

# **INDAGINE MORFOLOGICA SU UN TRATTO DEL FIUME ZAMBESI, NELLA REPUBBLICA DEL MOZAMBICO**

Misure batimetriche ed analisi dei dati

F. PASANISI, C. TEBANO

ENEA – Unità Tecnica Tecnologie Portici  
Laboratorio Chimica Ambientale  
Centro Ricerche Portici, Napoli

F. ZARLENGA

ENEA – Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
Centro Ricerche Casaccia, Roma



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

# INDAGINE MORFOLOGICA SU UN TRATTO DEL FIUME ZAMBESI, NELLA REPUBBLICA DEL MOZAMBICO

## Misure batimetriche ed analisi dei dati

F. PASANISI, C. TEBANO

ENEA – Unità Tecnica Tecnologie Portici  
Laboratorio Chimica Ambientale  
Centro Ricerche Portici, Napoli

F. ZARLENGA

ENEA – Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina  
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

# INDAGINE MORFOLOGICA SU UN TRATTO DEL FIUME ZAMBESI, NELLA REPUBBLICA DEL MOZAMBICO

Misure batimetriche ed analisi dei dati

F. PASANISI, C. TEBANO, F. ZARLENGA

## Riassunto

Lo Zambesi è il quarto fiume del continente africano per estensione del bacino idrografico ed è il più importante tra quelli che sfociano nell'Oceano Indiano. Nello Zambesi Inferiore, ovvero nel tratto terminale del fiume che scorre nel territorio della Repubblica del Mozambico, il deflusso è regolato dalla presenza, a monte, delle dighe di Kariba e di Cahora Bassa, costruite nella seconda metà dello scorso secolo. La presenza degli invasi artificiali provoca profondi cambiamenti sul regime idrologico e sulla dinamica dei sedimenti, con prevedibili conseguenze sulla morfologia fluviale e, in generale, sul territorio e sull'ecosistema. Tuttavia, in letteratura non sono disponibili i risultati di rilievi batimetrici o altre misure in sito negli invasi o lungo il corso del fiume per la valutazione del trasporto solido e lo studio della morfodinamica fluviale. Nel marzo 2013, l'ENEA ha condotto un'estesa campagna di ricerca multidisciplinare lungo un tratto dello Zambesi Inferiore, in collaborazione con la società mozambicana *Minas Rio Bravo*. Tra le varie attività svolte in campo, sono state eseguite misure batimetriche del fondo fluviale mediante l'utilizzo di ecoscandaglio, GPS e sistema di navigazione/acquisizione integrata. Nel presente rapporto, in particolare, sono descritte le risorse e le metodologie utilizzate per l'esecuzione delle misure batimetriche e l'elaborazione dei dati; sono, inoltre, presentati e discussi i risultati ottenuti, mediante mappe batimetriche e sezioni trasversali. I risultati qui riportati sono uno dei pochissimi esempi di misure in campo nell'area dello Zambesi Inferiore e potranno essere utilizzati come base di confronto per ulteriori campagne a scopo di monitoraggio, o, eventualmente, come dato di input per la calibrazione e validazione sia di modelli matematici, sia di misure ottenute mediante telerilevamento.

**Parole chiave:** Fiume Zambesi, Mozambico, Rilievo Batimetrico.

## ***MORPHOLOGICAL INVESTIGATION ON A REACH OF THE ZAMBEZI RIVER, IN THE REPUBLIC OF MOZAMBIQUE***

### ***Bathymetric measures and data analysis***

#### ***Abstract***

*The Zambezi River is the fourth largest river in Africa as regards catchment area, and the most important flowing into Indian Ocean. In the Lower Zambezi, i.e. the final reach flowing across the Republic of Mozambique, river flow is regulated by the Kariba and Cahora Bassa dams, built in the second half of the last century. The presence of impoundments causes important changes on hydrologic regime and dynamics of sediments downstream, with expected consequences on river morphology and, more in general, on territory and ecosystem. However, no results of bathymetric surveys or other in situ measures in the reservoirs and along the river aimed at quantifying sediment transport and studying river morphodynamic are available in literature. In march 2013 ENEA, in cooperation with Minas Rio Bravo Company (Mozambique), performed an extensive multidisciplinary research along a reach of the Lower Zambezi. Among different field activities, bathymetric measures of riverbed were performed using echo sounder, GPS and integrated navigation/acquisition system. In the present report materials and methods used for bathymetric measures and data processing are described; results are presented and discussed, by means of bathymetric maps and cross-section graphs. Results hereby reported are one of the fewest examples of direct field measures in the Lower Zambezi area and they can be used either for comparison with further monitoring survey, or, possibly, as input data for validation and calibration of both mathematical models and remote sensing data.*

**Keywords:** Zambezi River, Mozambique, Bathymetric Survey.



## INDICE

<b>PREMESSA</b> .....	<b>7</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>8</b>
1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CARATTERISTICHE DEL BACINO DELLO ZAMBESI.....	8
1.2 LO ZAMBESI INFERIORE.....	12
1.3 CONSIDERAZIONI GENERALI.....	16
<b>2 MATERIALI E METODI</b> .....	<b>17</b>
2.1 ASPETTI LOGISTICI ED AMBIENTALI.....	17
2.2 RISORSE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATE PER I RILIEVI .....	19
2.2.1 <i>Ecoscandaglio</i> .....	19
2.2.2 <i>Sistema di posizionamento GPS</i> .....	20
2.2.3 <i>Software di navigazione e acquisizione integrata</i> .....	21
2.2.4 <i>Mezzi nautici</i> .....	23
2.3 ESECUZIONE DELLE MISURE BATIMETRICHE .....	24
<b>3 RISULTATI</b> .....	<b>26</b>
3.1 ELABORAZIONE DEI DATI.....	26
3.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI.....	27
3.3 DISCUSSIONE DEI RISULTATI .....	31
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>34</b>
<b>APPENDICE A – DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA</b> .....	<b>36</b>
<b>APPENDICE B – CARTE BATIMETRICHE DI DETTAGLIO</b> .....	<b>43</b>
<b>APPENDICE C – SEZIONI TRASVERSALI</b> .....	<b>51</b>



## PREMESSA

Nel marzo del 2013 l'ENEA ha pianificato, coordinato ed eseguito una campagna di ricerca multidisciplinare lungo il tratto inferiore del fiume Zambesi, nella Repubblica del Mozambico. Le attività sono state svolte nell'ambito di un accordo tra l'ENEA e la società mozambicana *Minas Rio Bravo Lda.*, titolare di concessioni per l'estrazione di sabbie dal fondo fluviale. Il coordinamento scientifico della campagna è stato affidato all'ENEA nella persona del dott. Francesco Zarlenga.

Tra le varie attività svolte nel corso della campagna, sono state eseguite misure batimetriche in aree significative lungo il corso del fiume, che vengono descritte in dettaglio nel presente documento. In particolare, sono riportate le risorse, la strumentazione e le metodologie adottate per l'acquisizione e l'analisi dei dati, insieme a rappresentazioni grafiche dei risultati ottenuti.

Tali informazioni sono state già incluse, sinteticamente, nella documentazione tecnica redatta alla chiusura delle attività. Tuttavia, tenendo conto delle specifiche condizioni logistiche ed operative e della particolarità dell'area investigata, si è ritenuto opportuno rendere conto delle attività svolte in un documento tecnico a più ampia diffusione all'interno della comunità scientifica.

I risultati ottenuti potranno essere utilizzati come base di confronto per campagne di monitoraggio finalizzate alla valutazione del trasporto solido e della morfodinamica fluviale, che, per il tratto investigato, costituiscono argomenti di particolare interesse.

L'esame della letteratura di settore suggerisce altri possibili utilizzi dei dati qui presentati per ulteriori attività tecnico-scientifiche, quali la calibrazione e validazione di modelli matematici di dinamica fluviale, o di misure ottenute mediante tecniche di telerilevamento.

Vale la pena di sottolineare che le attività descritte nel presente documento rappresentano uno dei pochissimi casi di misure in campo per l'area in esame.

## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 Inquadramento geografico e caratteristiche del bacino dello Zambesi

Lo Zambesi (in inglese: Zambezi, in portoghese: Zambeze) è il maggiore tra fiumi del continente africano che sfociano nell'Oceano Indiano. Il fiume ha, secondo i dati di ARA Zambeze (*Administração Regional de Aguas do Zambeze*), una lunghezza complessiva di 2574 km ed un bacino idrografico di superficie pari a 1.4 milioni di km<sup>2</sup>. Il bacino dello Zambesi, il quarto per estensione in Africa dopo il Congo, il Nilo ed il Niger (Fig.1), ospita una popolazione di circa 30 milioni di persone, suddivise in 8 nazioni (Angola, Botswana, Malawi, Mozambico, Namibia, Tanzania, Zambia e Zimbabwe).



Fig. 1 –Inquadramento geografico del bacino dello Zambesi e confronto con i principali bacini del continente africano (fonte: GRID-Arendal).

Lo Zambesi sorge in Zambia, in prossimità della collina Kalene, ad una quota di circa 1450 m; dopo un breve tratto, l'asta principale del fiume scorre nel territorio dell'Angola, quindi entra nuovamente in Zambia, e, dopo aver attraversato la striscia di Caprivi, in Namibia, segna il confine tra gli stati Botswana, Namibia, Zimbabwe e Zambia. Successivamente, il fiume entra nel territorio del Mozambico e scorre in direzione Sud-Est, terminando il suo

corso in un'ampia foce a delta nell'Oceano Indiano, sulla costa orientale africana.

In Fig. 2 è riportata una mappa del bacino idrografico dello Zambesi, suddiviso nei principali sottobacini rappresentativi dei maggiori affluenti e dei diversi territori attraversati.

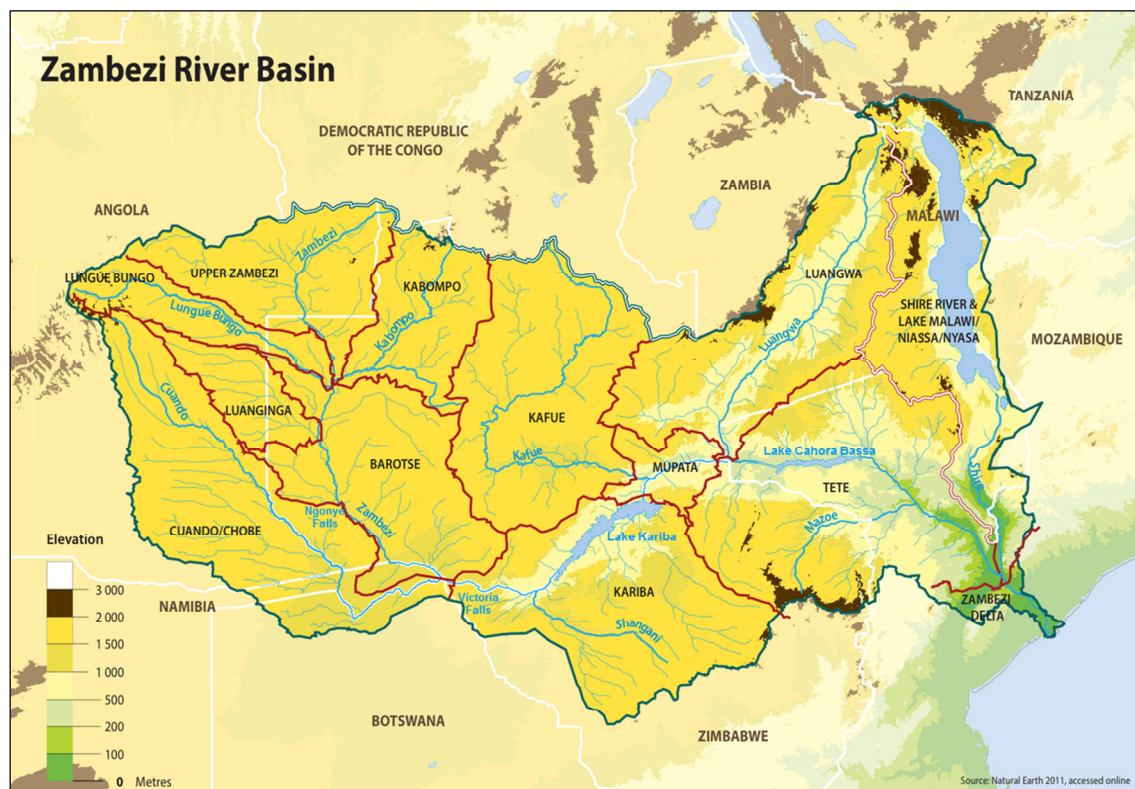


Fig. 2 – Il bacino dello Zambesi, suddiviso nei suoi principali sottobacini (adattato da: GRID-Arendal).

Le caratteristiche del bacino e del reticolo idrografico dello Zambesi sono ampiamente descritte in letteratura; tra i vari lavori, si citano: Davies & Jackson (1986), Nugent (1990), Hughes & Hughes (1992), Moore et al. (2007), Euroconsult Mott Macdonald (2007, 2008), World Bank (2010) e McCartney et al. (2013).

Il fiume viene normalmente suddiviso in tre tratti di differenti caratteristiche idrauliche, morfologiche, geologiche ed ecologiche.

Lo Zambesi Superiore è il tratto iniziale, di lunghezza circa 1078 km (Davies & Jackson, 1986), compreso tra la sorgente e le Cascate Vittoria. In questo primo tratto il fiume attraversa valli incise in roccia con una pendenza relativamente elevata, e poi scorre con un gradiente modesto attraverso la piana alluvionale di Barotse, un'ampia zona paludosa in cui nei periodi di piena, l'alveo raggiunge una larghezza di qualche decina di km. Alla fine della piana di Barotse, dopo un salto di circa 25 m (Cascate Ngonye, dette anche Cascate Sioma), il fiume scorre attraverso rocce basaltiche e sedimentarie, percorrendo un tratto caratterizzato dalla presenza di zone paludose alternate a rapide e da un moderato aumento della pendenza. Il tratto superiore dello Zambesi termina con le celebri Cascate Vittoria, dette Mosi-oa-Tunya, "il fumo che tuona", nella lingua locale, che presentano un salto di circa 100 m ed una larghezza di 1700 m.

Il Medio Zambesi è il tratto fluviale che va dalle Cascate Vittoria al lago di Cahora Bassa, di lunghezza circa 853 km (Davies & Jackson, 1986). In questo tratto, che presenta le

pendenze più elevate nell'intero corso dello Zambesi, il fondo è costituito quasi interamente da rocce basaltiche e sedimentarie ed il fiume è caratterizzato dall'alternarsi di rapide e gole. Lungo due di queste gole sono state realizzate le dighe ad arco di Kariba e Cahora Bassa, che hanno dato origine ai due omonimi grandi invasi artificiali.

Lo Zambesi Inferiore è il tratto finale del fiume, di lunghezza circa 593 km (Davies & Jackson, 1986), compreso tra la diga di Cahora Bassa e la foce nell'Oceano Indiano. Nella parte iniziale, il fiume scorre attraverso la piana costiera del Mozambico con larghezze di alveo tra 1.0 e 1.5 km e livelli idrici relativamente modesti, in particolare nella stagione secca. L'alveo si restringe localmente nella regione della gola di Lupata, circa 80 km a valle della città di Tete. L'area del delta inizia circa 150 km a monte della foce; nel suo tratto terminale il fiume forma una serie di meandri ed il territorio, per effetto delle modeste quote altimetriche, è soggetto ad inondazioni, che, a seconda della portata e dell'escursione di marea, si spingono fino a 40-50 km nell'entroterra.

In Fig. 3 sono riportati i profili longitudinali del fondo fluviale nei tratti compresi, rispettivamente, tra le Cascate Ngonye ed il lago di Kariba (Nugent, 1990), e tra il lago di Cahora Bassa e l'Oceano Indiano (Ronco et al., 2010).

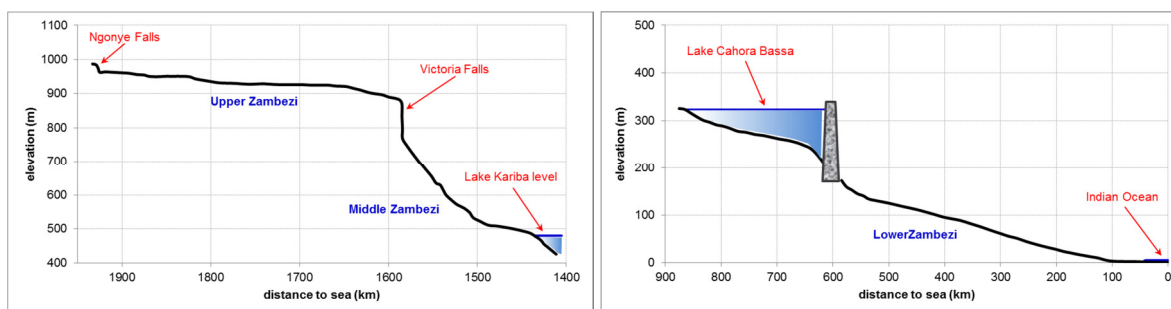


Fig. 3 – Profili longitudinali del fondo fluviale (dati da: Nugent, 1990; Ronco et al., 2010).

Lo Zambesi, lungo il suo corso, riceve le acque di numerosi affluenti, alcuni dei quali, per la loro portata, sono da considerarsi veri e propri sistemi fluviali a sé stanti. I principali affluenti sono il Lungue/Bumpo, il Luanginga, il Cuando (o Kwando) e il Kabompo nel tratto superiore, il Sanyati, il Kafue e il Luangwa nel tratto mediano e, nello Zambesi Inferiore, il Revuboe, il Luenha/Mazoe, e, infine, lo Shire, che sfocia dal lago Niassa/Malawi e confluisce nell'asta principale circa 150 km a monte della foce.

I due grandi invasi artificiali di Kariba e Cahora Bassa alterano in maniera significativa il regime idrologico e sedimentario del fiume a valle; entrambi gli invasi sono utilizzati a scopo idroelettrico e rappresentano la principale fonte di energia dell'Africa Sud-Orientale. Il lago di Kariba, lungo il confine tra Zambia e Zimbabwe, originato dalla diga entrata in esercizio nel 1959, ha una capacità di accumulo stimata in 180.6 miliardi di m<sup>3</sup> ed una superficie di 5364 km<sup>2</sup> (Davies et al., 2000). Circa 500 km più a valle, nel territorio del Mozambico, la diga di Cahora Bassa, completata alla fine del 1974, dà origine ad un lago che, secondo i dati della società *Hidroeléctrica de Cahora Bassa*, ha una capacità utile di 52 miliardi di m<sup>3</sup> e, al livello di massimo invaso, lunghezza 270 km, larghezza 30 km e superficie 2900 km<sup>2</sup>.

Va, inoltre, menzionata la diga di Itzhi-Tezhi, in Zambia, realizzata nel 1976 sull'affluente Kafue, che si immette nello Zambesi nel tratto compreso tra la diga di Kariba ed il lago di Cahora Bassa.

Per effetto delle grandi dimensioni, l'idrografia del bacino dello Zambesi non è uniforme, sia in termini di afflusso complessivo, sia in termini di variabilità stagionale. In generale, le

maggiori precipitazioni si verificano nei sottobacini settentrionali, in particolare nelle aree dello Zambesi Superiore e del lago Niassa, con valori fino a 1400 mm/anno, mentre i valori minimi si registrano nelle zone meridionali, con precipitazioni di circa 500 mm/anno (World Bank, 2010).

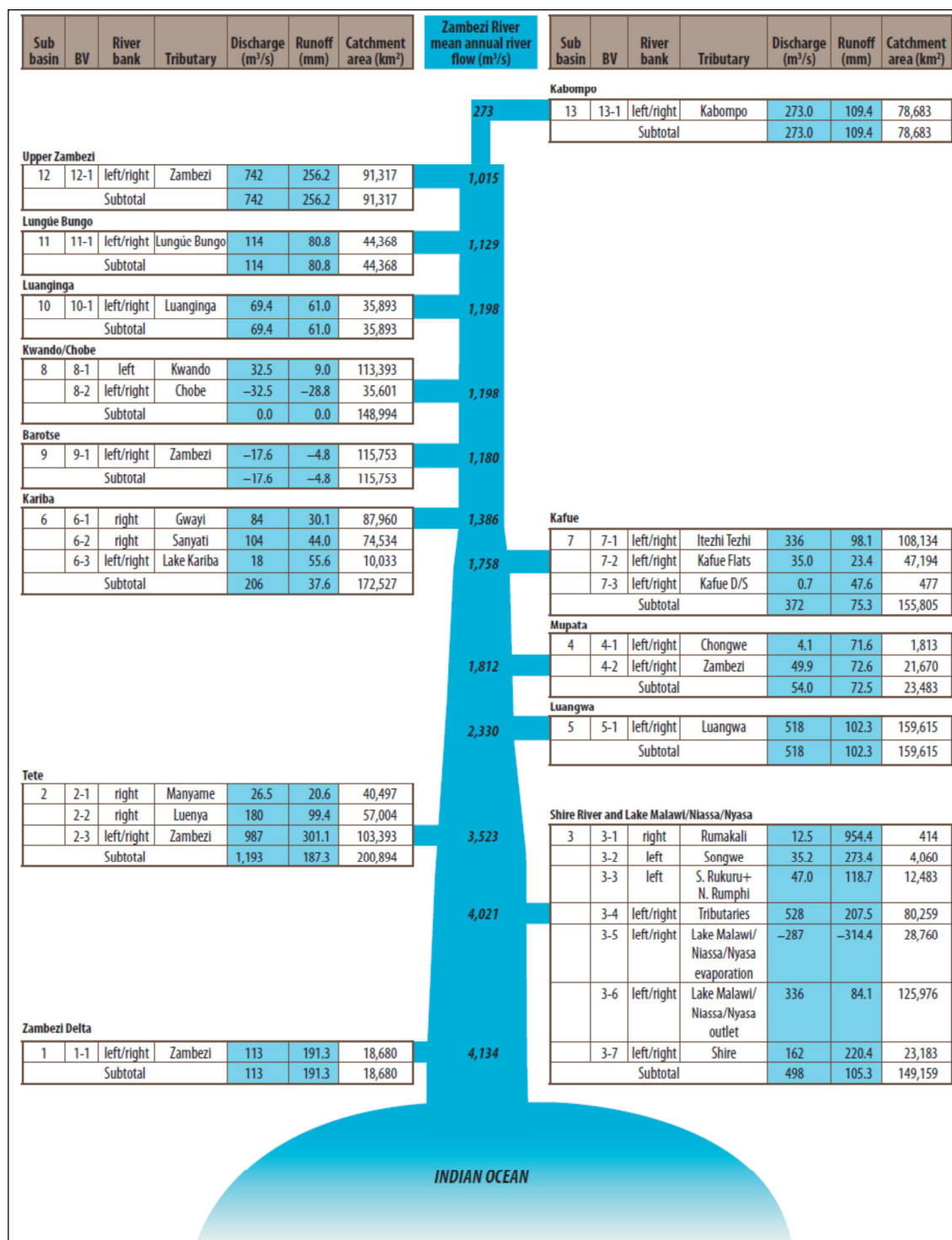


Fig. 4 – Rappresentazione schematica del sistema fluviale dello Zambesi (World Bank, 2010).

Per quanto riguarda il deflusso totale, Moore (2007) riporta il valore medio di 97 miliardi di  $m^3$ /anno, corrispondenti ad una portata media annua alla foce di  $3074 m^3/s$ , i rapporti di Euroconsult Mott MacDonald (2007, 2008) riportano, invece, il valore di 103 miliardi di  $m^3$ /anno ( $3264 m^3/s$ ), mentre uno studio della World Bank (2010) stima, infine, il deflusso medio in 130 miliardi di  $m^3$ /anno ( $4134 m^3/s$ ). La Fig. 4 (World Bank, 2010) riporta uno schema idrologico degli afflussi e deflussi medi annui, evidenziando i contributi dei vari sottobacini e trascurando gli effetti di regolazione delle portate in uscita alle dighe artificiali.

Relativamente alla variabilità stagionale di afflussi e deflussi, nel bacino dello Zambesi le precipitazioni sono concentrate nei mesi estivi (da novembre a marzo), mentre i mesi invernali (aprile-ottobre) sono generalmente asciutti.

In termini di deflusso, gli effetti della stagionalità sono oggi osservabili nello Zambesi Superiore. Ad esempio, in Fig. 5 sono riportati i valori di portata giornaliera misurati alle Cascate Ngonye dall'Ente gestore del tratto compreso tra Zambia e Zimbabwe (Zambezi River Authority).

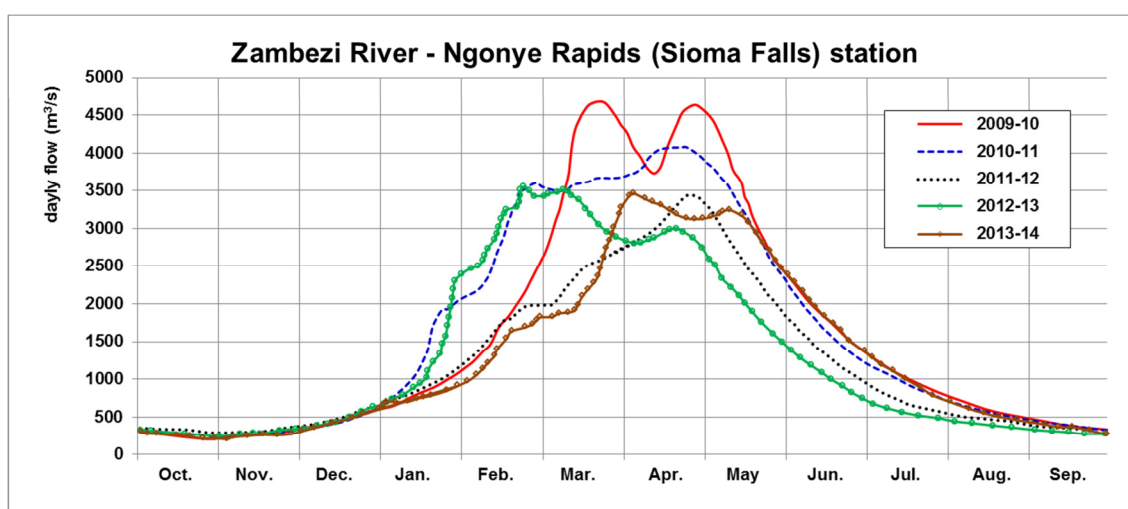


Fig. 5 – Portate giornaliere alla stazione di Ngonye, Zambesi Superiore (dati da: Zambezi River Authorities).

## 1.2 Lo Zambesi Inferiore

Lo Zambesi Inferiore va dalla diga di Cahora Bassa all'Oceano Indiano e scorre interamente nel territorio della Repubblica del Mozambico (Fig. 6). In tale tratto, il deflusso fluviale è influenzato in modo determinante dalla presenza dei grandi invasi artificiali e, in particolare, dalla regolazione delle portate in uscita dall'invaso di Cahora Bassa.

Dal momento che le piogge nel bacino idrografico sono concentrate nel periodo estivo, il regime dello Zambesi Inferiore era caratterizzato, in passato, da piene molto intense nei periodi da febbraio ad aprile, con portate di piena comprese, in media, tra  $8000$  e  $14000 m^3/s$  e, occasionalmente, anche superiori a  $22000 m^3/s$  (Davies et al., 2000). Questa caratteristica ha determinato storicamente, nelle popolazioni locali, la pratica agricola di seminare nelle zone alluvionali prossime alle sponde nel mese di aprile, appena dopo il ritiro delle acque, e di effettuare il raccolto nel mese di febbraio subito prima dell'arrivo delle inondazioni.

Dall'entrata in esercizio delle due dighe, una frazione significativa delle piogge estive si accumula negli invasi artificiali, riducendo in maniera sostanziale la variabilità delle portate a valle. Tale effetto è osservabile in Fig. 7, in cui sono riportati i valori delle portate medie

mensili alla stazione di Tete (Ronco et al., 2010) misurate, rispettivamente, negli anni 1951-1958 (prima della costruzione della diga di Kariba), 1959-1974 (con la sola diga di Kariba in esercizio) e 1975-2003 (con entrambe le dighe in esercizio).

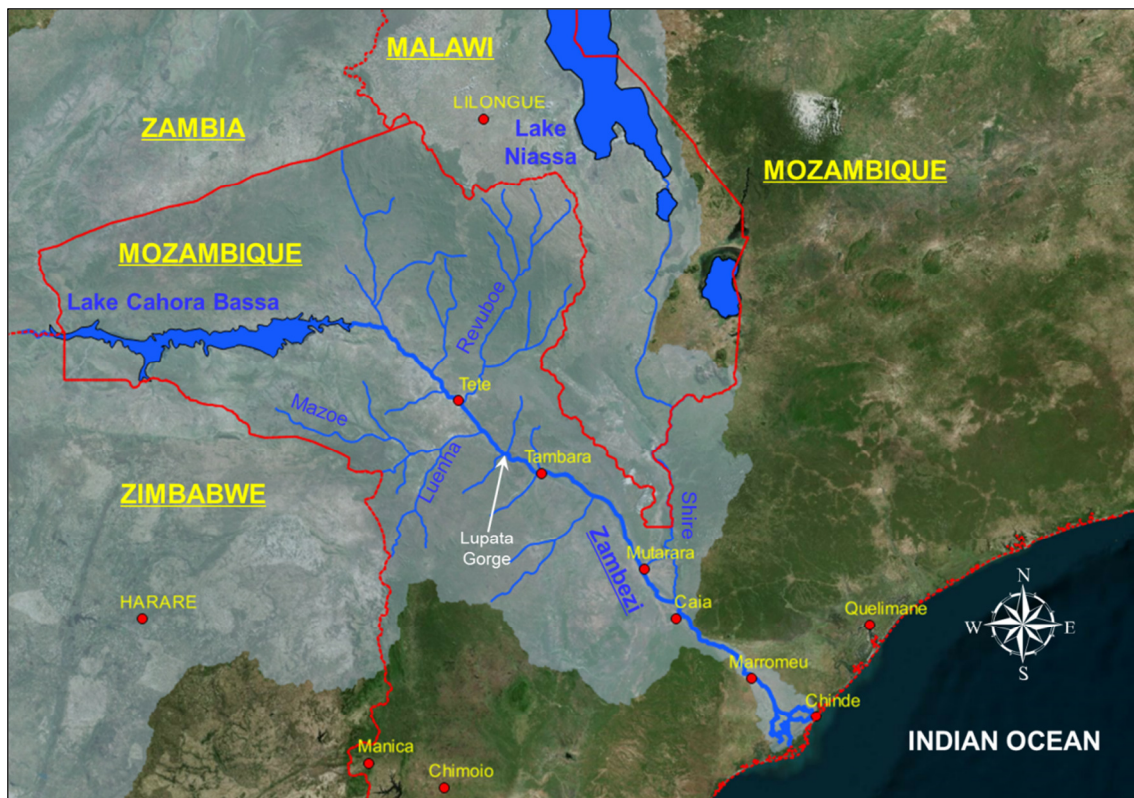


Fig. 6 – Mappa dello Zambesi Inferiore.

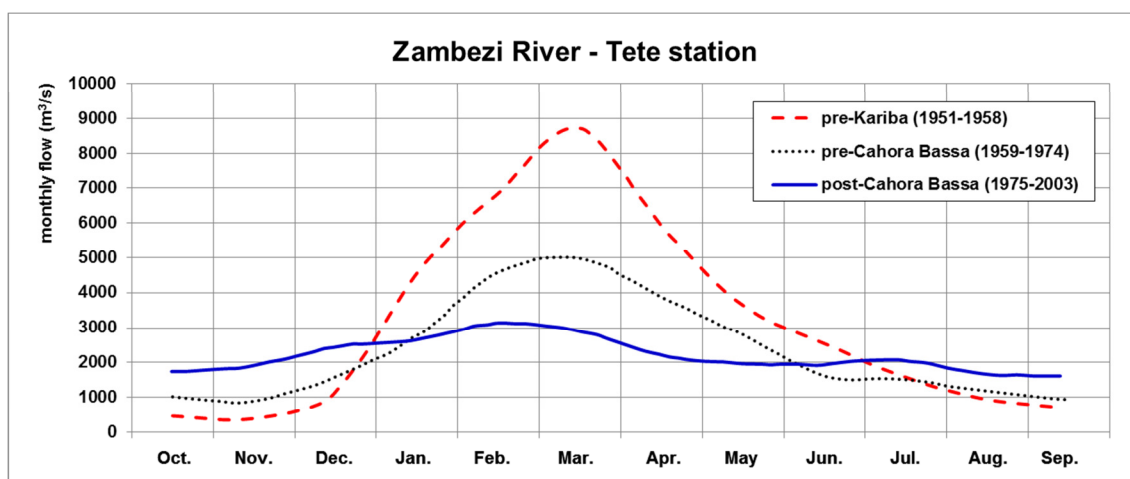


Fig. 7 – Andamento delle portate medie mensili alla stazione di Tete (dati da: Ronco et al. 2010).

Le effettive conseguenze della costruzione degli sbarramenti sul territorio, sulle popolazioni e sull'ambiente sono da anni oggetto di discussione, talvolta con punti di vista diversi.

Davies et al. (2000) riportano che, nel periodo immediatamente precedente la messa in

esercizio della diga di Cahora Bassa, furono formulate delle raccomandazioni al fine di minimizzare l'impatto della diga sull'ecosistema e sulla morfologia del fiume, le quali però, furono, almeno in parte, disattese. Il riempimento dell'invaso è avvenuto nella stagione 1974-1975 e, da allora, si sono contati pochi eventi straordinari di piena, tra cui il più grave si è verificato proprio nelle fasi finali di riempimento del bacino, nel marzo 1975.

La regolazione del regime fluviale ha avuto sia effetti positivi, sia effetti negativi sulla vita delle popolazioni che abitano lungo il corso del fiume. Tra le conseguenze positive si evidenziano la diminuzione dell'intensità delle inondazioni e la possibilità, per le fattorie, di disporre di un livello idrico relativamente stabile per l'irrigazione delle coltivazioni in prossimità delle sponde. Al contrario, per le popolazioni che praticano un'agricoltura di sussistenza senza l'utilizzo di particolari tecniche di irrigazione, la riduzione delle inondazioni periodiche, ha avuto conseguenze negative, venendo a mancare l'apporto di umidità e di sostanze nutrienti ai terreni agricoli ed ai pascoli (Euroconsult Mott MacDonald, 2007).

Gli sbarramenti hanno avuto, inoltre, conseguenze sull'ecosistema, a causa della riduzione dell'apporto di acqua e di sedimenti alla piana alluvionale ed all'apparato di foce (Moore et al., 2007). Beilfus & Brown (2010) riportano che negli anni '70 dello scorso secolo le zone umide di Marromeu e l'area del delta ospitavano, accanto a numerose specie di uccelli, un'importante popolazione di grandi mammiferi, tra cui circa 46000 bufali africani (*Syncerus caffer*), 47500 antilopi d'acqua (*Kobus ellipsiprymnus*), 3000 ippopotami (*Hippopotamus amphibious*) e 400 elefanti africani (*Loxodonta africana*), drasticamente ridotta o scomparsa nei decenni successivi (Davies et al., 2000); a riguardo, è doveroso evidenziare, tuttavia, anche il ruolo giocato, nello stesso periodo, dal bracconaggio e dalle guerre. Davies et al. (2000) riportano, infine, che nell'area del delta è stata riscontrata, dopo la realizzazione della diga di Cahora Bassa una estesa erosione costiera, insieme ad una importante diminuzione delle mangrovie e della popolazione di gamberi.

Dal punto di vista dell'impatto sulla morfologia fluviale, i grandi invasi di Kariba e Cahora Bassa si comportano come trappole di sedimenti, intercettando il materiale solido che sarebbe destinato a valle. Al tempo stesso, la regolazione del deflusso e la drastica attenuazione degli eventi di piena tendono a ridurre la capacità di trasporto dei sedimenti. I due fenomeni hanno conseguenze opposte sulla morfologia del fiume e si sviluppano in scale temporali diverse; i cambiamenti morfologici, pertanto, dipendono dal prevalere ora dell'uno, ora dell'altro dei due effetti.

Relativamente all'apporto di sedimenti ai due grandi laghi artificiali, si fa usualmente riferimento agli studi condotti da Bolton (1984). Per il lago di Kariba, l'autore, analizzando le caratteristiche del bacino idrografico ed i risultati di studi precedenti finalizzati alla previsione della perdita di suolo, riporta una stima della portata solida in arrivo compresa tra 7 e 70 milioni di m<sup>3</sup>/anno. Per Cahora Bassa, l'autore rileva l'assenza, in letteratura, di stime di trasporto solido condotte in fase di progettazione della diga e osserva che, probabilmente, tale aspetto fu considerato di secondaria importanza, vista la presenza del lago di Kariba. Invece, sulla base delle caratteristiche del bacino e delle poche misure disponibili di concentrazione di solidi sospesi, l'autore stima, sia pure con larga incertezza, un valore di portata solida in arrivo a Cahora Bassa relativamente elevato, compreso tra 20 e 200 milioni di m<sup>3</sup>/anno.

Più recentemente, Ronco et al. (2010), utilizzando misure di torbidità condotte nel periodo 1973-1974, integrate con misure di portata idrica, stimano una portata solida mediamente in arrivo a Cahora Bassa di 28.6 milioni di m<sup>3</sup>/anno, di cui 14.6 provenienti dal Medio Zambesi e 14.0 provenienti dall'affluente Luangwa.

Davies et al. (2000), sulla base di osservazioni aeree, riportano significativi cambiamenti

nella morfologia fluviale successivamente all'entrata in esercizio delle dighe. Gli autori, inoltre, hanno descritto in dettaglio le diverse tipologie morfologiche individuate nello Zambesi Inferiore (Fig. 8), analizzando, per ognuna di esse, le possibili tendenze evolutive.

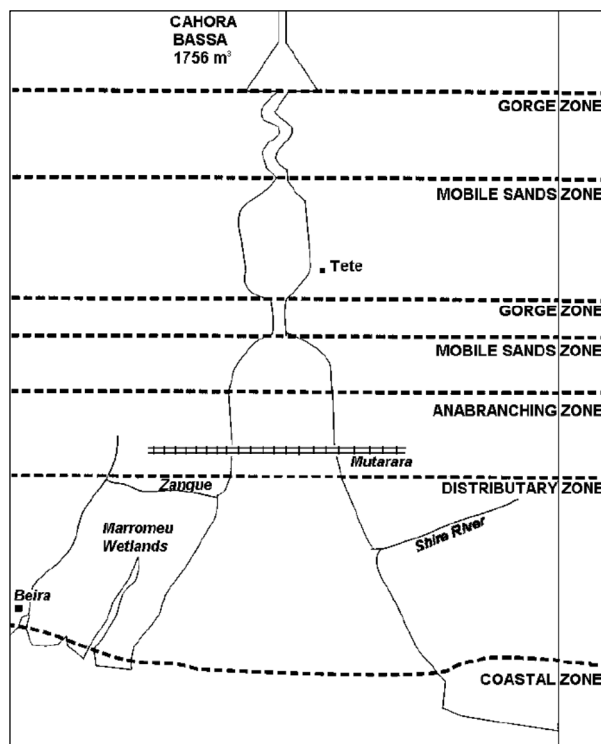


Fig. 8 – Rappresentazione schematica dei principali tipi di morfologia fluviale osservati nel tratto inferiore dello Zambesi (da: Davies et al., 2000).

In particolare, nell'area montana tra Cahora Bassa e Tete e nella gola di Lupata il fiume scorre attraverso valli relativamente strette (150-400 m) con un gradiente idraulico piuttosto elevato (*gorge zone*). A valle di queste zone, si può individuare una zona di transizione in cui la sezione fluviale si allarga fino a misure di circa 1 km, dando luogo ad una rete di canali intrecciati caratterizzata, tuttavia, da un gradiente idraulico e da un trasporto solido ancora apprezzabili (*mobile sands zone*). Con l'ulteriore allargamento della sezione e diminuzione del gradiente, il fiume forma una serie di canali caratterizzati da scarsi valori di velocità e trasporto (*anabanching zone*). Nell'ultimo tratto e nella piana deltizia, infine, la sezione si allarga ulteriormente, dando luogo ad una estesa rete di canali distribuita su un'area che raggiunge una larghezza di diverse decine di km (*tributary zone*).

La presenza degli invasi determina effetti diversi a seconda della morfologia dei vari tratti sopra descritti. Da un punto di vista qualitativo, Davies et al. (2000) prevedono, nelle *gorge zones*, una tendenza alla rimozione delle barre di fondo, per effetto della regolazione del deflusso, che dà luogo a velocità della corrente costantemente elevate. Nelle aree a minore gradiente, invece, la maggiore regolarità delle portate tenderebbe a concentrare il flusso in un canale principale della sezione fluviale, favorendo, al tempo stesso, la sedimentazione nei canali secondari, fino al loro progressivo interrimento. Nell'area del delta gli effetti sarebbero ancora più evidenti, con una riduzione dell'estensione delle aree umide. Un'altra conseguenza prevedibile è l'erosione costiera nell'area della foce, per effetto della riduzione dell'apporto sedimentario.

Ronco et al. (2006, 2010) hanno utilizzato un modello morfologico monodimensionale basato sull'ipotesi di "portata locale uniforme" per simulare le tendenze evolutive dello Zambesi Inferiore, rispettivamente, in assenza ed in presenza delle dighe di Kariba e Cahora Bassa. I risultati in assenza delle dighe mostrano una tendenza generale ad un innalzamento della quota di fondo dell'alveo (sedimentazione) e ad un affinamento della granulometria dei sedimenti, in particolare nella zona pianeggiante a valle delle gole. Le simulazioni in presenza delle dighe mostrano, sia pure con modalità diverse a seconda dei vari tratti, alcune variazioni rispetto alla naturale tendenza evolutiva del fiume, ma senza sostanziali alterazioni dell'andamento generale; le maggiori conseguenze in termini di erosione sono state riscontrate nell'area del delta fluviale.

Il modello descritto è stato recentemente implementato con l'aggiunta di un modulo "quasi 2-D" che simula in modo semplificato l'evoluzione della sezione trasversale dell'alveo, considerando anche la presenza della vegetazione (Nones et al., 2013). Nel confermare i risultati degli studi precedenti, è stata evidenziata, in presenza delle dighe, una tendenza al restringimento della sezione trasversale dell'alveo, caratterizzata dall'approfondimento di un canale centrale e dalla crescita della vegetazione nei canali secondari, fino alla loro progressiva obliterazione. La semplificazione indotta dalle ipotesi alla base della formulazione del modello permette di ridurre la quantità e la risoluzione necessaria per i dati di input, rendendo possibile l'impiego di immagini telerilevate e modelli digitali a scala globale di risoluzione non elevata (Nones et al., 2014).

### **1.3 Considerazioni generali**

Nonostante i lavori citati, non sono riportati in letteratura esempi di misure batimetriche o altri studi finalizzati a quantificare gli apporti solidi nei grandi invasi, né rilievi e misure sistematiche lungo il fiume Zambesi a valle di Cahora Bassa per una valutazione della quota di fondo dell'alveo e dei cambiamenti di morfologia fluviale. D'altra parte, la scarsa disponibilità di misure dirette in campo è, ragionevolmente, condizionata da evidenti difficoltà operative e logistiche.

Anche per quanto riguarda le tendenze evolutive generali del fiume successive alla costruzione delle dighe, in assenza di misure e di un monitoraggio sistematico, si riscontrano, in letteratura, conclusioni differenti tra i diversi autori.

L'acquisizione di misure dirette, pertanto, potrebbe rivestire un interesse generale ai fini di una più approfondita conoscenza delle dinamiche idrologiche e sedimentarie dello Zambesi Inferiore.

In particolare, i dati acquisiti potrebbero costituire una base di confronto con ulteriori campagne in campo a scopo di monitoraggio. Inoltre, essi potrebbero essere utilizzati come dato per la calibrazione e validazione di modelli matematici o di misure acquisite mediante tecniche di telerilevamento.

Tali considerazioni, tenendo presente anche la particolarità e l'importanza del sito investigato, costituiscono la motivazione principale del presente rapporto.

## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 Aspetti logistici ed ambientali

Viste le particolari caratteristiche dell'area investigata, si ritiene interessante fornire alcune informazioni di carattere logistico ed ambientale.

La campagna scientifica è stata condotta utilizzando come base operativa la draga fluviale *Rio Bravo*, di proprietà dell'omonima società. L'imbarcazione misura, orientativamente, 30 m in lunghezza e 10 m in larghezza ed è dotata di un braccio aspirante, lungo circa 25 m e munito di testa rotante per l'estrazione dei sedimenti dal fondo (Fig. 9). Sul ponte inferiore della draga si trovano un'officina meccanica e vari locali di servizio, mentre il ponte superiore ha ospitato, nel corso della campagna, servizi, spazi comuni ed alloggi per il personale tecnico-scientifico.



Fig. 9 – La draga Rio Bravo, utilizzata come base per la campagna di ricerca.

La campagna di ricerca ha richiesto complessivamente circa un mese di lavoro, tra marzo ed aprile 2013. Nella prima parte di tale periodo, il personale è stato impegnato nelle operazioni di mobilitazione della strumentazione, nei trasferimenti via terra ed in altre attività preparatorie, tra cui la messa a punto degli strumenti e l'esecuzione di misure di prova in campo. Successivamente, è stata condotta la campagna di misura, comprendente la navigazione lungo il fiume, l'esecuzione dei rilievi e, infine, la smobilitazione delle attrezzature. L'ultima fase delle attività è consistita nella prima di analisi dei dati misurati; sono stati, inoltre, acquisiti documenti tecnici e cartografia presso le autorità locali e sono stati prodotti i report preliminari sul lavoro svolto.

Le attività sul fiume Zambesi sono state condotte dal 10/03 al 29/03/2013. La draga è partita dalla base operativa della *Minas Rio Bravo*, nella città di Tete, ed ha disceso il fiume fino a raggiungere la città di Tambara (Fig. 10). La distanza totale percorsa in navigazione è stata di circa 105 km.

In base al regime climatico ed idrologico del bacino fluviale, è stato scelto per la campagna il periodo immediatamente alla fine della stagione delle piogge. In tal modo, si è potuto

operare con condizioni di tempo asciutto e con i livelli idrici più elevati, quindi nella situazione di maggiore navigabilità del tratto fluviale. Tuttavia, nonostante il limitato pescaggio dell'imbarcazione, la navigazione è stata in qualche occasione condizionata dalle numerose secche e isole presenti lungo il corso fluviale.

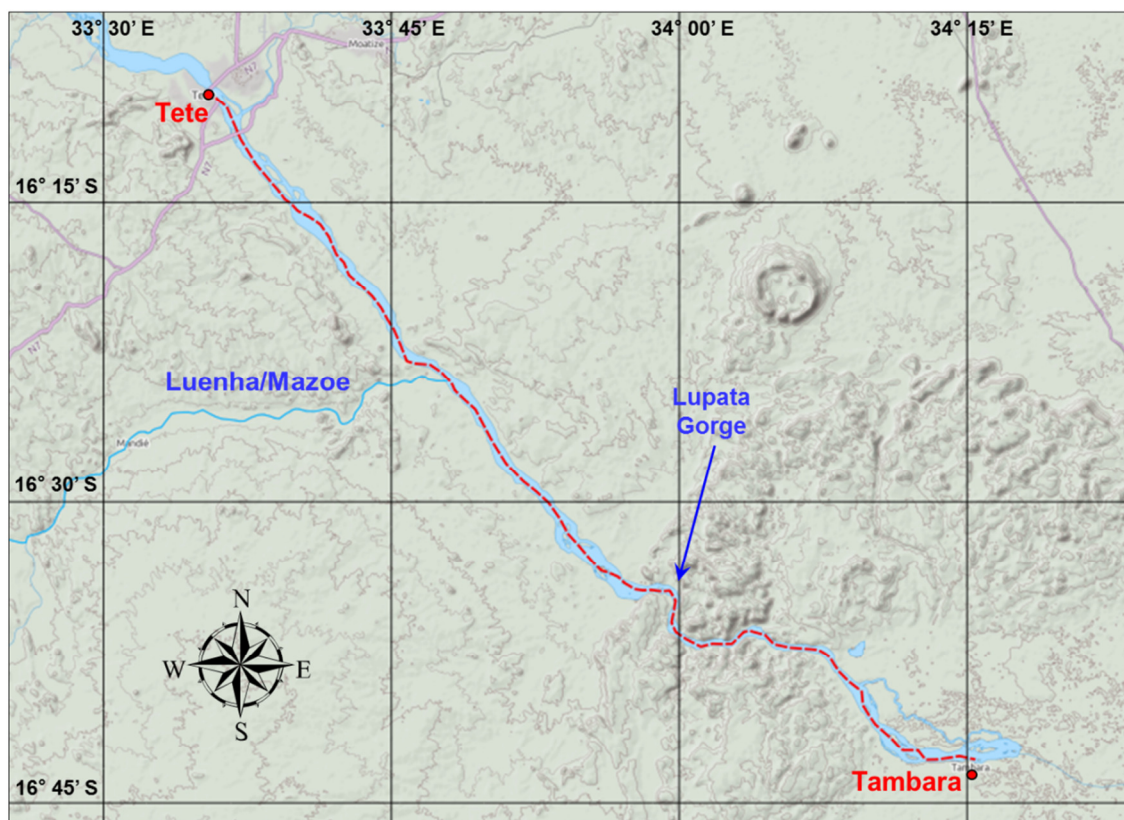


Fig. 10 – Itinerario seguito nel corso della campagna di ricerca.

In Tab. 1 sono riportati, con riferimento al periodo della campagna, i valori di portata misurati alla stazione di Tete dell'ARA Zambeze, Ente di regolamentazione e gestione del bacino fluviale nel territorio del Mozambico.

Tab. 1 – Valori di portata misurati alla stazione di Tete (ARA Zambeze)

DATA	Q (m <sup>3</sup> /s) - TETE
13/03/2013	1730.1
14/03/2013	1673.4
15/03/2013	1823.0
16/03/2013	1799.5
17/03/2013	1764.6
18/03/2013	1764.6
19/03/2013	1477.8
20/03/2013	1741.6
21/03/2013	1834.8
22/03/2013	2368.9
23/03/2013	2396.2
24/03/2013	2507.2

25/03/2013	2288.0
26/03/2013	2368.9
27/03/2013	2261.4
28/03/2013	2261.4
29/03/2013	2301.4
30/03/2013	2130.8

La velocità della corrente fluviale, relativamente ridotta, ad eccezione del passaggio attraverso le gole di Lupata, non ha inciso in maniera significativa sugli spostamenti della draga. Tuttavia, di essa si è dovuto tenere conto nell'esecuzione delle misure batimetriche, condotte con imbarcazioni di dimensioni ridotte e seguendo transetti trasversali alla sezione fluviale.

Infine, vale la pena segnalare la presenza di mandrie di ippopotami, che, occasionalmente, ha reso necessario modificare in parte il piano di navigazione e di acquisizione delle misure.

In Appendice A sono riportate alcune fotografie descrittive dello stato dei luoghi e delle condizioni ambientali ed operative.

## 2.2 Risorse e strumentazione utilizzate per i rilievi

### 2.2.1 *Ecoscandaglio*

Per le misure batimetriche è stato utilizzato un ecoscandaglio *single-beam dual frequency*, modello Odom Echotrac MKII. Lo strumento è composto da un trasduttore, montato fuori bordo, e da un'unità di controllo e acquisizione dati (Fig. 11).

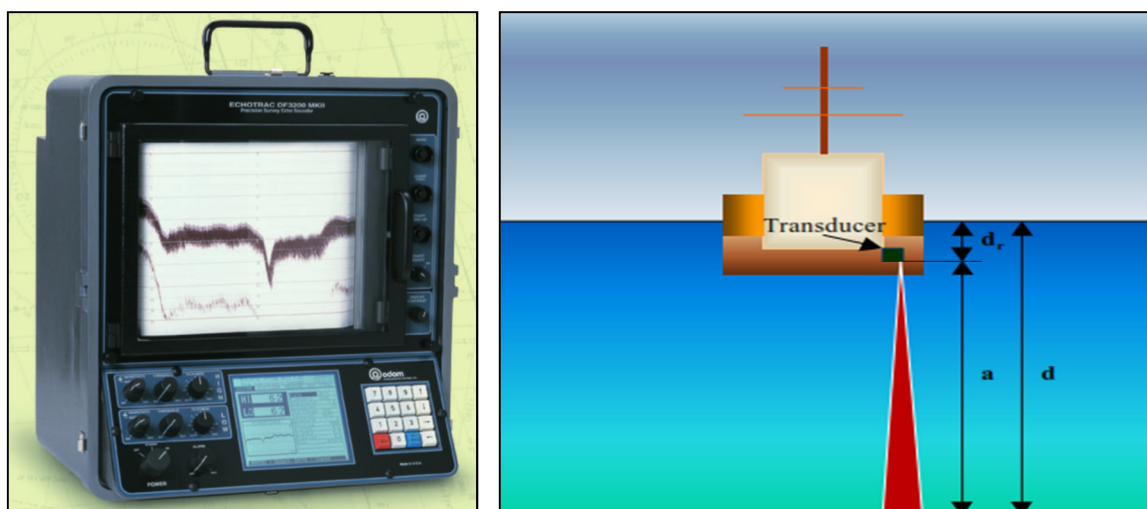


Fig. 11 – Unità di controllo e principio di funzionamento dell'ecoscandaglio.

Lo strumento è in grado di lavorare con due frequenze operative, rispettivamente pari a 200 kHz (*high frequency*) e 24 kHz (*low frequency*), che acquisiscono la misura simultaneamente su due canali diversi. Il segnale ad alta frequenza permette una maggiore risoluzione della misura batimetrica, presentando, al tempo stesso una maggiore tendenza ad attenuarsi con la profondità; viceversa, il segnale a bassa frequenza presenta una precisione inferiore, ma ha una minore attenuazione con la profondità e permette, pertanto, maggiori profondità operative.

La profondità viene calcolata utilizzando la relazione:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} + k + d_r$$

in cui:

- $d$  = profondità misurata rispetto alla superficie libera
- $v$  = velocità del suono lungo la colonna d'acqua
- $t$  = tempo impiegato dal segnale acustico emesso dal trasduttore a raggiungere il fondo e ritornare, per riflessione, al trasduttore
- $k$  = costante strumentale
- $d_r$  = distanza tra il trasduttore e la superficie libera (*draft*)

La velocità del suono rappresenta il principale parametro di calibrazione dello strumento. In accordo con lo stato dell'arte della materia (USACE, 2002), tale parametro può essere calcolato o mediante formule empiriche in funzione della temperatura e salinità/conducibilità dell'acqua, misurate con una sonda multiparametrica, oppure ricorrendo alla procedura del bar-check, che consiste nell'effettuare una misura ponendo una piastra metallica ad una profondità nota al di sotto del trasduttore. Nel lavoro qui descritto, sono state utilizzate entrambe le procedure.

La costante strumentale  $k$  viene normalmente considerata insieme al *draft* come un *offset* verticale di installazione dello strumento.

L'unità di controllo ed acquisizione è dotata di comandi per la regolazione dei parametri di funzionamento e di porte seriali RS232 per il collegamento al PC di acquisizione dei dati; lo strumento, inoltre, è fornito di stampante termica per la registrazione istantanea su carta del tracciato batimetrico rilevato (Fig. 12).

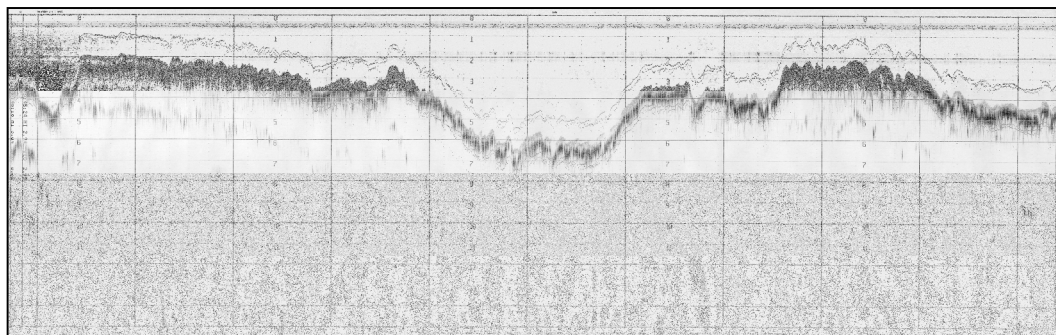


Fig. 12 – Tracciato batimetrico registrato su carta dall'ecoscandaglio.

### 2.2.2 Sistema di posizionamento GPS

Per il posizionamento dell'imbarcazione e l'acquisizione delle coordinate dei punti di misura è stato utilizzato un ricevitore GPS differenziale, modello Trimble Marine SPS 461, specifico per il rilievo idrografico.

Le principali caratteristiche tecniche del GPS utilizzato sono riportate nel seguito:

- Possibilità di operare in modalità *dual antenna (position/vector)* per la misura di posizione e *heading*.
- Doppia frequenza operativa.
- 72 canali C/A per il segnale L1, misura di fase sulle portanti L1/L2.
- Compatibilità con correzione differenziale SBAS (*Satellite Based Augmentation System*).

Per quanto riguarda la precisione delle misure, il produttore dichiara sul posizionamento orizzontale un'accuratezza di 0.25 m+1ppm in modalità differenziale, e un'accuratezza <1.00 m +1ppm con correzione SBAS. Tali valori devono ritenersi solamente indicativi, dal momento che la precisione effettiva dipende anche dalle condizioni ambientali ed operative e dalla configurazione dei satelliti al momento del rilievo.

In Fig. 13 sono illustrati i principali componenti dello strumento utilizzato.

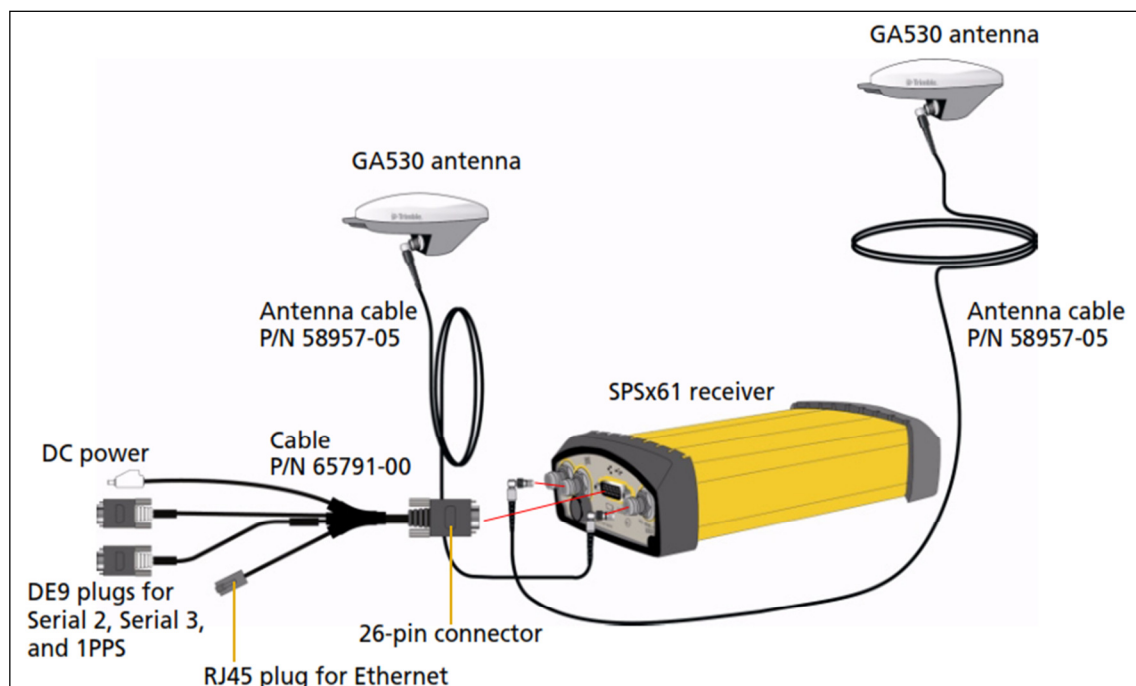


Fig. 13 – Principali componenti del GPS utilizzato per i rilievi.

### 2.2.3 Software di navigazione e acquisizione integrata

Per la navigazione e l'acquisizione in tempo reale delle misure è stato utilizzato il software Trimble HydroPro, specifico per rilievi idrografici (Trimble, 2001). Il software è installato su un PC equipaggiato con porte multiple di comunicazione per la gestione dei dati input/output dei vari strumenti utilizzati nel rilievo.

In particolare, nel modulo di navigazione, tutte le informazioni relative al rilievo sono contenute in un "progetto", contenente i seguenti dati (Fig. 14):

- Configurazione ed impostazioni generali.
- Informazioni geodetiche, necessarie a convertire le coordinate geografiche GPS (Latitudine e Longitudine riferite al Datum WGS84) in coordinate metriche Easting e Northing relative ad un determinato sistema di riferimento locale.
- Caratteristiche dell'imbarcazione, ovvero le dimensioni e la posizione degli strumenti, individuati da specifici offset.
- Configurazione degli strumenti collegati (GPS, ecoscandaglio, etc.), per ciascuno dei quali deve essere definito il tipo di dato acquisito, la modalità di funzionamento, la frequenza di acquisizione, il protocollo per la trasmissione dei dati, la porta di comunicazione. Nella presente campagna è stata scelta una frequenza di acquisizione dei dati batimetrici pari a 1 Hz.

- “Guidance object”, ovvero elementi grafici quali linee, punti, etc. che, visualizzati sullo schermo insieme alla posizione del natante, vengono utilizzati come guida per la navigazione e l’acquisizione delle misure, fornendo in tempo reale al pilota lo scostamento rispetto alla posizione prevista e le indicazioni per la correzione di rotta.
- Modalità di acquisizione dei dati e di gestione degli eventi. In particolare, l’utente può passare da una all’altra delle seguenti modalità operative:
  - o Off-line, senza ricevere dati dalla strumentazione collegata.
  - o On-line, in cui è attivo l’input/output dei dati strumentali, ma non la loro acquisizione su disco o altra unità di memoria.
  - o Logging, in cui vengono acquisiti i dati strumentali.
- Storage delle misure eseguite, organizzate in un database strutturato.

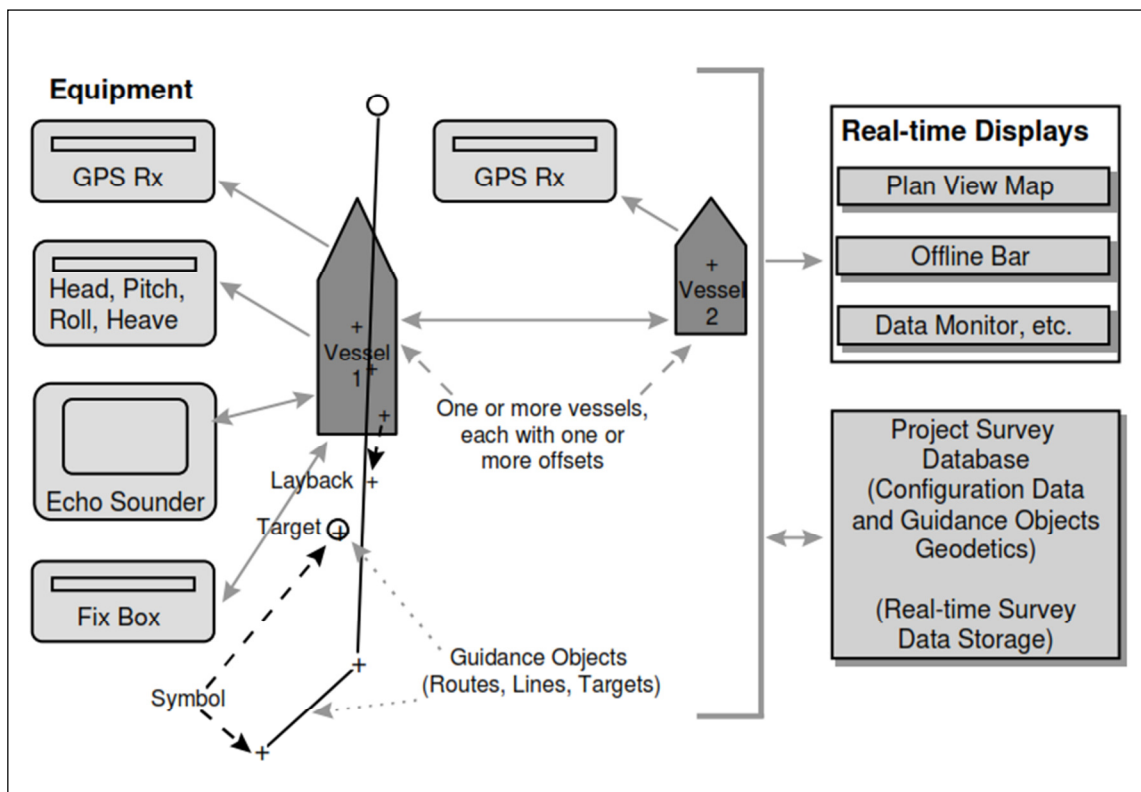


Fig. 14 - Schema di un progetto di navigazione Trimble HydroPro.

Per quanto riguarda il sistema di riferimento, nel presente rilievo è stato utilizzato il sistema locale di coordinate UTM 36 Sud-WGS 84 (EPSG 32736), i cui parametri principali sono elencati nel seguito:

- Sistema di Proiezione: UTM (*Universal Transverse Mercator*)
- Datum: WGS84
- Fuso: 36 Sud
- Falso Easting: 500000
- Falso Northing: 10000000
- Meridiano Centrale: 33
- Fattore di scala: 0.999600

#### 2.2.4 Mezzi nautici

Per l'esecuzione delle misure sono state utilizzate le due imbarcazioni ausiliarie a servizio della Rio Bravo, denominate Alpha 1 e Alpha 2. Le imbarcazioni hanno lo scafo in acciaio e dimensioni tali da poter ospitare la strumentazione ed il personale addetto alla navigazione ed alle misurazioni batimetriche.

La guida dell'imbarcazione e tutte le altre operazioni connesse alla navigazione sono state affidate al personale *Rio Bravo*, mentre il personale ENEA ha curato l'installazione della strumentazione e l'acquisizione dei dati batimetrici, fornendo al pilota le indicazioni necessarie alla navigazione.

Per permettere l'installazione degli strumenti sono stati necessari lavori di adeguamento ai natanti e la realizzazione di supporti metallici, che sono stati realizzati presso l'officina a bordo della draga *Rio Bravo* seguendo le istruzioni del personale ENEA. In particolare, l'ecoscandaglio è stato fissato ad un palo che è stato installato, tramite un idoneo supporto, di fianco all'imbarcazione; è stata inoltre realizzata una struttura per il fissaggio dell'antenna GPS nella posizione più elevata possibile, in modo da permettere la migliore ricezione del segnale.

In Fig. 15 si può osservare uno dei natanti utilizzati per i rilievi. Si nota, in primo piano, il palo con il trasduttore dell'ecoscandaglio, immediatamente prima del fissaggio al fianco dell'imbarcazione, l'antenna GPS, la consolle dell'ecoscandaglio ed il computer utilizzato per la navigazione e l'acquisizione dei dati.

Ulteriori immagini fotografiche descrittive delle risorse impiegate sono riportate in Appendice A.



Fig. 15 – Imbarcazione utilizzata per le misure batimetriche.

### 2.3 Esecuzione delle misure batimetriche

L'area interessata dalle misure batimetriche risulta compresa, in latitudine, nell'intervallo  $16^{\circ}38'43.00''$ - $16^{\circ}43'03.50''$  Sud e, in longitudine, nell'intervallo  $34^{\circ}08'35.00''$ - $34^{\circ}13'45.00''$  Est (WGS84). Con riferimento al sistema di riferimento UTM 36 Sud (WGS84), l'area di rilievo risulta, orientativamente, compresa tra le coordinate 621500-631000 m (Easting) e 8151500-8159500 m (Northing).

In Fig. 16 il tracciato planimetrico delle misure eseguite è riportato su una recente immagine satellitare dell'area (fonte: *Google Earth*, data di acquisizione dell'immagine: 27/08/2014).

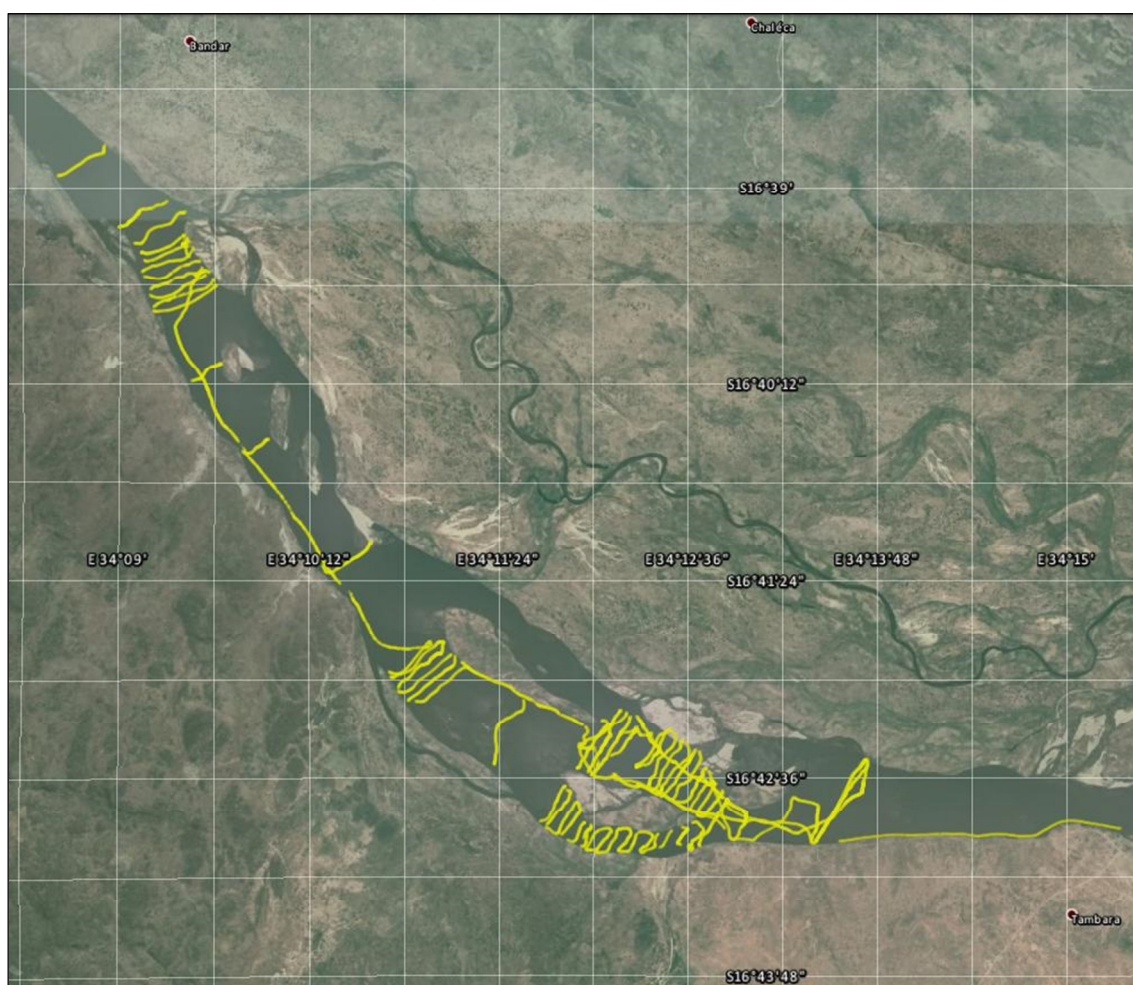


Fig. 16 – Tracciato delle misure batimetriche effettuate, visualizzate tramite Google Earth (data di acquisizione dell'immagine satellitare: 27/08/2014).

Il rilievo è stato condotto seguendo linee di navigazione trasversali al corso del fiume. Il piano di navigazione è stato definito, essenzialmente, tenendo conto della necessità di ottenere un'informazione più dettagliata nelle aree dove si sono concentrate anche le altre attività di campagna. Pertanto, la spaziatura dei transetti non è uniforme; in generale, si è seguito il criterio di rilevare, ove possibile, la sezione fluviale lungo transetti a distanza compresa tra 800 e 1500 m, riducendo l'interasse a circa 100 m nelle aree di maggiore interesse. Inoltre, compatibilmente con la navigabilità, sono state anche eseguite delle misure lungo linee il più

possibile prossime alle sponde del fiume.

All'inizio di ogni sequenza di misure è stata eseguita la calibrazione dell'ecoscandaglio ricorrendo alla procedura del bar-check. È stata, inoltre, utilizzata una sonda multiparametrica per la misura della temperatura e della conducibilità dell'acqua.

In generale, è stata riscontrata una scarsa variabilità dei parametri misurati nel corso dei diversi giorni di misura. I valori adottati di velocità del suono sono risultati complessivamente variabili nell'intervallo 1480-1500 m/s.

L'esecuzione delle misure batimetriche è stata condizionata dalla morfologia del fiume, che è caratterizzata dalla presenza di depositi sabbiosi sommersi ed isole, la cui forma, per effetto delle dinamiche sedimentarie, è risultata in taluni casi sensibilmente diversa da quella attesa in base alla cartografia ed alle immagini satellitari disponibili al momento del rilievo.

Tali aspetti saranno approfonditi nella sezione dedicata alla presentazione ed alla discussione dei risultati.

### 3 RISULTATI

#### 3.1 Elaborazione dei dati

I dati acquisiti in formato digitale sono stati elaborati per ricostruire un modello digitale del fondale e produrre i grafici per la presentazione dei risultati.

La prima fase è consistita nell'eliminazione dei dati spuri (*spike*) legati a episodiche e macroscopiche acquisizioni errate della strumentazione; tali dati sono facilmente individuabili in quanto si differenziano sensibilmente da quelli che li precedono e seguono nella sequenza temporale delle misure.

Successivamente, i dati acquisiti sono stati esportati in formato ASCII, sotto forma di terne (X, Y, Z - Easting, Northing, Depth). Attraverso l'utilizzo di software specialistico, è stato quindi costruito il modello digitale del fondale mediante interpolazione. I risultati ottenuti sono stati, infine, presentati sotto forma di mappe batimetriche e sezioni trasversali.

Le procedure descritte sono state eseguite separatamente per ciascuno dei due canali dell'ecoscandaglio, denominati nel modo seguente:

- Channel 1: high frequency (200 kHz)
- Channel 2: low frequency (24 kHz)

Nell'elaborazione dei dati si è dovuto tenere conto della variabilità del livello della superficie libera del fiume, che rappresenta la quota zero dell'ecoscandaglio. Sono stati presi come riferimento, a tale scopo, i livelli idrografici misurati alla stazione di Mutarara (Bollettini idrologici ARA Zambeze), che, per il periodo in cui sono stati effettuati i rilievi, forniscono i valori riportati in Tab. 2. L'assenza di precipitazioni, il fondo poco acclive e, in generale, la scarsa variabilità dei livelli idrometrici, ha permesso di trascurare la variabilità del livello di riferimento nel corso delle singole giornate di misura.

Tab. 2 – Livelli idrometrici alla stazione di Mutarara (ARA Zambeze)

DATA	LIVELLO (m) - MUTARARA
20/03/2013	3.96
21/03/2013	4.04
22/03/2013	4.04
23/03/2013	4.06
24/03/2013	4.26
25/03/2013	4.33
26/03/2013	4.34
27/03/2013	4.24
28/03/2013	4.29

Dai dati batimetrici registrati in termini di profondità (*depth below transducer*) sono state ricavate le quote del fondo fluviale riferite allo zero idrografico. Attraverso tale procedura è stato possibile riportare su mappa ed utilizzare per le interpolazioni dati acquisiti in giornate differenti.

Per l'elaborazione ed interpolazione delle misure batimetriche è stato utilizzato il software Surfer, prodotto da Golden Software. Il software permette di eseguire interpolazioni di dettaglio su dati 3D, consentendo di scegliere il tipo di algoritmo di interpolazione ed i parametri che meglio si adattano alla distribuzione dei dati. Inoltre, è possibile utilizzare varie funzioni di smoothing e di filtraggio sui dati.

In particolare, è stato utilizzato l'algoritmo di interpolazione geostatistico Kriging, dotato di caratteristiche che gli consentono di adattarsi bene a diverse distribuzioni di dati, restituendo, in particolare, risultati sufficientemente realistici nei casi, come quello in esame, di distribuzione spaziale non uniforme.

Per ciascun nodo della griglia, i dati per l'interpolazione vengono ricercati in un intorno di forma ellittica, di cui è possibile definire l'orientamento e la dimensione degli assi; è possibile anche suddividere l'ellisse di ricerca in un numero assegnato di settori. Il nodo viene considerato privo di dati (blank node) nel caso in cui il numero di dati contenuti in uno o più settori siano al di sotto di un minimo stabilito dall'utente.

Complessivamente, sulla base della distribuzione dei dati, sono state definite 8 aree di indagine, come illustrato in Fig. 17. Per ciascuna area è stato ricavato per interpolazione il modello digitale del fondale, adottando una maglia quadrata di lato 5 m, con riferimento ad entrambi i canali dell'ecoscandaglio.

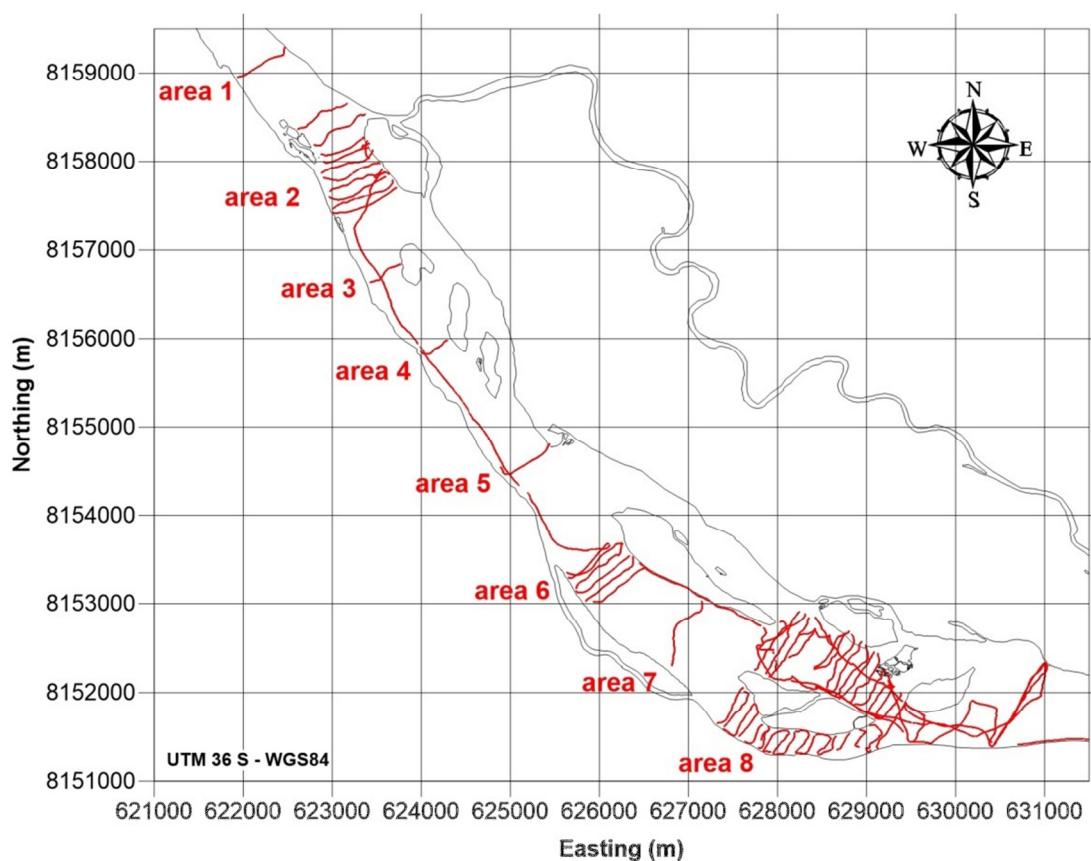


Fig. 17 – Definizione delle aree in cui sono state condotte le elaborazioni dei dati batimetrici. Le linee di sponda sono state digitalizzate dall'immagine satellitare del 27/08/2014.

### 3.2 Presentazione dei risultati

Nelle Figg. 18 e 19 sono riportate le carte batimetriche generali dell'area di indagine, in scala di colori rappresentativa della profondità del fondale acquisita, rispettivamente dal segnale ad alta frequenza (channel 1) e dal segnale in bassa frequenza (channel 2).

Nei grafici riportati, le profondità sono riferite al livello idrometrico della giornata in cui

sono state eseguite le misure. Per le aree 6, 7 e 8, in cui le misure sono state eseguite in giorni diversi, i valori di profondità sono stati ricavati sottraendo alla quota di fondo il livello idrometrico medio misurato nei diversi giorni di misura.

In Appendice B sono riportate le mappe batimetriche di dettaglio descrittive delle diverse aree individuate.

Allo scopo di evidenziare l'andamento della sezione fluviale, sono stati estratti, a partire dalle griglie batimetriche, i profili batimetrici lungo un numero significativo di transetti, come illustrato in Fig. 20. Le sezioni sono state tracciate con i seguenti criteri:

- Nelle aree di misura isolate, caratterizzate da una sola linea di misura è stata tracciata una sezione, il più possibile vicina alla linea effettiva di misura.
- Nelle aree più ampie sono state tracciate linee di sezione ad equidistanza 150 m.

Complessivamente, sono stati estratti 33 profili batimetrici. I rispettivi grafici sono riportati in Appendice C. Nei grafici, l'origine dell'asse delle ascisse è sulla sponda in destra idrografica.

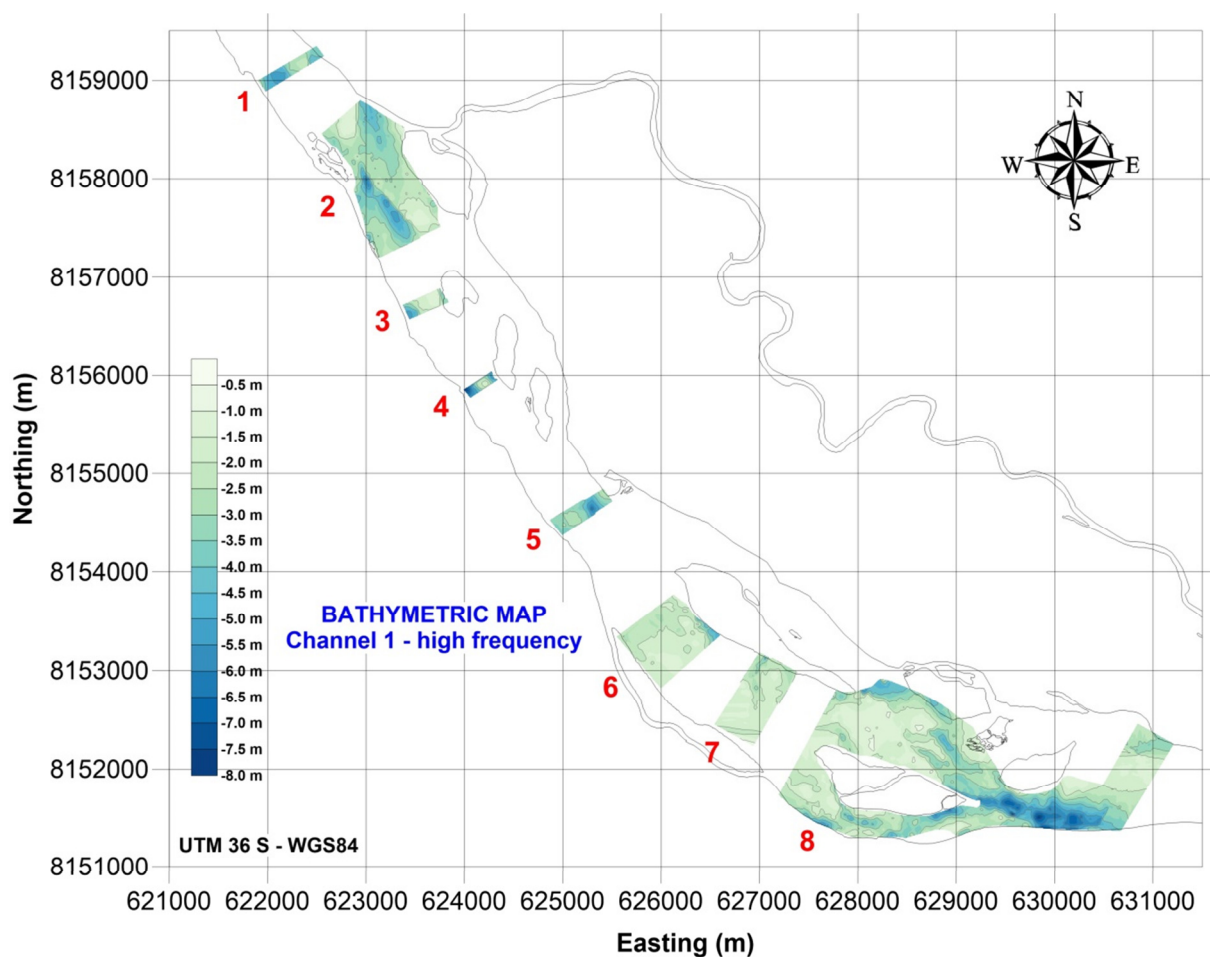


Fig. 18 – Carta batimetrica generale (canale 1, alta frequenza).

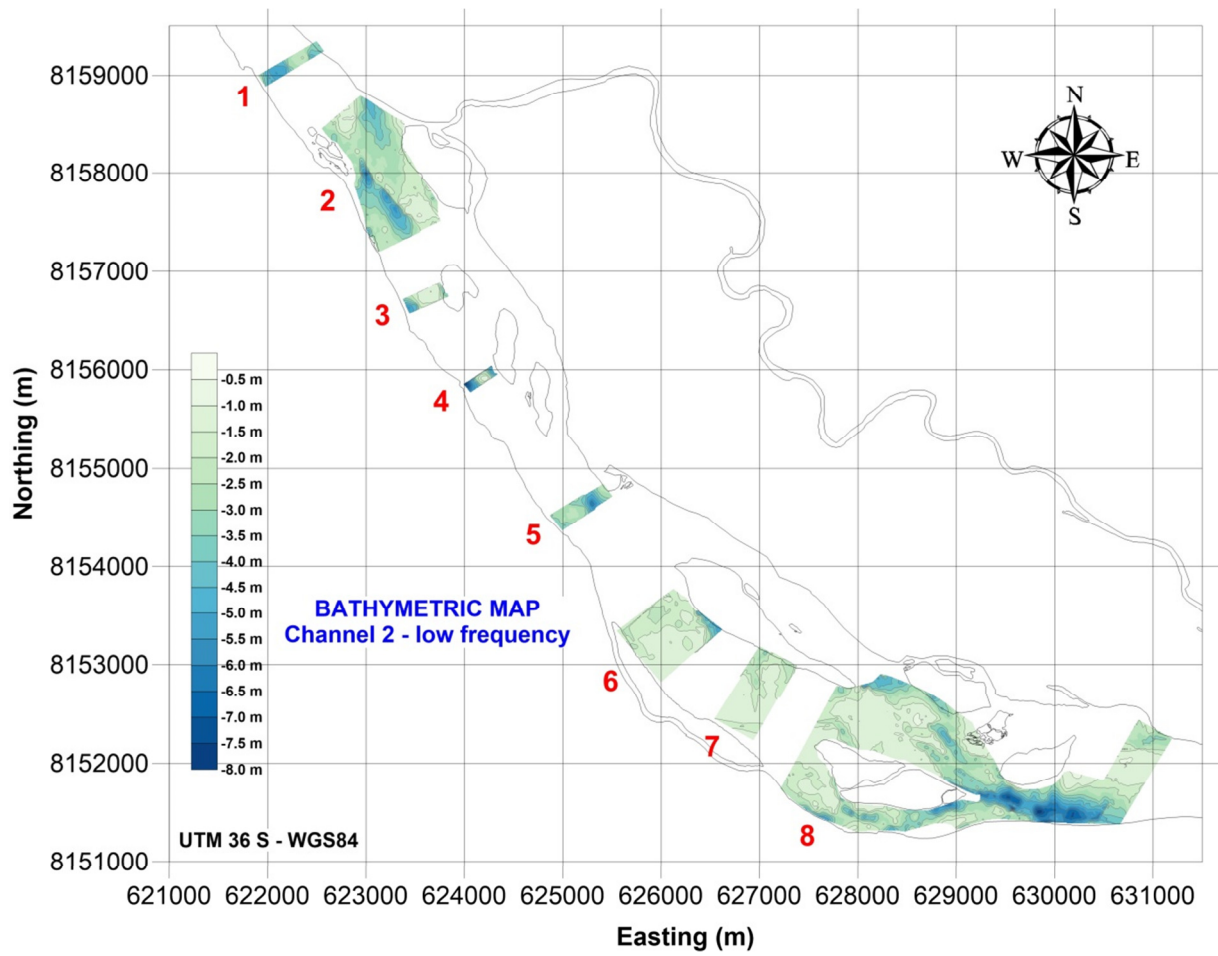


Fig. 19 – Carta batimetrica generale (canale 2, bassa frequenza).

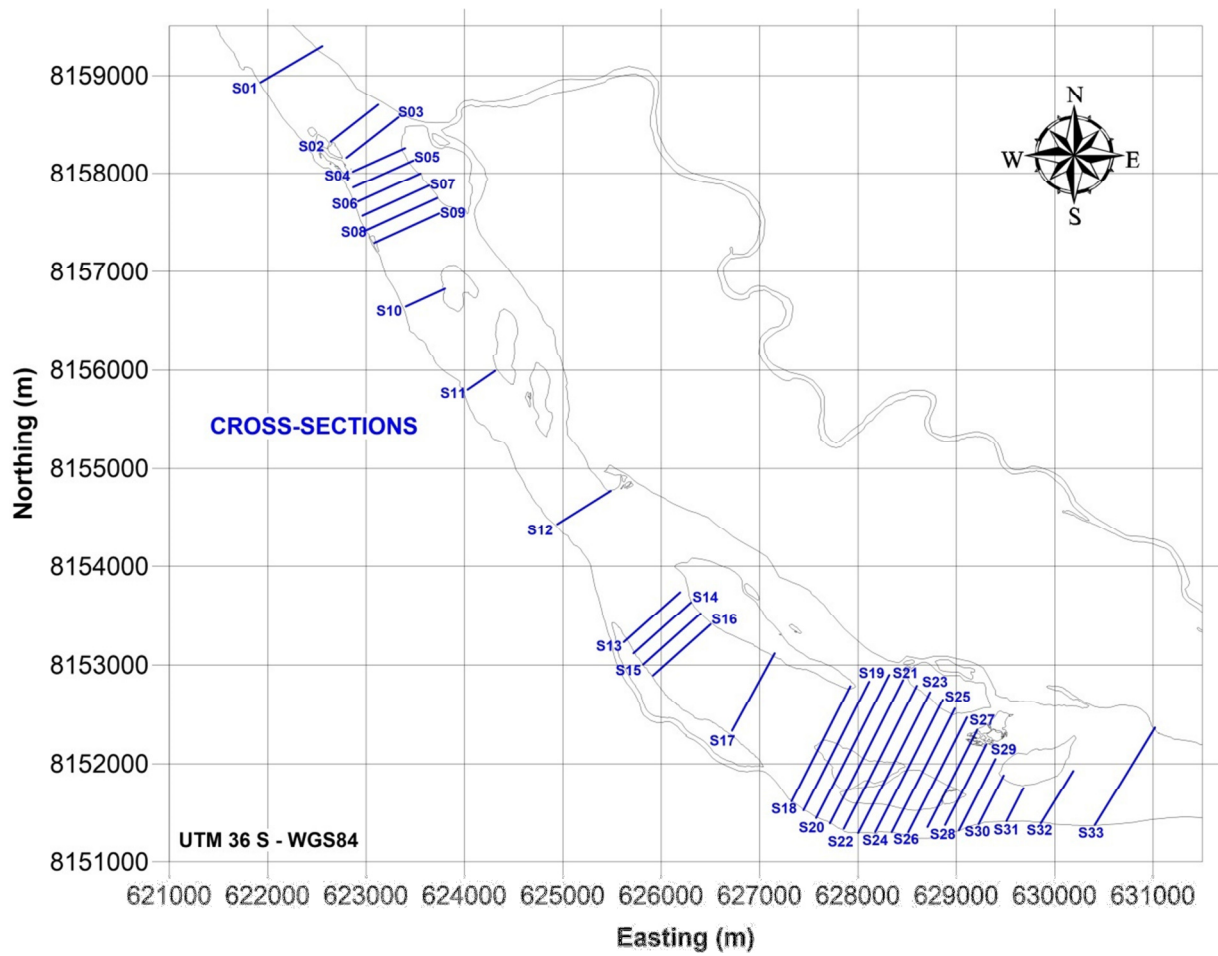


Fig. 20 – Tracce delle sezioni trasversali.

### 3.3 Discussione dei risultati

Il primo aspetto su cui si vuole richiamare l'attenzione è la marcata variabilità temporale della morfologia delle sponde e delle isole che caratterizza il tratto investigato, per effetto della dinamica dei sedimenti.

Tale variabilità è evidenziata in Fig. 21, in cui sono messi a confronto i dati desunti da immagini satellitari acquisite in date diverse, rispettivamente, il 24/09/2006 e il 27/08/2014 (fonte: *Google Earth*). Pur tenendo conto della risoluzione delle immagini e della natura qualitativa della procedura di digitalizzazione, si evidenzia una sostanziale stabilità della sponda in destra idrografica, mentre la sponda sinistra mostra cambiamenti più evidenti, con locali erosioni o depositi ed apertura o chiusura di canali secondari. Anche le isole mostrano cambiamenti evidenti di forma, dimensioni e posizione.

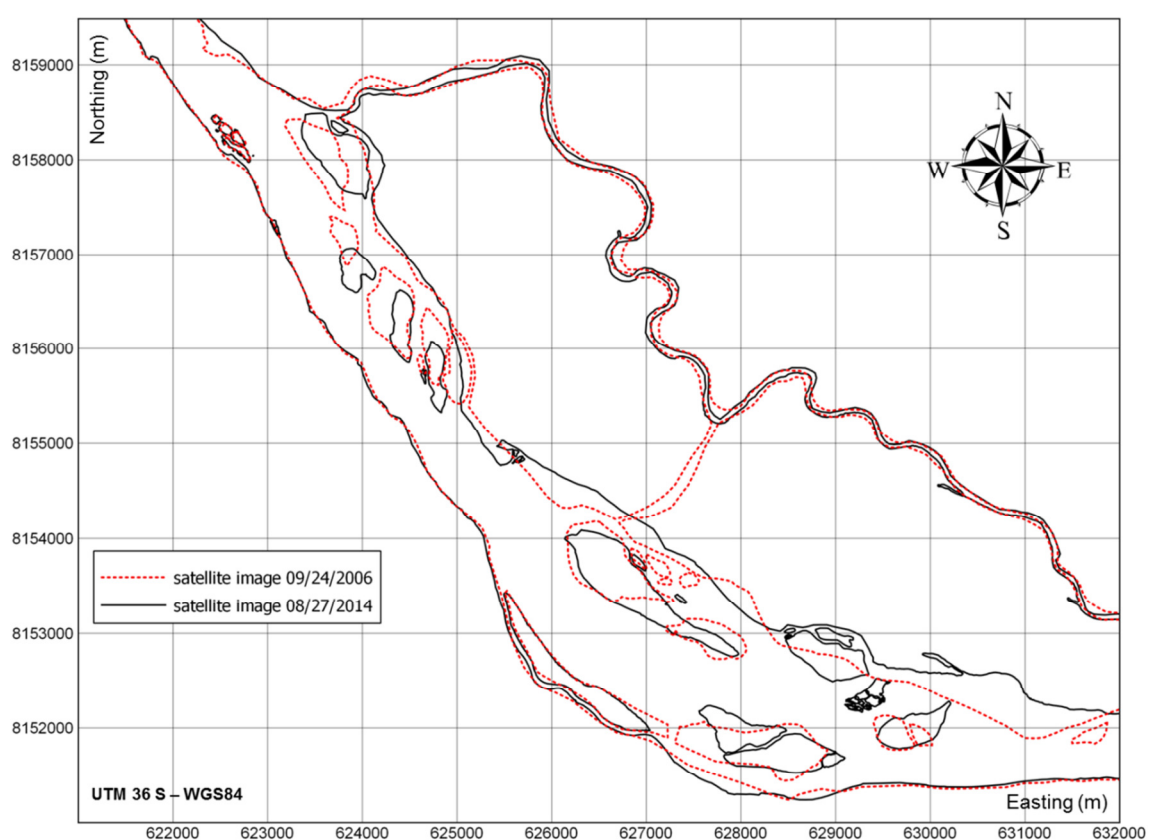


Fig. 21 – Confronto tra le linee di sponda ricavate da immagini satellitari acquisite in tempi diversi.

Nel corso dei rilievi effettuati è stata riscontrata una configurazione molto simile, anche se non del tutto coincidente, a quella dell'immagine satellitare più recente (2014), come mostrato nelle Fig. 22 e 23. È importante osservare, inoltre, che alcune aree, nonostante il limitato pescaggio dell'imbarcazione, sono risultate non navigabili per la presenza di banchi di sabbia soffolti, appena al di sotto del livello dell'acqua, frequentemente evidenziati dalla presenza di vegetazione affiorante.

Per quanto riguarda la batimetria, sono state misurate profondità massime di poco più di 8.0 m. Prevedibilmente, le aree a maggiore profondità sono localizzate prevalentemente nei punti in cui la sezione fluviale si restringe e la corrente è più intensa. Per quanto riguarda le

profondità più basse, si deve tenere conto che il limite di operatività dello strumento è di circa 1 m al di sotto del trasduttore.

Il confronto tra le misure ottenute dalle due frequenze operative dell'ecoscandaglio mostra che, salvo pochissime anomalie che interessano, comunque, zone di estensione trascurabile, il fondale rilevato a bassa frequenza è costantemente al di sotto di quello rilevato con la frequenza più elevata. La differenza di livello tra le due tracce è quasi ovunque compresa nel range 0.10-0.30 m.

Lo scostamento tra le due misure è dovuto, oltre alla diversa precisione, al fatto che il segnale ad alta frequenza (200 kHz) è maggiormente sensibile ai gradienti di densità e registra quindi la profondità corrispondente alla prima superficie di interfaccia in cui la densità supera un determinato valore limite. Al contrario, il segnale a bassa frequenza (24 kHz) ha una minore sensibilità ed è potenzialmente in grado di penetrare lo strato superficiale di sedimento di fondo, sia pure per uno spessore limitato (dell'ordine delle decine di cm) a causa dell'attenuazione del segnale acustico.

La batimetria del fondale mostra caratteristiche differenti da zona a zona, come si può osservare dai grafici riportati. In generale, le misure effettuate suggeriscono le seguenti considerazioni:

1. Nel tratto di fiume compreso tra le sezioni S01-S09 (Aree 1 e 2), che si estende per circa 2 km dal limite di monte dell'area di indagine, il fondale presenta un andamento caratterizzato dalla presenza di canali e barre sommerse. Le barre presentano una estensione variabile, con un massimo di 250 m in pianta e 2.50 m in altezza rispetto al punto più depresso della sezione. In particolare, nelle sezioni da S04 a S09 si osserva chiaramente la presenza un canale centrale il cui fondo presenta una dislivello rispetto al resto della sezione mediamente variabile tra 1.50 e 3.00 m.
2. Le sezioni S10 ed S11 presentano uno sviluppo lineare limitato, a causa della presenza, in sinistra idrografica, di isole che limitano l'area investigabile. Entrambi i profili sono caratterizzati da un'ampia barra centrale, di altezza circa 4.00 m rispetto al punto più depresso della sezione, e lunghezza in pianta compresa tra 200 e 300 m. La sezione S12, presenta un andamento inverso, con un canale il cui fondo si trova 3.50 m al di sotto del resto della sezione.
3. Nell'area compresa tra le sezioni S13-S16 (Area 6) l'alveo presenta profondità limitate e generalmente poco variabili, con valori massimi di circa 2.50 m. Nelle sezioni S15 ed S16, in particolare, si nota una brusca riduzione di profondità in prossimità della sponda dell'isola che rappresenta il limite in sinistra idrografica dell'area investigabile.
4. La sezione isolata S17, presenta una profondità quasi ovunque al di sotto dei 2.00 m, con uno stretto canale centrale in cui la profondità raggiunge il valore massimo di circa 3.00 m.
5. Le sezioni S18-S29 (Area 8) sono caratterizzate dalla presenza di un'ampia isola centrale, i cui confini sono risultati molto prossimi a quelli rilevati dall'immagine satellitare più recente tra quelle disponibili. In diverse sezioni le maggiori profondità (fino a valori massimi di 5.00-6.00 m) sono state riscontrate in prossimità delle sponde dell'isola. In generale, nell'area idrografabile da entrambi i lati dell'isola si nota l'alternarsi di barre e canali, anche multipli, con dislivelli massimi tra il punto più depresso e quello più superficiale della sezione che raggiungono valori massimi compresi tra 3.50 e 4.00 m.
6. A valle dell'isola, le sezioni S30 e S31 sono caratterizzate da un canale centrale che,

nel caso della sezione S31, raggiunge una profondità prossima a 8.00 m, che rappresenta il valore massimo rilevato nel corso della presente indagine. Infine, le sezioni S32 e S33 sono caratterizzate da un ampio canale in prossimità della sponda destra, con valori di profondità che diminuiscono procedendo verso la sponda sinistra fino al limite minimo operativo dello strumento.

## BIBLIOGRAFIA

1. ARA Zambeze (Administração Regional de Aguas do Zambeze), website: <http://www.arazambeze.gov.mz>.
2. Beilfuss, R., Brown, C., 2010. “Assessing Environmental Flow Requirements and Trade-offs for the Lower Zambezi River and Delta, Mozambique”, *International Journal of River Basin Management*, vol. 8, no. 2, pp. 127-138, Ed. Taylor & Francis.
3. Bolton, P., 1984. “Sediment Deposition in Major Reservoirs in the Zambezi Basin”, *Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium* (July 1984), IAHS Publications, no. 114, pp. 559-567.
4. Davies, B.R., Beilfuss, R.D., Thoms, M.C., 2000. “Cahora Bassa Retrospective, 1974-1997: Effects of Flow Regulation on the Lower Zambezi River”, *Limnology in the Developing World*, 27, pp. 1-9.
5. Davies, B.R., Jackson, P.B.N., 1986. “The Zambezi River System”, *The Ecology of River Systems, Monographiae Biologicae*, Vol. 60, pp 225-288, Ed. Springer.
6. Euroconsult Mott MacDonald, 2007. *Integrated Water Resources Management Strategy and Implementation Plan for the Zambezi River Basin. Final Report, Rapid Assessment*, SADC-WD/ZRA (Southern African Development Community-Water Division/Zambezi River Authority).
7. Euroconsult Mott MacDonald, 2008. *Integrated Water Resources Management Strategy and Implementation Plan for the Zambezi River Basin. Strategy Options Report*, SADC-WD/ZRA (Southern African Development Community-Water Division/Zambezi River Authority).
8. GRID-Arendal, UNEP (United Nations Environment Programme), website: <http://www.grida.no>.
9. HCB (Hidroeléctrica de Cahora Bassa), website: <http://www.hcb.co.mz>.
10. Hughes, R.H., Hughes, J.S., 1992. *A Directory of African Wetlands*, IUCN/UNEP/WCMC (World Conservation Union/United Nations Environment Programme/World Conservation Monitoring Centre), 820 pp.
11. McCartney, M., Cai, X., Smakhtin, V., 2013. *Evaluating the Flow Regulating Functions of Natural Ecosystems in the Zambezi River Basin*, Research Report 148, IWMI (International Water Management Institute), Colombo, Sri Lanka, 59 pp.
12. Moore, A.E., Cotterill, F.P.D., Main, M.P.L., Williams, H.B., 2007. “The Zambezi River”, in: *Large River: Geomorphology and Management*, pp. 311-332, Ed. John Wiley and Sons.
13. Nones, M., Guerrero, M., Ronco, P., 2014. “Opportunities from Low-resolution Modelling of River Morphology in Remote Parts of the World”, *Earth Surface Dynamycs*, vol. 2 (9), pp. 9-19, Ed. European Geosciences Union.
14. Nones, M., Ronco, P., Di Silvio, G., 2013. “Modelling the Impact of Large Impoundments on the Lower Zambezi River”, *International Journal of River Basin Management*, vol. 11, no. 2, pp. 221-236, Ed. Taylor & Francis.
15. Nugent, C., 1990. “The Zambezi River: Tectonism, Climatic Change and Drainage

- Evolution”, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 78, pp. 55-69, Ed. Elsevier.
16. Ronco, P., Fasolato, G., Di Silvio, G., 2006. “The Case of the Zambezi River in Mozambique: Some Investigations on Solid Transport Phenomena downstream Cahora Bassa Dam”, *River Flow 2006, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Lisbon, Portugal, pp. 1345-1354.
  17. Ronco, P., Fasolato, G., Nones, M., Di Silvio, G., 2010. “Morphological Effects of Damming on Lower Zambezi River”, *Geomorphology*, vol. 115, pp. 43-55, Ed. Elsevier.
  18. USACE (U.S. Army Corps of Engineers), 2002. *Engineering and Design. Hydrographic Surveying*, Eng. Man. 1110-2-1003.
  19. World Bank, 2010. *The Zambezi River Basin : A Multi-Sector Investment Opportunities Analysis - State of the Basin*. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2961>.
  20. Zambezi River Authority, website: <http://www.zaraho.org.zm>.

## APPENDICE A – DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



*Foto 1 – Il fiume Zambesi nel tratto subito a valle della città di Tete.*



*Foto 2 – Confluenza tra lo Zambesi e l'affluente Luenha/Mazoe.*



*Foto 3 – Restringimento della sezione fluviale in corrispondenza della gola di Lupata.*



*Foto 4 – Un'altra immagine del passaggio attraverso la gola di Lupata.*



*Foto 5 – Un'immagine della parte settentrionale dell'area di rilievo. Si osserva la presenza di sedimenti in sospensione e la sponda ricoperta di vegetazione.*



*Foto 6 – Sponda del fiume in prossimità della città di Tambara.*



*Foto 7 – Tipica morfologia dello Zambesi Inferiore, caratterizzata dalla presenza di isole e banchi sabbiosi sommersi o appena affioranti rispetto alla superficie idrica.*



*Foto 8 – Un particolare dell'area di rilievo poco a monte della città di Tambara. Si osserva la presenza di un canale secondario lungo la sponda.*



*Foto 9 – Lavori di realizzazione del palo di sostegno per il trasduttore dell'ecoscandaglio.*



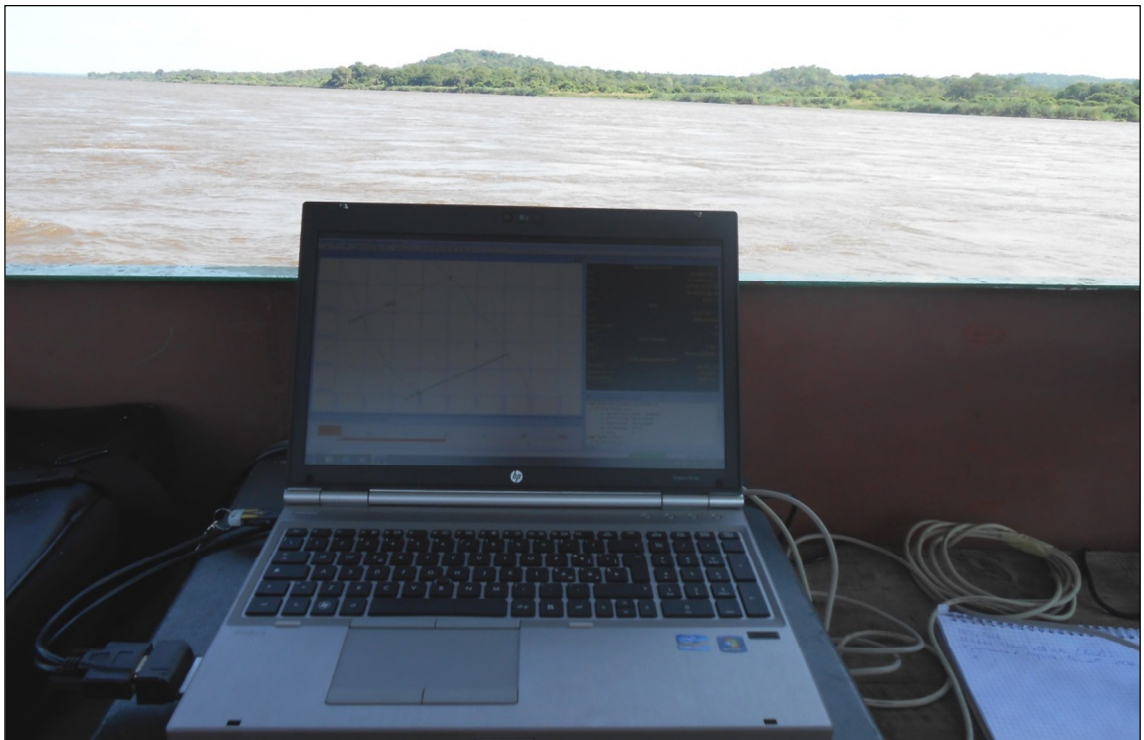
*Foto 10 – Particolare dell'elemento per il fissaggio del palo dell'ecoscandaglio lungo il fianco dell'imbarcazione, che può essere regolato per assicurarne la verticalità.*



*Foto 11 – Una fase dell'esecuzione delle misure batimetriche.*



*Foto 12 – Particolare del trasduttore e dell'unità di controllo dell'ecoscandaglio.*

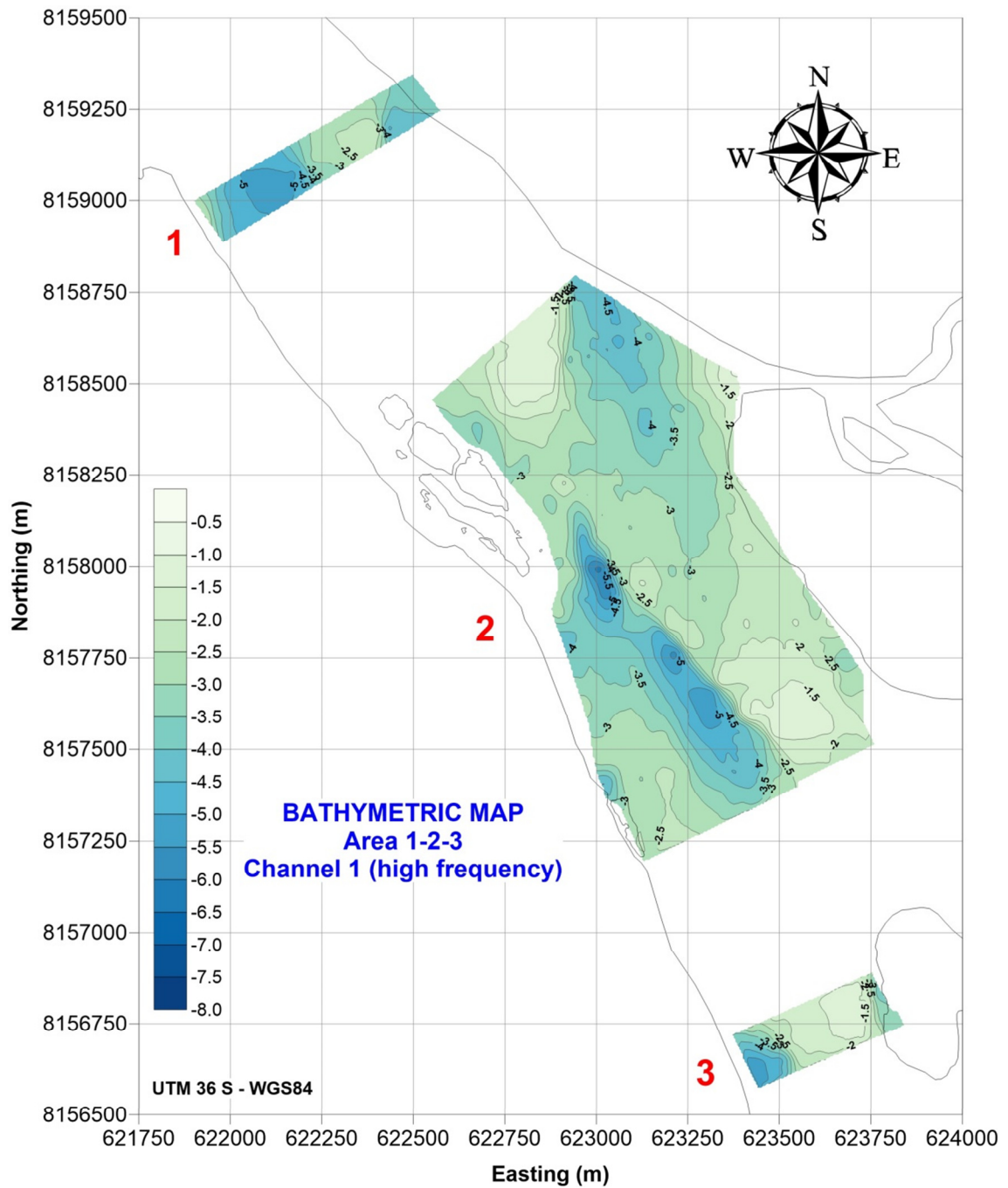


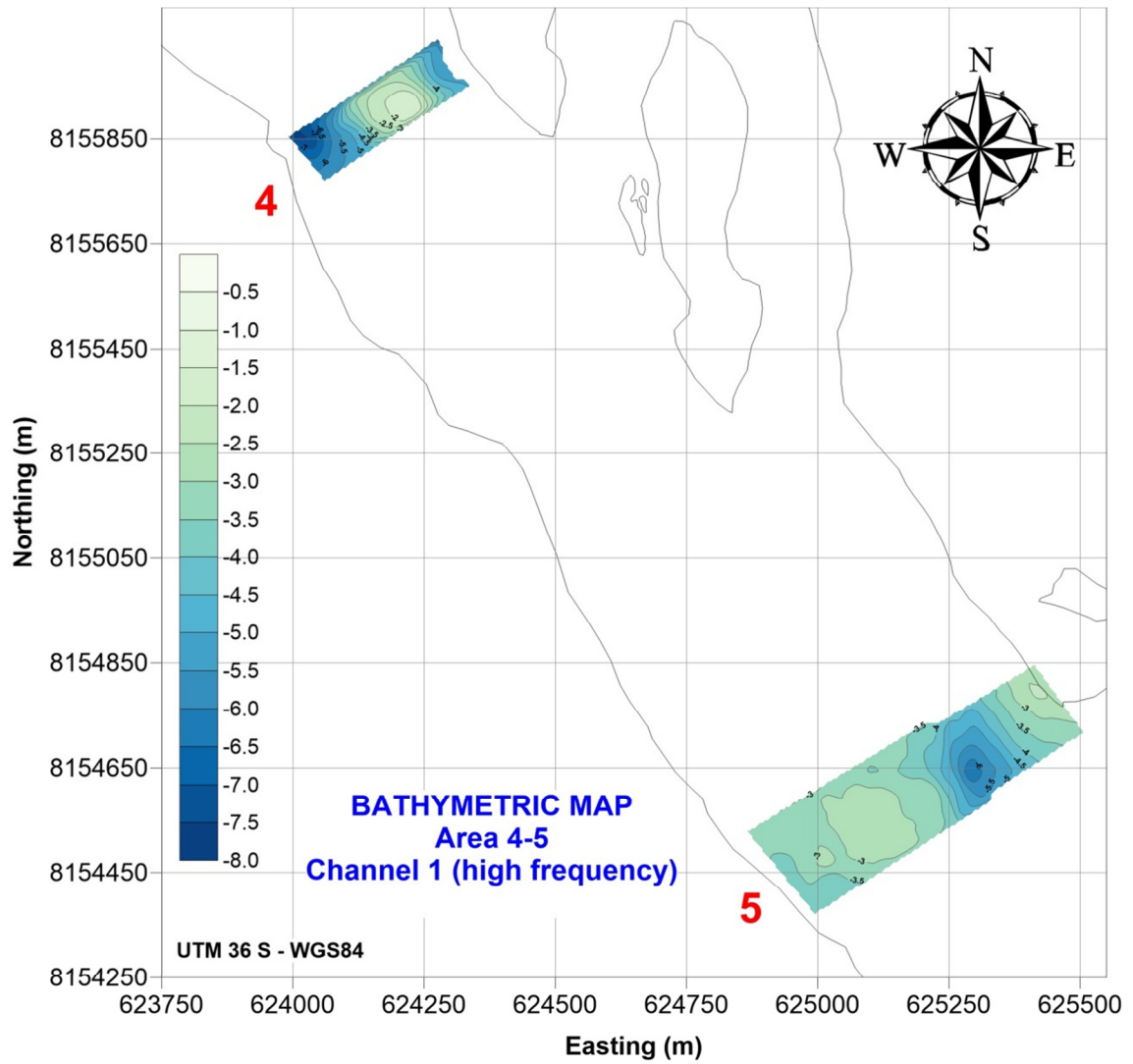
*Foto 13 – Particolare del computer utilizzato per la navigazione ed acquisizione integrata dei dati batimetrici. Le linee di misura e la posizione istantanea della barca vengono visualizzate sullo schermo per fornire assistenza e indicazioni al pilota.*

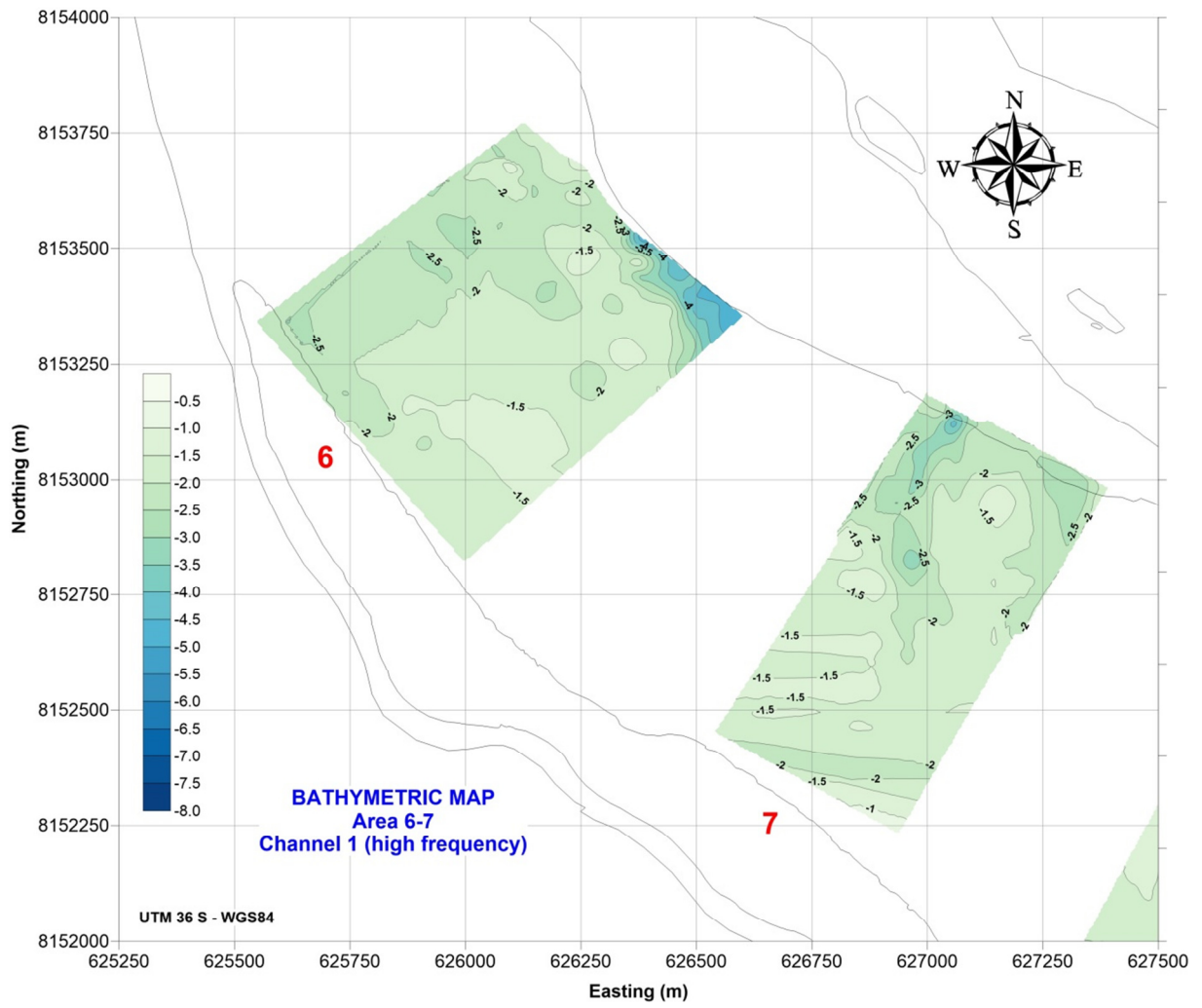


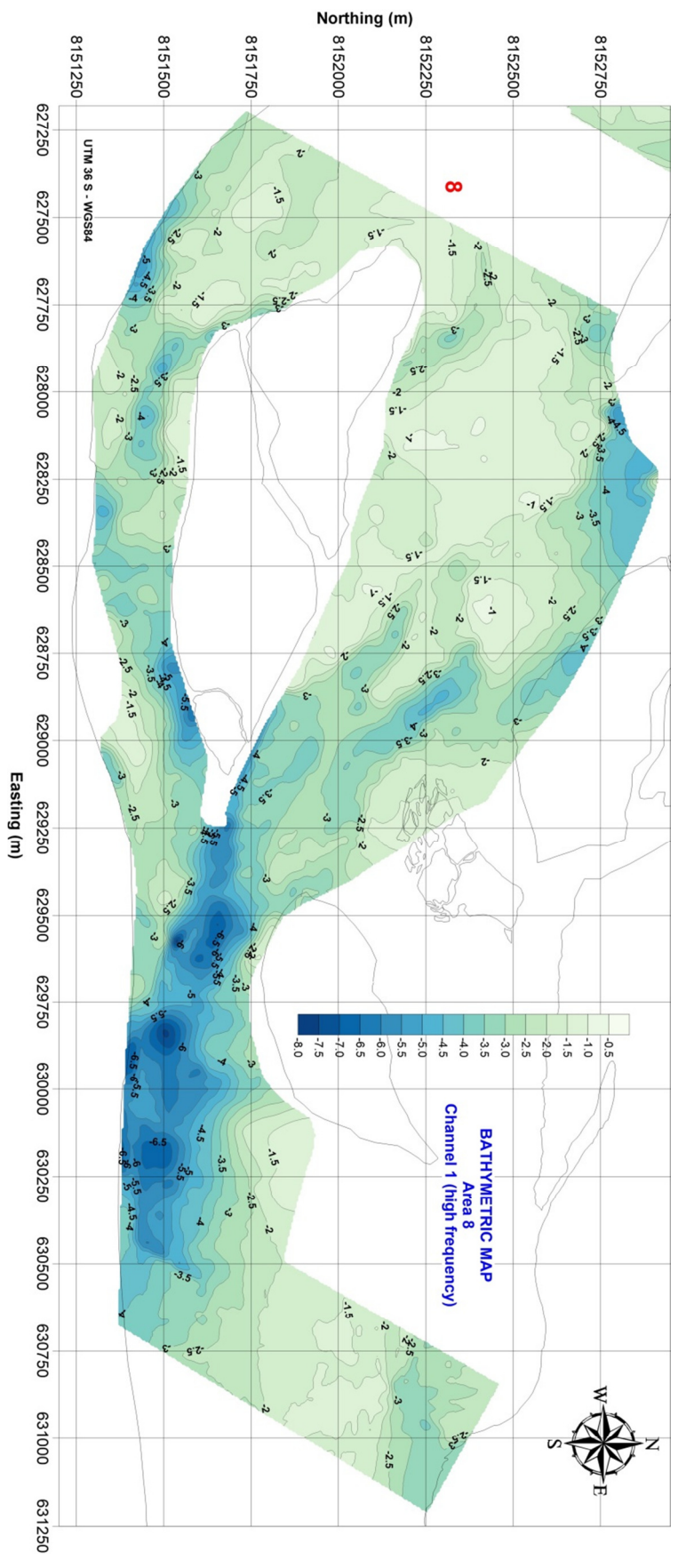
*Foto 14 – L'esecuzione delle misure, in qualche occasione, è stata condizionata dalla presenza di ippopotami nell'area di rilievo.*

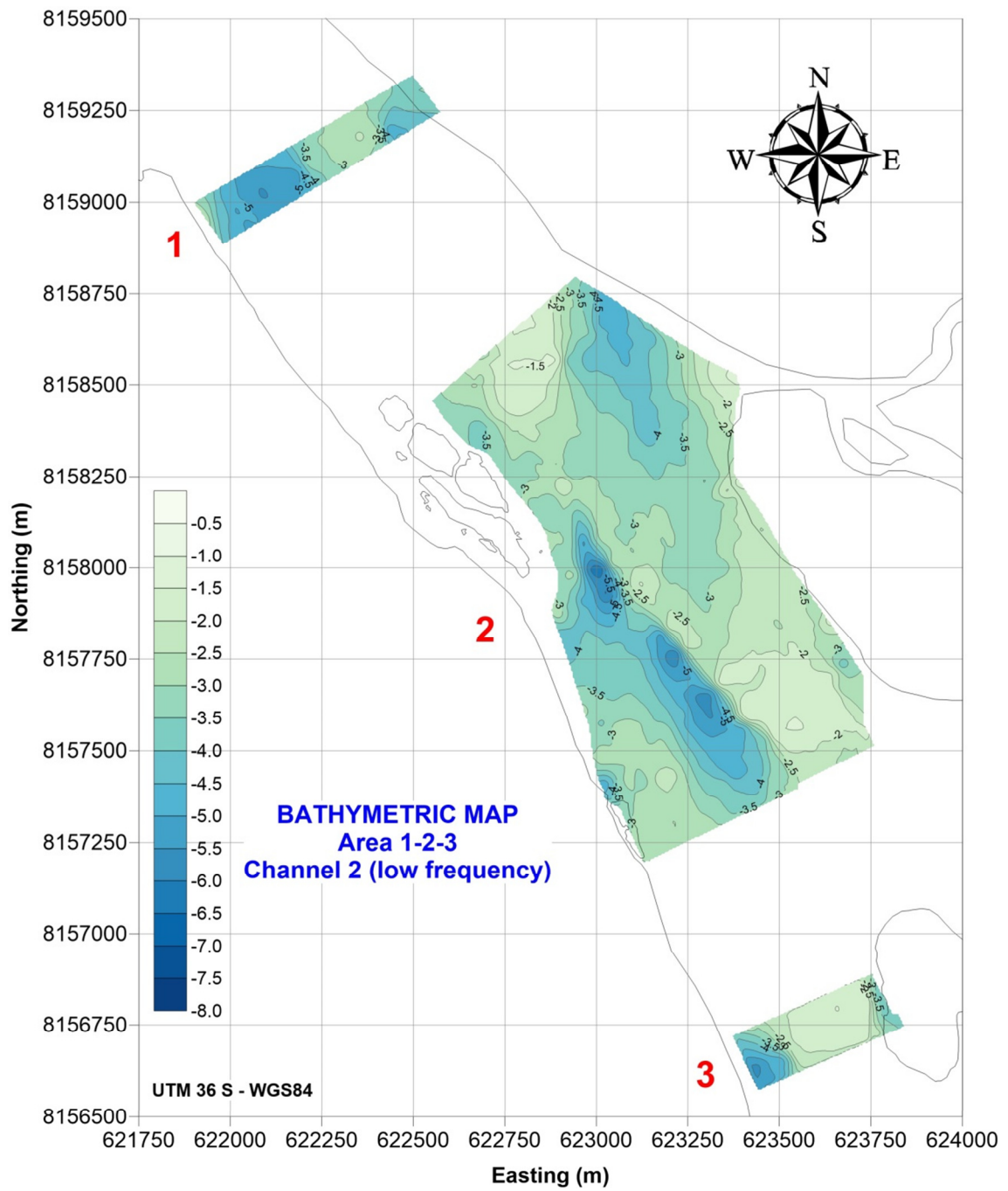
## APPENDICE B – CARTE BATIMETRICHE DI DETTAGLIO

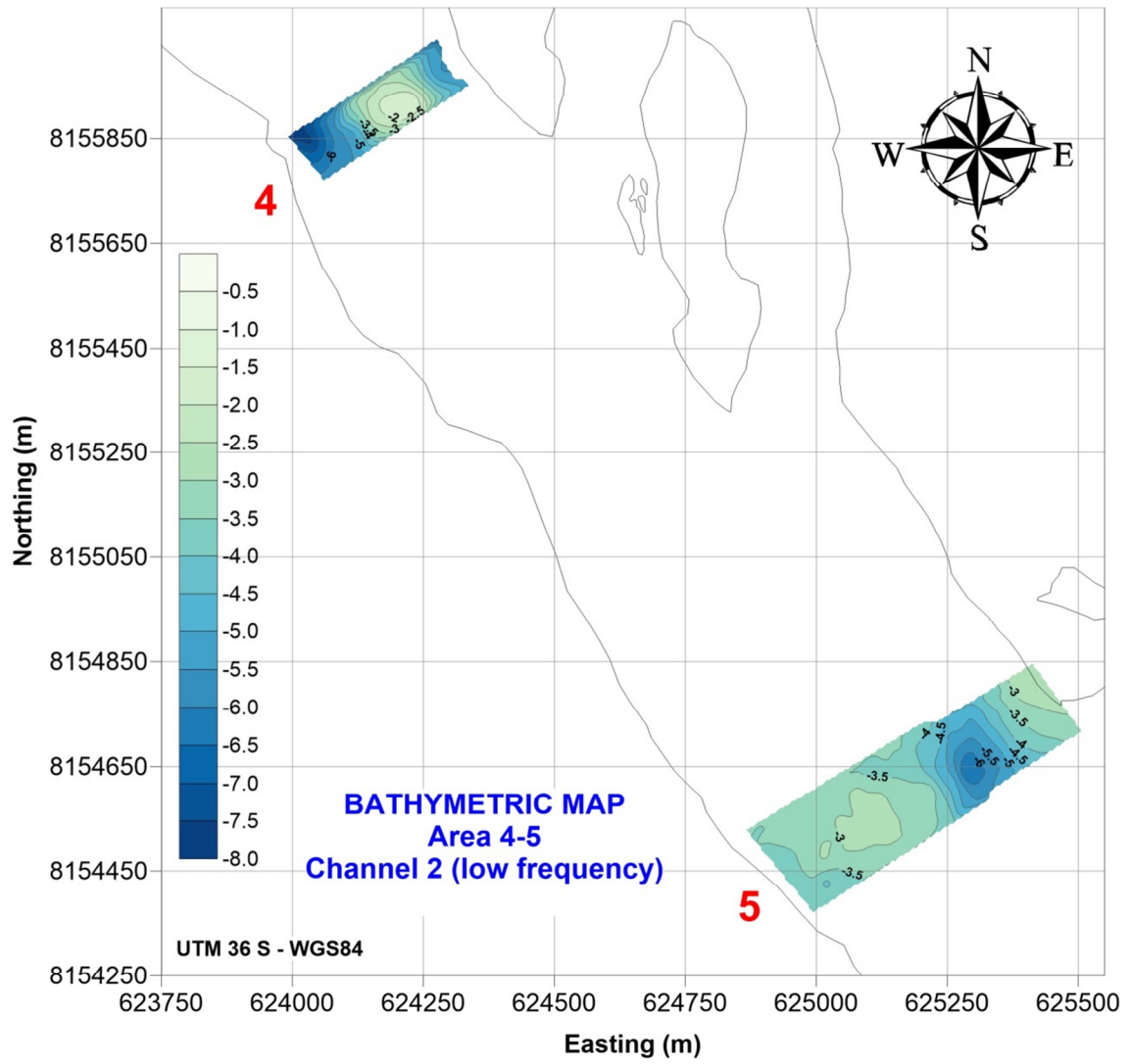


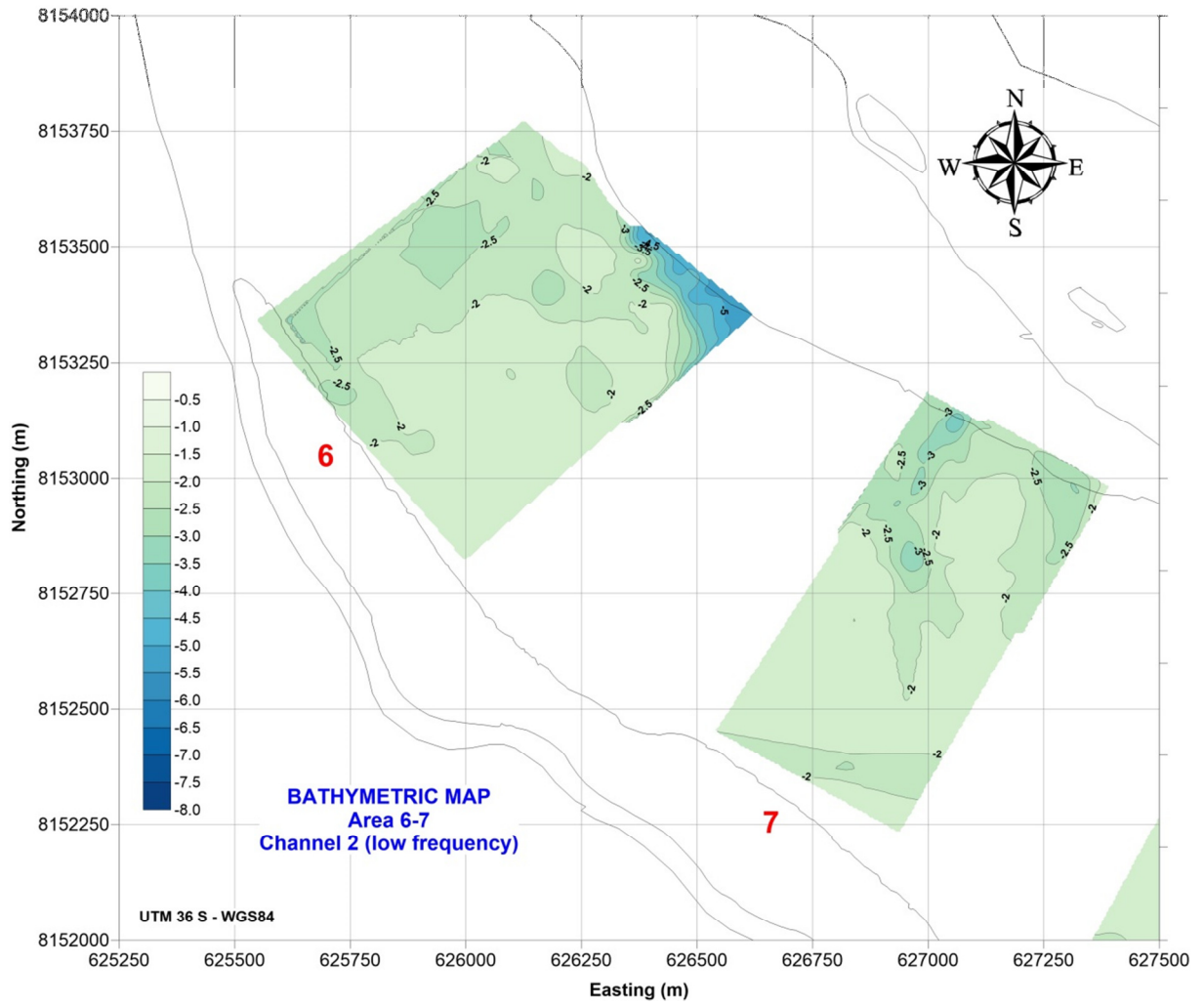


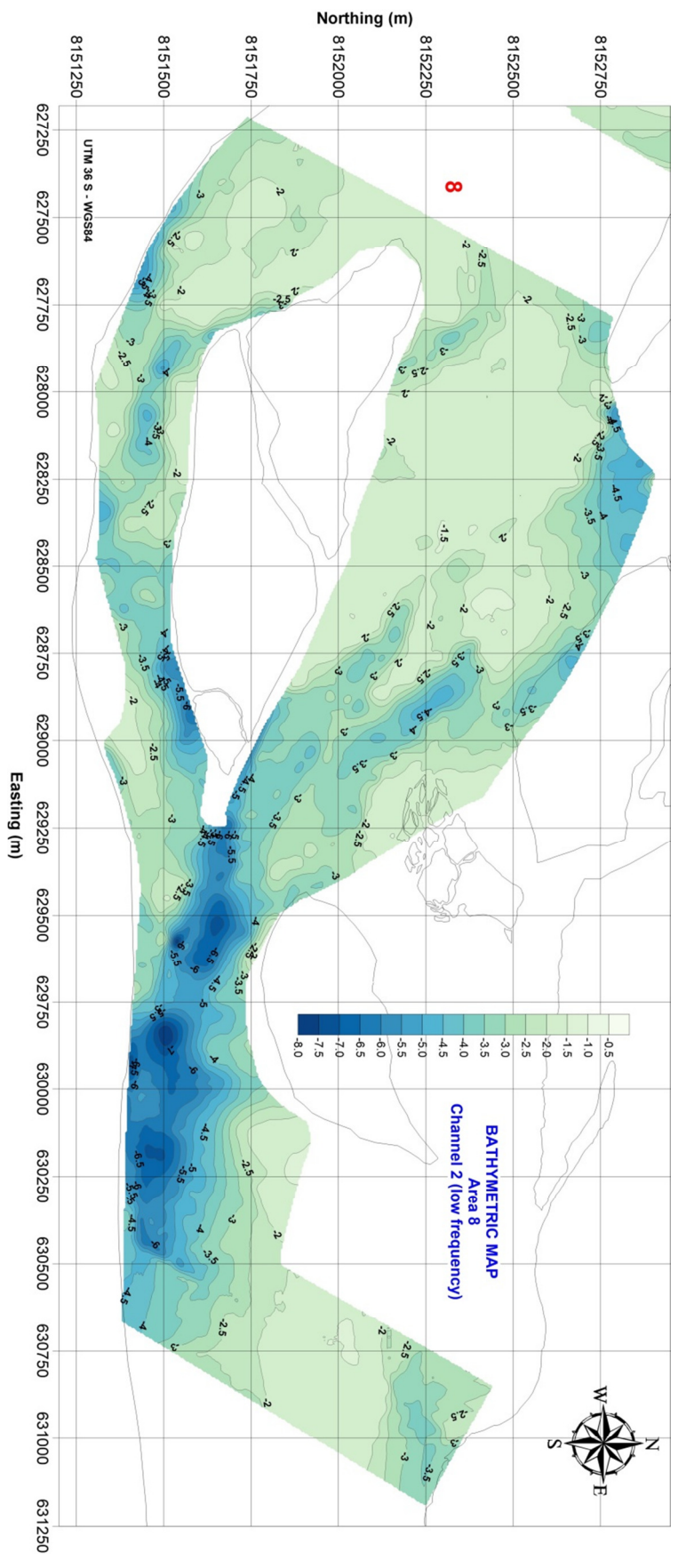




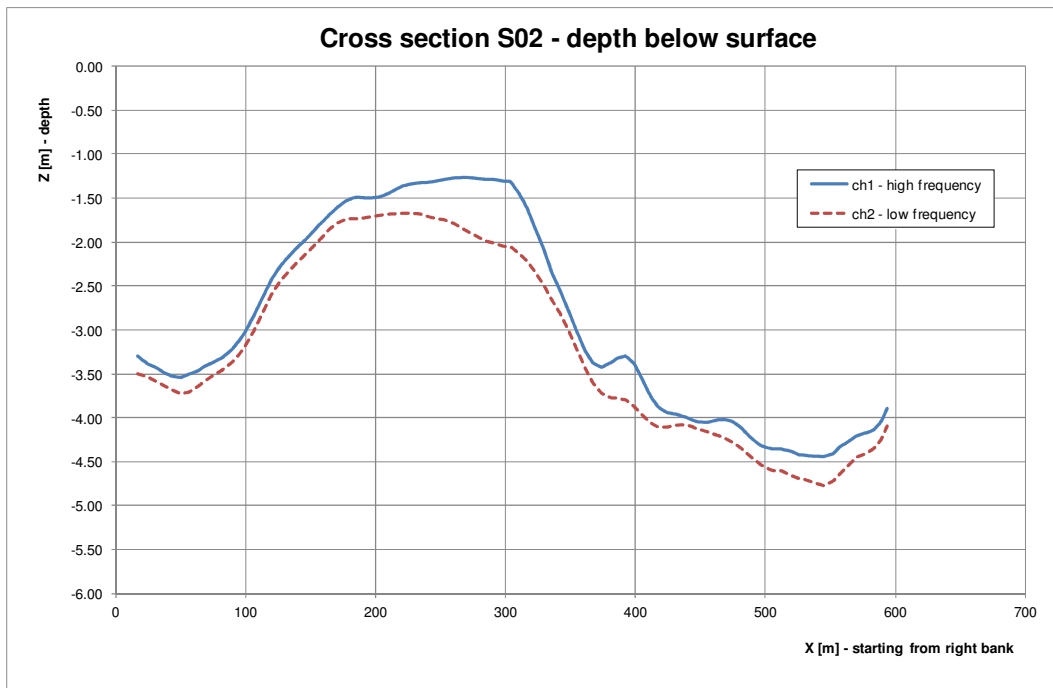
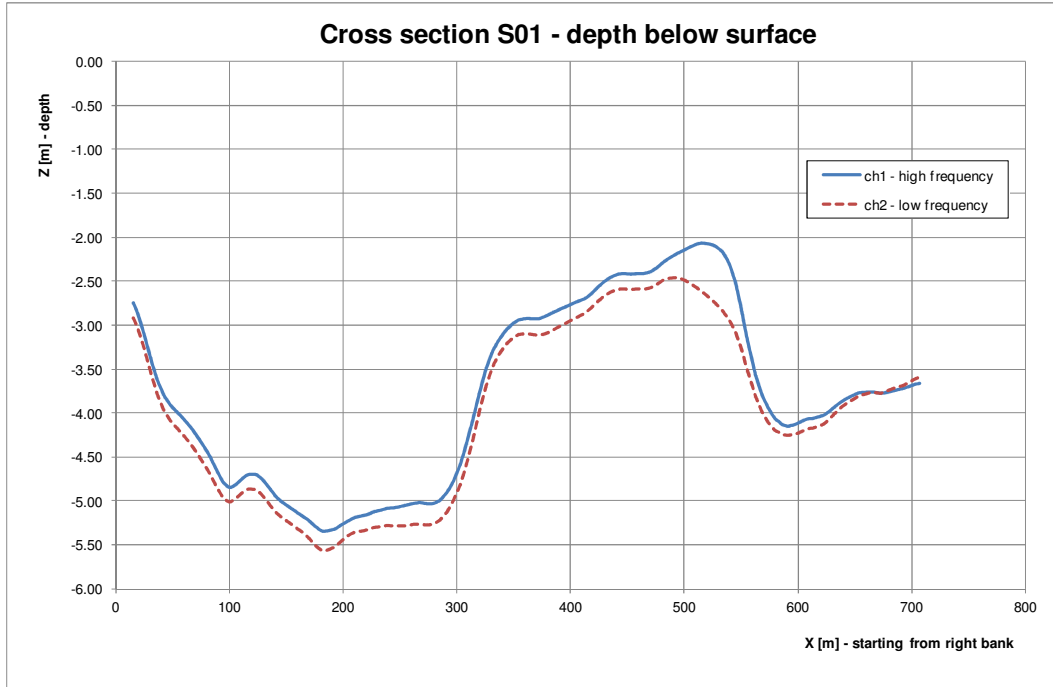


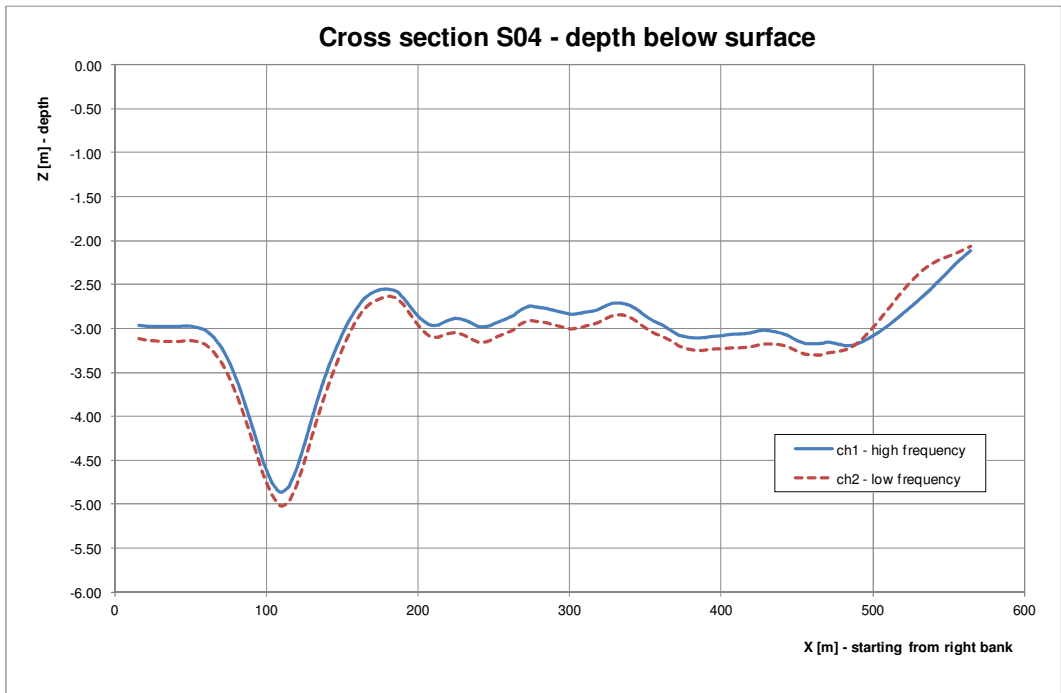
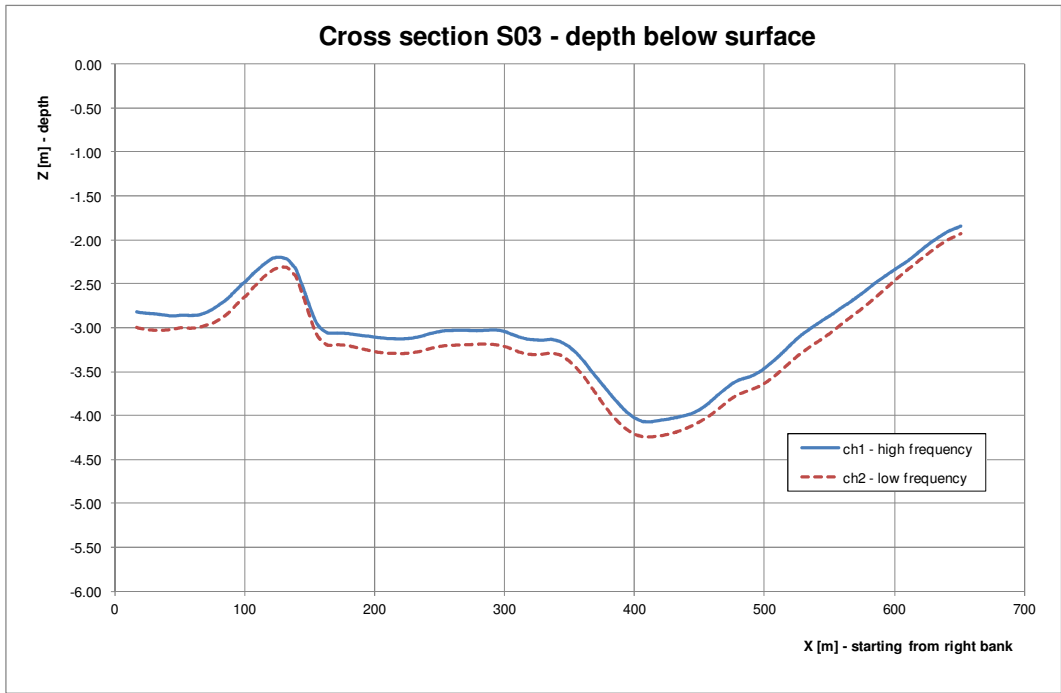


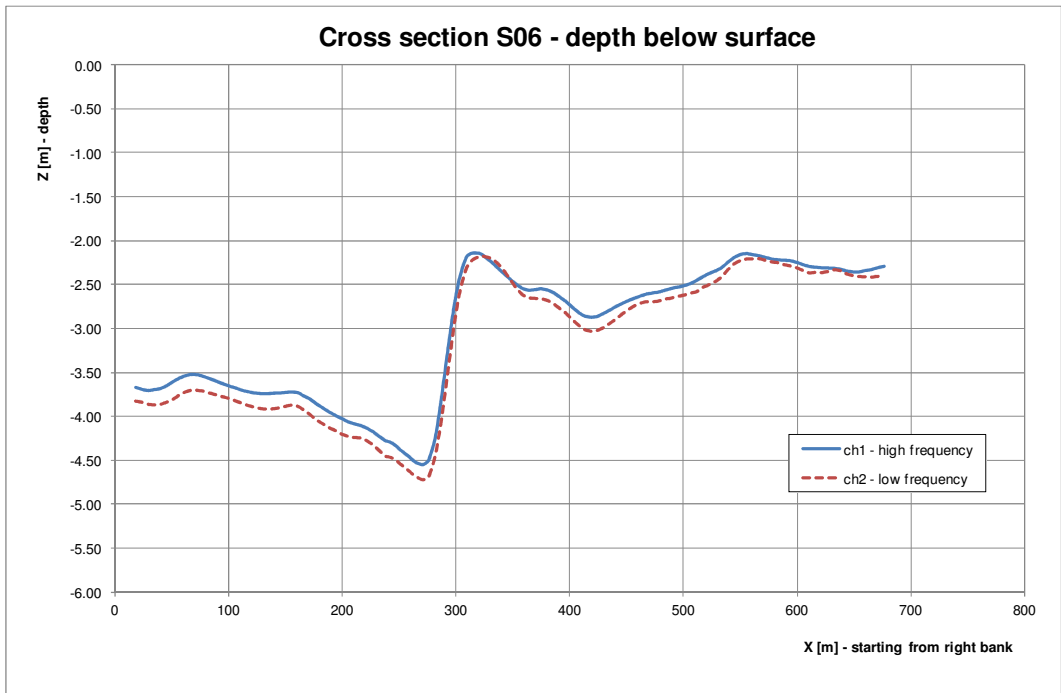
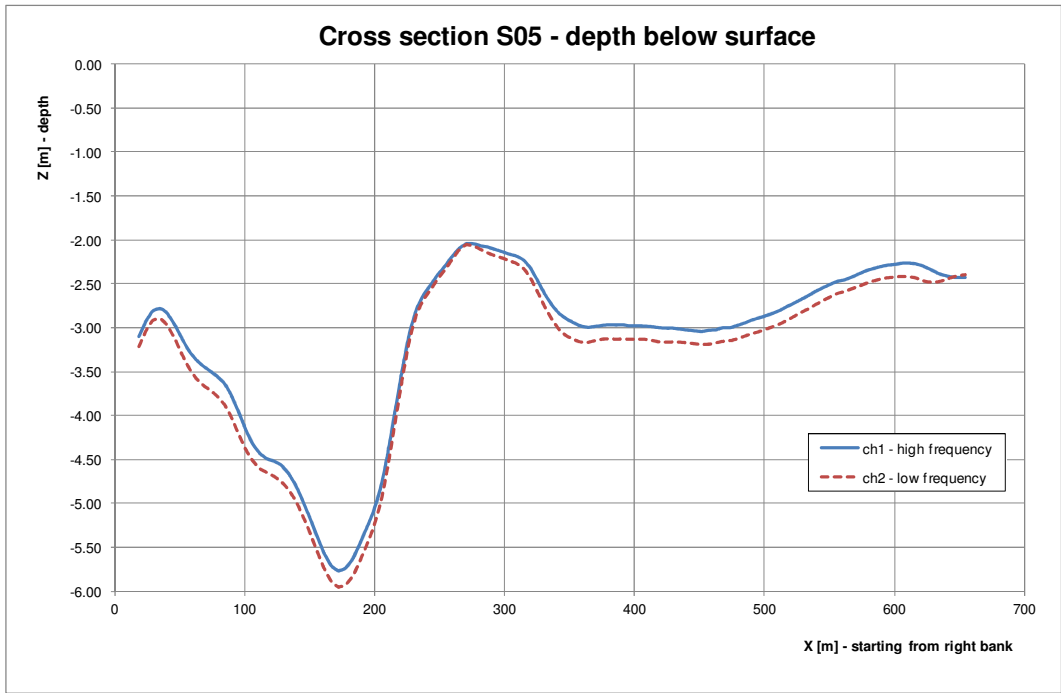


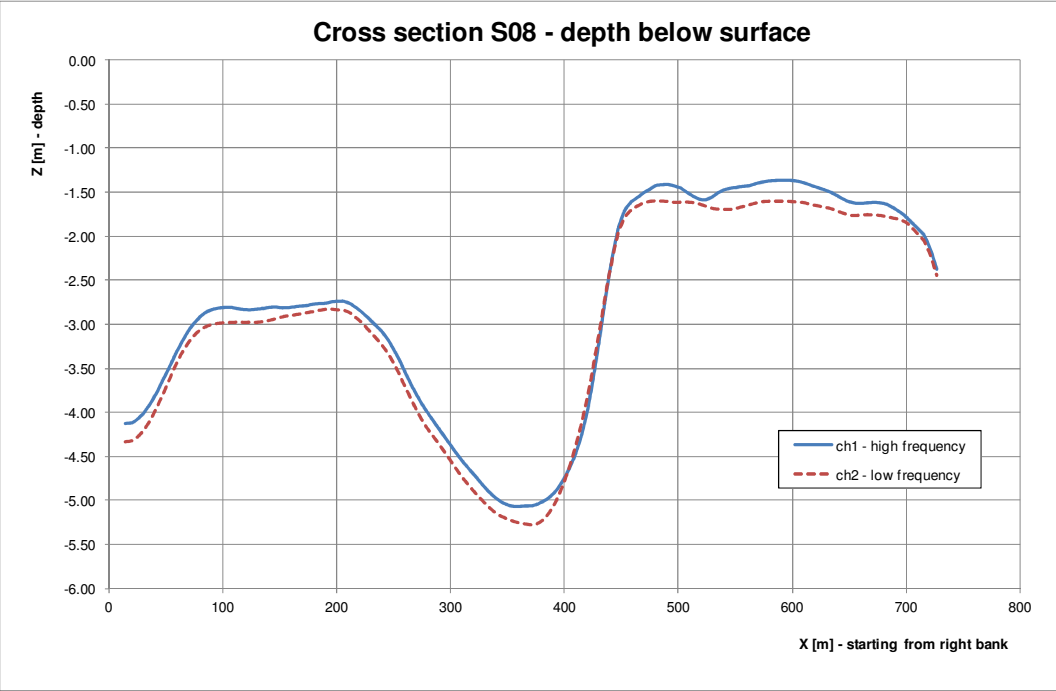
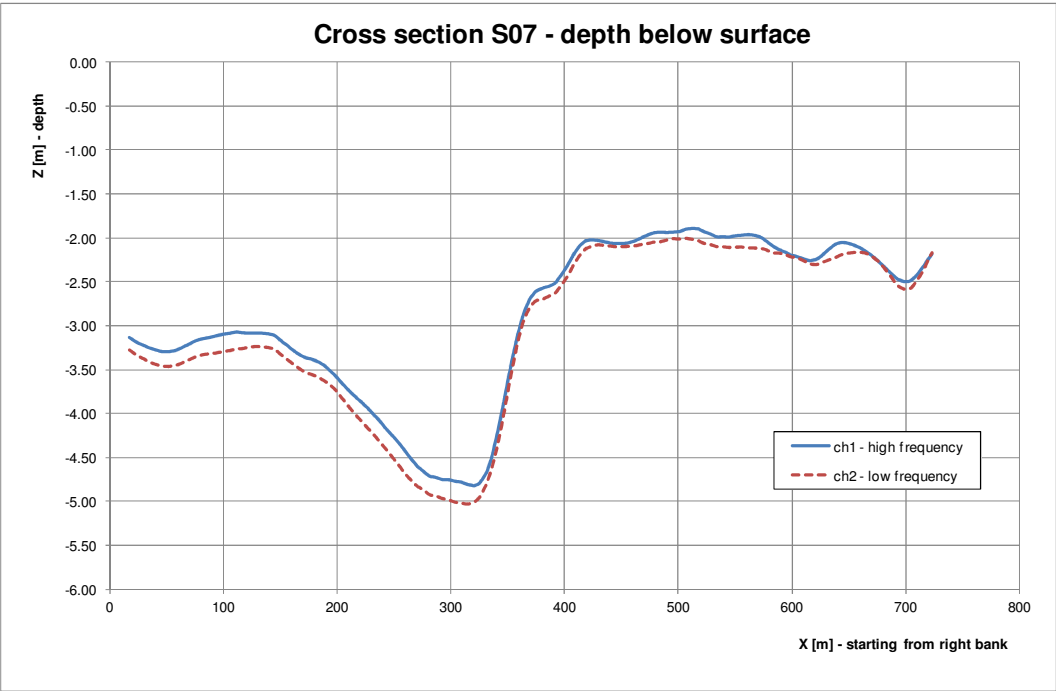


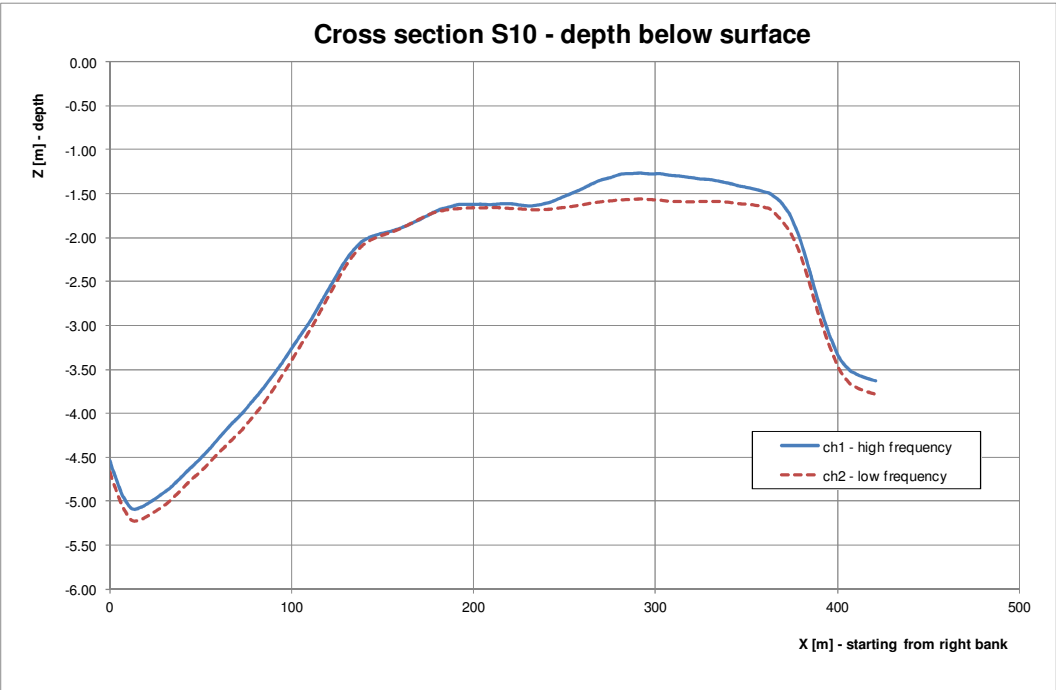
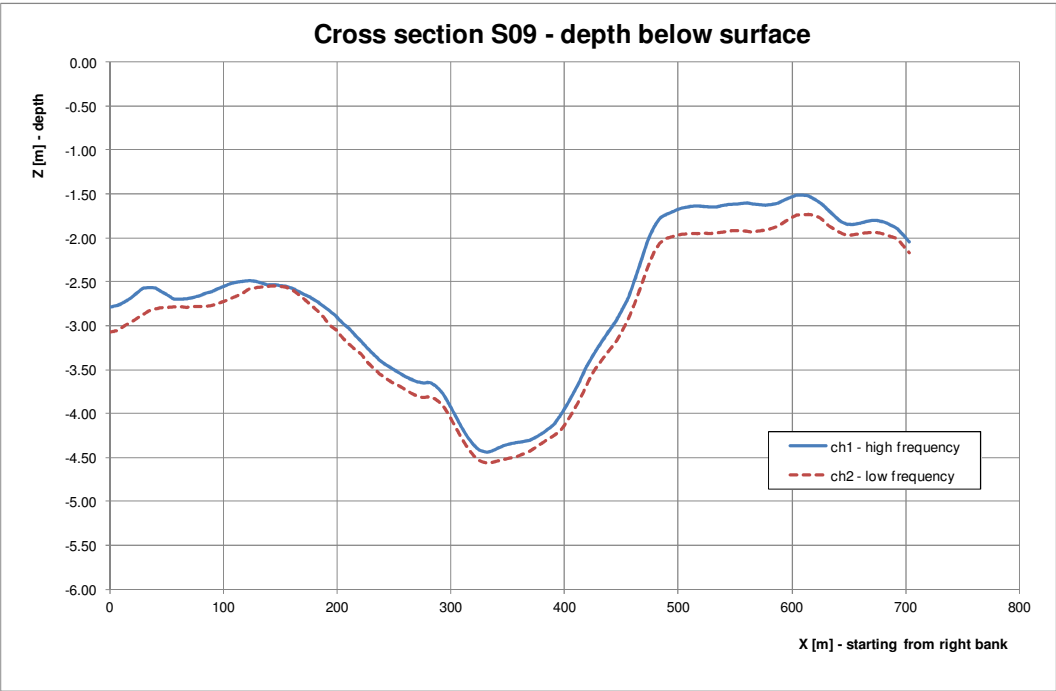
## APPENDICE C – SEZIONI TRASVERSALI

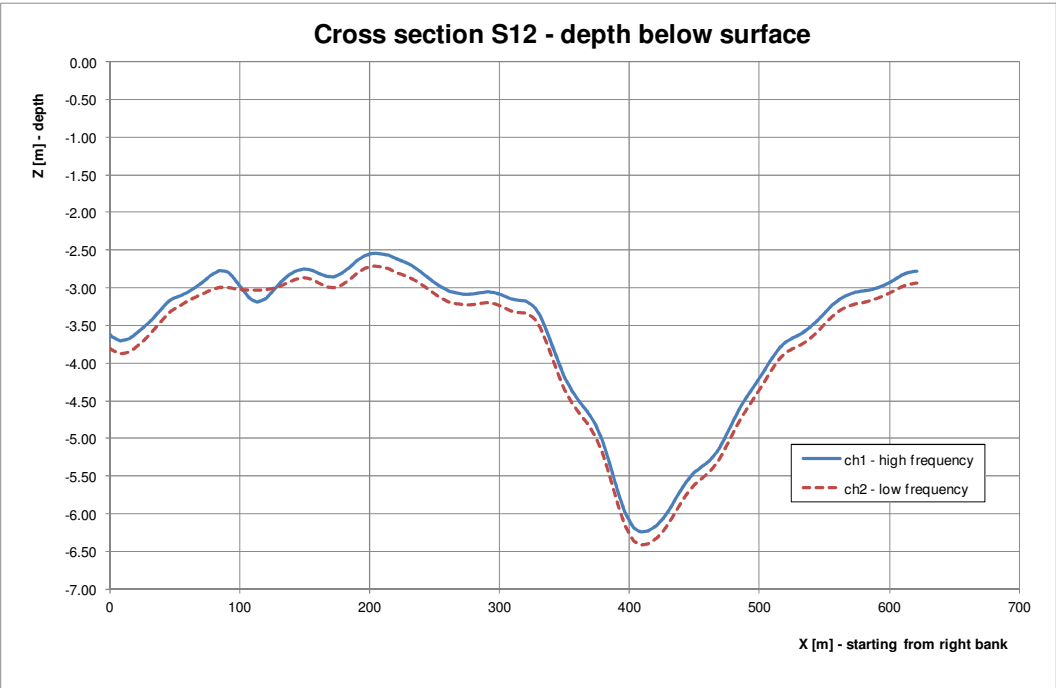
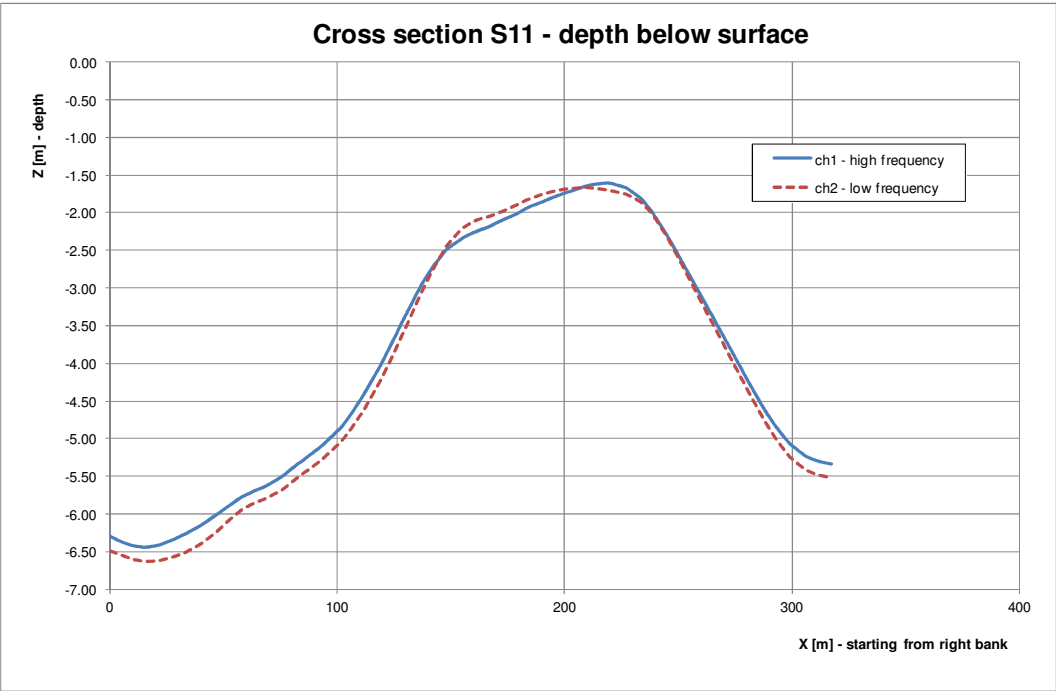


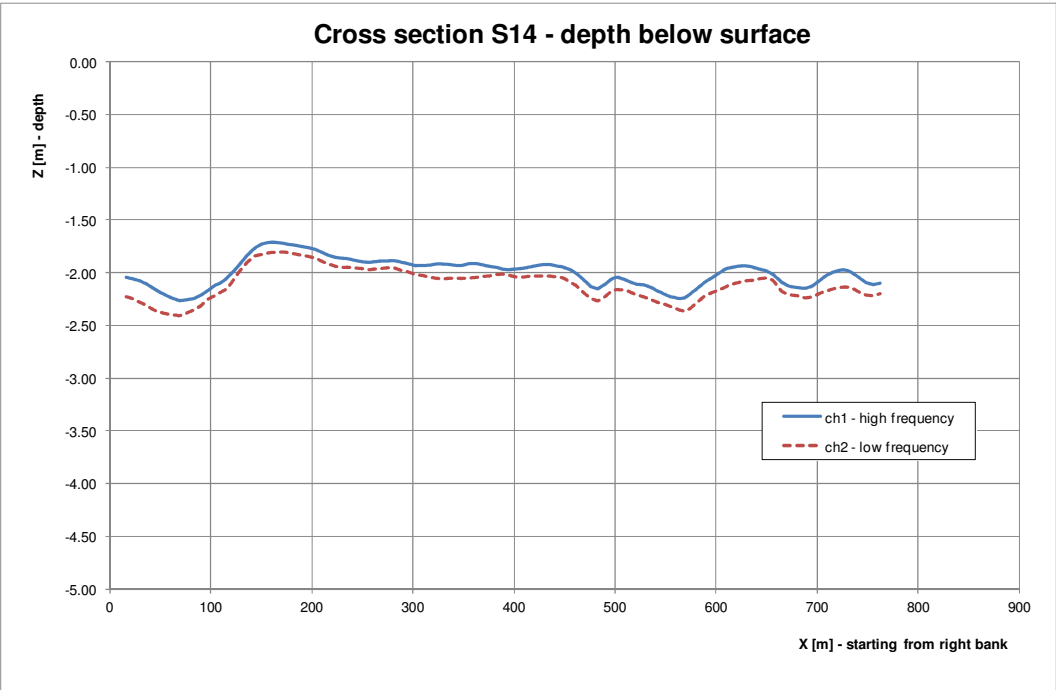
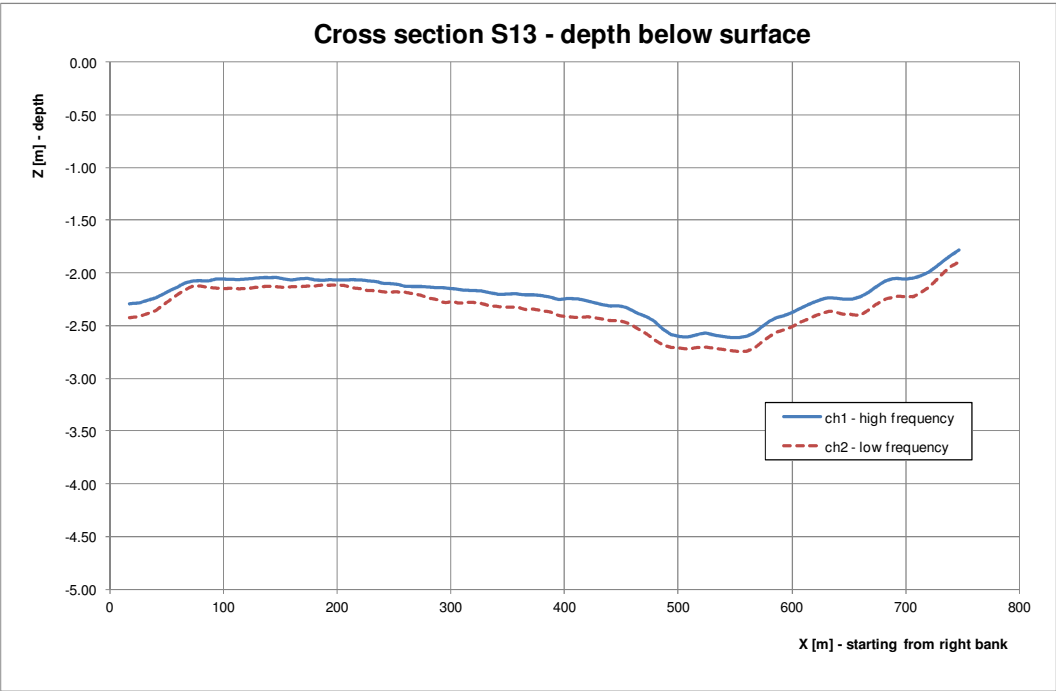


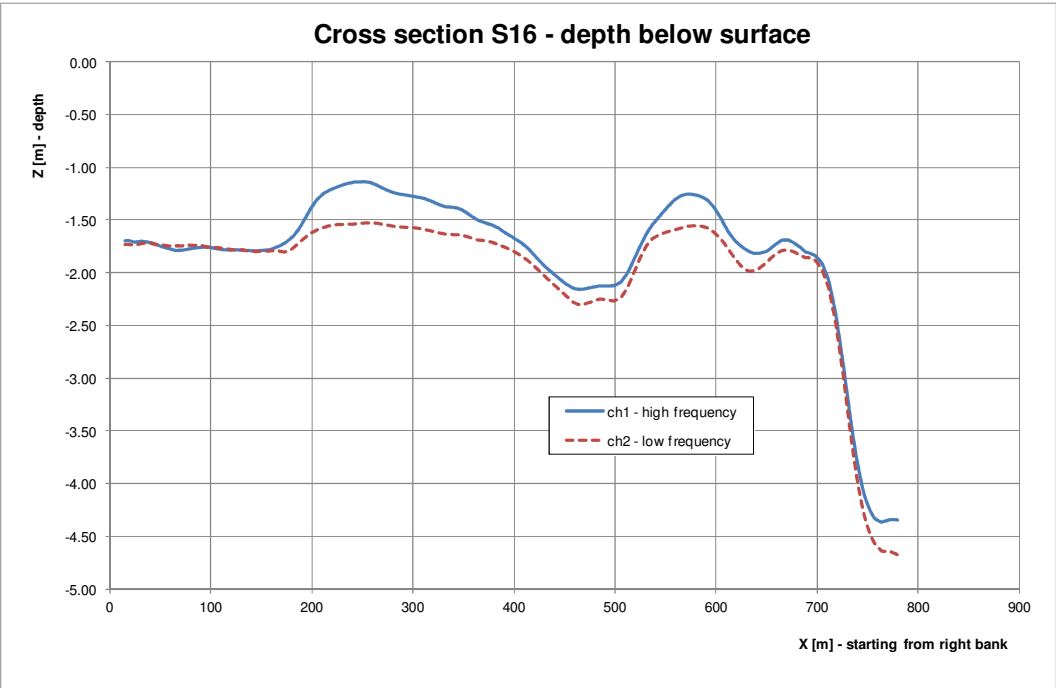
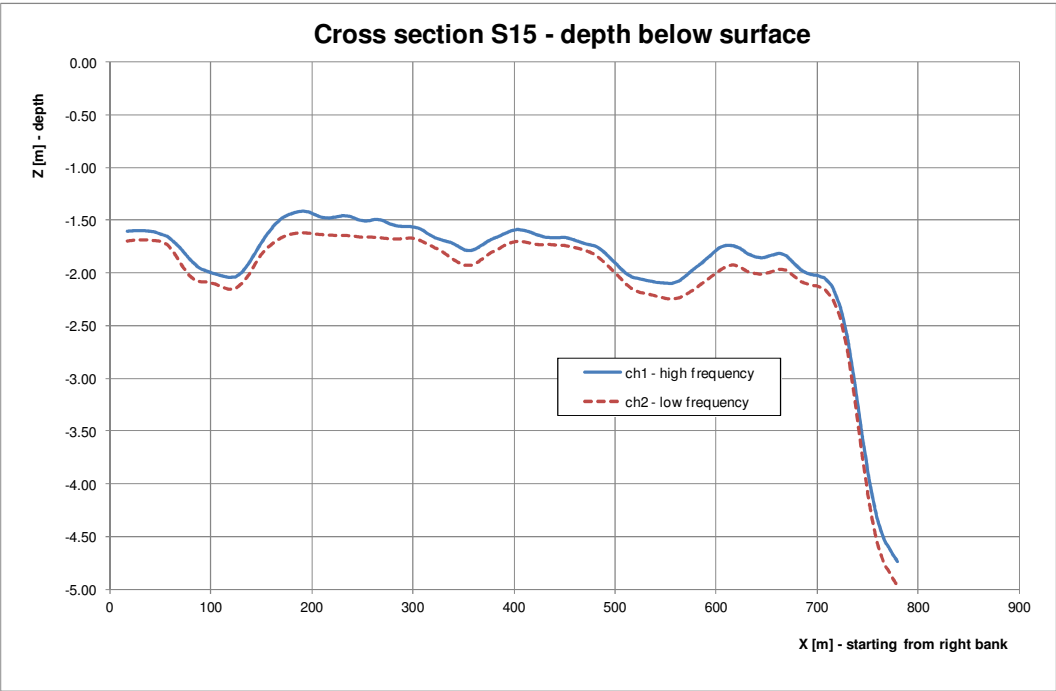


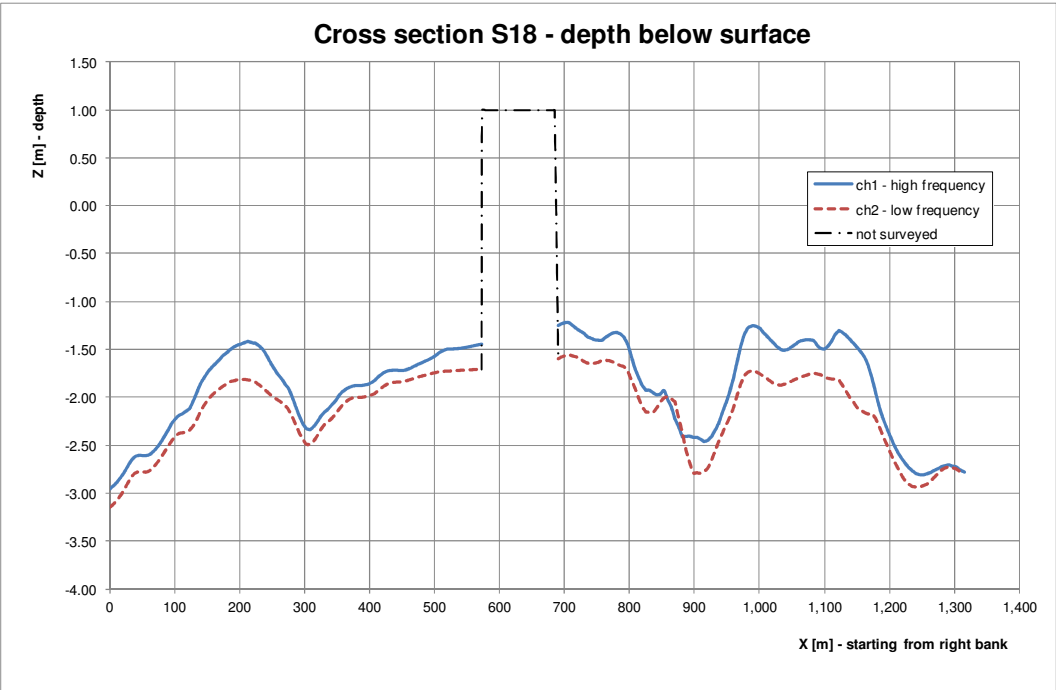
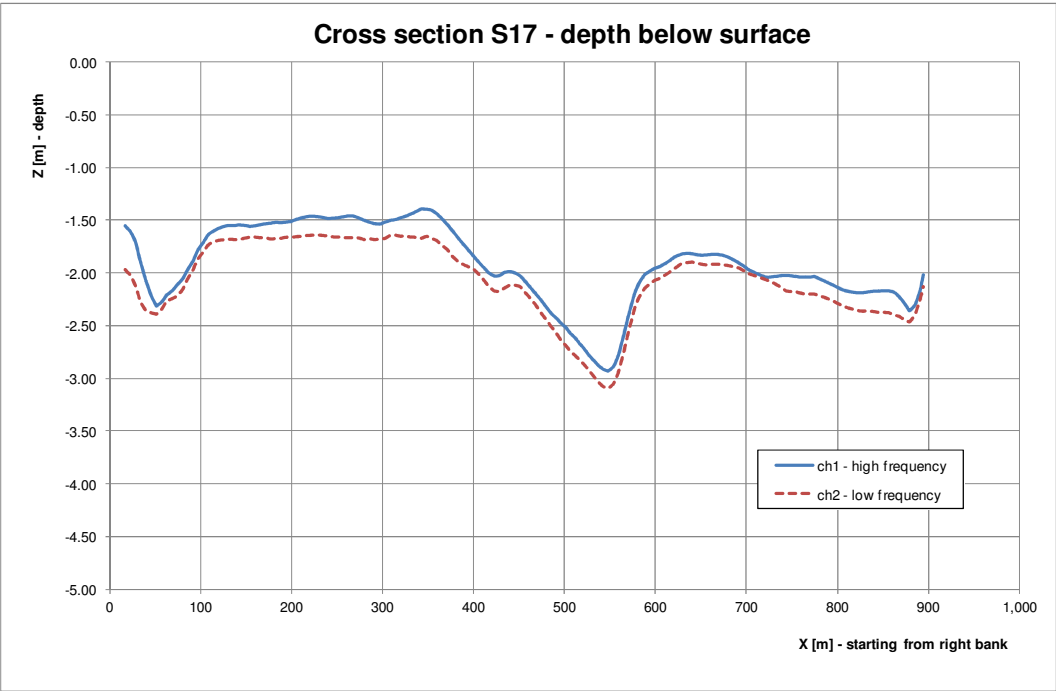


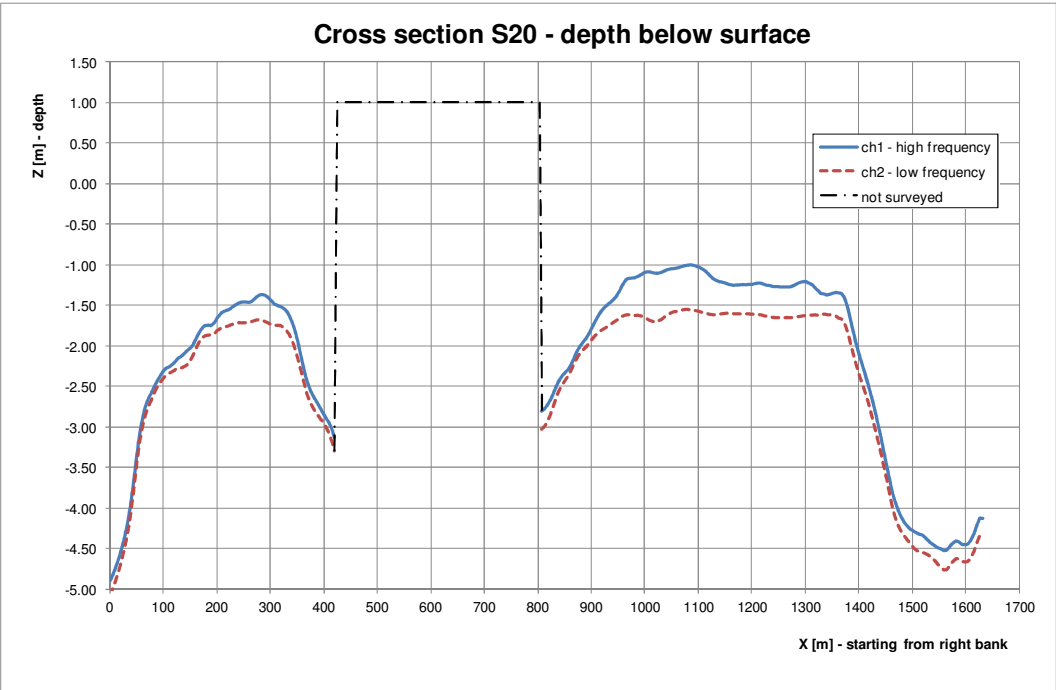
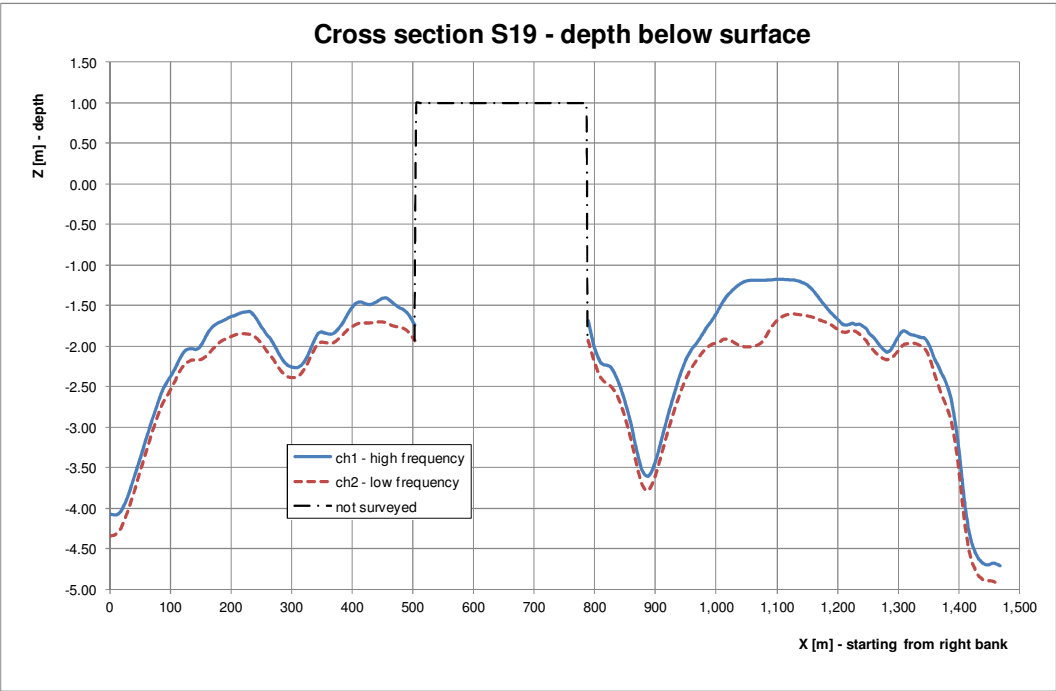


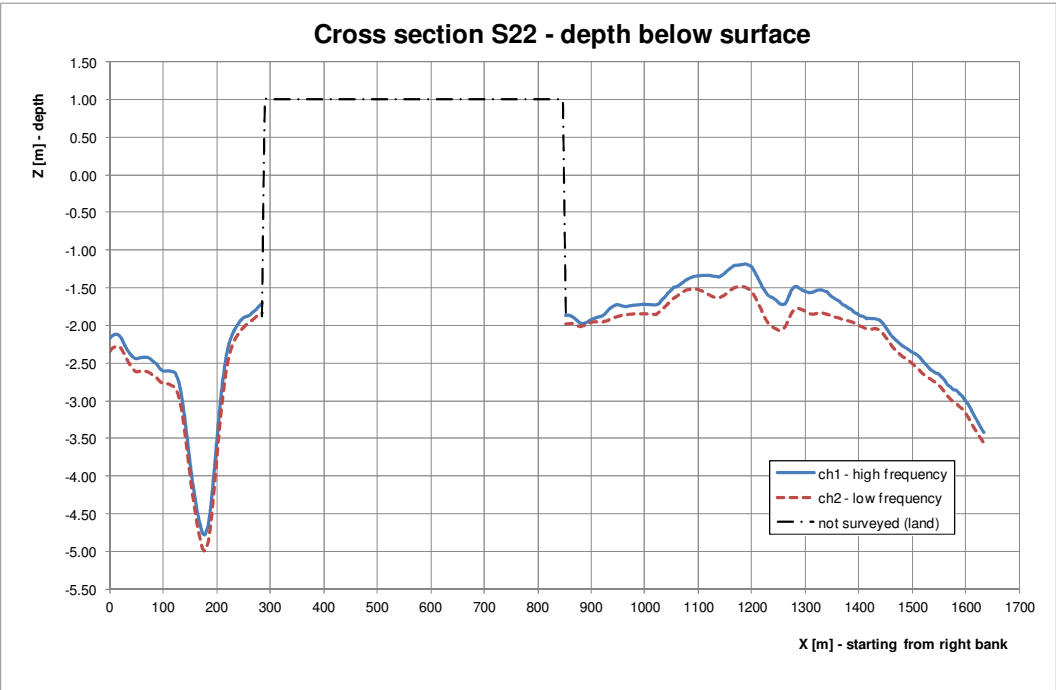
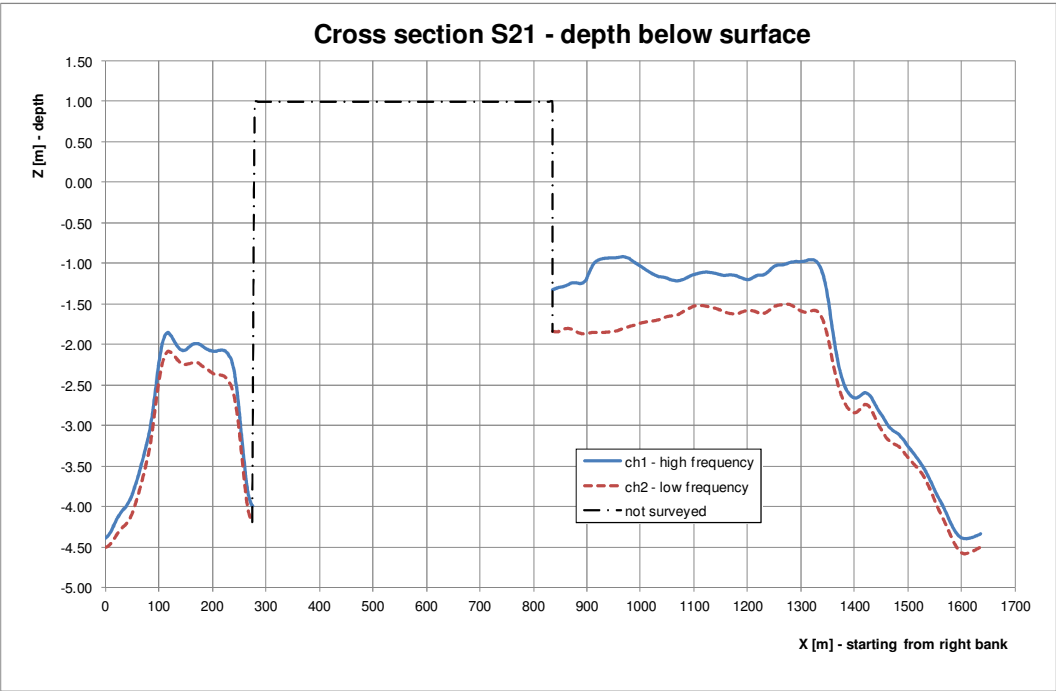


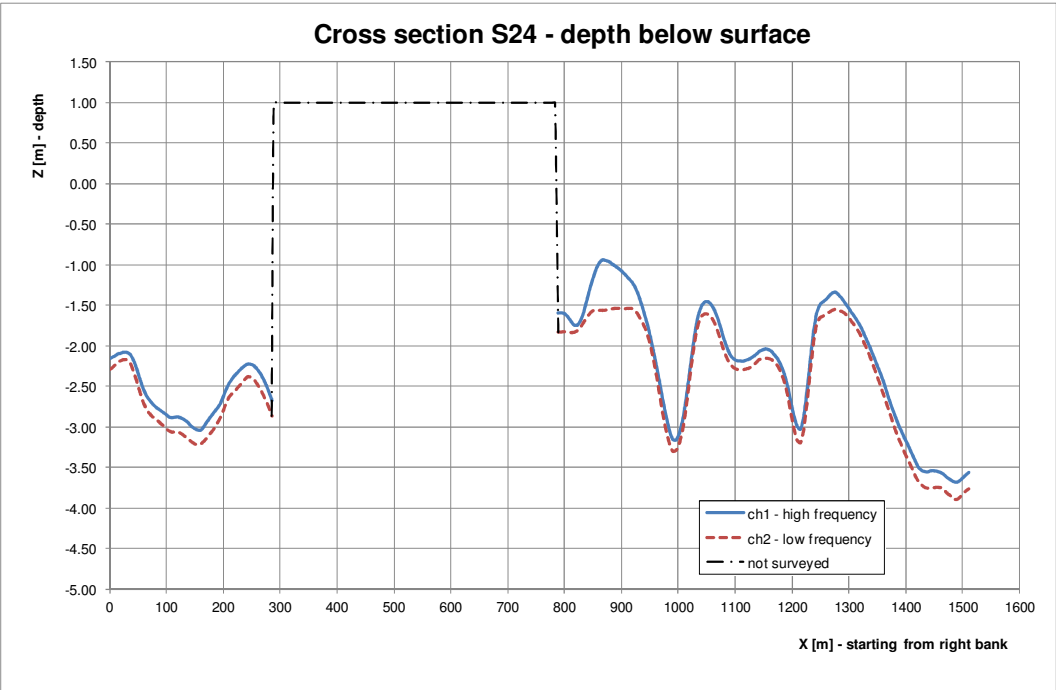
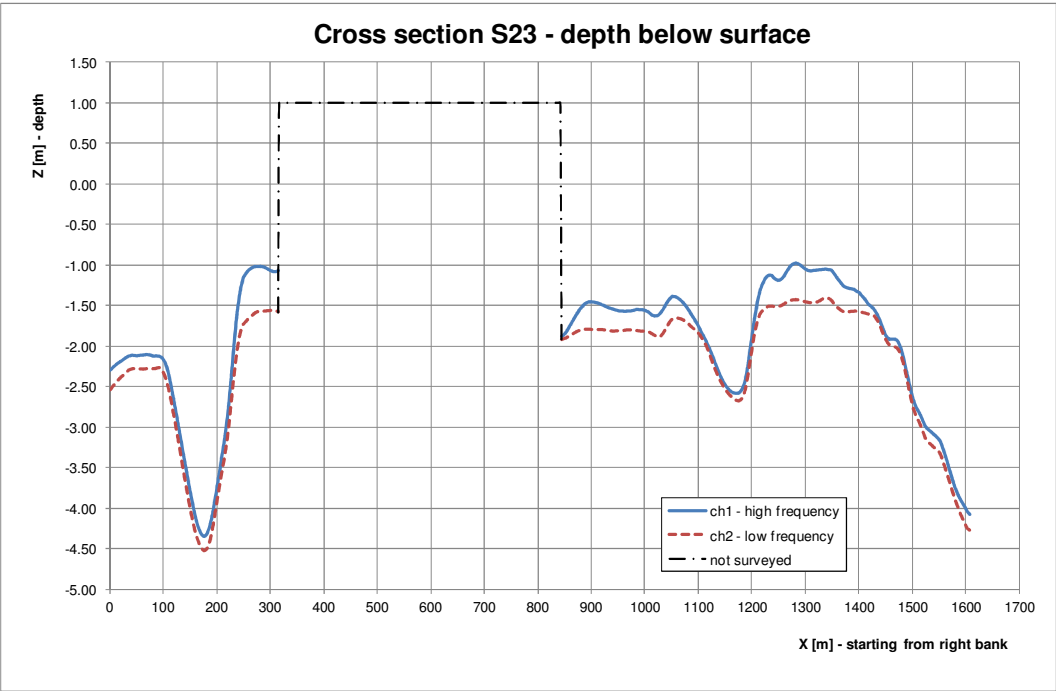


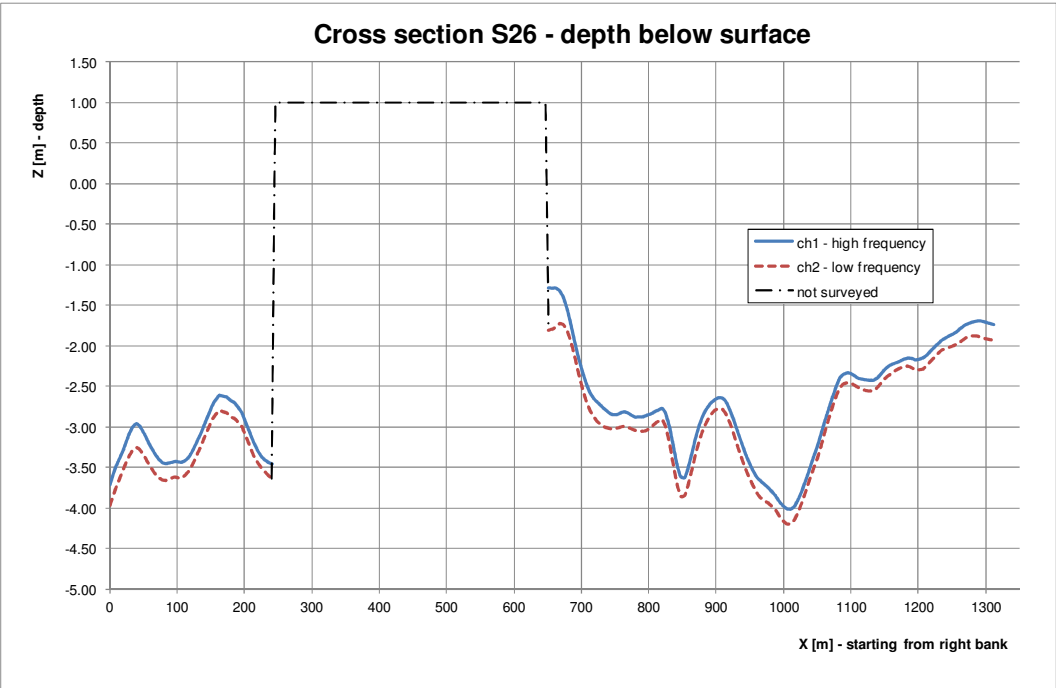
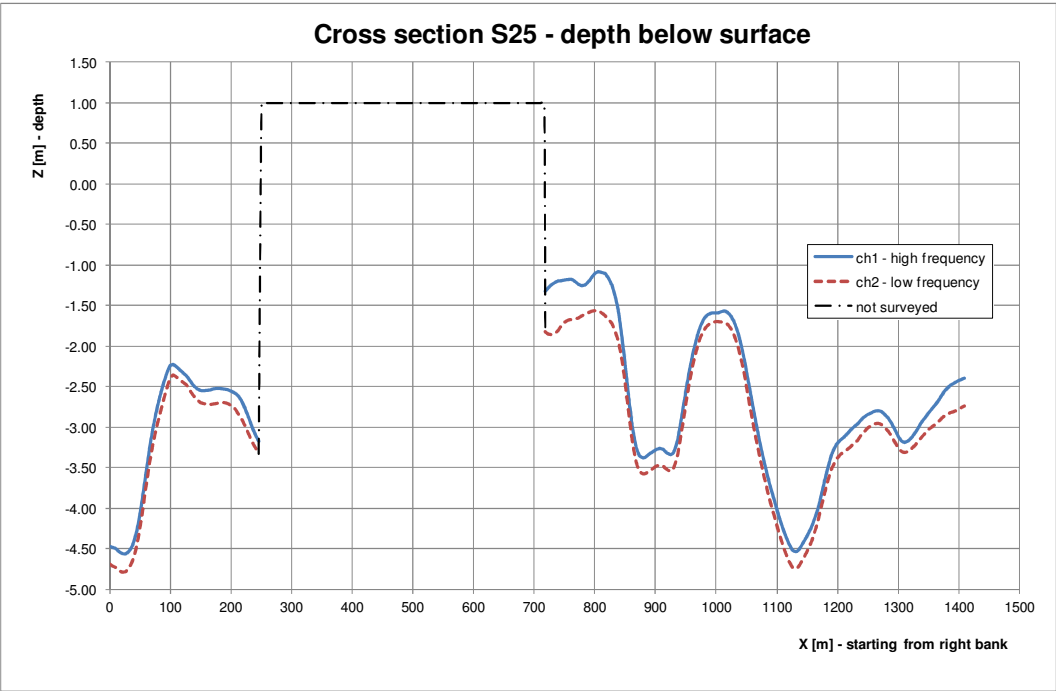


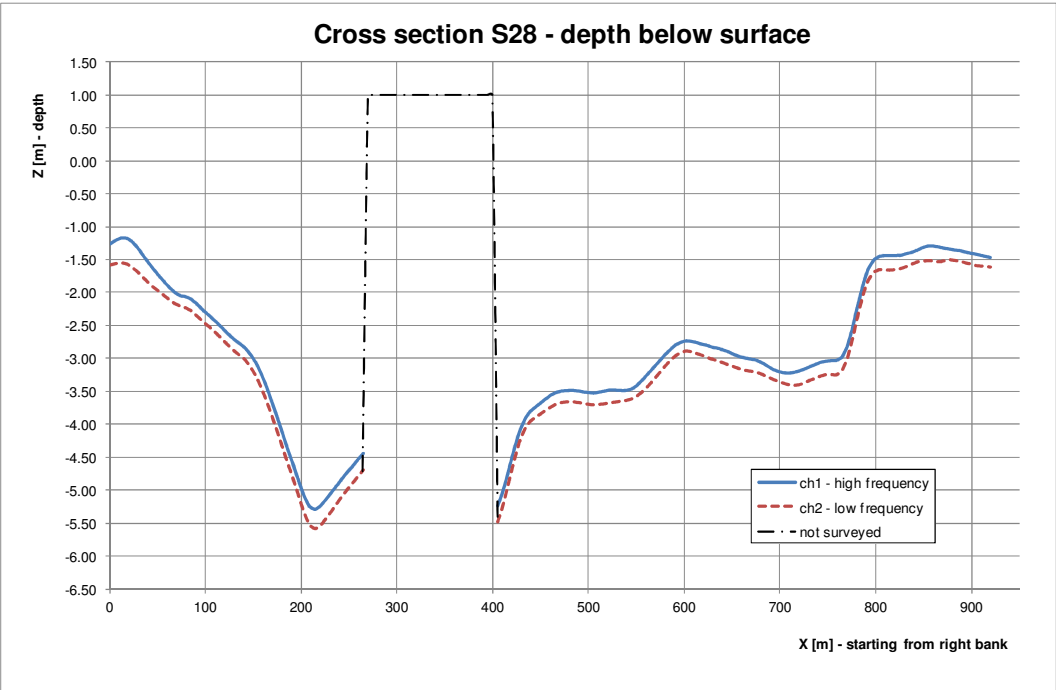
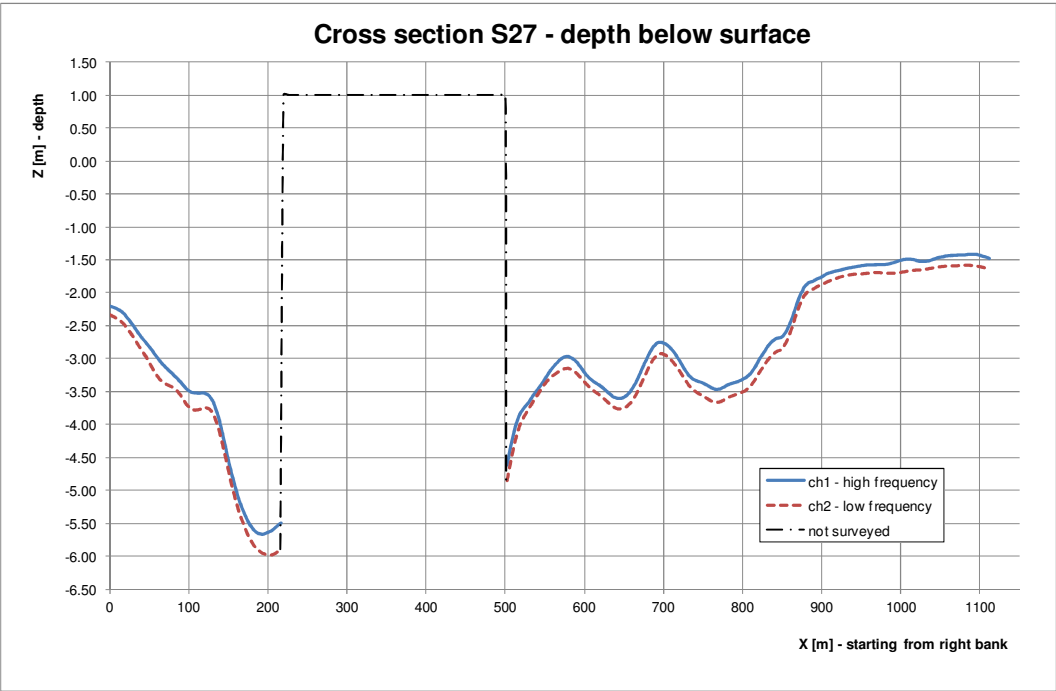


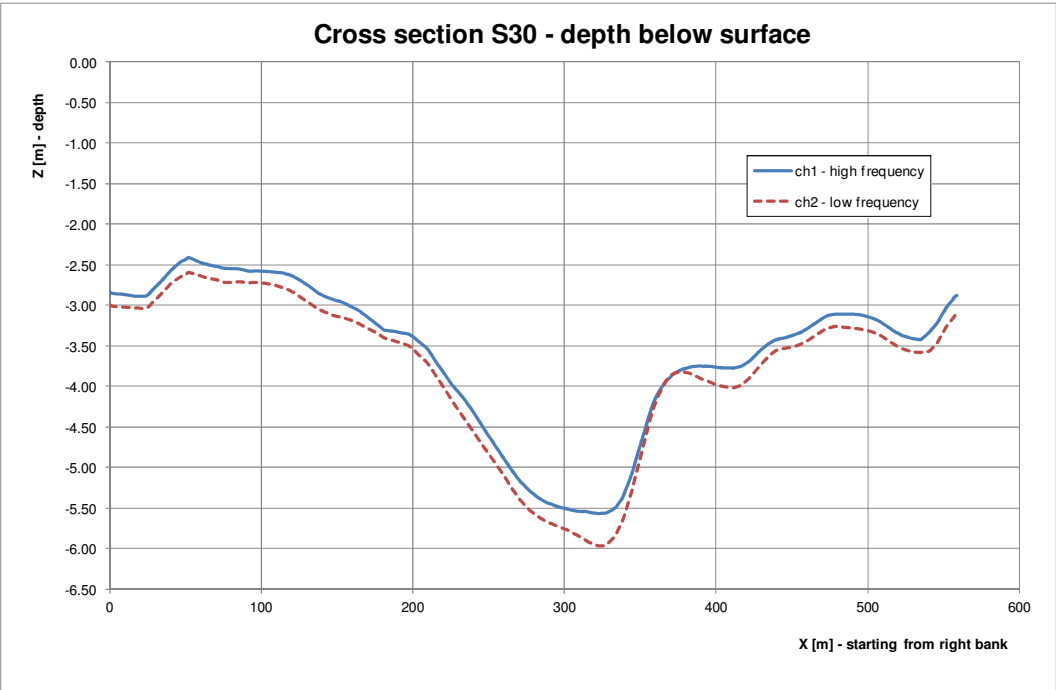
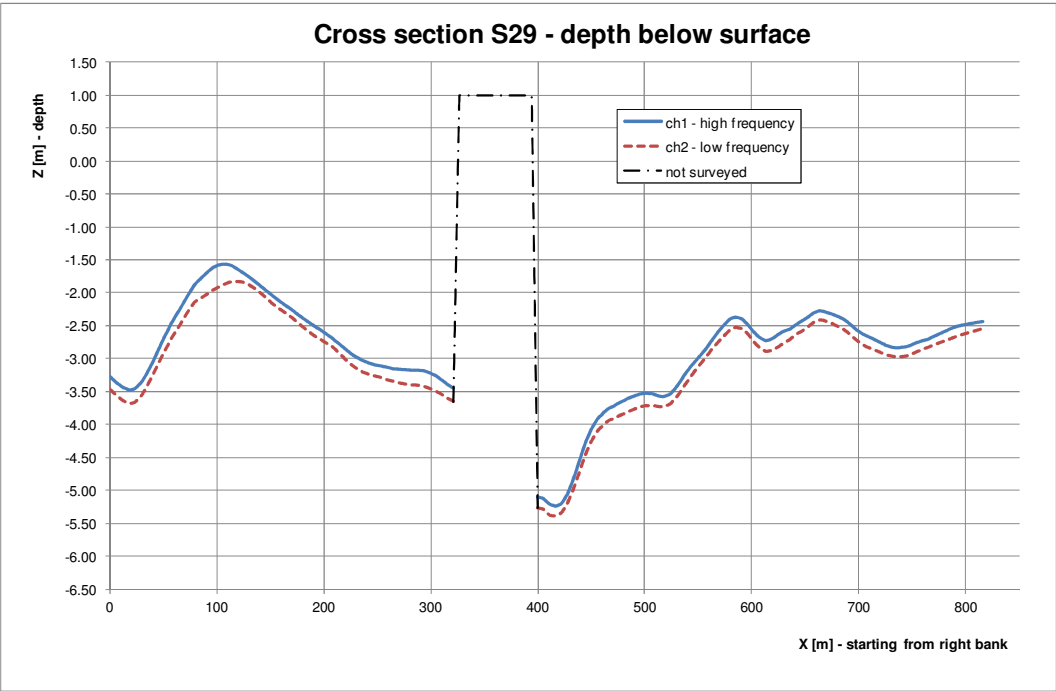


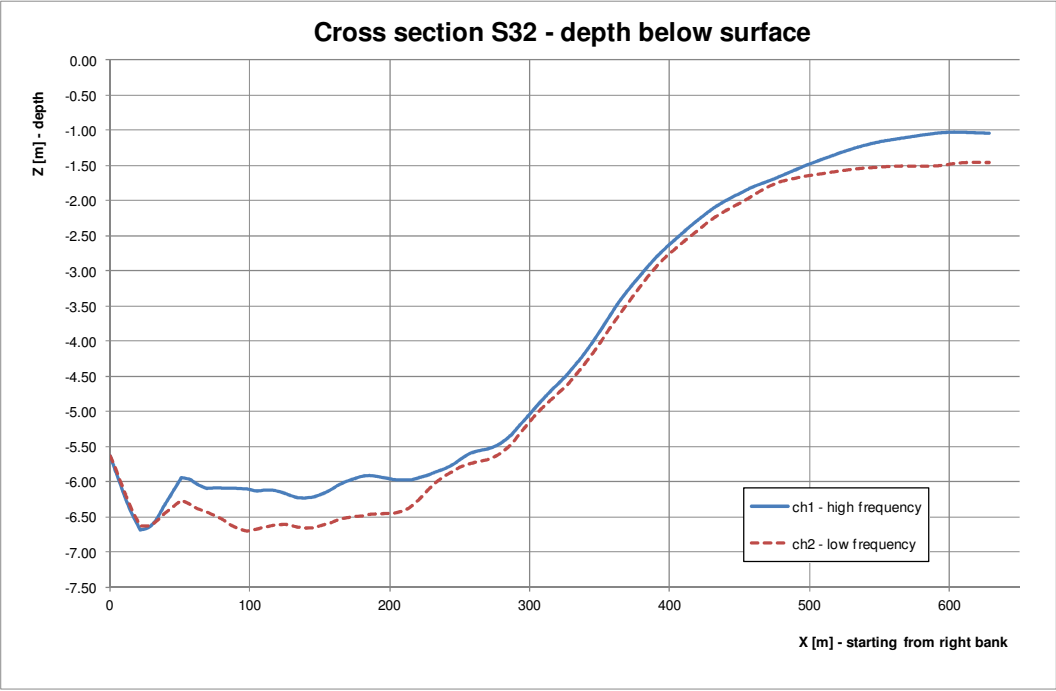
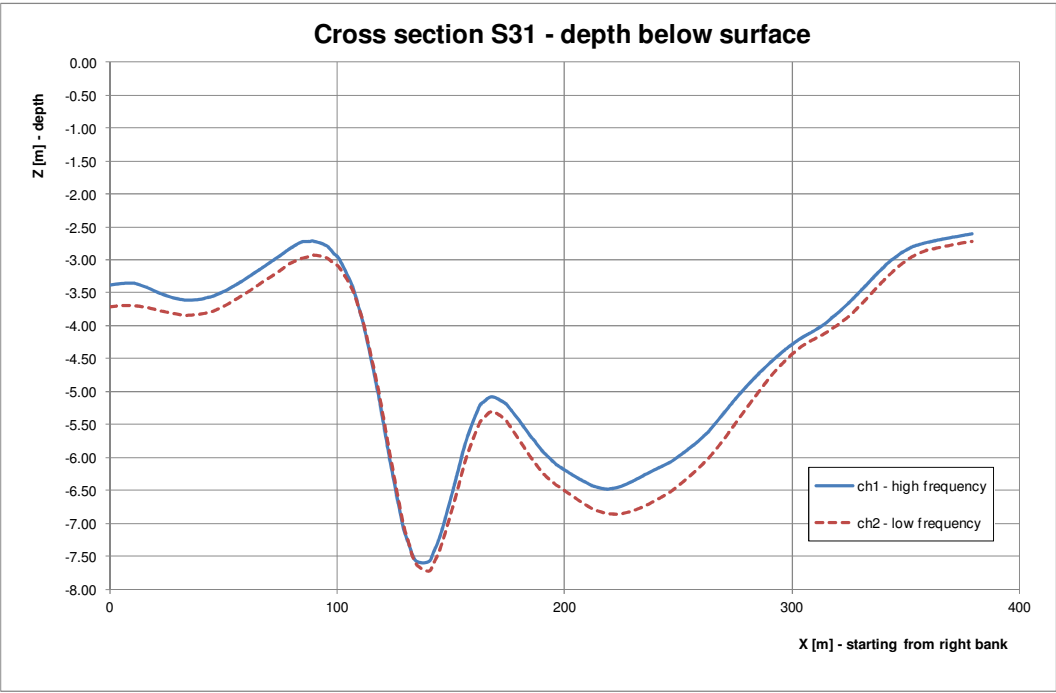


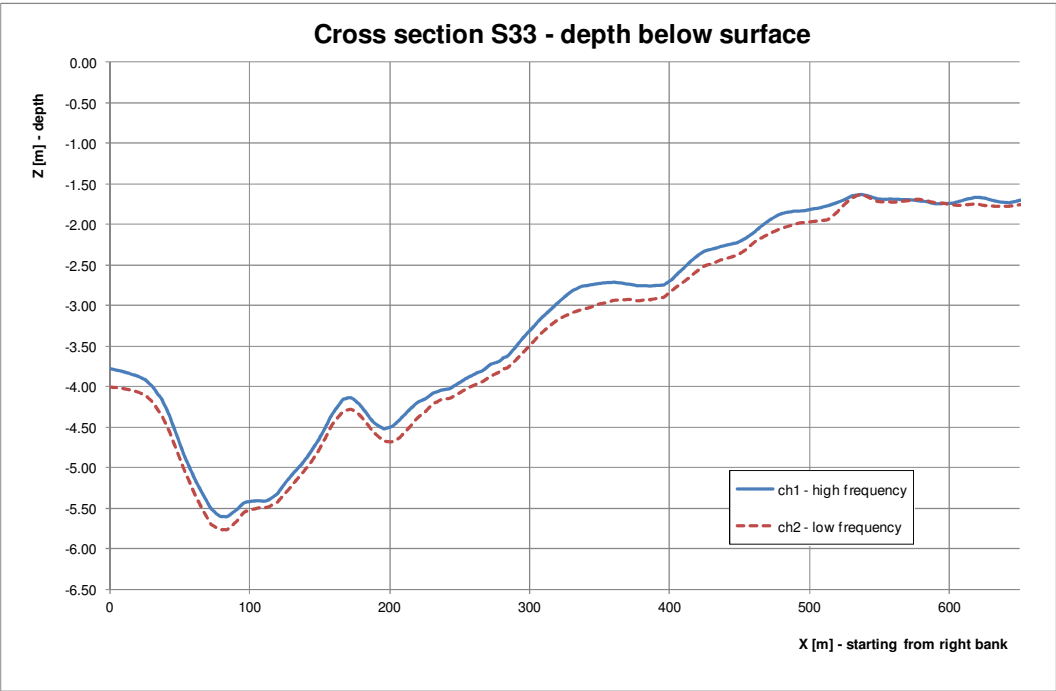












Edito dall' **ENEA**  
Servizio Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

*[www.enea.it](http://www.enea.it)*

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati  
Pervenuto il 12.6.2015

Finito di stampare nel mese di luglio 2015