piastra di misurazione. Gli stessi idrofoni, come è stato presentato anticipatamente, sono talvolta utilizzati in modo autonomo per captare il rumore autoprodotta dal bed load (scontri interparticellari o con il letto del fiume). Per la classe dimensionale media in particolare, dall'ascolto del segnale riportato in Fig. 27 non risulta ben chiaro se l'impatto evidenziato rappresenti un colpo di una particella sopra la piastra o se si tratti di una collisione avvenuta contro il letto del canale in prossimità del sistema di registrazione, anche se la saturazione del segnale fa pensare alla prima ipotesi.

La Fig. 27 testimonia quindi la possibilità di captare distintamente il momento in cui ha inizio il trasporto di base e quando il materiale solido movimentato passa al di sopra del sensore acustico.

Assieme ai segnali grezzi delle registrazioni audio sono stati confrontati anche gli spettri in frequenza, ottenuti dopo trasformati di Fourier, dei segnali presenti in Fig. 26. Il confronto è stato incentrato all'interno del range di frequenze 0-1000 Hz, oltre questo intervallo infatti l'intensità diventava poco rilevante (Fig. 28).

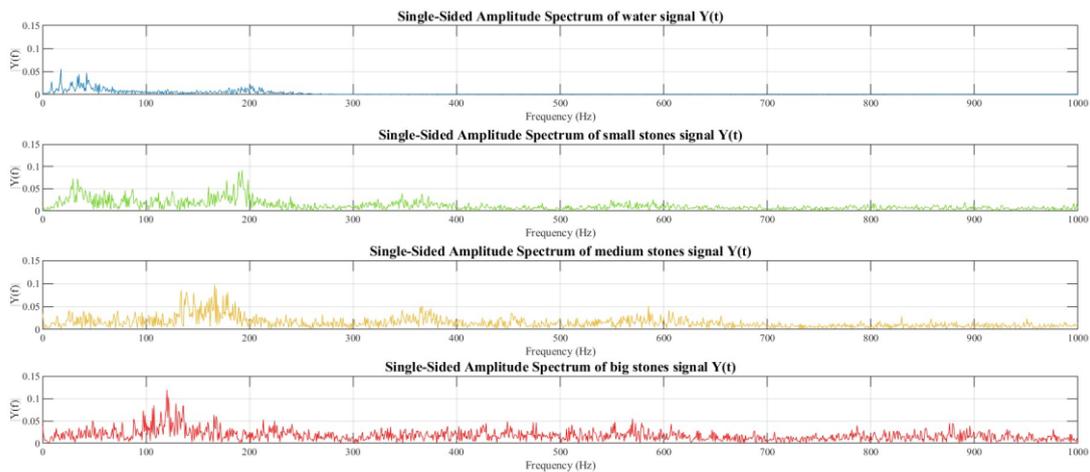


Figura 28: Confronto degli spettri in frequenza, fra 0 e 1000 Hz, dei segnali di impatto presenti in Fig. 26. In blu le frequenze dell'acqua, in verde quelle dei clasti piccoli, in giallo quelle dei medi e in rosso quelle dei grandi.

Rispetto al flusso d'acqua che è composto principalmente da basse frequenze, non superiori ai 300 Hz, i segnali delle tre classi dimensionali hanno spettri più complessi che occupano tutto il range 0-1000 Hz considerato. Le principali frequenze delle diverse

granulometrie si concentrano tutte fra i 100 e 200 Hz, ma si riesce ad osservare un possibile trend in funzione della classe dimensionale. All'aumentare della dimensione dei clasti le frequenze principali tendono infatti a spostarsi verso valori più bassi, vicini ai 100 Hz, mentre quelle del segnale acustico delle granulometrie più fini rimangono attorno i 200 Hz. Sembra esserci quindi una possibile correlazione fra le frequenze principali che compongono i segnali degli impatti e la dimensione dei clasti che li producono; tuttavia, si tratta di un'ipotesi che andrebbe meglio approfondita, considerando soprattutto il fatto che gli spettri ottenuti derivano da segnali acustici che hanno saturato il microfono e dei quali si è persa una componente importante.

Analizzando infine gli spettrogrammi dei segnali presentati in Fig. 26, ottenuti sfruttando il tool Signal Analyzer presente in MATLAB, è possibile anche in questo caso distinguere le condizioni di bed load da quelle di flusso d'acqua. Di seguito è riportato un confronto fra il segnale dell'acqua e quello delle granulometrie più fini (Fig. 29).

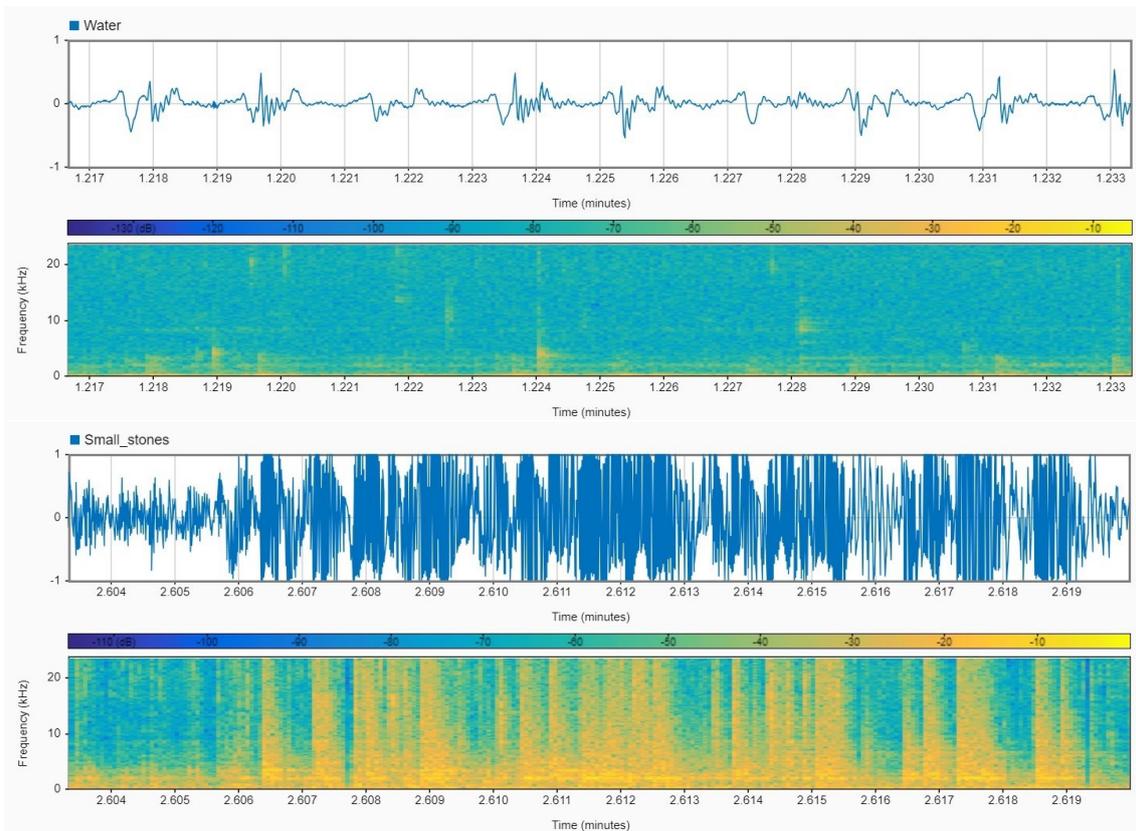


Figura 29: Spettrogrammi tra 0-24 kHz ottenuti tramite il tool Signal Analyzer in MATLAB. In alto il segnale e lo spettrogramma del flusso d'acqua, in basso il segnale e lo spettrogramma della classe dimensionale più fine.

Dall'analisi degli spettrogrammi dei segnali registrati si conferma la possibilità di distinguere il momento in cui il fenomeno di bed load si attiva. Mentre l'acqua mantiene uno spettrogramma relativamente omogeneo con dominanza di basse frequenze per tutta la durata della registrazione (come osservato precedentemente dalle Fig. 24 e 25), gli impatti dei clasti fanno invece risuonare il segnale su quasi tutta la banda di frequenze considerate, permettendo di distinguere i momenti in cui le particelle colpiscono e passano al di sopra della piastra di acciaio.

5.3. Segnali dei singoli clasti

Durante i test in laboratorio sono state infine effettuate delle prove con singoli clasti suddivisi anche in questo caso secondo tre diverse granulometrie: “piccolo”, “medio” e “grande” (Tab. 3).

<i>Classe dimensionale</i>	<i>Diametro (mm)</i>	<i>Peso (g)</i>
Piccolo – Small stone	21	10,3
Medio – Medium stone	39	62,3
Grande – Big stone	47	169,8

Tabella 3: Classi dimensionali dei sedimenti utilizzati durante i test con singoli clasti.

In Fig. 30 sono riportati i segnali acustici registrati utilizzando un singolo clasto all'interno della canaletta. Anche in questo caso i precisi momenti in cui le particelle sono passate sopra la piastra sono stati individuati sia grazie ai tempi annotati durante le prove, che dall'ascolto delle registrazioni selezionate.

A differenza delle prove con gruppi di particelle, in cui il segnale acustico andava incontro ad un'importante saturazione dovuta ai molteplici impatti e alle vibrazioni prodotte, nel caso di singoli clasti le registrazioni risultano più pulite. Per tutte e tre le granulometrie utilizzate è possibile individuare distintamente il colpo della particella contro la superficie di acciaio e, oltre a quello, anche gli eventuali ulteriori rimbalzi secondari sopra la piastra. Gli impatti sono rappresentati da ristrette saturazioni del segnale all'interno di un rumore di base a più bassa magnitudo, soprattutto nel caso delle granulometrie più fini, che si fa inizialmente più intenso a monte del primo impatto e successivamente meno rumoroso e comparabile a quello di un semplice flusso d'acqua. Tale dinamica potrebbe essere dovuta

ad una duplice ipotesi: da una parte la registrazione del rumore autoprodotta dal bed load contro il fondo del canale, che sembrerebbe aumentare con la dimensione dei grani e interrompersi una volta superata la piastra a causa del materiale gommoso, e dall'altra l'effetto onda generatosi nel momento in cui si apriva la paratoia e l'acqua colpiva in modo relativamente violento il sensore acustico, sfumando successivamente in un semplice flusso continuo. È difficile valutare quale delle due ipotesi sia la più valida, sicuramente l'iniziale impatto dell'acqua influenza la misura, ma non si esclude che il segnale possa comprendere anche il rumore autoprodotta dal bed load.

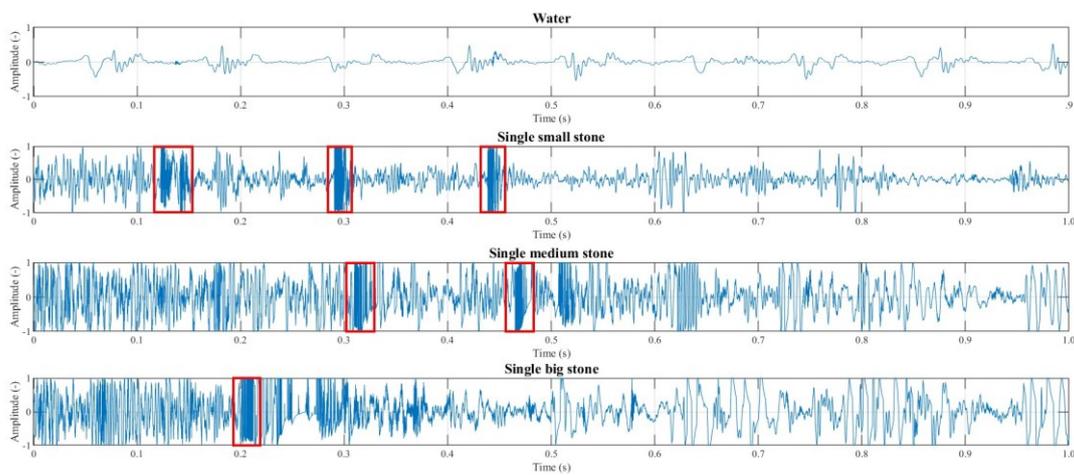


Figura 30: Confronto dei segnali registrati nel momento dell'impatto (evidenziato in rosso) contro la piastra di acciaio. Partendo dall'alto: flusso d'acqua, clasto piccolo, medio e grande.

Partendo dai segnali acquisiti è possibile isolare ad una scala temporale ridotta (0,1 secondi) anche i singoli eventi all'interno delle registrazioni e visualizzare nel dettaglio la saturazione del segnale registrato nell'istante in cui la particella impatta contro la superficie metallica (Fig. 31). Per tutte e tre le classi dimensionali la saturazione del segnale ha una durata nell'ordine di 0,01 secondi, anche se nei segnali prodotti dal clasto medio e grande si possono osservare alcune saturazioni isolate successive all'impatto, probabilmente a causa di possibili vibrazioni indotte sulla piastra di acciaio negli istanti dopo la collisione.

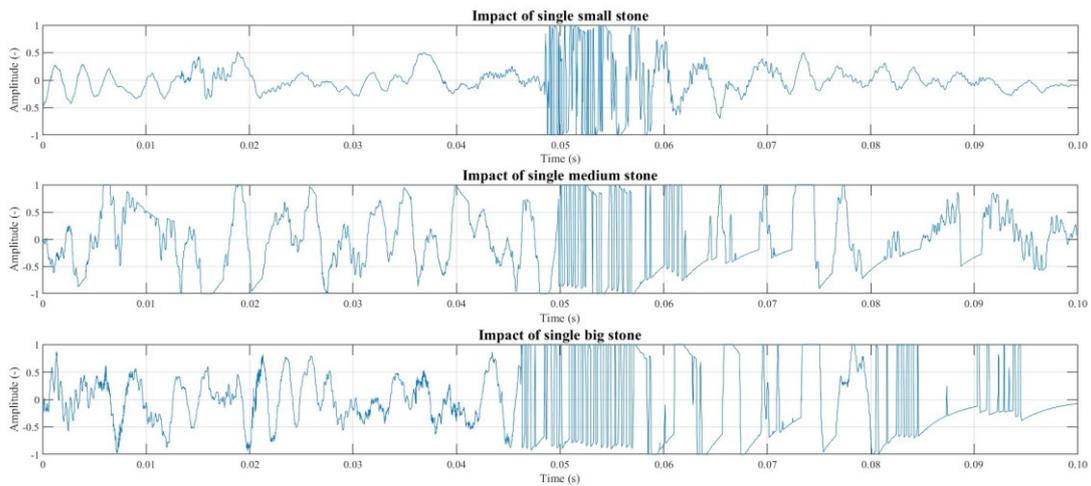


Figura 31: Singoli eventi di impatto isolati dai segnali presenti in Fig. 30. Partendo dall'alto: impatto di un clasto piccolo, medio e grande.

Dall'analisi degli spettri in frequenza delle tre diverse granulometrie (Fig. 32) in questo caso sembra più complicato individuare particolari trend correlati alla classe dimensionale, se non un leggero spostamento a frequenze più basse per la particella più grande (segnale in rosso). Si tratta comunque di spettri più complessi rispetto al flusso d'acqua, costituiti da frequenze più alte che si concentrano fra i 50 e 500 Hz circa e che aumentano di intensità con l'aumentare della dimensione dei sedimenti utilizzati.

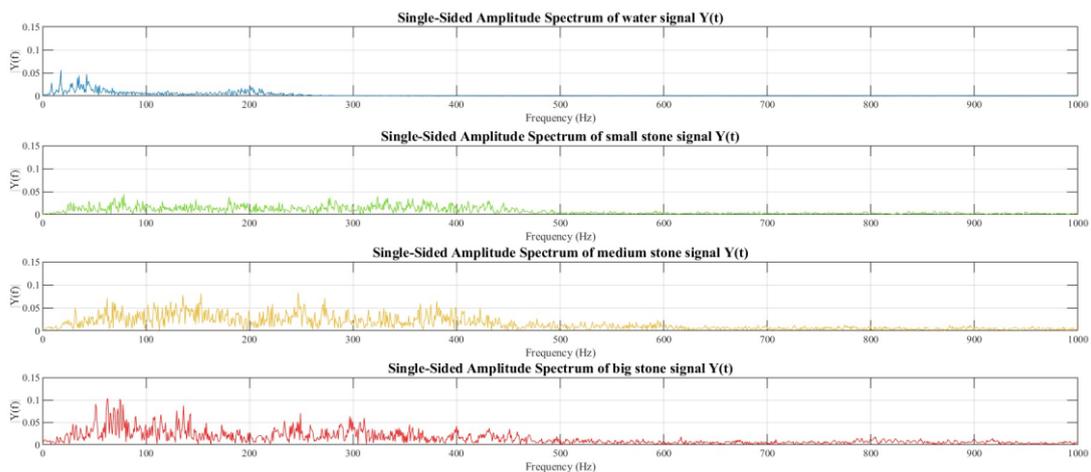


Figura 32: Confronto degli spettri in frequenza, fra 0 e 1000 Hz, dei segnali di impatto presenti in Fig. 30. In blu le frequenze dell'acqua, in verde quelle del clasto piccolo, in giallo quelle del medio e in rosso quelle del grande.

Come per i gruppi di particelle, anche per i singoli clasti è possibile distinguere gli impatti sfruttando gli spettrogrammi nel tempo dei segnali registrati (Fig. 33).

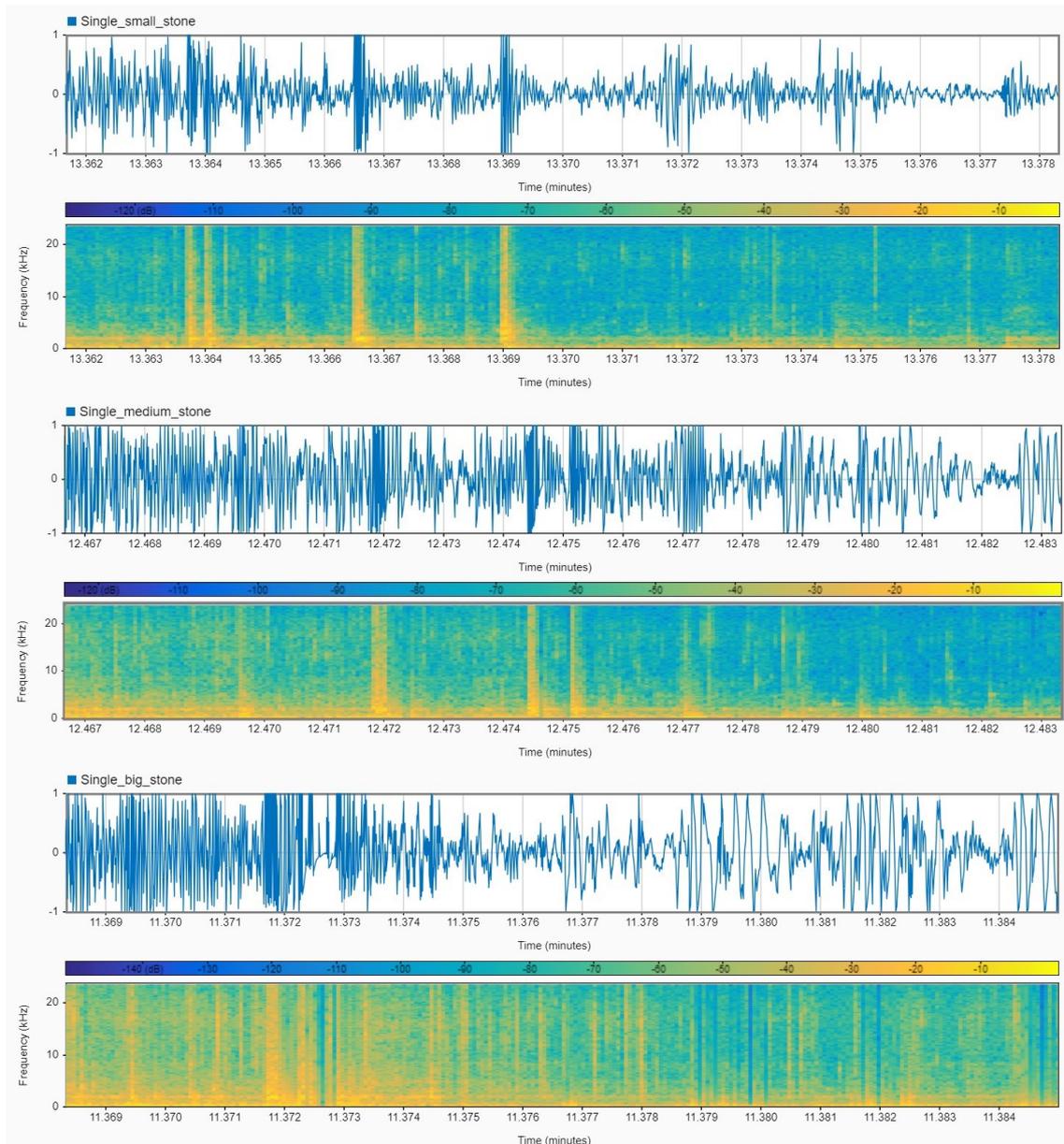


Figura 33: Spettrogrammi tra 0-24 kHz ottenuti tramite il tool Signal Analyzer in MATLAB. In alto il segnale e lo spettrogramma del singolo clasto piccolo, in mezzo quelli del clasto medio e in basso quelli del clasto grande.

In questo caso la differenza fra le frequenze alle quali risuonano il flusso d'acqua e i colpi provocati dalle particelle è ancora più evidente. I singoli impatti risuonano a frequenze

molto più alte rispetto al rumore prodotto dallo scorrimento dell'acqua che si limita invece a basse frequenze rimanendo un segnale di fondo senza creare particolare disturbo. Soprattutto per le granulometrie più piccole, le collisioni contro la piastra di acciaio corrispondono ai momenti in cui nello spettrogramma il segnale è un rumore complesso che occupa tutta la banda considerata. Per la particella di maggiori dimensioni invece lo spettrogramma inizia ad essere meno pulito; i picchi registrati potrebbero essere causati da impatti più rilevanti contro il letto del canale, captati dal sensore acustico prima della collisione contro la piastra di acciaio. Tale considerazione sembrerebbe quindi avvalorare l'ipotesi che il dispositivo HydroMoth sia in grado di registrare anche il rumore autoprodotta dal bed load in avvicinamento verso il sistema di misurazione.

6. CONCLUSIONI

Nonostante al momento siano state effettuate solamente delle prove sperimentali in laboratorio, il sistema di monitoraggio acustico passivo si è dimostrato in grado di captare il rumore generato dalle collisioni delle particelle contro la piastra di misurazione e di poterlo distinguere rispetto a quello prodotto dal semplice flusso d'acqua.

Le registrazioni degli impatti ottenute con il sensore HydroMoth, allacciato nella parte inferiore di un'apposita lastra in Acciaio Inox, hanno fornito un'intensità almeno doppia rispetto ai segnali registrati in condizioni di assenza di bed load, tanto da saturare completamente il microfono nel momento delle collisioni, sia con gruppi di sedimenti, sia con singole particelle. Dall'analisi dei segnali grezzi si è riusciti a distinguere i momenti in cui i clasti venivano movimentati dalla corrente contro la superficie metallica e ad isolare i singoli eventi di impatto ad una scala temporale di 0,1 secondi.

Gli spettri in frequenza hanno permesso di distinguere le condizioni di bed load da quelle del solo flusso d'acqua anche grazie alle frequenze che componevano i segnali registrati. Il rumore prodotto dalla corrente ha fornito spettri a basse frequenze, inferiori ai 300 Hz e con le principali entro i 100 Hz, mentre gli spettri ottenuti durante il trasporto solido occupavano tutta la banda considerata (0-1000 Hz) con frequenze principali più intense e concentrate tra i 100 e 200 Hz. Dalle prove con gruppi di particelle inoltre è sembrato possibile distinguere uno spostamento delle frequenze principali verso valori più bassi in correlazione all'aumento della classe dimensionale dei sedimenti.

Anche l'analisi degli spettrogrammi nel tempo ha permesso di distinguere gli impatti dei clasti all'interno del segnale di base prodotto dal flusso d'acqua, soprattutto per le prove condotte con singole particelle. Le collisioni corrispondono ai momenti in cui il segnale nello spettrogramma risuona a frequenze più alte occupando quasi tutta la banda considerata, mentre in assenza di trasporto si limita a basse frequenze.

È bene tenere in considerazione che i segnali ricavati durante i test potrebbero essere in parte sporcati dall'effetto onda generatosi nel momento in cui si alzava la paratoia e dall'impatto relativamente violento della corrente contro il sistema di registrazione. Il sensore acustico, infatti, potrebbe essere riuscito in alcuni casi a captare anche il rumore autoprodotta dal bed load contro il letto del canale, ma è difficile accertare tale ipotesi proprio a causa dell'effetto onda contro il microfono. In ambiente naturale le condizioni

del flusso d'acqua variano molto anche a seconda del sito e del punto in cui il sistema viene installato; quindi, in condizioni reali è possibile aspettarsi sia correnti continue e omogenee, sia più turbolenti e rumorose.

In conclusione, il metodo acustico passivo sperimentato nell'ambito del progetto BE.R.G. ha permesso di distinguere il momento in cui il fenomeno di bed load si attivava in condizioni di laboratorio e i risultati ottenuti fino ad ora suggeriscono la possibilità di poter monitorare l'attivazione dei processi di trasporto di base anche in siti reali, in modo pratico ed economico.

6.1. Prospettive future

Concluse le prove in laboratorio, la prosecuzione del progetto BE.R.G. prevede la sperimentazione del sistema di monitoraggio sul campo per ottenere serie di dati reali e verificarne il funzionamento in condizioni naturali. Per confermare l'efficacia del metodo si rende necessario quindi un punto di installazione in cui i tassi di trasporto di base siano noti e monitorati per essere confrontati con i segnali registrati dal sensore acustico. Il sito selezionato per l'applicazione sul campo è il torrente Cordon (Belluno), nel quale è presente una stazione di monitoraggio operativa da quasi 30 anni che registra il deflusso delle acque, il carico di fondo e il carico sospeso.

Il bacino strumentato del Rio Cordon è situato nelle Alpi orientali (Dolomiti) e drena una superficie di 5 km² ad altitudini che vanno da 1763 a 2763 m s.l.m. Il corso d'acqua normalmente presenta condizioni di apporto di sedimenti da basse a moderate e il deflusso ha un regime nivo-pluviale dominato dallo scioglimento delle nevi tra maggio e giugno e con piene significative legate a piogge persistenti in estate e inizio autunno. L'emissario del bacino è dotato di una stazione di monitoraggio permanente, istituita nel 1986 dalla Regione Veneto (Centro Sperimentale di Arabba) e attualmente gestita dall'ARPA Veneto. La stazione è costituita da un canale di ingresso, una griglia inclinata, un'area di stoccaggio per il materiale del bed load dotata di 24 sensori a ultrasuoni (funzionanti fino al 2012), un canale di uscita e un bacino di decantazione, e ospita numerosi dispositivi per monitorare lo scarico dell'acqua, il trasporto solido di fondo e la concentrazione dei sedimenti sospesi. Dal 2012 il volume dei sedimenti grossolani, depositati nell'area di stoccaggio dagli eventi di piena, viene rilevato tramite un Laser Scanner Terrestre (TLS)

che permette di creare un modello digitale di elevazione (DEM) dei volumi di carico di fondo. La presenza della stazione ha consentito quindi di analizzare tutti gli eventi alluvionali, caratterizzati da materiale di fondo e trasporto solido in sospensione, avvenuti dal 1986 (Rainato R. et al., 2017).

A maggio 2024 il sistema è stato installato sul letto del torrente Cordon, a monte della stazione di monitoraggio, utilizzando una piastra di acciaio quadrata avvitata ad una zavorra per mantenere la struttura stabile e fissa sul fondo (Fig. 34-a).



Figura 34: Posizionamento del sistema di monitoraggio ancorato ad una zavorra sul letto del torrente Cordon (a) e versione del sensore HydroMoth con batteria estesa (b).

Nei prossimi mesi si prevede di registrare gli eventi di trasporto per valutare il sistema in condizioni reali e proseguire con gli sviluppi del progetto sul campo. I futuri progressi esploreranno tra l'altro le possibilità di ottenere dati in tempo reale e le modalità di acquisizione dei segnali per prolungare l'autonomia del sensore; si prevede ad esempio di utilizzare una configurazione del dispositivo dotata di più batterie, come quella mostrata in Fig. 34-b, o di memorizzare le registrazioni solo al di sopra di una determinata soglia di ampiezza del segnale acustico.

6.2. Primi dati reali sul campo

Tra il 20 maggio e il 2 giugno 2024 il sistema installato nel torrente Cordon è stato in grado di intercettare due eventi di bed load, confermati attraverso una trappola Bunte che ha raccolto 21,3 kg di materiale. I segnali registrati fanno riferimento ad un periodo caratterizzato da alcune importanti precipitazioni con conseguenti innalzamenti del livello d'acqua del torrente e successive curve di scarico (Fig. 35) che hanno quindi comportato la mobilitazione di materiale solido sul letto fluviale.

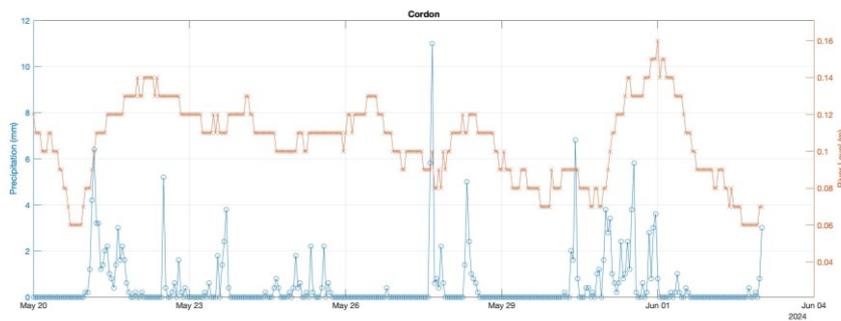


Figura 35: Dati orari delle precipitazioni e del livello del torrente Cordon registrati dalla stazione di monitoraggio dal 20 maggio al 2 giugno 2024.

In Fig. 36 è presente un minuto di segnale registrato da uno degli eventi di trasporto captati mediante il sistema di monitoraggio installato in situ e confrontato con un segnale relativo ad una condizione senza bed load.

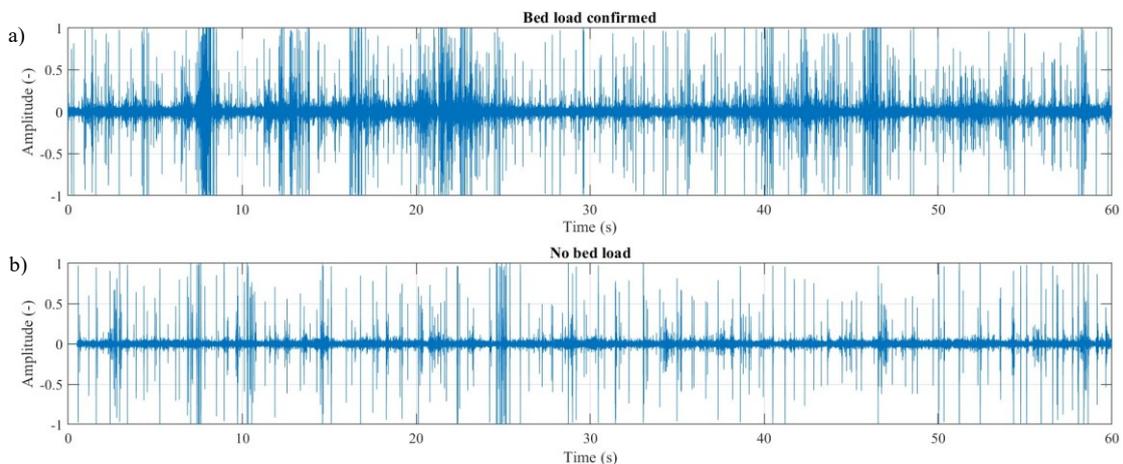


Figura 36: Segnale registrato sul torrente Cordon in condizioni di bed load confermate da una trappola Bunte (a) e segnale registrato in assenza di trasporto di base (b).

In assenza di bed load il segnale acustico risulta piuttosto omogeneo, con intensità contenute e privo di rilevanti saturazioni. Durante il trasporto di base invece le registrazioni presentano una maggior variabilità temporale dell'ampiezza, importanti saturazioni del sensore e, in generale, intensità maggiori dovute agli impatti dei clasti contro la superficie di acciaio. Per apprezzare meglio la differenza dei segnali, la scala temporale è stata ristretta e sono stati confrontati 2 secondi di registrazione che evidenziano la discrepanza fra le condizioni di bed load e quelle senza trasporto, in cui invece domina il flusso d'acqua (Fig. 37).

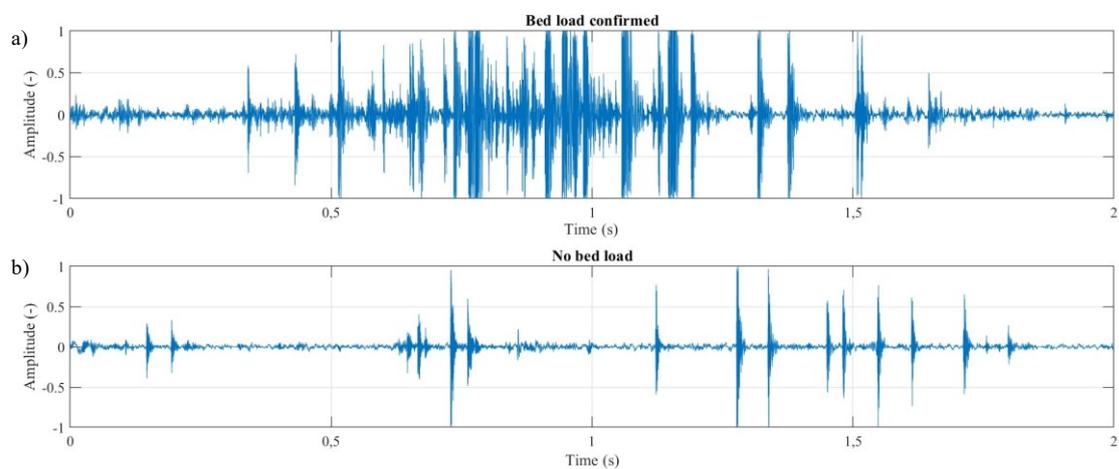


Figura 37: Segnali in presenza (a) e in assenza (b) di trasporto di base ottenuti dalle registrazioni presenti in Fig. 36.

All'interno del segnale è possibile infine isolare quelli che si dimostrano essere singoli impatti di particelle (Fig. 38), paragonabili con i segnali ottenuti durante le prove condotte in laboratorio (Fig. 31).

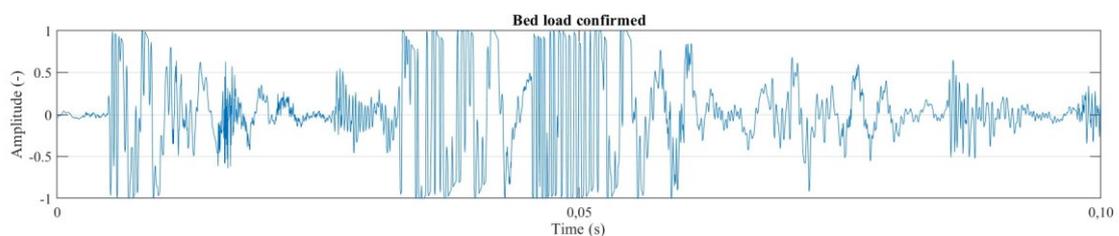


Figura 38: Impatto di una particella isolato all'interno del segnale presente in Fig. 37-a.

BIBLIOGRAFIA

1. Antoniazza G., Nicollier T., Wyss C. R., Boss S. & Rickenmann, D. (2020), *Bedload transport monitoring in Alpine rivers: variability in Swiss Plate Geophone response*. Sensors, 20(15), 4089.
2. Antoniazza G., Nicollier T., Boss S., Mettra F., Badoux A., Schaeffli B., Rickenmann D. & Lane S. N. (2022). *Hydrological drivers of bedload transport in an Alpine watershed*. Water Resources Research, 58(3), e2021WR030663.
3. Antoniazza G., Dietze M., Mancini D., Turowski J. M., Rickenmann D., Nicollier T., Boss S. & Lane S. N. (2023). *Anatomy of an Alpine Bedload Transport Event: A Watershed-Scale Seismic Network Perspective*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 128(8), e2022JF007000.
4. Antoniazza G. (2023), *Bedload transport in Alpine streams: Lessons from newly emerging monitoring systems*. Thesis, University of Lausanne.
5. Bonilla Porrás J. A. (2022). *Bedload transport in water courses with submerged vegetation*.
6. Bussetini M., Monacelli G. & Trezzini F. (2011), *Introduzione alla Direttiva Alluvioni*. Pericolosità Idraulica nel Territorio Italiano ed Applicazione della Direttiva Europea “Alluvioni”, Bolzano, 9-10 giugno 2011, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
7. Carrillo V., Mendoza D., Petrie J., Matovelle P., Torres S., Pacheco E., Cisneros F. & Timbe L. (2022), *Using a statistical efficiency methodology for predictors' selection in the bedload transport problem: A high gradient experimental channel case*. Alexandria Engineering Journal, 61(8), 6205-6219.
8. Colombo S. & Giuriani G. L. (2010), *Evoluzione morfologica dei fiumi montani. Propagazione della condizione di alimentazione solida imposta a monte*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano.
9. Frey P. & Church M. (2011), *Bedload: a granular phenomenon*. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 36, 58-69.
10. Geay T., Zanker S., Misset C. & Recking A. (2020), *Passive acoustic measurement of bedload transport: Toward a global calibration curve?*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 125(8), e2019JF005242.

11. Gray J. R., Laronne J. B. & Marr J. D. (2010), *Bedload-surrogate monitoring technologies*. No. 2010-5091. US Geological Survey.
12. Habersack H., Kreisler A., Rindler R., Aigner J., Seitz H., Liedermann M. & Laronne, J. B. (2017), *Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers*. *Geomorphology*, 291, 80-93.
13. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ultimo aggiornamento: 16/09/2015), *La Direttiva Alluvioni 2007/60/CE e il D.Lgs attuativo 49/2010*. Idrologia Operativa, Idromorfologia, Inondazioni, Risorse Idriche e Siccità, a cura dell'area BIO-ACAS di ISPRA.
14. Mao L. (2011), *Il monitoraggio del trasporto solido nei torrenti montani*. Presentazione su Pericolosità idraulica nel territorio montano Italiano ed applicazione della direttiva Europea "Alluvioni". Facoltà di Scienze e Tecnologie, Libera Università di Bozen-Bolzano e Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
15. Mao L., Dell'Agnese A., Huincache C., Penna D., Engel M., Niedrist G., & Comiti F. (2014), *Bedload hysteresis in a glacier-fed mountain river*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(7), 964-976.
16. Møen K. M., Bogen J., Zuta J. F., Ade P. K. & Esbensen K. (2010), *Bedload measurement in rivers using passive acoustic sensors*. US Geological Survey Scientific Investigations Report, 5091, 336-351.
17. Nicollier T., Antoniazza G., Rickenmann D., Hartlieb A. & Kirchner J. W. (2022), *Improving the calibration of the Swiss plate geophone bedload monitoring system by filtering out seismic signals from extraneous particle impacts*. *Earth and Space Science*, 9(5), e2021EA001962.
18. Rainato R., Mao L., García-Rama A., Picco L., Cesca M., Vianello A., Preciso E., Scussel G. R. & Lenzi M. A. (2017), *Three decades of monitoring in the Rio Cordon instrumented basin: Sediment budget and temporal trend of sediment yield*. *Geomorphology*, 291, 45-56.
19. Regione Veneto (ultimo aggiornamento: 19/12/ 2023), *Direttiva Alluvioni – PGRA*. Il Portale della Regione Veneto.

20. Rickenmann D. (2017), *Bedload transport measurements with geophones, hydrophones, and underwater microphones (passive acoustic methods)*. Gravel-bed rivers: Processes and disasters, 185-208.
21. Rinaldi M., Surian N., Comiti F. & Bussetini M. (2011). *Manuale tecnico – operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d'acqua – Versione 1*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
22. Wyss C. R., Rickenmann D., Fritschi B., Turowski J. M., Weitbrecht V. & Boes R. M. (2016), *Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bed load monitoring system: 1. Impulse counts and particle size identification*. Water Resources Research, 52(10), 7744-7759.
23. Wyss C. R., Rickenmann D., Fritschi B., Turowski J. M., Weitbrecht V., Travaglini E., Bardou E. & Boes R. M. (2016), *Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bed load monitoring system: 2. Application to field sites with direct bed load samples*. Water Resources Research, 52(10), 7760-7778.