

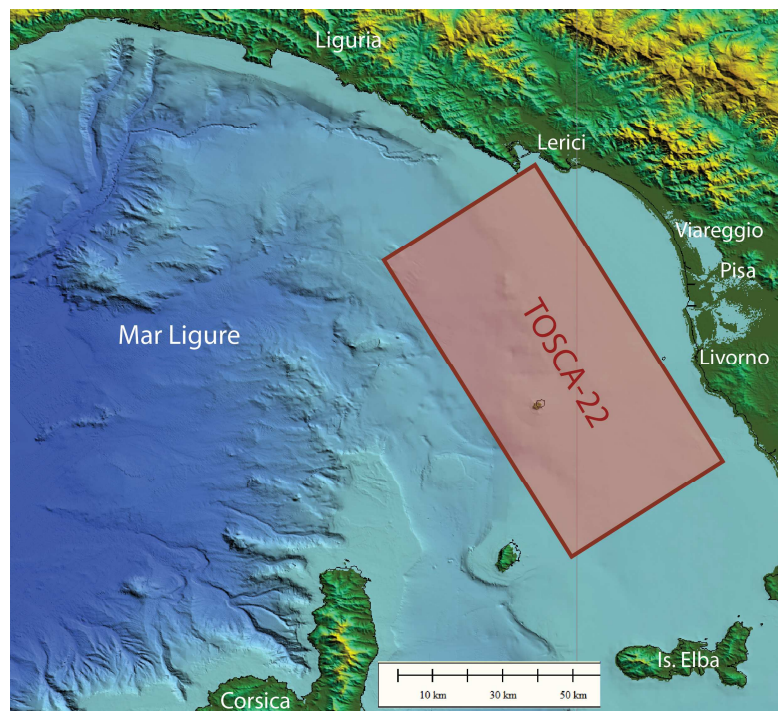


CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE  
Istituto di Scienze Marine - Bologna



## TOSCA-22

### FAGLIE ATTIVE E TERREMOTI STORICI AL LARGO DELLA TOSCANA



Rapporto Tecnico

N/O G. DALLAPORTA

(6 – 16 maggio, 2022)

Mercorella Alessandra, Polonia Alina, Gasperini Luca, Bidini Camilla, Gallerani  
Andrea, Giorgetti Giulia, Stanghellini Giuseppe, Del Bianco Fabrizio

## Indice

- 1- Sintesi della campagna
- 2- Partecipanti
  - 2.1- Partecipanti alla campagna
  - 2.2- Istituzioni coinvolte nel progetto
- 3- Progetto di ricerca
  - 3.1- Premessa
  - 3.2- La zona di lavoro: inquadramento geologico e tettonico
  - 3.3- Scopo del rilievo
- 4- Sommario della crociera: dati tecnici del rilievo
  - 4.1- L'imbarcazione
  - 4.2- Strumentazione ISMAR-CNR
  - 4.3- Lavoro svolto – diario di bordo
- 5- Materiali e metodi
  - 5.1- Sismica multicanale
  - 5.2- Sismica monocanale Chirp
  - 5.3- Veicoli autonomi di superficie
  - 5.4- Carotaggi
  - 5.5- Rilievo magnetometrico
- 6- Risultati preliminari
- 7- Conclusioni

Ringraziamenti

Bibliografia

- Allegato 1- Diario di bordo
- Allegato 2- Mappa di posizione dei profili di sismica multicanale
- Allegato 3- Mappa di posizione dei profili di sismica multicanale
- Allegato 4- Mappa di posizione dei profili magnetometrici
- Allegato 5- Mappa di posizione dei carotaggi

## 1- Sintesi della campagna

Questa relazione contiene il resoconto tecnico della campagna di Geologia e Geofisica Marina denominata “TOSCA-22”, effettuata tra il 6 e il 16 Maggio 2022 nel Mar Ligure.

Durante la spedizione TOSCA-22 sono stati acquisiti dati di sismica a riflessione singolo- e multi-canale, carotaggi, campioni di acqua di fondo in corrispondenza dei carotaggi, dati magnetometrici ed è stato effettuato un test con mezzo autonomo.

Il progetto di ricerca TOSCA-22 si propone di studiare la deformazione attiva e le relazioni esistenti tra tettonica e sedimentazione al retro della catena Appenninica Nord-Occidentale, attraverso un approccio integrato di geofisica ad alta risoluzione e geologia marina. Lo scopo principale è quello di produrre un modello strutturale della deformazione crostale che cercherà di vincolare l'architettura superficiale del margine ai processi tettonici profondi in un'area chiave dove sono state identificate due strutture litosferiche che potrebbero rappresentare sorgenti sismogenetiche.

## 2- Partecipanti

A causa delle restrizioni introdotte per fronteggiare l'epidemia di Covid-19 (le attività in mare si sono svolte nel rispetto del “Protocollo per la prevenzione e sicurezza del personale CNR impiegato nelle attività sperimentali in mare in relazione all'emergenza sanitaria da Covid-19”) il numero dei partecipanti è stato ridotto a 6 unità di personale. Questo non ha permesso a tutti i potenziali interessati di partecipare alla spedizione ma si sono comunque garantiti i 3 i turni di lavoro (navigazione, acquisizione geofisica e carotaggi) sulle 24h durante tutta la campagna.

### 2.1- Partecipanti alla campagna

Nome	Istituzione	Ruolo
Polonia, Alina	ISMAR-CNR	Capomissione, Responsabile Scientifico
Gallerani Andrea	ISMAR-CNR	Responsabile campionamento
Gasparini Luca	ISMAR-CNR	Responsabile dati geofisici
Mercorella Alessandra	ISMAR-CNR	Responsabile acquisizione veicolo autonomo
Giorgetti Giulia	ISMAR-CNR	Navigazione, campionamento
Bidini Camilla	ISMAR-CNR	Navigazione, veicolo autonomo

## **2.2- Personale tecnico-scientifico coinvolto nel progetto**

Polonia Alina, Gasperini Luca, Stanghellini Giuseppe, Giorgetti Giulia, Gallerani Andrea, Mercorella Alessandra, Bidini Camilla (ISMAR-CNR)

Sgroi Tiziana (INGV)

Molli Giancarlo (Università di Pisa)

Artoni Andrea, Torelli Luigi (Università di Parma)

Vannucchi Paola (Università di Firenze)

Di Bucci Daniela (Dipartimento di Protezione Civile)

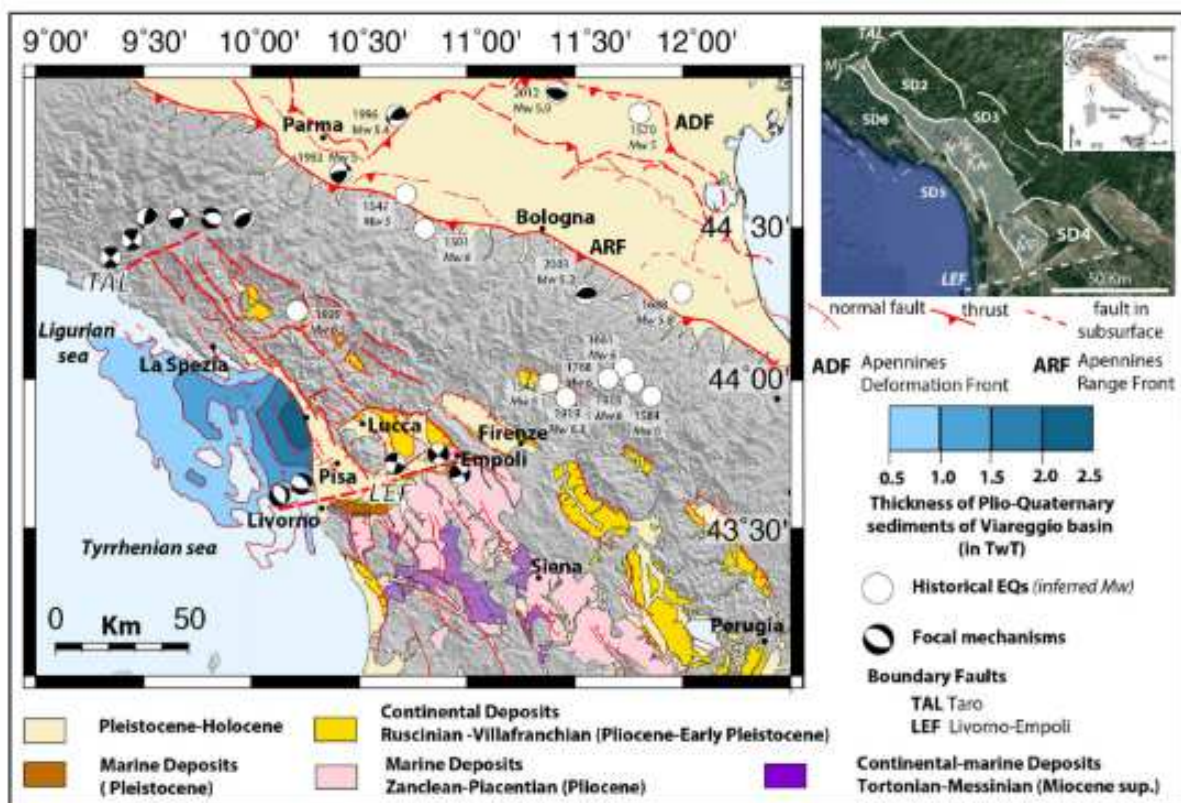
## **3- IL PROGETTO DI RICERCA**

### **3.1- PREMESSA**

L'identificazione delle faglie sismogenetiche in una regione attiva dal punto di vista sismico, è il primo passo per capire dove potrebbero verificarsi terremoti futuri. I dati sulla sismicità recente in una determinata area sono informazioni critiche per vincolare la valutazione della pericolosità sismica. Tuttavia, questi dati coprono in genere periodi di tempo che generalmente sono molto più brevi dei tempi di ricorrenza di grandi terremoti (cioè con  $M_w > 6.0$ ) su una determinata faglia, specialmente in aree caratterizzate da bassi tassi di deformazione come nel caso della regione mediterranea. I dati paleo sismologici possono completare i cataloghi sismici, ma gli studi a terra risentono della scarsa continuità della sedimentazione in ambiente subaereo. La zona costiera del Mar Ligure orientale, è stata sede di terremoti tsunamigenici in tempi recenti, come gli eventi del 1646, 1771, 1809 e 1846 che hanno causato danni e vittime. In particolare, il terremoto di Orciano Pisano del 1846 potrebbe coincidere con uno tsunami registrato a La Spezia. Malgrado tali eventi siano stati studiati da molti autori per il grande impatto che hanno prodotto, la loro origine (zona e meccanismo di generazione) è ancora poco vincolata. In altre parole, non si conoscono ancora con certezza le faglie che hanno generato tali terremoti e la loro eventuale prosecuzione a mare e non si sa se gli tsunami associati siano stati generati direttamente dai terremoti o indirettamente da frane sottomarine sismo indotte.

### 3.2- LA ZONA DI STUDIO: INQUADRAMENTO GEOLOGICO E TETTONICO

La zona di studio si trova al largo della catena dell'Appennino settentrionale, tra La Spezia a nord e Cecina a Sud. L'evoluzione tettonica dell'Appennino settentrionale è caratterizzata da processi di raccorciamento nell'avampaese accompagnati da estensione nelle porzioni più interne della catena (LeBreton et al., 2017). Questa deformazione ha prodotto una grande densità e varietà di sistemi di faglie con cinematiche differenti, che delimitano i vari domini morfostrutturali (Figura 1).



**Figura 1** – Mappa geologico-strutturale semplificata degli Appennini settentrionali. AA: Alpi Apuane; LEF: Livorno–Empoli Fault; MG: Mt. Gottero; MP: Mt. Pisano; TAL: Taro Line. TAL and LEF bound the region of study. Modificata da Molli et al., 2021.

I principali sistemi tettonici nel dominio esterno sono rappresentati dai sovrascorrimenti frontali dell'Appennino sepolti sotto la Pianura Padana che si estendono anche al largo dell'Adriatico occidentale (Carminati and Doglioni, 2012). Studi morfo tettonici combinati con la sismicità recente, tra cui il terremoto dell'Emilia del 2012, suggeriscono che la deformazione lungo il fronte esterno è attualmente attiva.

Il settore più interno degli Appennini sebbene caratterizzato da una minore frequenza di terremoti, è stato interessato da eventi di magnitudo significativa, e mostrano principalmente meccanismi focali distensivi. Tra i diversi grandi terremoti che si sono verificati nella regione, ci sono il 1542 e il 1919 Eventi del “Mugello” (rispettivamente Mw 6.0 e Mw 6.4), gli eventi del 1584, 1661, 1768 e 1918 a la regione “Forlivese” (tutti ~ Mw 6), e il terremoto di Fivizzano del 1920 ~ Mw 6.5 (Rovida et al., 2020; Guidoboni et al., 2019; de Ferrari et al., 2010).

La zona di studio è centrata sul bacino di Viareggio che è controllato da discontinuità litosferiche che bordano il suo sviluppo: la Linea del Taro a nord (TAR in Fig.1, Bernini et al., 1987; Molli et al., 2021) e la Linea Livorno–Sillaro (Bernini et al., 1990; Argnani et al., 1997), detta anche faglia di Livorno–Empoli (LEF in Figura 1 modificata da Molli et al., 2021) a sud. La Linea Taro, già riconosciuta nei primi studi (Bernini et al., 1987), è stata descritta in diversi contributi a causa della sua prominente espressione morfologica associata ad una intensa attività sismica (Rovida et al., 2020). La linea di Taro è sede di un importante accorciamento crostale (Molli et al., 2018) mentre a cavallo della Faglia di Livorno–Empoli è stata descritta una significativa variazione laterale dello spessore della crosta (Piana Agostinetti, 2005).

Oltre alle due principali strutture litosferiche che delimitano il bacino di Viareggio, altre faglie normali antitetiche ad andamento NW-NNW mostrano attività tettonica nel Quaternario (Molli et al., 2021) che potrebbero rappresentare potenziali sorgenti di terremoti la cui magnitudo potrebbe raggiungere  $M_w \geq 6.0$  visto che si tratta di strutture lunghe decine di chilometri e che interessano l'intero spessore crostale. Il rischio sismico è quindi significativo nella regione e merita di essere valutato attentamente acquisendo dati geofisici per verificare se le strutture identificate a terra abbiano una continuità nella zona marina.

Una rivalutazione delle potenziali faglie o sistemi di faglie sismogenetiche nell'Appennino nordoccidentale interno è stata recentemente proposta sulla base di dati stratigrafici, tettonici, morfologici, geodetici e sismologici e nuove osservazioni strutturali (Molli et al., 2021). Abbiamo a disposizione un catalogo aggiornato delle strutture tettoniche, per le quali si conoscono la posizione a terra, nonché la loro architettura, segmentazione su scala regionale, rigetti cumulativi e tassi di deformazione a lungo termine. Questi risultati costituiscono la base di partenza della nostra proposta di acquisizione dati geofisici per meglio caratterizzare le strutture sismogenetiche.

### 3.3- SCOPO DEL RILIEVO

Per ricostruire l'assetto strutturale e per identificare le faglie sismogenetiche è necessario utilizzare un approccio integrato che si basa su discipline, metodologie e tecniche diverse (geofisica, geologia, sedimentologia, stratigrafia, sismo-tettonica e paleosismologia sottomarina) che dovranno essere combinate per dare risposta agli obiettivi del progetto. Sono state programmate tre fasi di attività in mare:

- 1) Acquisizione di dati geofisici a risoluzioni diverse in aree chiave identificate grazie all'analisi di dati già a disposizione del gruppo di lavoro per identificare e caratterizzare le faglie attive e verificare la loro continuità laterale. A tale scopo è stato pianificato un rilievo di dati di sismica multicanale con il sistema elettroacustico (Boomer) in dotazione al laboratorio geofisico di ISMAR-Bologna. A questo, si aggiunge l'acquisizione di dati Chirp lungo tutte le linee multicanale, e l'acquisizione di dati magnetometrici.
- 2) Acquisizione di dati multibeam ad alta risoluzione in aree chiave attraverso le strutture tettoniche utilizzando i veicoli autonomi in dotazione di ISMAR.
- 3) Campionamenti: le relazioni tra tettonica e sedimentazione verranno analizzate acquisendo campioni di sedimento in punti chiave in prossimità delle faglie e nei depocentri dei bacini sedimentari per comprendere se il margine continentale sia soggetto a movimenti gravitativi (frane sottomarine, correnti di torbida) e se tali movimenti siano in relazione con terremoti storici anche di magnitudo bassa o moderata.

Si prevede di analizzare i dati geofisici e i campioni di sedimento per raggiungere i seguenti obiettivi: i) individuare le strutture tettoniche attive e la distribuzione di corpi caotici, torbiditi e frane sottomarine; ii) ricostruire l'attività delle faglie nel tempo attraverso l'analisi delle unità torbiditiche all'interno della successione sedimentaria nei bacini sedimentari; iii) stimare i volumi sedimentari coinvolti nei processi di instabilità gravitativa; iv) datare i processi di risedimentazione ed effettuare una correlazione con il catalogo degli eventi storici.

L'incrocio di tali dati potrà quindi migliorare in maniera significativa la conoscenza dei rapporti tra terremoti, instabilità gravitativa e tsunami nell'area di studio.

## 4- Sommario della crociera: dati tecnici del rilievo

### 4.1- Imbarcazione

La ricerca è condotta sulla N/O G. Dallaporta (Figura 2). La nave è lunga 35.7m ed è adibita alle attività di ricerca in mare del CNR. È equipaggiata con un sistema di posizionamento DGPS ed un ecoscandaglio che può lavorare a diverse frequenze. Il software di navigazione è Navigator Professional (*COMM-TECH*), connesso ai sistemi DGPS e all'ecoscandaglio della nave.

L'antenna GPS di riferimento è posta in posizione centrale, a circa 18 m dalla poppa della nave.



Figura 2: N/O G. Dallaporta. (fonte: [www.ismar.cnr.it](http://www.ismar.cnr.it))

### 4.2- Strumentazione imbarcata:

- una sorgente sismica a bassa frequenza (HMS–620 Bubble Gun Low-Frequency)
- uno streamer allo stato solido GeoEel Solid Digital Streamer (GEOMETRICS), multicanale per l'acquisizione in digitale del segnale sismico.



- un sistema CHIRP III della Benthos-Teledyne
- due veicoli autonomi di superficie (USV) SWAP, equipaggiati con Side-Scan Sonar, Ecografo a fascio singolo, Sub-bottom profiler a tecnologia CHIRP (chirp-sonar) e Multibeam interferometrico Klein HC3500
- magnetometro 'Sea-Spy' di Marine Magnetics ad effetto Overhauser
- sonda multiparametrica Valeport SWiFT SVP
- carotiere acqua-sedimento SW104

#### **4.3- Sintesi dei dati acquisiti (Allegato 1 – Diario di bordo):**

- acquisizione di 19 profili sismici multicanale (per un totale di circa 610 km) ad alta risoluzione (**Allegato 2**);
- acquisizione di 110 profili sismici a riflessione CHIRP (per un totale di circa 600 km) ad altissima risoluzione (**Allegato 3**);
- acquisizione di 350 km di dati magnetometrici (**Allegato 4**)
- numero 8 carotaggi (TO22-01/TO22-08, **Allegato 5**)
- acquisizione di 7.9 Km di profili ecografici con mezzo autonomo OpenSwap;

#### **5- Materiali e metodi**

Il rilievo geofisico con chirp e multicanale è stato pianificato sulla base di batimetria e dati sismici pregressi e di bibliografia.

Per posizionare accuratamente i dati acquisiti è stato utilizzato un ricevitore GPS differenziale Trimble, con precisione submetrica nella posizione orizzontale. La georeferenziazione dei dati è stata fatta relativamente al datum WGS84 e nella proiezione UTM33N. La Time Zone adottata in fase di acquisizione è UTC+0.

Per le mappe di posizionamento è stato adottato il software Global Mapper.

I software adottati per la registrazione dei dati sismici sono SwanPro (ISMAR–CNR), per il sistema CHIRP-Benthos, e Geometrics Seismic Controller Software (GEOMETRICS) per il sistema multicanale. Per la registrazione del dato magnetometrico è stato utilizzato il software SeaLINK.

### 5.1- Dati di sismica a riflessione multicanale

Per l'acquisizione dei dati di sismica a riflessione multicanale è stata utilizzata una sorgente sismica Bubble Gun™ HMS-620LF Low Frequency source (HMS). Il segnale sismico è stato acquisito sia tramite un sistema multicanale digitale, caratterizzato da uno streamer allo stato solido GeoEel Solid Digital Streamer (GEOMETRICS). In questo caso il trigger è a distanza, basato sul sistema di posizionamento della nave. I dati digitali sono inviati ad un amplificatore Streamer Power Supply Unit (GeoEel SPSU – GEOMETRICS) e poi al computer.

I parametri di acquisizione e le geometrie sono riportate in Figura 3. Gli strumenti utilizzati sono rappresentati nelle figure 4-7.

Marine geometry input parameters

Ship navigation Source/streamer geometry

Positive X

GPS

1 STREAMER 16

SOURCE

Positive Y

X Neg

Streamer shape

Straight line

Follow ship track

Heading calculation

Choose base 1

Receiver geometry

First receiver dx (m) 10

First receiver dy (m) 40

Number of receivers 16

Distance between receivers (m) 3.125

Source geometry

Source dx (m) -9.6

Source dy (m) 83

CDP Binning

Bin size (m) 3.125

OK Annulla

Figura 3 – Geometria di acquisizione dei dati sismici multicanale



**Figura 4a** – Deck Unit della sorgente Bubble Gun



**Figura 4b** – Computer di acquisizione delle linee multicanale



*Figura 5 – Operazioni di messa a mare dello streamer*



**Figura 6 – Sorgente boomer**



**Figura 7 – Boomer e cavo sismico trainati a poppa**

## 5.2- Dati di sismica a riflessione monocanale

Il sistema CHIRP III della Benthos-Teledyne (Figs. 8-9) permette di acquisire profili sismici a riflessione ad alta risoluzione nelle aree sommerse. Si tratta di uno strumento in grado di ottenere delle immagini acustiche del fondale e del sottofondo penetrando alcune decine di metri all'interno della successione sedimentaria evidenziando geometrie interne e spessori con una risoluzione verticale di alcuni centimetri, paragonabile a quella ottenibile dalle osservazioni degli affioramenti rocciosi a terra (Fig. 10). Il sistema è composto da un emettitore di impulsi modulati in frequenza che funziona anche da ricevitore delle riflessioni dal fondale e dal substrato. Il segnale ricevuto è deconvoluto e elaborato in tempo reale, successivamente presentato sotto forma di sezione verticale tempo-distanza sul computer di acquisizione e contemporaneamente immagazzinato in formato XTF sull'hard disk del computer di acquisizione. La frequenza di emissione degli impulsi acustici è nell'ordine delle migliaia di Hz mentre le potenze generate sono relativamente modeste (qualche centinaio di watt) in modo tale da non provocare nessun danno alla fauna marina. Il controllo dei parametri di acquisizione, così come la visualizzazione dei dati in tempo reale, è stata eseguita per mezzo del software SwanPro sviluppato dalla Communication Technology srl. Nel corso di tutta la campagna sono stati utilizzati i seguenti parametri di acquisizione:

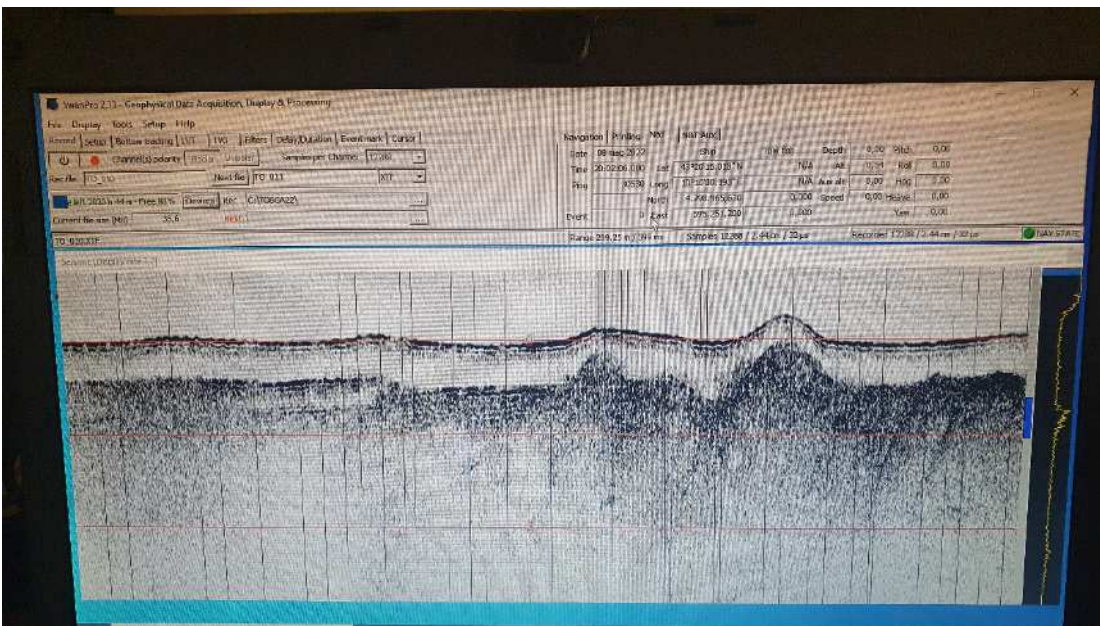
-Trigger rate	da 375 ms a 750 ms
-Transmission frequency	Sweep 2-7 kHz
-Transmission power	max
-Pulse length	50 ms
-Gain	24 db



**Figura 8** – Consolle di acquisizione del sistema CHIRP III Benthos-Teledyne collegato al computer di controllo e archiviazione dei dati.



**Figura 9** – I trasduttori del sistema CHIRP ed ecoscandaglio montati su un palo a murata.



**Figura 10** – Esempio di profilo sismico a riflessione ottenuto utilizzando il sistema CHIRP-III Benthos-Teledyne

### 5.3 – Veicoli autonomi di superficie

I due veicoli autonomi di superficie **OpenSWAP** dell'ISMAR-CNR/Proambiente di Bologna sono catamarani in ABS di dimensioni molto contenute (circa 1 m x 1 m) in grado di navigare autonomamente utilizzando una serie di algoritmi per la navigazione autonoma che sfruttano il posizionamento elaborato da un ricevitore GPS, in combinazione con un sistema inerziale.

Entrambi i veicoli sono equipaggiati con un ecoscandaglio a fascio singolo e incidenza normale accoppiato ad un sistema di campionamento del segnale basato su tecnologie "open" sviluppate in ISMAR-CNR (Stanghellini et al., 2020). L'ecoscandaglio lavora ad una frequenza emessa di 200 kHz, lunghezza impulso di 200  $\mu$ sec e n. di campioni 5000 (Fig. 11).

Uno dei due veicoli è equipaggiato anche con un sub-bottom a tecnologia CHIRP, dalla completa programmabilità dell'ecogramma di emissione (impulso CHIRP) e con un Side Scan Sonar della ditta Imagenex con frequenza di emissione del segnale di 260, 330 e 800 kHz. Per mancanza di tempo non siamo riusciti ad eseguire un rilievo con questo swap.

L'altro veicolo è equipaggiato, oltre che con l'ecoscandaglio già citato, con un ecoscandaglio multifascio interferometrico "HydroChart-3500" della Klein Marine System montato tra gli scafi del catamarano. Questo sistema è in grado di acquisire un dettagliato modello digitale del fondale (DTM), insieme ad immagini acustiche che si basano sulla misura dell'ampiezza del segnale retro-diffuso dal fondale stesso (backscatter). Le frequenze a cui può operare il sistema SSS (backscatter) sono 445 Hz e 900 Hz, mentre quella del sistema multibeam (batimetria) è 445 Hz. Il ricevitore GPS TRIMBLE SPS461 HP/XP doppia antenna con correzione differenziale del dato attraverso un sistema VRTK via rete GSM ha fornito un'accuratezza centimetrica del dato grazie alle correzioni ricevute dalle stazioni di riferimento della rete HxGN SmartNet. Il dato interferometrico è stato acquisito tramite il software SonarPro®. La configurazione di questo sistema di acquisizione è stata integrata con le informazioni sull'assetto della navigazione (*Heading, Roll, Pitch e Heave*) così da raggiungere la giusta accuratezza del dato prodotto.



General Specifications	
Deployment Method	Pole configurations or hull mounting
Max Water Depth	150 m
Frequency	455 kHz Bathymetry and Side Scan 900 kHz Side Scan
Pulse Technology	Wideband FM Chirp
Bathymetry Coverage	10 to 12 times water depth
Bathymetry Across Track	5.0 cm
Bathymetry Along-Track Resolution	0.4°
Side Scan Swath Coverage (2x range)	300 m @ 445 kHz 150 m @ 900 kHz
Side Scan Across-Track Resolution	1.5 cm
Side Scan Along-Track Resolution	0.21°
Construction	Rugged

*Figura 11: Caratteristiche del sistema idrografico utilizzato*

Le operazioni di messa a mare del veicolo sono state abbastanza agevoli. Il veicolo è stato calato in mare con il verricello posto sul lato destro del ponte della nave (Fig. 12).



*Figura 12: Operazione di messa a mare del veicolo autonomo*

Una volta in acqua, il veicolo è stato pilotato attraverso il software opensource OpenSWAPNAV sviluppato in-house a cui è collegato un joystick per il controllo manuale. Questo ha consentito di allontanarlo in sicurezza dalla murata della nave ed avvicinarlo al punto di inizio acquisizione, individuato sulla base dei profili sismici precedentemente acquisiti.

Attraverso il software, il veicolo è stato capace di seguire in automatico le linee di acquisizione precedentemente impostate (Fig. 13). Questo ha significato che anche in caso di perdita di comunicazione tra veicolo e computer a causa di un'eccessiva distanza, le linee sono state seguite con un'elevata accuratezza. A causa di un problema tecnico che non ha permesso la registrazione dei dati geofisici, è stato possibile eseguire solo il test di navigazione.



**Figura 13:** Risultato della navigazione SWAP. Si può notare la precisione del veicolo nel seguire la navigazione lungo la griglia pre-impostata. Il punto impreciso che si vede a metà acquisizione è dovuto ad un momento di test effettuato dall'operatore.

#### 5.4- Campioni di sedimento (Allegato 5)

Le operazioni di carotaggio sono state eseguite con un carotiere a gravità acqua-sedimento SW104, ideato per il campionamento di sedimenti a granulometria fine. Esso garantisce l'interfaccia acqua-sedimento indisturbata e la possibilità di campionare l'acqua di fondo a contatto col sedimento, grazie ad una valvola salva acqua posta in testa al tubo carotiere.

Questa valvola rimane aperta durante la discesa e la penetrazione del carotiere ma si chiude non appena inizia la fase di recupero, ancora prima che il carotiere venga estratto dal sedimento. In

questo modo viene preservata l'acqua di fondo e viene impedito il rimescolamento e la contaminazione della colonna d'acqua sovrastante durante la risalita. Oltre a recuperare sedimento indisturbato, questo strumento garantisce anche un minimo fenomeno di compattazione grazie alla dimensione maggiore del tubo (diametro esterno del liner 110 mm, diametro interno 104 mm)

La chiusura della carota avviene non appena inizia il recupero, grazie alla corsa dell'albero scorrevole che prima di recuperare il carotiere sgancia il cavalletto che chiude la valvola.

Le caratteristiche principali di tale strumento sono:

- L'interfaccia acqua sedimento viene preservata indisturbata con possibilità di campionare un volume minimo di 1000 ml di acqua di fondo.
- Grazie alla dimensione maggiore del tubo la quantità di sedimento campionabile per gli studi geologici è maggiore.
- Il liner può essere estratto in verticale quindi senza arrecare disturbo all'interfaccia o rimescolamento.
- L'armamento può essere variato in peso e lunghezza tubo a seconda del tipo di sedimento e degli obiettivi scientifici.
- La geometria del naso, lo spessore minimo del tubo carotiere e i sistemi di chiusura superiore ed inferiore contribuiscono alla riduzione dei disturbi alla carota e soprattutto al top di essa.
- Il sistema di chiusura superiore impedisce la contaminazione dell'acqua di fondo campionata con l'acqua della colonna sovrastante durante la fase di recupero in superficie
- Assenza di infiltrazioni di acqua dal top lungo la parete interna del liner.

Sono state acquisite 8 carote di sedimento (Tabella 1) in punti chiave selezionati attraverso l'interpretazione preliminare dei dati geofisici per campionare siti che mostrassero da un lato una sedimentazione olocenica relativamente tranquilla e continua (carote di riferimento), dall'altro, siti con evidenza di processi di risedimentazione.

Nome carota	Data	Ora UTC (locale -2)	Profondità acqua	Recupero	Posizione (Lat, Lon)
TO22_01	13/05/2022	07:00	126 m	124 cm	43.313811°N 10.178730°E
TO22_02	13/05/2022	07:42	117 m	59 cm	43.335059°N 10.174771°E
TO22_03	13/05/2022	09:02	144 m	64 cm	43.388675°N 9.9819917°E
TO22_04	13/05/2022	11:02	141 m	60 cm	43.405852°N 9.989686°E
TO22_05	13/05/2022	11:49	138 m	63 cm	43.411735°N 9.995069°E
TO22_06	13/05/2022	13:30	75.5 m	19 cm	43.544955°N 10.051518°E
TO22_07	13/05/2022	14:13	66 m	32 cm	43.571362° N 10.064464° E
TO22_08	13/05/2022	15:10	77.5 m	119 cm	43.593042° N 10.073754° E

**Tabella 1** - Dati relativi alle 8 carote di sedimento acquisite durante la spedizione (giorno, ora, nome, posizione, profondità dell'acqua e recupero).



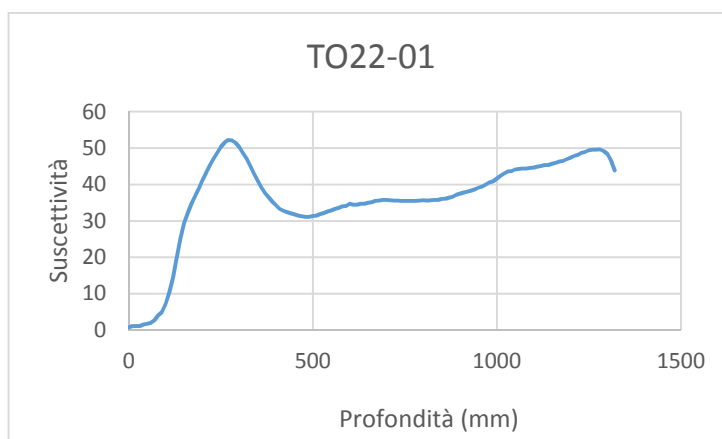
**Figura 14a,b** – Armamento e messa a mare del carotiere prima della calata

Sulle carote sono stati acquisiti i dati di suscettività magnetica. La suscettività magnetica  $\chi = M/H$ , dove M è la magnetizzazione e H il campo applicato, misura il grado di magnetizzazione in un materiale in presenza di un campo magnetico, e può essere utilizzata per correlazioni stratigrafiche fra carote, determinazioni di province mineralogiche, analisi statistiche per studi di cicli sedimentari. Note  $\chi$  (adimensionale) e la densità, è possibile determinare la suscettività di massa.

I minerali possono essere:

- diamagnetici ( $\chi \ll 0$ )
- paramagnetici ( $\chi \gg 0$ ), ad ed. Fe, Ni
- ferromagnetici ( $\chi \gg \gg 0$ ), ad es.: (a) ossidi di ferro, come magnetite, ematite, ilmenite, maglemite, (b) idrossidi di ferro come limonite e goethite, e (c) solfuri, come la pirite.

Il valore ottenuto di  $\chi$  è stato corretto per il diametro dell'anello (10 o 12.5cm) e lo spessore del sedimento.



**Fig. 15-** Profilo suscettività magnetica su una delle carote acquisite

### 5.5- Dati magnetometrici

E' stato usato un magnetometro 'Sea-Spy' di Marine Magnetics ad effetto Overhauser, trainato a 195 m da poppa. Lo strumento fornisce una accuratezza di 0.1 nT, ed il campionamento e' stato operato alla frequenza di 1 Hz. I dati sono stati raccolti con il sistema 'Maglog' Geometrics, interfacciato al GPS, e pre-processati dal pacchetto Oasis-Montaj di Geosoft [GEOSOFT (2007)]. Si sono ottenute riduzioni a IGRF, oltre a pre-elaborazione dei dati.

## 5. Risultati e analisi preliminari dei dati

E' stato possibile acquisire un fitto grigliato di dati di sismica a riflessione (multicanale e Chirp) che garantiscono la possibilità di studiare l'andamento, la geometria e la continuità laterale delle faglie attive presenti. La possibilità di integrare queste informazioni con i dati magnetometrici consentirà di vincolare la deformazione superficiale con variazioni reologiche più profonde. L'acquisizione di 8 carote di sedimento in punti chiave individuati attraverso l'analisi preliminare dei dati geofisici acquisiti, consentirà di stimare il tasso di sedimentazione nei diversi settori del margine, di individuare livelli stratigrafici ad alta energia, soprattutto per la parte della successione sedimentaria più recente. La datazione radiometrica di questi livelli verrà effettuata per correlare eventi sedimentari anomali all'attività tettonica recente.

La strategia di acquisizione dei profili di sismica multicanale e CHIRP, impiegati in contemporanea sfruttando le frequenze molto diverse di acquisizione, prevedeva che le rotte dell'imbarcazione fossero progettate in maniera tale da formare una griglia molto fitta composta da segmenti di diversa lunghezza che intersecandosi avrebbero coperto in modo relativamente omogeneo l'intera area di lavoro. Il fatto di acquisire i dati di questo tipo lungo segmenti di linea retta facilita la successiva fase di interpretazione dei dati in quanto permette di correlare le strutture sedimentarie sommerse e di studiarne la geometria nelle tre dimensioni spaziali. La presenza di secche e di zone interdette alla navigazione ha condizionato pesantemente la navigazione e la posizione delle linee acquisite e non ha permesso di investigare tutta l'area di lavoro prevista nella proposta originaria.

L'elaborazione preliminare, eseguita utilizzando il *software* SeisPrho (Gasperini and Stanghellini, 2009) ha permesso di produrre sezioni sismiche in formato *bitmap*, le quali possono essere interpretate utilizzando lo stesso pacchetto *software*.

I dati CHIRP acquisiti in forma digitale saranno in seguito elaborati in modo accurato così da ottenere la mappa batimetrica di dettaglio e la mappa di riflettività del fondale.

La procedura di elaborazione dei dati CHIRP è la seguente:

1. conversione dei dati da XTF a SEG Y;
2. esportazione della navigazione dal file SEG Y e verifica (con eventuale correzione) degli errori;
3. applicazione di filtri passa-banda e normalizzazione di ampiezza del segnale sismico;

4. generazione delle immagini bitmap geo-referenziate per ciascun profilo;
5. applicazione di un algoritmo di “*bottom detection*” e generazione di file in formato REF di SeisPrho (Gasperini and Stanghellini 2009) che contengono sia il valore della profondità in metri (assumendo velocità di propagazione del suono costante nella colonna d’acqua), sia il valore della riflettività relativa del fondale corretto per la divergenza sferica;
6. applicazione degli *offset* strumentali;
7. creazione dei “*grid*” (batimetria e riflettività) in formato netcdf con GMT.

Molte di queste operazioni sono state eseguite sul campo.

## 6. Conclusioni

L’utilizzo di tecniche di indagine geofisica ha permesso di ottenere una buona copertura del fondale marino e acquisire dati di elevata qualità che permetteranno di studiare e descrivere le faglie attive e l’evoluzione stratigrafico-sedimentologica recente. L’obiettivo principale sarà comunque compilare una carta batimetrica del fondale, una carta di riflettività dei sedimenti sul fondo e, se l’analisi geologica-geofisica dei profili lo consentirà, cartografare uno o più orizzonti chiave nella successione sedimentaria. Questi dati sismo-stratigrafici saranno utilizzati per produrre una carta delle isocronopache dei sedimenti con la quale determinare i tassi di sedimentazione medi nei differenti settori, individuando le relative sorgenti principali degli apporti e gli eventuali effetti di rimaneggiamento da parte delle correnti profonde e/o di eventi ad alta energia come terremoti e tsunami. Tutti questi dati saranno utilizzati per lavori scientifici e relazioni tecniche che speriamo possano essere preparatori per un progetto più ampio per il prossimo futuro.

## Ringraziamenti

Si ringrazia il comandante S. Pappalardo della N/R Dallaporta e tutto il suo equipaggio per il supporto incessante durante l’intera crociera e i numerosi sforzi extra che questa spedizione ha comportato in tempi di coronavirus per garantire l’operatività sulle 24 ore. Un grazie particolare ai nostri partner dell’Università di Pisa, Parma e Firenze che non hanno potuto partecipare alla spedizione a causa delle restrizioni per il coronavirus. La crociera non sarebbe stata possibile senza il sostegno finanziario del CNR.

## Bibliografia

Argnani, A.; Bernini, M.; Di Dio, G.M.; Papani, G.; Rogledi, S., 1997. Stratigraphic record of crustal-scale tectonics in the Quaternary of the Northern Apennines (Italy). *Ital. J. Quat. Sci.*, 10, 595–602.

Bernini, M.; Boccaletti, M.; Moratti, G.; Papani, G.; Sani, F.; Torelli, L., 1990. Episodi compressivi neogenico-quadernari nell'area estensionale tirrenica. Dati in mare e a terra. *Mem. Della Soc. Geol. Ital.*, 45, 577–589.

Bernini, M.; Papani, G., 1987. Alcune considerazioni sulla struttura del margine appenninico emiliano tra lo Stirone e l'Enza (e sue relazioni con il sistema del Taro). *L'ateneo Parm. Acta Nat.*, 24, 219–240.

Carminati, E., & Doglioni, C., 2012. Alps vs. Apennines: the paradigm of a tectonically asymmetric Earth. *Earth Science Review*, 112, 67 – 96.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.004> de Ferrari, R.; Ferretti, G.; Barani, S.; Spallarossa, D., 2010. Investigating on the 1920 Garfagnana earthquake (Mw=6.5); Evidences of site effects in Villa Collemandina (Tuscany, Italy). *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 30, 1417–1429.

Gasparini L. and Stanghellini G., 2009. SeisPrho: an interactive computer program for processing and interpretation of high-resolution seismic reflection profiles. *Computers and Geosciences* 35, pp. 1497-1504.

Guidoboni, E.; Ferrari, G.; Tarabusi, G.; Sgattoni, G.; Comastri, A.; Mariotti, D.; Ciuccarelli, C.; Bianchi, M.G.; Valensise, G. CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area. *Sci. Data* 2019, 6, 80.

Le Breton, E.; Handy, M.; Molli, G.; Ustaszewski, K. Post-20 Ma motion of the Adriatic plate—new constraints from surrounding orogens and implications for crust-mantle decoupling. *Tectonics* 2017, 36, 3135–3154.

Molli, G.; Carlini, M.; Vescovi, P.; Artoni, A.; Balsamo, F.; Camurri, F.; Clemenzi, L.; Storti, F.; Torelli, L., 2018. Neogene 3-D Structural Architecture of the North-West Apennines: The Role of the Low-Angle Normal Faults and basement thrusts. *Tectonics*, 37, 2165–2196.

Molli, G.; Manighetti, I.; Bennett, R.; Malavieille, J.; Serpelloni, E.; Storti, F.; Giampietro, T.; Bigot, A.; Pinelli, G.; Giacomelli, S.; et al., 2021. Active Fault Systems in the Inner Northwest Apennines, Italy: A Reappraisal One Century after the 1920 Mw ~6.5 Fivizzano Earthquake. *Geosciences*, 11, 139. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030139>.



Piana Agostinetti, N., 2005. The structure of the Moho in the Northern Apennines: Evidence for an incipient slab tear fault? *Tectonophysics*, 655, 88–96.

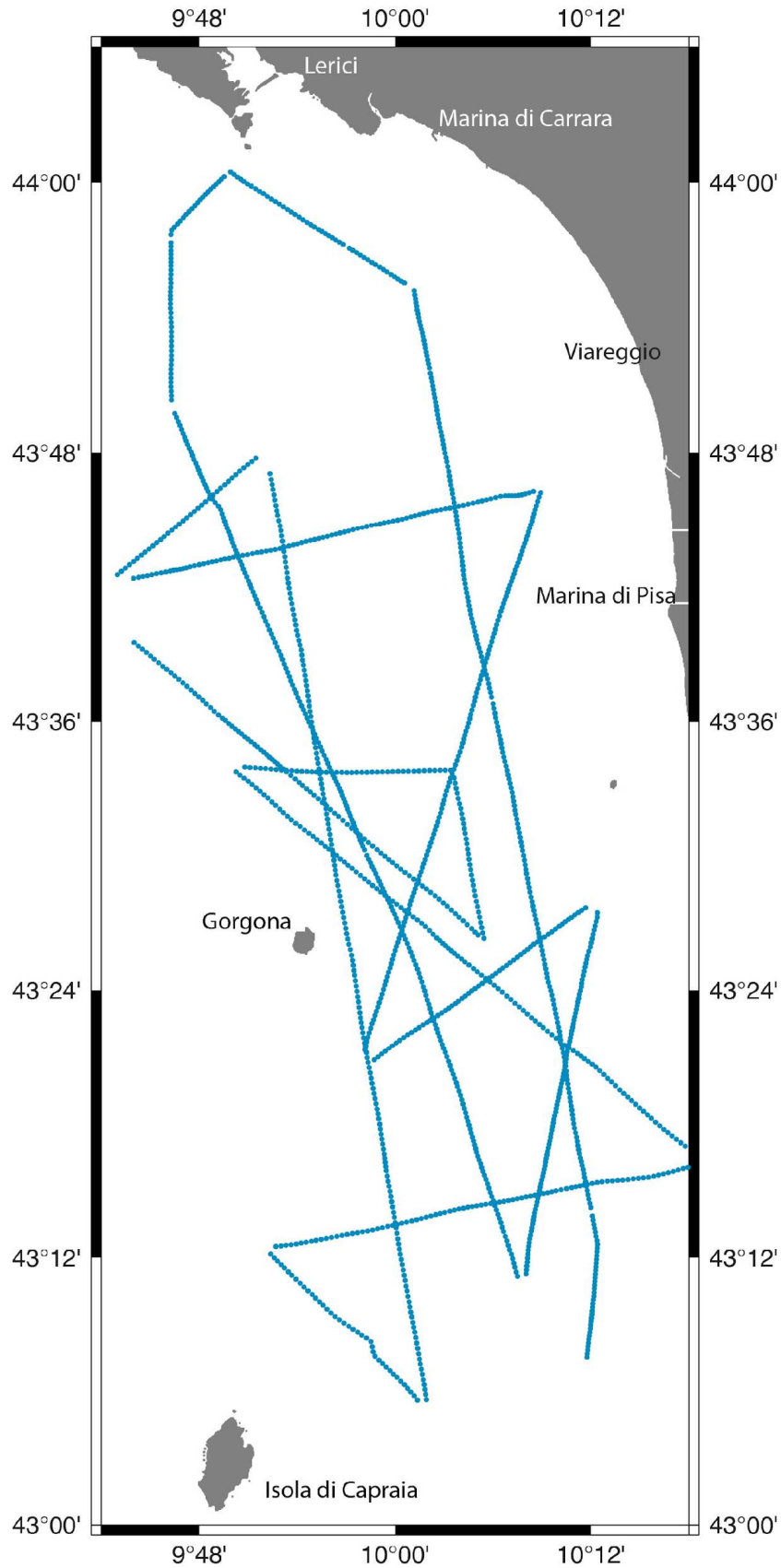
Rovida, A.; Locati, M.; Camassi, R.; Lolli, B.; Gasperini, P., 2020. The Italian earthquake catalogue CPTI15. *Bull. Earthq. Eng.*, 18, 2953–2984.

Stanghellini, G., Del Bianco, F., Gasperini, L., 2020. OpenSWAP, an Open Architecture, Low Cost Class of Autonomous Surface Vehicles for Geophysical Surveys in the Shallow Water Environment. *Remote Sensing*, 12(16), 2575.

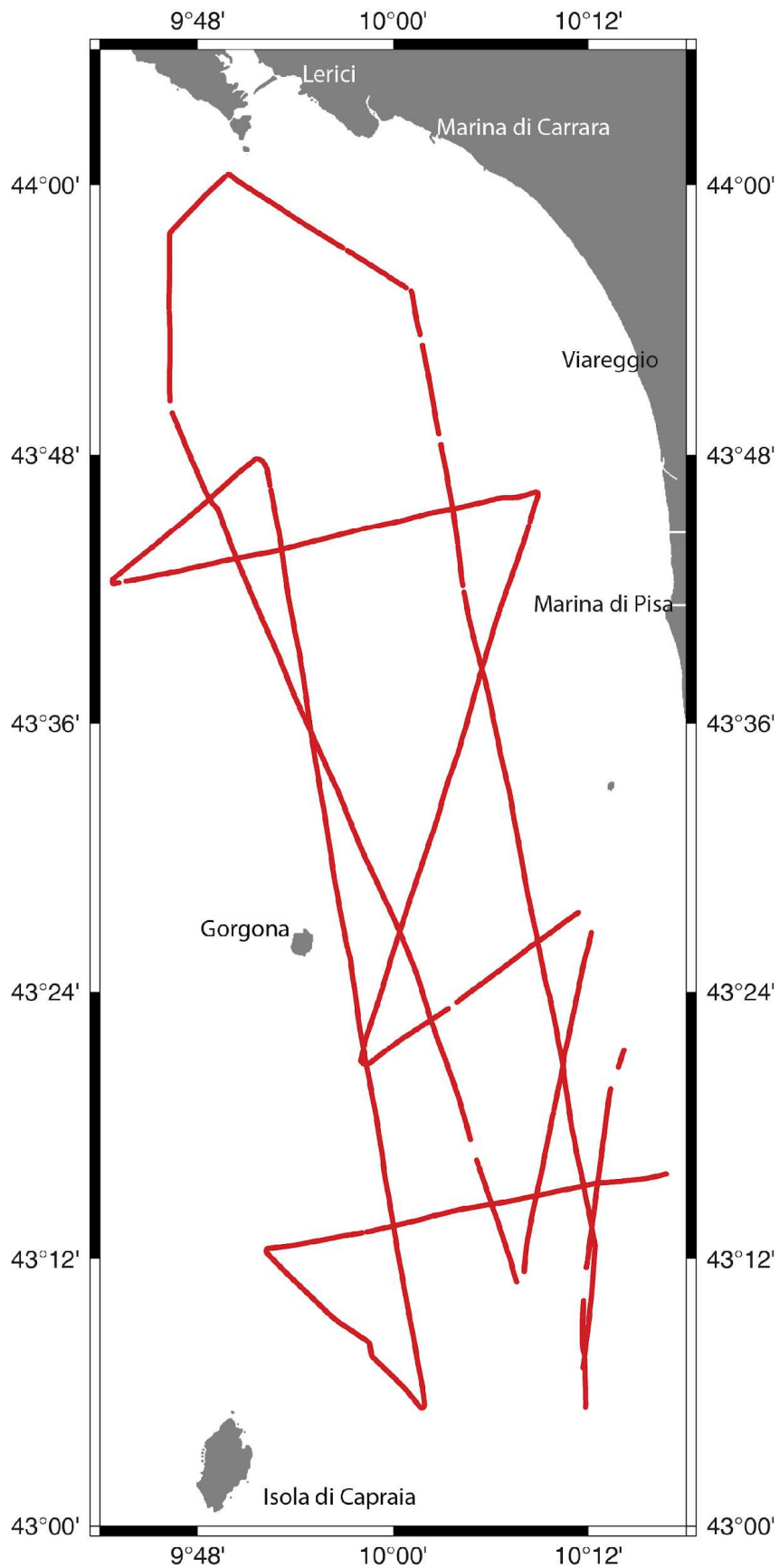
### ALLEGATO 1 – DIARIO DI BORDO

Data	Ora UTC (ora locale -2)	Evento
06/05/2022	11:10	Imbarco nel porto di Livorno, molo Italia. Stand by meteo.
07/05/2022	08:00	Configurazione DGPS Dallaporta- Configurazione delle postazioni in laboratorio (elettronica per acquisizione sismica e per navigazione). Stand by meteo.
08/05/2022	08:10	Chirp in acqua (montato a palo)
08/05/2022	08:50	Inizio acquisizione linee Chip
08/05/2022	09:50	Sorgente e streamer a mare
08/05/2022	16:15	Inizio acquisizione linee multicanale
12/05/2022	13:59	Fine acquisizione chirp e multicanale
12/05/2022	18:02	Magnetometro a mare
12/05/2022	18:08	Inizio acquisizione dato magnetometrico
13/05/2022	05:00	Fine acquisizione magnetometro
13/05/2022	06:02	Magnetometro a bordo
13/05/2022	07:00	Inizio operazioni di carotaggio
13/05/2022	15:20	Fine operazioni di carotaggio
13/05/2022	15:31	Magnetometro a mare
13/05/2022	15:34	Inizio registrazione magnetometro
14/05/2022	06:00	Fine acquisizione magnetometro
14/05/2022	06:25	Magnetometro a bordo
14/05/2022	07:00	Veicolo Autonomo a mare
14/05/2022	14:30	Veicolo Autonomo a bordo
14/05/2022	14:42	Sonda
14/05/2022	15:37	Inizio registrazione megnetometro
15/05/2022	08:20	Magnetometro a bordo
15/05/2022	08:15	Test sonda valeport
15/05/2022	10:00	Arrivo in porto a Livorno

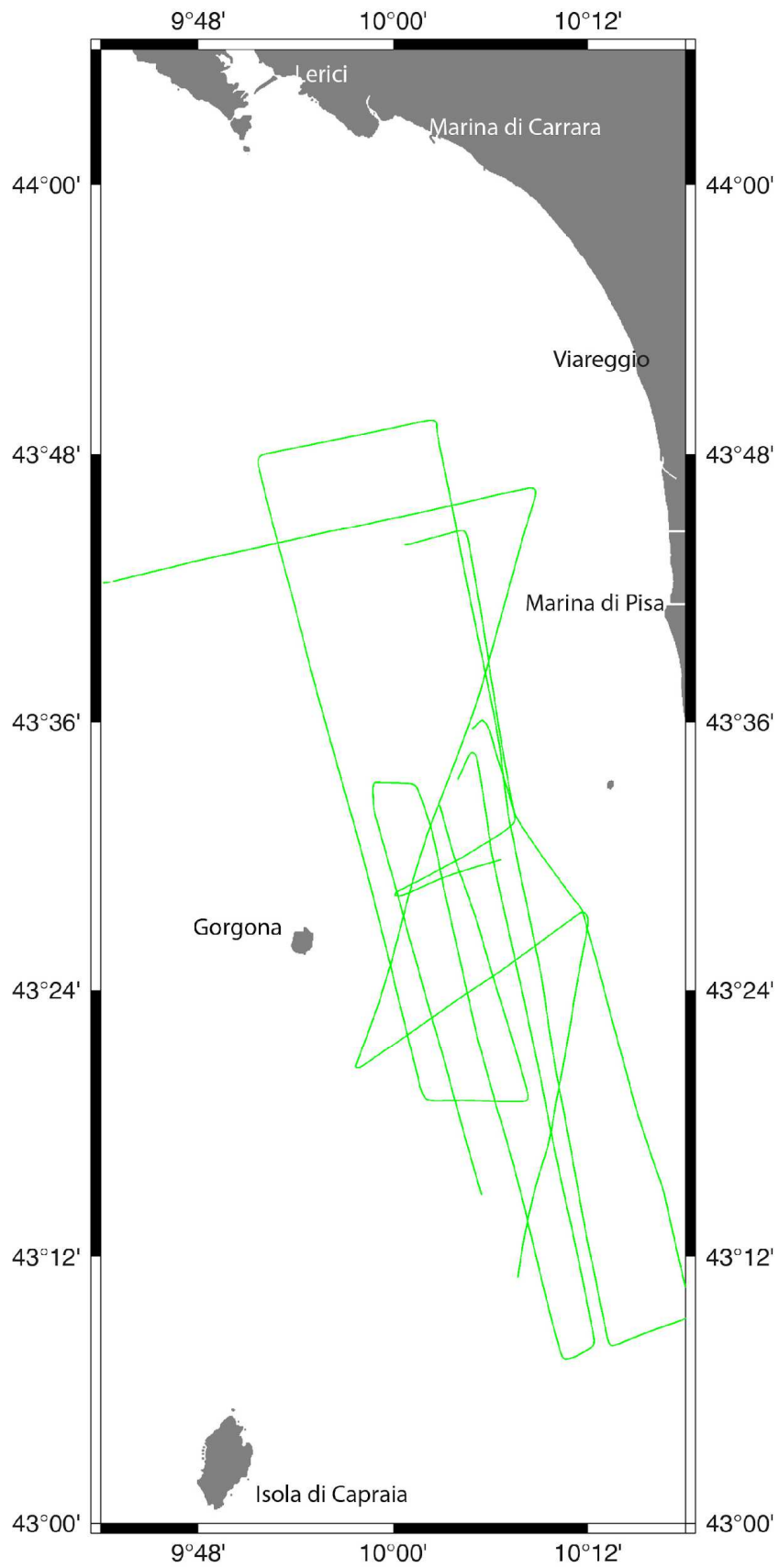
## ALLEGATO 2: MAPPA DI POSIZIONE DELLE LINEE SISMICHE MULTICANALE



## ALLEGATO 3 – MAPPA DI POSIZIONE DEI DATI CHIRP



## ALLEGATO 4 – MAPPA DI NAVIGAZIONE DEI DATI MAGNETOMETRICI



**ALLEGATO 5 – Mappa di posizione delle stazioni di carotaggio**