



ISPRA

Dipartimento per il
SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA
Organo Cartografico dello Stato (legge n°68 del 2.2. 1960)



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

MEMORIE

DESCRITTIVE DELLA

CARTA GEOLOGICA D'ITALIA

VOLUME 105

**Inventario delle emissioni fluide
nei mari italiani**
Inventory of fluid emissions in Italian Seas





ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA

Organo Cartografico dello Stato (legge n° 68 del 2. 2. 1960)



MEMORIE

DESCRITTIVE DELLA

CARTA GEOLOGICA D'ITALIA

VOLUME 105

Inventario delle emissioni fluide nei mari italiani

Inventory of fluid emissions in Italian Seas

di

ANDALORO F., ANDOLINA C., BABICH A., BATTAGLINI L., BEAUBIEN S.,
BOHRMANN G., BORTOLUZZI G., BOSMAN A., BusetTI M., CANDONI O.,
CANESE S., CAPACCIONI B., CARUSO C., CATALANO R., CERAMICOLA S.,
CHIOCCI F.L., COLIZZA E., CONTE A.M., CORBO A., COVA A., D'ANGELO S.,
DE GIOSA F., DEL BEN A., DEMONTE P., DI BELLA L., DONDA F., D'ONGHIA M.,
ESPOSITO V., FIORENTINO A., FREZZA V., GAGLIOTI M., GAMBI M.C.,
GELETTI R., GIORDANO P., GORDINI E., GRAZIANI S., GUGLIANDOLO C.,
INGRASSIA M., ITALIANO F., LAZZARO G., LOHER M., LONGO M., LORETO M.F.,
LUCCHI R.G., MACELLONI L., MANCINELLA D., MANCUSO M.R., MANTERO D.,
MARTORELLI E., MASCLE J., MAZZOLA A., MOCNIK A., PRAEG D., ROMEO T.,
SPAGNOLI F., SPOSATO A., TEIXIDO N., TESTARDI M., VALENZANO E.,
VIZZINI S., VOLPI V.

Editors

Silvana D'ANGELO, Loredana BATTAGLINI, Andrea FIORENTINO

In copertina e in IV di copertina: foto di VASSALLO P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli
in GAMBÌ *et alii*, questo volume

Realizzazione iconografica: MARIA LUISA VATOVEC

La redazione raccomanda per la citazione di questo volume la seguente dizione:

D'ANGELO S., BATTAGLINI L. & FIORENTINO A. (Eds) (2020) - *Inventario delle emissioni fluide nei mari italiani*.
Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., Dip. per il Serv. Geol. d'It., ISPRA, **105**: pp. 110, 60 figg., 3 tav., 4 tabb.,
D.R.E.Am Italia, Firenze.

Direttore responsabile: CLAUDIO CAMPOBASSO

Responsabile del coordinamento attività per la stampa delle pubblicazioni Cartografico-Editoriali: Domenico TACCHIA

SERVIZIO PER LA GEOLOGIA STRUTTURALE E MARINA, IL RILEVAMENTO E LA CARTOGRAFIA GEOLOGICA

Dirigente: Claudio CAMPOBASSO (*ad interim*)

REDAZIONE a cura del *Settore Cartografia*

Responsabile del Settore: Maria Luisa VATOVEC

Allestimento Editoriale digitale: Maria Luisa VATOVEC

ISBN 978-88-9311-077-8

ISSN 05360242 *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*

Stampa: D.R.E.Am Italia - Pistoia 2020

Lo studio della geologia dei fondali marini permette di completare l'inquadramento geologico e approfondire la conoscenza della geodinamica del territorio italiano, portando alla luce preziose informazioni non immediatamente analizzabili con i consueti metodi di rilevamento geologico.

La conoscenza sempre più dettagliata della morfologia e della costituzione geologica del fondo marino ha fornito risposte fondamentali nel delineare l'evoluzione delle strutture geologiche nella loro continuità spaziale. Molti fenomeni geologici sottomarini inoltre influenzano direttamente alcune caratteristiche ambientali delle aree marino costiere e gli habitat degli organismi che vivono in mare.

È il caso delle emanazioni fluide, testimoni dell'attività vulcanica e del rapido sollevamento della gran parte del territorio italiano.

I lavori presentati in questo volume segnalano la presenza del fenomeno nelle sue diverse implicazioni: come base per lo studio di particolari habitat bentonici o come corollario a studi di geodinamica in aree particolarmente attive. Alcune segnalazioni provengono dalla banca dati della Carta Geologica d'Italia (Progetto CARG). Questo volume vuole avviare un primo inventario del fenomeno a carattere nazionale per collaborare alla diffusione e condivisione, in ambito europeo, della conoscenza geologica di base.

The study of marine seafloors geology allows to complete the geological framework of the Italian territory and to improve the knowledge on its geodynamics. It provides relevant information which generally cannot be obtained by means of traditional geological surveys.

Detailed knowledge of the morphology and geological characteristics of the seabottom provides fundamental evidences that underpin the evolution and spatial continuity of geological structures. Moreover, many geological events have a direct influence on a few environmental characteristics of marine coastal areas as well as on marine habitats and organisms.

Fluid emissions are one type of geological events; they provide evidence of volcanic activity and of the fast uplift of most of the Italian territory.

Contributions gathered within this volume report occurrences of fluid emissions and their characteristics. Fluid emissions can be useful in the study of benthic habitats or can complement geodynamic studies in particularly tectonically active areas. Several occurrences reported herein were obtained from the national database of the Geological Map of Italy (CARG Project). This volume aims at starting a national inventory of fluid emissions in order to contribute to disseminate and share, at European level, basic geological knowledge.

Claudio Campobasso

Direttore del Dipartimento per il Servizio Geologico

Premessa

Foreword

Le emissioni fluide che interessano i fondali marini derivano dalla presenza di gas endogeni di varia natura presenti in aree di vulcanismo estinto o attivo, in zone tettonicamente attive e in aree ad alto tasso di sedimentazione. Si può trattare di fluidi vulcanici e idrotermali riferiti a centri di espansione oceanici, archi insulari, aree vulcaniche intra-placca, o fluidi biogenici che derivano da alterazioni chimico-fisiche di materiale organico intrappolato nelle coltri sedimentarie.

Il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA ha affrontato questo argomento per le aree marine nazionali, nell'ambito di un progetto europeo commissionato dalla DG MARE (*Maritime Affairs and Fisheries*), con l'intento di costituire un *database* di carattere nazionale dei principali eventi geologici, secondo standard europei.

EMODnet (*European Marine Observation and Data Network*) è un Progetto portato avanti, a partire dal 2009, da una rete di organizzazioni che lavorano insieme per assemblare da fonti diverse e distribuire in forma armonizzata dati, metadati e prodotti sulle acque europee costiere e oceaniche.

L'obiettivo del Progetto è la costruzione di un comune punto d'accesso *online* per la consultazione dei dati esistenti (<http://www.emodnet.eu/>), contenente informazioni rappresentate attraverso carte digitali, a diverse risoluzioni, delle aree marine europee; le informazioni collazionate riguardano batimetria, geologia, *habitat* ed ecosistemi, attività antropiche, accompagnate da informazioni correlate su condizioni fisiche, chimiche e biologiche della colonna d'acqua.

Attraverso il Portale di EMODnet Geology (<http://www.emodnet-geology.eu/>) è possibile consultare ed esplorare le banche dati geologiche delle aree marine europee, prevalentemente disponibili presso i servizi geologici nazionali di 30 paesi europei.

Ad oggi sul Portale sono disponibili, oltre ai servizi WMS, i *dataset* originali riguardanti:

- dati geologici armonizzati dei fondali alle scale 1:100.000 e 1:250.000 ove disponibili e alla scala 1:1.000.000 nelle altre aree;
- informazioni sull'evoluzione delle coste (migrazione; erosione; accrezione; resilienza/vulnerabilità);
- dati inerenti gli eventi geologici con *link* a ulteriori *database* specialistici;
- località minerarie, idrocarburi e aggregati minerali;
- paesaggi sommersi.

Uno dei temi del Progetto EMODnet Geology riguarda "*Geological events and probabilities*", ed è coordinato dal Servizio Geologico d'Italia. L'obiettivo è l'identificazione e la rappresentazione cartografica degli eventi geologici significativi che includono una serie di fenomenologie presenti nei mari europei: frane sottomarine, terremoti, strutture vulcaniche, tettonica quaternaria, tsunami ed emissioni fluide; questi elementi sono spesso associati fra loro in una dinamica geologica quanto mai complessa ed articolata.

Per quanto riguarda le emissioni fluide sottomarine, attualmente non esiste un inventario nazionale. Questo volume raccoglie segnalazioni da parte di studiosi che hanno osservato il fenomeno nel corso di ricerche volte all'analisi di particolari ricadute del fenomeno in diversi ambiti: dallo studio di eventi geologici, come la tettonica, il vulcanismo o la sismicità, agli *habitat* bentonici, all'acidificazione delle acque marine. Per questo motivo l'inventario si riferisce soltanto alle evidenze di superficie di tale fenomeno e si concentra sulla sua distribuzione geografica

Per analogia di forme e caratteri fisico-ambientali, è stato inserito nel volume anche un lavoro relativo a sorgenti sottomarine nel Golfo di Taranto, descritte da VALENZANO *et alii*, allo scopo di sottolineare con un esempio la necessità di superare visioni troppo specialistiche di un fenomeno in nome della complessità dello studio dell'ambiente.

Ringraziamo gli Autori che hanno accettato di presentare i loro contributi in questo contesto, dimostrando come dati acquisiti per progetti e finalità di studio peculiari e differenti possano entrare a far parte di un patrimonio di conoscenze condiviso e omogeneo. Allo stesso tempo i ricercatori europei hanno così la possibilità di entrare in una rete di contatti interdisciplinari che forniscono un orizzonte più ampio ai singoli ambiti di ricerca.

Fluid emissions affecting the seabed derive from the presence of endogenous gases of various origins present in areas of extinct or active volcanism, in tectonically active areas and in areas where sedimentation rates are high. Fluids can be of volcanic and hydrothermal origin related to centers of oceanic expansion, insular arcs, intra-plate volcanic areas, or they can be of biogenic origin derived from chemical-physical alterations of organic material trapped in the sediments.

The Geological Survey of Italy - ISPRA tackled this topic concerning national submerged areas, within a European project promoted by DG MARE (Maritime Affairs and Fisheries), aiming to create a national database of geological events, according to European standards.

EMODnet (European Marine Observation and Data Network) is a Project carried out, since 2009, by a network of organizations working together to gather information from different sources and to provide freely available harmonized data, metadata and products on European seas.

The aim of the Project is the creation of a common online portal to access existing data (<http://www.emodnet.eu/>). The Portal provides information represented as digital maps of European sea areas at different resolutions, concerning bathymetry, geology, habitat and ecosystems, human activities, complemented by information on physical, chemical and biological conditions of the water column.

The EMODnet Geology Portal (<http://www.emodnet-geology.eu/>) allows to browse through geological databases of European marine areas, stored mainly at national geological surveys of 30 European countries.

Currently, on the Portal, beside WMS services, original datasets are available concerning:

- harmonized geological data at 1: 100,000 and 1: 250,000 scale where available and at 1: 1,000,000 scale in less detailed areas;*
- information on coastal migration (erosion, accretion, resilience/vulnerability);*
- data regarding geological events with links to additional databases;*
- mining locations, hydrocarbons and mineral aggregates;*
- submerged landscapes.*

One of the EMODnet Geology Project themes focuses on “Geological events and probabilities” and is led by the Geological Survey of Italy. Its purpose is the identification and mapping of significant geological events occurring in European seas, such as submarine landslides, earthquakes, volcanic structures, Quaternary tectonics, tsunamis and fluid emissions. These events are often connected with each other in a complex geological dynamics.

Insofar as submarine fluid emissions are concerned, to date there is no national inventory. This volume collects reports from scientists who have observed fluid emissions during their researches aimed at the study of particular effects of the phenomenon in different settings: from the study of geological events, such as tectonics, volcanism or seismicity, to benthic habitats, to the acidification of sea waters. For this reason the present inventory only reports surface evidences of the phenomenon and focuses on its geographical distribution.

By analogy of physical and environmental morphologies and characteristics, a contribution on submarine springs in the Gulf of Taranto, described by Valenzano et alii, has been included in the volume, aimed to underline with an example the need to overcome approaches too specialized to events, in the name of the complexity of the study of the environment.

We thank the Authors who accepted to present their contributions in the frame of this volume, demonstrating how data acquired for particular and different study projects and purposes can become part of a shared and homogeneous knowledge. At the same time, European researchers have thus the possibility to enter a network of interdisciplinary contacts that provides a broader scope to individual research areas.

Raccolta sistematica e archiviazione di dati sulle emissioni fluide sommerse

Systematic collation and storage of data concerning submerged fluid emissions

D'ANGELO S.(*), BATTAGLINI L.(*)
FIORENTINO A.(*)

RIASSUNTO - Le emissioni di fluidi dai fondali marini sono individuate attraverso l'acquisizione di dati geofisici da remoto. Possono essere di origine vulcanica o derivare da processi geologici o biologici. La maggior parte delle sostanze gassose è costituita da metano e biossido di carbonio. Emissioni fluide sono state segnalate da molti autori che le hanno individuate anche nel corso di studi finalizzati ad altri scopi. Diverse segnalazioni sono contenute nei fogli della Carta Geologica d'Italia che includono aree sommerse.

Le emissioni di fluidi sono state riconosciute come un evento geologico e pertanto incluse tra gli elementi da rappresentare sulle carte disponibili online del Progetto europeo EMODnet Geology, finalizzato alla raccolta, armonizzazione e rappresentazione di dati relativi alla geologia dei mari europei. Il Servizio Geologico d'Italia coordina le attività del Progetto riguardanti le emissioni di fluidi e, in collaborazione con gli altri partner, ha individuato gli attributi per caratterizzarle, che si sono mostrati validi per i casi di studio esposti in questo volume.

PAROLE CHIAVE: Inventario, fondale marino, emissione fluida, Europa, dati geofisici, cartografia geologica, EMODnet Geology

ABSTRACT - Fluid emissions on seafloors are detected by geophysical surveys. They can be of volcanic origin or derive from geological or biological processes. Most of the emitted gases are methane and carbon dioxide.

Fluid emissions have been identified by many authors even during researches addressed at different objectives. The Geological Map of Italy also contains several indications of fluid emissions in the maps including submerged areas.

Fluid emissions have been acknowledged as a geological event and included within the features to be represented in the digital maps available online of the EMODnet Geology European Project, aimed at the collection, harmonisation and representation of geological data from European seas. The Geological Survey of Italy coordinates the Project activities concerning fluid emissions and, through cooperation with other Partners, has identified attributes useful to characterise them. Such attributes have been successfully applied to the study cases collected within this volume.

KEY WORDS: Fluid emission, geophysical data, geological mapping, inventory, ocean floors, Europe, EMODnet Geology

1. - INTRODUZIONE

Le emanazioni di fluidi sul fondale marino furono evidenziate a partire dalla metà degli anni '60 grazie all'uso delle strumentazioni geofisiche (*sidescan sonar* ed ecografi) che ne mettevano in luce le modificazioni morfologiche associate. Furono riconosciute per la prima volta al largo della Nova Scotia da KING & MACLEAN nel 1970, che coniarono la prima definizione di "pockmark". Nel corso dei decenni successivi il fenomeno della risalita di fluidi attraverso i sedimenti dei fondali marini venne riconosciuto, e approfondito, soprattutto a causa della interferenza acustica che genera nelle indagini sismiche, ma anche sulla base dell'analisi di particolari litologie (*mud breccia*) campionate in sondaggio (CITA, 1981), rivelando le proprie caratteristiche di evento geologico che può verificarsi in ambiti e con geni diverse (JUDD, 2003).

Le emanazioni fluide sono state classificate in base al processo che le genera (*cold seep, hydrothermal vent, volcanoes seep, groundwater seep, etc.*) o in base ai materiali di derivazione geologica o biologica associati (*duomi salini, vulcani di fango, brine pool, bacterial mat, carbonati autigeni*). Sono caratterizzate da morfologie o da processi erosivi o deposizionali legati alla composizione e ai meccanismi di fuoriuscita dei fluidi; spesso sono associate a caratteristiche comunità biotiche.

Le sostanze gassose, in prevalenza metano e biossido di carbonio, possono svilupparsi nei sedimenti marini e/o impregnarli ed essere poi espulse sui fondali a causa della pressione interstiziale, alterando talora le caratteristiche meccaniche dei corpi sedimentari attraversati e inducendo spesso fenomeni di instabilità (ROTHWELL *et alii* 1998; HOVLAND *et alii*, 2005). Esaminate in ampi contesti le emissioni di questi gas sono state anche considerate in relazione agli studi sui cambiamenti

(*)Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia, ISPRA, Roma

climatici, in quanto sorgenti importanti di gas nell'atmosfera (DICKENS *et alii*, 1997; FLEISCHER *et alii*, 2001; DIMITROV, 2002; JUDD *et alii*, 2002).

2. - STUDI RECENTI SUL FENOMENO DELLE EMANAZIONI FLUIDE NEL MEDITERRANEO

ROTHWELL *et alii* (1998), in uno studio della megatorbidite presente nel Bacino Balearico, evidenziano nel Mediterraneo occidentale, attraverso l'analisi delle registrazioni sismiche e di carotaggi, il rilascio di gas metano attraverso il deposito. La megatorbidite costituisce un evento di grande portata, probabilmente generato da un terremoto, che ha spostato un cospicuo volume di sedimenti (500 km³ ca.), che in base ai dati studiati forniscono una età dell'evento stimata in 22.000 anni fa, durante il *Last Glacial Maximum*.

Sintesi sulle emanazioni fluide nel Mediterraneo orientale, dove tali manifestazioni sono più comuni, sono state effettuate da diversi Autori. In DIMITROV (2002) il vulcanismo di fango nel *Mediterranean Ridge* (un complesso di accrezione) e quello della piana abissale del Mar Nero (un bacino di retroarco con regime tettonico estensionale) sono descritti come casi di studio per mostrare differenze morfologiche e fattori comuni nello sviluppo dei vulcani di fango.

ZITTER (2004) analizza il controllo tettonico nelle emissioni fluide nel Mediterraneo orientale: la dorsale di Anassimandro, all'incrocio tra l'Arco Ellenico e l'Arco di Cipro, è costituita da un complesso di tre *seamount* con più di 1.000 m di dislivello, distaccati dal margine turco. Insieme alle strutture vicine (*Florence Rise* a sud-ovest della Turchia), essi formano un'area di accomodamento tettonico tra le deformazioni della regione egea-turca e di quella cipriota. La deformazione ancora attiva dell'area indica che la spinta della collisione viene gradualmente assorbita lungo una grande zona transpressiva orientata NO-SE. I vulcani di fango si trovano lungo il ramo occidentale dell'arco di Cipro (parte orientale del *seamount* Anassimandro e *Florence Rise*) in associazione con una rete di faglie normali a componente destra, orientate N150°, parallelamente alla struttura e di faglie trascorrenti sinistre orientate N070°. Le faglie fungono da condotto preferenziale per l'espulsione dei fluidi sotto pressione.

HUGUEN *et alii* (2005) sottolineano la grande variabilità dei vulcani di fango a partire dalla parte centrale del complesso di accrezione del *Mediterranean Ridge* verso il limite settentrionale del suo sovrascorrimento contro il blocco continentale cretese. Sono evidenziate le differenze tra i grandi vulcani di fango, costituiti da flussi successivi e associati a carbonati diagenetici e emissione di fluidi, e i più piccoli duomi di fango, caratterizzati da versanti ripidi soggetti a instabilità della coltre sedimentaria e privi di qualsiasi testimonianza di

altre attività. Viene proposto un modello qualitativo per la messa in posto dei vulcani di fango, basato sull'integrazione delle indagini sismiche ad alta risoluzione con l'assetto geologico e strutturale del *Mediterranean Ridge*.

MASCLE *et alii* (2014) forniscono un'analisi comparativa tra le principali zone interessate da importanti evenienze di emissioni fluide nell'area del Mediterraneo con quelle nel Golfo di Cadice. Vengono evidenziati i diversi assetti geologico-strutturali correlati al fenomeno: a) potenti cunei di accrezione di margine convergente (Golfo di Cadice, Arco Calabro esterno, *Mediterranean Ridge*, *Anaximander mountains*-Siria); b) margine passivo nord-africano (delta del Nilo); c) bacini estensionali di retro-arco (mare di Alboran occidentale, margine calabro tirrenico).

BERTONI *et alii* (2017) reinterpretano con dati sismici un inventario preesistente. Dei 141 eventi censiti 82 sono rilevabili sul fondo e 59 sono sepolti; tutti sono parte della storia evolutiva del bacino negli ultimi 6 milioni di anni ca. Il fenomeno si sviluppa in momenti diversi nelle varie aree, dal delta del Nilo ai bacini di Levante, Erodoto, Cipro e Latakia. Vengono evidenziati *pockmark*, vulcani di fango, condotti di risalita, intrusioni clastiche e strutture di collasso. Solo una piccola parte delle emissioni sono originate da depositi pre-evaporitici e sono correlate a marcate sovrappressioni e fratturazione idraulica confermando l'ottima azione sigillante delle evaporiti messiniane.

La relazione con l'assetto tettonico è predominante nell'area mediterranea, come si evince dall'analisi di molti autori.

3. - INFORMAZIONI DERIVANTI DAL PROGETTO CARG

Alcune emanazioni di fluidi del territorio sommerso italiano vengono segnalate nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Progetto CARG); nella banca dati associata alla carta esse vengono indicate e codificate negli strati informativi dei processi geologici particolari, degli elementi geomorfologici e delle risorse e prospezioni.

A causa dei limiti geografici dei Fogli geologici (le aree marine investigate sono solo quelle adiacenti alle aree emerse rilevate), le emanazioni segnalate nell'ambito del Progetto CARG ricadono principalmente nelle aree marino-costiere o di piattaforma interna. Nel corso dei rilevamenti delle aree marine per la cartografia geologica, effettuati mediante osservazioni indirette (geofisica, Sidescan e ROV) e tramite immersioni ARA, le evidenze di espulsione di fluidi sono state cartografate e classificate, in relazione alla scala di rilevamento, come: zone interessate da manifestazioni gassose, zone a vulcanelli di fango, aree di alterazione idrotermale, campi di fumarole, emissioni gassose fredde o ad alta temperatura (fig. 1).

| Feature | Status | Format | Definition | Description | Reference | Remarks |
|--------------------------------|-----------|-------------------|---|--|--|---------|
| Mfe_pt, Mfe_lin, Mfe_pol | mandatory | Text (8) | points, polylines, polygons | unique identifier code (two letters country code, which corresponds to ISO3166- code e.g. "IT" plus progressive numbers that identify each spatial occurrence in the map e.g. "IT00001", "IT00002", "IT00003", etc.) | | |
| Type | | Text (50) | Mud volcanoes, fluid emissions, unknown | | | |
| Name | | Text (50) | literature name | | | |
| Region | | Text (50) | Areas of distribution, regions of action, emissions provinces | | LYOBOMIR I. DIMITROV (2002) - Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments. Earth-Science Reviews 59 | |
| Activity_age | | Text (50) | geochronology | Indicate the age or the range of activity | | |
| Activity type | | Text (50) | if possible describe the activity type or classification | | | |
| Morphological type | | Text (50) | caldera, composite/compound, cone, crater, field, ring, depression, pockmark area, seep, vent, fissure vent | | | |
| Height | | Numeric Short (4) | meters | elevation above seafloor | | |
| Composition | | Text (100) | chemical composition and temperature; for mud volcanoes also lithology | | | |
| References | mandatory | Text (200) | in case of long text, fill with the name of a file.doc named "References + the identifier code" as in the following example: References_mfe_pol_IT00001.doc | | | |
| Comment | | Text (200) | free comments | | | |

Fig. 1 - Format per la caratterizzazione degli attributi delle emanazioni fluide.
- *Format for attribute characterisation of fluid emissions.*

4. - EMANAZIONI FLUIDE COME EVENTI GEOLOGICI

Un inventario a carattere nazionale di eventi geologici deve essere il più possibile omogeneo ed integrato secondo standard riconosciuti: per l'Europa lo standard di riferimento è la direttiva 2007/2/CE INSPIRE (INSPIRE THEMATIC WORKING GROUP GEOLOGY, 2013). La standardizzazione rende possibile una informazione di base completa e fruibile per chiunque sia interessato a studiare ed approfondire l'argomento nelle sue diverse articolazioni.

Dal 2013 il Servizio Geologico d'Italia è partner per l'Italia del Progetto EMODnet Geology e, in quanto coordinatore del *Work Package "Geological*

events and probabilities", ha curato la cartografia numerica, la classificazione e l'armonizzazione, a livello europeo, dei principali eventi geologici relativi ai fondali marini dei Paesi europei. Nell'ambito delle attività del Servizio Geologico d'Italia il valore del Progetto EMODnet-Geology è consistito principalmente nell'acquisizione di un'ottica europea nella strutturazione, condivisione, e divulgazione di *database* geologici. Il lavoro di ricognizione che è stato svolto per il territorio italiano nell'ambito del Progetto ha inoltre messo in luce la carenza di una raccolta sistematica di informazioni geologiche relative ai fondali marini, a livello nazionale.

Poiché lo scopo principale di EMODnet è di creare una struttura dati interoperabile e condivisa

in accordo con gli standard europei, è stato necessario operare una categorizzazione semantica. Lo studio degli elementi geologici sommersi parte dall'individuazione di "manifestazioni" che vengono poi messe a confronto per identificarne gli elementi comuni ("comparazione"), in modo da trarne definizioni generali. Attraverso il riconoscimento di "equivalenze" tra i singoli elementi si può arrivare a una loro sistematizzazione per individuarne ed analizzarne l'origine.

Nell'ambito delle attività relative a EMODnet Geology, è stato necessario considerare le emissioni fluide sottomarine come argomento a sé stante; da un lato per integrare le informazioni relative alle strutture vulcaniche, fornendo dettagli in merito alle manifestazioni idrotermali associate; dall'altro, per distinguere nettamente le manifestazioni non collegate ad attività vulcanica. La presenza di emissioni fluide può costituire un'evidenza aggiuntiva per l'individuazione di aree tettonicamente attive o fornire indicazioni utili per la valutazione della stabilità dei depositi. Per la classificazione delle emanazioni fluide è stato stabilito un *format* (fig. 1 - tabella EMODnet) che permette di caratterizzare il fenomeno per mezzo di una serie di attributi: tipo di attività, tipo di morfologia, intervallo di tempo di attività, collocazione geografica, altezza, composizione dei prodotti emessi. Per essere funzionale, una tabella degli attributi deve essere esaustiva, per quanto riguarda le caratteristiche fondamentali del fenomeno, e allo stesso tempo elastica, al fine di consentire l'inserimento delle informazioni necessarie a caratterizzare il fenomeno e sufficienti affinché esso possa essere classificato all'interno di un *database* di ambito più ampio.

Applicata ai casi di studio esposti in questo volume, la tabella degli attributi delle emanazioni fluide ha sostenuto, con esito positivo, un ulteriore test di validità. Sono nel seguito descritti in maniera schematica diversi fenomeni di emanazioni fluide, distribuiti in tutto il territorio sommerso nazionale.

BIBLIOGRAFIA

- BERTONI C., KIRKHAM C., CARTWRIGHT J., HODGSON N. & RODRIGUEZ K. (2017) - *Seismic indicators of focused fluid flow and cross-episodic seepage in the Eastern Mediterranean*. Marine and Petroleum Geology, 88, 472-488.
- CITA M.B. (1981) - *Prometheus mud breccia: an example of shale diapirism in the western Mediterranean ridge*. In: *Annales géologiques des Pays helléniques*, 30, 543-569.
- DICKENS G.R., CASTILLO M.M. & WALKER J.G.C. (1997) - *A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate*. Geology, 25, 259-262.
- DIMITROV L.I. (2002) - *Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments*. Earth-Science Reviews, 59(1-4), 49-76.
- EMODnet (European Marine Observation and Data Network) - Geology. <http://www.emodnet-geology.eu/> accesso 07/11/2019
- FLEISCHER P., ORSI T., RICHARDSON M. & ANDERSON A. (2001) - *Distribution of free gas in marine sediments: a global overview*. Geo-Marine Letters, 21(2), 103-122.
- HOVLAND M., SVENSEN H., FORSBERG C.F., JOHANSEN H., FICHLER C., FOSSA J.H., JONSSON R. & RUESLÄTTEN H. (2005) - *Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway. Products of sediment degassing*. Marine Geology, 218, 191-206.
- HUGUEN C., MASCLE J., WOODSIDE J., ZITTER T. & FOUCHER J.P. (2005) - *Mud volcanoes and mud domes of the Central Mediterranean Ridge: near-bottom and in situ observations*. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 52(10), 1911-1931.
- INSPIRE THEMATIC WORKING GROUP GEOLOGY (2013) - *D2.8.III.12 INSPIRE Data Specification on Geology - Technical Guidelines*. EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/ge> accesso 07/11/2019
- JUDD A.G. (2003) - *The global importance and context of methane escape from seabed*. Geo-Mar Lett, 23, 147-154.
- JUDD A.G., HOVLAND M., DIMITROV L.I., GARCIA GIL S. & JUKES V. (2002) - *The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change*. Geofluids, 2(2), 109-126.
- KING L.H. & MACLEAN B. (1970) - *Pockmarks on Scotian Shelf*. GSA Bulletin; 81(10): 3141-3148. doi: [https://doi.org/10.1130/00167606\(1970\)81\[3141:POTSS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/00167606(1970)81[3141:POTSS]2.0.CO;2)
- MASCLE J., MARY F., PRAEG D., BROSOLO L., CAMERA L., CERAMICOLA S. & DUPRÉ S. (2014) - *Distribution and geological control of mud volcanoes and other fluid/free gas seepage features in the Mediterranean Sea and nearby Gulf of Cadiz*. Geo-Marine Letters, 34(2-3), 89-110.
- ROTHWELL R.G., THOMPSON J. & KALHER G. (1998) - *Low-sea-level emplacement of a very large Late Pleistocene 'megaturbidite' in the western Mediterranean Sea*. Nature, 392, 377-380.
- ZITTER T.A. (2004) - *Mud volcanism and fluid emissions in Eastern Mediterranean neotectonic zones*. (Doctoral dissertation, Vrije Universiteit).

Evidenze geofisiche di emissioni di fluidi nel Golfo di Trieste (Nord Adriatico)

Geophysical evidence of fluids emission in the Gulf of Trieste (North Adriatic Sea)

BUSETTI M.(*), BABICH A.(**), DEL BEN A.(***)

RIASSUNTO - La presenza di fluidi nei sedimenti del Golfo di Trieste (Nord Adriatico) è caratterizzata da manifestazioni superficiali che sono state individuate nei dati di sismica ad alta risoluzione. In particolare nell'area a sud-ovest di Grado sono stati identificati sei siti con evidenze di accumulo di fluidi nei sedimenti, dispersione di fluidi nella colonna d'acqua, e presenza sul fondo mare di affioramenti rocciosi la cui genesi si ipotizza sia legata alla precipitazione di carbonato di calcio metano-derivato.

PAROLE CHIAVE: Adriatico, Golfo di Trieste, emissione fluida, fondale marino, fluidi, gas, migrazione, profilo geofisico.

ABSTRACT - The presence of fluids in the sediments of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) produces surface occurrences that have been identified by high resolution seismic data. In particular, south-west of Grado, six sites have been pinpointed with evidence of accumulation of fluids within the sediment, dispersion of fluids in the water column, and presence on the sea bottom of rocky outcrops whose genesis is assumed to be linked to the precipitation of calcium carbonate methane-derived.

KEY WORDS: Adriatic, Gulf of Trieste, fluid emission, ocean floors, fluids, gases, migration, geophysical profiles.

1. - INTRODUZIONE

Nel Nord Adriatico sono già note da tempo evidenze di fuoriuscite di fluidi, definite come “bromboli” nella terminologia locale. Esse furono documentate per la prima volta da MORGANTE (1940).

Nel Golfo di Trieste (estremità orientale del Nord Adriatico) i fluidi che fuoriescono dai sedimenti possono essere costituiti sia da gas che da acqua. La fase gassosa è composta principalmente da metano (81-84%), come è stato anche evidenziato da analisi su campioni (GORDINI, 2009). Dati di sismica multicanale evidenziano la migrazione di fluidi, verso la superficie attraverso la piattaforma carbonatica meso-cenozoica sepolta dai sedimenti terrigeni cenozoici e attraverso la copertura quaternaria. Il fenomeno risulta essere particolarmente concentrato in corrispondenza delle strutture tettoniche che interessano l'area (BUSETTI *et alii*, 2013). La piattaforma carbonatica costituisce un *reservoir* di acque a bassa entalpia

(*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico (Trieste)

(**) Aurisina Cave 5/A, 34011 Duino Aurisina (Trieste)

(***) Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università degli Studi di Trieste, via Weiss 1, 34127 Trieste

(DELLA VEDOVA *et alii*, 2008) di origine marina ed età miocenica (PETRINI *et alii*, 2013), che fuoriescono spontaneamente in sorgenti sottomarine lungo la costa settentrionale dell'Istria (ZUMER, 2004). Non si può peraltro escludere che congiuntamente all'acqua possano risalire anche gas, in particolare metano e/o altri idrocarburi (BUSETTI *et alii*, 2013).

Sul fondo mare, associate alle emissioni di gas, si trovano frequentemente degli affioramenti rocciosi costituiti da sabbie più o meno cementate spesso coperte da concrezioni organogene. Si ipotizza che l'origine di questi affioramenti possa essere legata alla precipitazione di carbonato di calcio metano-derivato che cementerebbe i sedimenti non consolidati (HOVLAND *et alii*, 1987). I livelli cementati verrebbero successivamente interessati dalla colonizzazione di organismi, alcuni dei quali biocostruttori (GORDINI *et alii*, 2012). Questi affioramenti, noti come "grebeni" (ma anche come grebani, tegnie o trezze), sono molto frequenti nel Nord Adriatico: attualmente ne sono stati individuati circa 250 (GORDINI *et alii*, 2004).

I siti presentati sono stati identificati nei profili *chirp* ad altissima risoluzione, acquisiti nel corso di due campagne geofisiche realizzate nel 2005 e nel 2009 con la N/R OGS Explora. L'interpretazione dei dati è stata eseguita con il *software* Kingdom® della IHS Markit.

2. - DESCRIZIONE DEI SITI

Il Golfo di Trieste, in particolare l'area a sud-ovest di Grado, è caratterizzato da una elevata concentrazione di affioramenti rocciosi e manifestazioni di fluidi, strutture quali piccoli vulcani di fango, *pockmark* e *plume* (GORDINI, 2009; BABICH, 2017). In base alle evidenze geofisiche nei profili *chirp*, sono stati individuati sei siti a 10-13 km a sud-ovest di Grado (fig. 1) con evidenze di fluidi nei sedimenti, dispersione di fluidi nella colonna d'acqua, e presenza sul fondo mare di affioramenti rocciosi (fig. 2).

L'evidenza acustica relativa alla presenza di fluidi nei sedimenti è data da zone di *blanking*, cioè zone in cui il segnale sismico è pressoché assente.

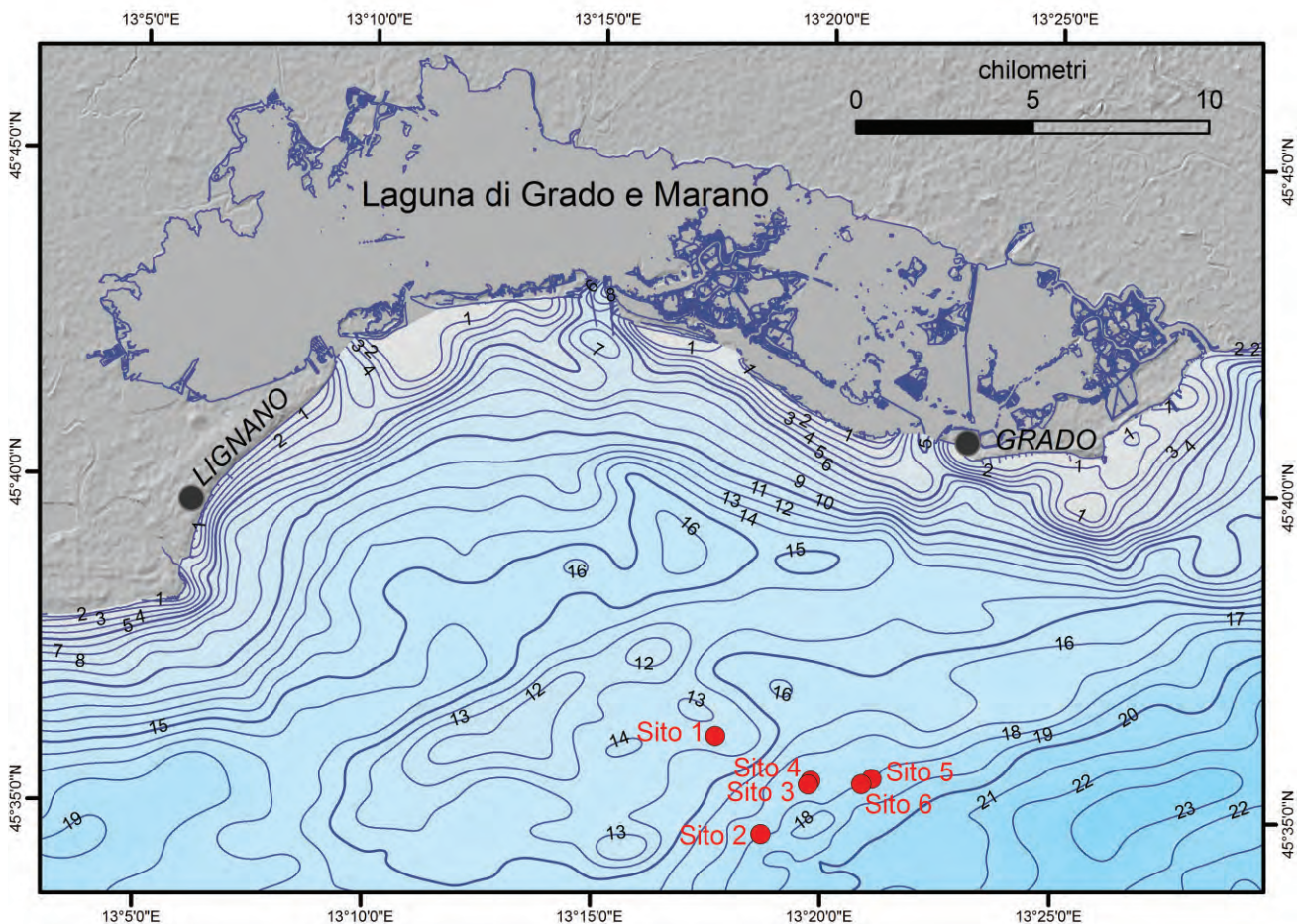


Fig. 1 - Mappa batimetrica (contour in metri, TROBEC *et alii*, 2017) con posizione dei siti dove sono presenti evidenze di fluidi nei sedimenti superficiali (vedi figura 2).
- Bathymetric map (contour lines in meter, TROBEC *et alii*, 2017) with location of the sites with evidences of fluids in the shallow sediment (see figure 2).

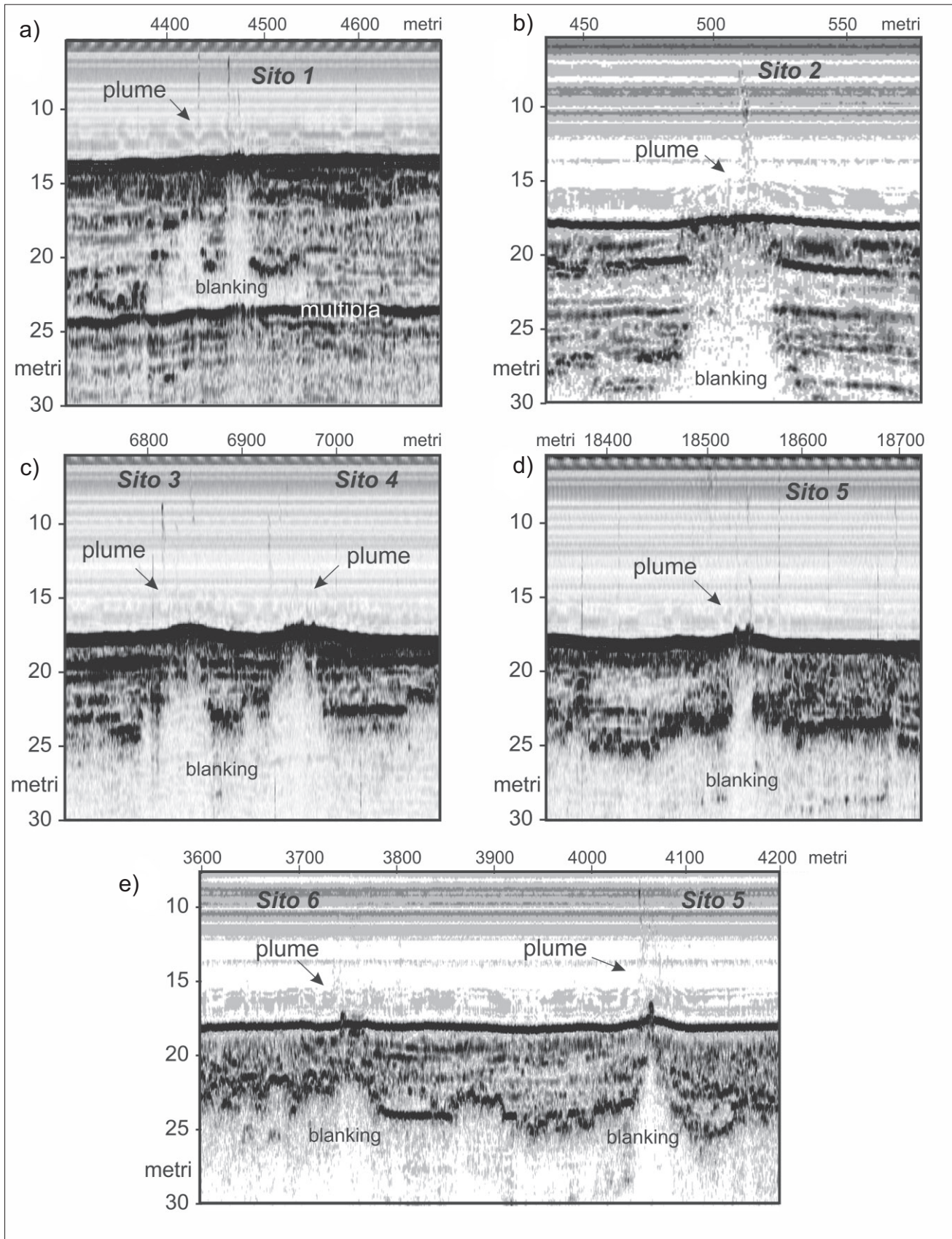


Fig. 2 - Profili *chirp* caratterizzati da evidenze di fluidi (*blinking*) nei sedimenti superficiali. La dispersione dei fluidi nella colonna d'acqua è testimoniata da *plume* che si innalzano per diversi metri dal fondo mare. In corrispondenza della loro fuoriuscita sul fondo mare sono presenti delle morfologie relative ad affioramenti rocciosi.

- *Chirp profiles with evidences of fluids in the shallow sediment (blinking). The dispersion of the fluids in the water column is testified by plumes rising for several meters from the sea floor. In correspondence of the fluid escapes from the sea floor, rocky outcrops are present.*

Tale fenomeno è causato dalla forte attenuazione delle alte frequenze contenute nel segnale acustico dovuto all'assorbimento e allo *scattering* delle bolle di gas nei sedimenti. Come conseguenza, solo il tetto del livello a gas dà luogo ad una riflessione, mentre i sedimenti sottostanti risultano sostanzialmente trasparenti (TOTH *et alii*, 2014). Nei profili utilizzati, il tetto dei settori caratterizzati da *blanking* è marcato da un riflettore ad elevata ampiezza (*enhanced reflections*): la sua discontinuità laterale conferma che non è originato da una discontinuità stratigrafica, ma da una disomogeneità dovuta alla distribuzione dei fluidi nella porosità dei sedimenti.

I siti individuati si trovano in un'area caratterizzata da un'ampia diffusione della facies acustica con *blanking*, al tetto della quale sono presenti riflettori ad elevata ampiezza. In particolare i profili *chirp* indicano che nei sedimenti fino alla profondità di circa 7-10 metri dal fondo mare, questa facies si estende per diverse centinaia di metri (fig. 2c, d, e). Localmente, da questo

livello i fluidi risalgono verso la superficie canalizzandosi nelle zone più ristrette dei camini, larghi circa 40-70 metri nella parte più profonda e con la tendenza a rastremarsi in diametri più ridotti verso il fondo del mare (fig. 2, tab. 1).

La dispersione dei fluidi nella colonna d'acqua genera dei *plume* che possono essere visibili nei profili *chirp* come riflessioni che perturbano le riflessioni relative allo strato d'acqua in prossimità del fondo mare (fig. 2b), e che si estendono in verticale fino a circa 10 metri (fig. 2, tab. 1).

In corrispondenza delle zone di accumulo di fluidi nei sedimenti e della loro dispersione nella colonna d'acqua, sono evidenti sul fondo mare delle morfologie quali rilievi convessi e/o tabulari relativi agli affioramenti rocciosi. Questi elementi possono estendersi fino a circa 100 metri in orizzontale ed elevarsi di circa 50 cm rispetto al fondo mare. Localmente in alcuni siti, su queste morfologie sono presenti degli elementi morfologici con dimensioni fino a circa 10 metri in larghezza e circa 50 cm di altezza.

Tab. 1 - Dimensioni dei camini relativi alla migrazione dei fluidi nei sedimenti, dei *plume* relativi alla dispersione dei fluidi nella colonna d'acqua, e descrizione della tipologia e dimensione delle morfologie relative agli affioramenti rocciosi sul fondo del mare dei siti individuati.

- Sizes of the chimneys related to fluid migration in the sediment, and of the plume related to the dispersion of the fluid in the water column, and description of type and size of the rocky outcrop on the sea floor.

| | Diametro dei camini | Estensione verticale dei plume | Tipologia e dimensioni delle morfologie sul fondo mare |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Sito 1 | ~50 metri | ~7 metri | morfologia tabulare di ~20 metri di estensione con superficie rugosa |
| Sito 2 | ~40 metri | ~10 metri | morfologia tabulare di ~100 metri di estensione e ~60 cm di altezza |
| Sito 3 | 50-70 metri | ~8 metri | morfologia tabulare di ~60 metri di estensione e ~50 cm di altezza |
| Sito 4 | 50-70 metri | ~7 metri | morfologia tabulare di ~70 metri di estensione e ~50 cm di altezza morfologia, su cui sono presenti elementi morfologici di qualche metro di estensione e qualche decimetro di altezza |
| Sito 5 | ~40 metri | ~8 metri | morfologia tabulare di ~70 metri di estensione e ~50 cm di altezza, su cui sono presenti due elementi morfologici di ~10 metri di estensione di ~50 cm di altezza |
| Sito 6 | non visibile nel profilo <i>chirp</i> | ~7 metri | elemento morfologico di ~10 metri di estensione di ~50 cm di altezza |

BIBLIOGRAFIA

- BABICH A. (2017) - *Identificazione della presenza di fluidi nei sedimenti superficiali del Golfo di Trieste*. Tesi di Laura Triennale in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Trieste, Relatore A. Del Ben, correlatrice M. Busetti, A.A. 2015-2016, 10 marzo 2017, 51 pp.
- BUSETTI M., ZGUR F., VRABEC M., FACCHIN L., PELOS C., ROMEO R., SORMANI L., SLAVEC P., TOMINI I., VISNOVICH G. & ZERIAL A. (2013) - *Neotectonic reactivation of Meso-Cenozoic structures in the Gulf of Trieste and its relationship with fluid seepings*. Atti del 32° Convegno del GNGTS, Trieste, 19-21 novembre 2013, Tema3: Geofisica Applicata: 29-34.
- DELLA VEDOVA B., CASTELLI E., CIMOLINO A., VECCELIO C., NICOLICH R. & BARISON E. (2008) - *La valutazione e lo sfruttamento delle acque geotermiche per il riscaldamento degli edifici pubblici*. Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, 6/2008: 16-19.
- GORDINI E. (2009) - *Integrazione di metodologie geofisiche, geomorfologiche, sedimentologiche e geochimiche, per la definizione della genesi e dell'età degli affioramenti rocciosi presenti sul fondale marino dell'Adriatico Settentrionale*. Dottorato di ricerca in Scienze Ambientali, ambiente fisico, marino e costiero, XX ciclo, Università degli Studi di Trieste, relatore R. Marocco, correlatori G. Tunis, R. Ramella, M. Vazzoler: 1-398.
- GORDINI E., FALACE A., KALEB S., DONDA F., MAROCCO R. & TUNIS G. (2012) - *Methane-Related Carbonate Cementation of Marine Sediments and Related Macroalgal Coralligenous Assemblages in the Northern Adriatic Sea*. Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: 16 pp., DOI: 10.1016/B978-0-12-385140-6.00009-8
- GORDINI E., MAROCCO R., TUNIS G. & RAMELLA R. (2004) - *I depositi cementati del Golfo di Trieste (Adriatico Settentrionale): Distribuzione areale, caratteri geomorfologici e indagini acustiche ad alta risoluzione*. Il Quaternario, 17(2/2): 555-563.
- HOVLAND M., TALBOT M.R., QVALE H., OLAUSSEN S. & AASBERG L. (1987) - *Methane-related carbonate cements in pockmarks of the North Sea*. J. Sediment. Petrol., 57/5: 881-892.
- MORGANTE S. (1940) - *I "bromboli" delle coste istriane*. Notiziario dell'Istituto di Biologia Rovigno, 16/2: 1-12.
- PETRINI R., ITALIANO F., PONTON M., SLEJKO F.F., AVIANI U. & ZINI L. (2013) - *Geochemistry and isotope geochemistry of the Monfalcone thermal waters (northern Italy): inference on the deep geothermal reservoir*. Hydrogeology Journal 21, 1275-1287, DOI 10.1007/s10040-013-1007-y
- TÓTH Z., SPIESS V. & JENSEN J.B. (2014) - *Seismo-acoustic signatures of shallow free gas in the Bornholm Basin, Baltic Sea*. Continental Shelf Research, 88: 228-239.
- TROBEC A., BUSETTI M., ZGUR F., BARADELLO L., BABICH A., COVA A., GORDINI E., ROMEO R., TOMINI I., POGLAJEN S., DIVIACCO P. & VRABEC M. (2018) - *Thickness of marine Holocene sediment in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea)*. Earth Syst. Sci. Data, 10/2, 1077-192, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1077-2018>
- ŽUMER J. (2004) - *Odkrijije podmorskih termalnih izvirov*. Geografski Obzornik, 51/2: 11-17.

Emissioni gassose di metano in Adriatico Settentrionale: quale ruolo nei processi di cementazione dei sedimenti marini?

Methane emissions in Northern Adriatic Sea: what role in the lithification processes of marine sediments?

GORDINI E.(*), DONDA F.(*)

RIASSUNTO - In questa breve nota vengono presentate le principali caratteristiche emerse da tre casi studio riguardanti emissioni di gas metano in Adriatico settentrionale correlate a processi di cementazione dei sedimenti marini. Per lo studio sono stati analizzati numerosi *dataset* di dati geofisici di alta risoluzione (profili *chirp*, *side scan sonar* e *multibeam*) e dati geochimici.

Sono state analizzate le emanazioni gassose e relativi affioramenti rocciosi dei siti denominati “Campione gas” (a 4 km dall’Isola di Grado), “Bardelli” (a 19 km dal delta del fiume Tagliamento) e “D’Ancona” (a 7,5 km dalla Laguna di Venezia). Le indagini geofisiche realizzate hanno mostrato l’abbondante presenza di gas intrappolato all’interno dei sedimenti dell’intera successione sedimentaria del Plio-Quaternario e in modo diffuso nella coltre sedimentaria superficiale. Le immersioni subacquee hanno confermato quanto evidenziato dalle indagini geofisiche permettendo di individuare fuoriuscite più o meno intermittenti di gas dal fondale marino, talvolta associate a morfologie e depositi rappresentati da affioramenti rocciosi conosciuti come Tegnùe, Trezze, Grebeni, Bromboli, o in altri casi, sotto forma di piccoli vulcani di sedimento (sabbia-fango), ed infine da chiazze biancastre legate all’attività batterica/microbica.

I risultati ottenuti dalle analisi isotopiche eseguite su alcuni campioni di roccia mostrano valori del $\delta^{13}\text{C}$ compresi tra -17.36‰ PDB e -22.09‰. Il solo cemento risulta molto negativo e pari a -49.80‰ PDB. Il $\delta^{18}\text{O}$ risulta pari a 0.14‰ PDB e 0.62‰ PDB. Il gas prelevato è costituito prevalentemente da metano (81/84%), subordinatamente da azoto (15/18%) ed alcune tracce di ossigeno (0,7/1,3%). Recentemente sono stati effettuati dei campionamenti di gas sia in corrispondenza dei due affioramenti Bardelli e d’Ancona, sia in altre zone dell’Adriatico settentrionale, che hanno confermato la predominanza di metano biogenico quale componente principale delle emissioni gassose presenti nell’area (DONDA *et alii*, 2018).

PAROLE CHIAVE: Adriatico settentrionale, carbonato autigeno, emissioni gassose, geochimica, metano, fondale marino, emissione fluida

ABSTRACT - This note presents the main results concerning three case studies on methane gas emissions in the Northern Adriatic Sea and related cementation processes in marine se-

diments. For this study, several datasets of high resolution geophysical data (*chirp*, Side Scan Sonar and multibeam profiles) and geochemical data were analyzed.

In particular, we have analyzed the gas seeps and rocky outcrops of the sites called “Campione gas” (4 km offshore the Grado Island), “Bardelli” (19 km from the Tagliamento river delta) and “D’Ancona” (ca 7 km offshore the Venetian Lagoon). The geophysical investigations revealed the abundant presence of gas trapped within the Plio-Quaternary sedimentary succession. Gas also appears to be widespread in the uppermost sedimentary layer. Scuba diving confirmed what highlighted by the geophysical surveys and allowed to detect more or less intermittent gas leaks from the seabed. Locally, they appear to be associated to rocky outcrops known as *Tegnùe*, *Trezze*, *Grebeni*, *Bromboli*, to small-scale sand-mud volcanoes, and also to white patches related to bacterial /microbial activity.

The isotopic analyses carried out on some rock samples reveal values of $\delta^{13}\text{C}$ ranging from -17.36‰ PDB to -22.09‰. Cement alone is very negative and equal to -49.80‰ PDB. The $\delta^{18}\text{O}$ is 0.14‰ PDB and 0.62‰ PDB. The sampled gas mainly consists of methane (81/84%), nitrogen (15/18%) and some traces of oxygen (0.7/1.3%).

Gas samplings have been recently carried out at the Bardelli and Ancona outcrops, and in other areas of the Northern Adriatic Sea, which confirmed the predominance of biogenic methane as the main component of the gaseous emissions present in the area (DONDA *et alii*, 2019).

KEY WORDS: Northern Adriatic Sea, authigenic carbonate, gas seepage, geochemistry, methane, ocean floors, fluid emission

1. - INTRODUZIONE

Le emissioni gassose nell’Adriatico settentrionale sono già state oggetto di numerosi studi, ma solo recenti indagini hanno portato ad una loro caratterizzazione dal punto di vista geofisico, composizione chimica, caratterizzazione isotopica e

(*)Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Borgo Grotta Gigante, 42/c 34010 Sgonico - TS – Italy

definizione dell'età di formazione (DONDA *et alii*, sottomesso). I dati geofisici acquisiti in Adriatico settentrionale da OGS (sismica multicanale, profili *chirp*, dati morfo-batimetrici *side scan sonar e multi-beam*) in varie campagne di ricerca, e numerose immersioni subacquee eseguite nell'ambito di vari Progetti di Ricerca (per tutti GORDINI, 2009) evidenziano che il gas è presente all'interno dell'intera successione sedimentaria del Plio-Quaternario e in modo diffuso nella coltre sedimentaria superficiale. Localmente esso risale da strati più profondi in su-

perficie attraverso vie di migrazione preferenziali (*chimney*), a volte associate a faglie (fig. 1C e 2C), dando vita a gorgogliamenti che si diffondono lungo tutta la colonna d'acqua. I camini di risalita, dove presenti, si originano a vari livelli nella sequenza plio-quadernaria (DONDA *et alii*, 2015) e mostrano un'ampiezza variabile da qualche decina fino a centinaia di metri. Localmente i camini raggiungono senza soluzione di continuità il fondo mare, dove la fuoriuscita di gas è talvolta associata a morfologie e depositi peculiari rappresentati da

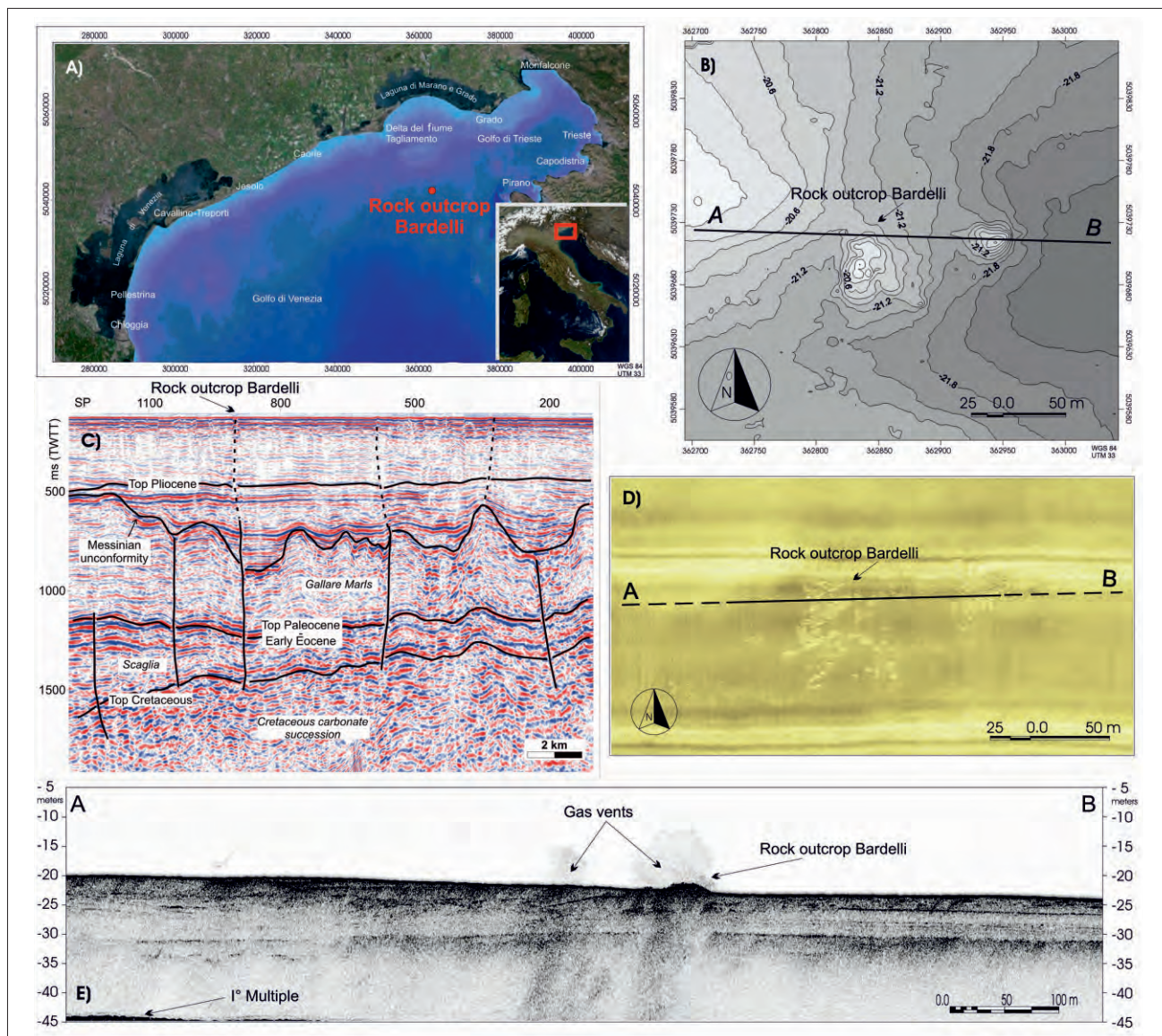


Fig. 1 - A) Mappa con l'ubicazione dell'affioramento roccioso presente al largo dell'Isola di Grado, conosciuto dai pescatori locali con il nome di Affioramento Bardelli. B) Rappresentazione bidimensionale del rilievo *singlebeam* realizzato in corrispondenza dell'affioramento Bardelli (*singlebeam Kongsberg-Simrad EA400 Survey*, 38-200 kHz). C) Linea sismica multicanale ST09-01 (a) (modificata da fig. 2a, DONDA *et alii*, 2015). L'immagine mostra che l'affioramento roccioso è presente appena sopra un camino che si origina nella parte superiore di una faglia profonda sub-verticale. D) Particolare del mosaico *side-scan sonar* (500 kHz, *side scan sonar EdgeTech DF1000*); nella parte centrale del mosaico è evidente la presenza di un numero elevato di affioramenti rocciosi di forma irregolare. E) Profilo acustico *sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profilers chirp EdgeTech SB-216S*) eseguito lungo la direzione di massimo sviluppo dell'affioramento roccioso in cui sono ben evidenti sacche di gas nell'immediato sottofondo dell'affioramento e ampi *plumes* di metano che si sviluppano lungo la colonna d'acqua.

- A) Location map of the rocky outcrop offshore the Grado Island, known by local fishermen as "Affioramento Bardelli". B) Two-dimensional representation of the *singlebeam* survey performed in correspondence to the Bardelli outcrop (*singlebeam Kongsberg-Simrad EA400 Survey*, 38-200 kHz). C) Multichannel seismic line ST09-01 (a) (modified by fig. 2a, DONDA *et alii*, 2015). The image shows that the rocky outcrop is present just above a chimney that originates from a deep sub-vertical fault. D) Detail of the Side Scan Sonar Mosaic (500 kHz, *Edge Scan Sonar EdgeTech DF1000*); in the central part of the mosaic, the presence of a large number of irregularly shaped rocky outcrops is evident. E) Acoustic sub-bottom profiler *Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profilers chirp EdgeTech SB-216S*) performed along the direction of the maximum development of the rocky outcrop, where gas pockets are clearly visible just below the outcrop, together with large methane plumes in the water column.

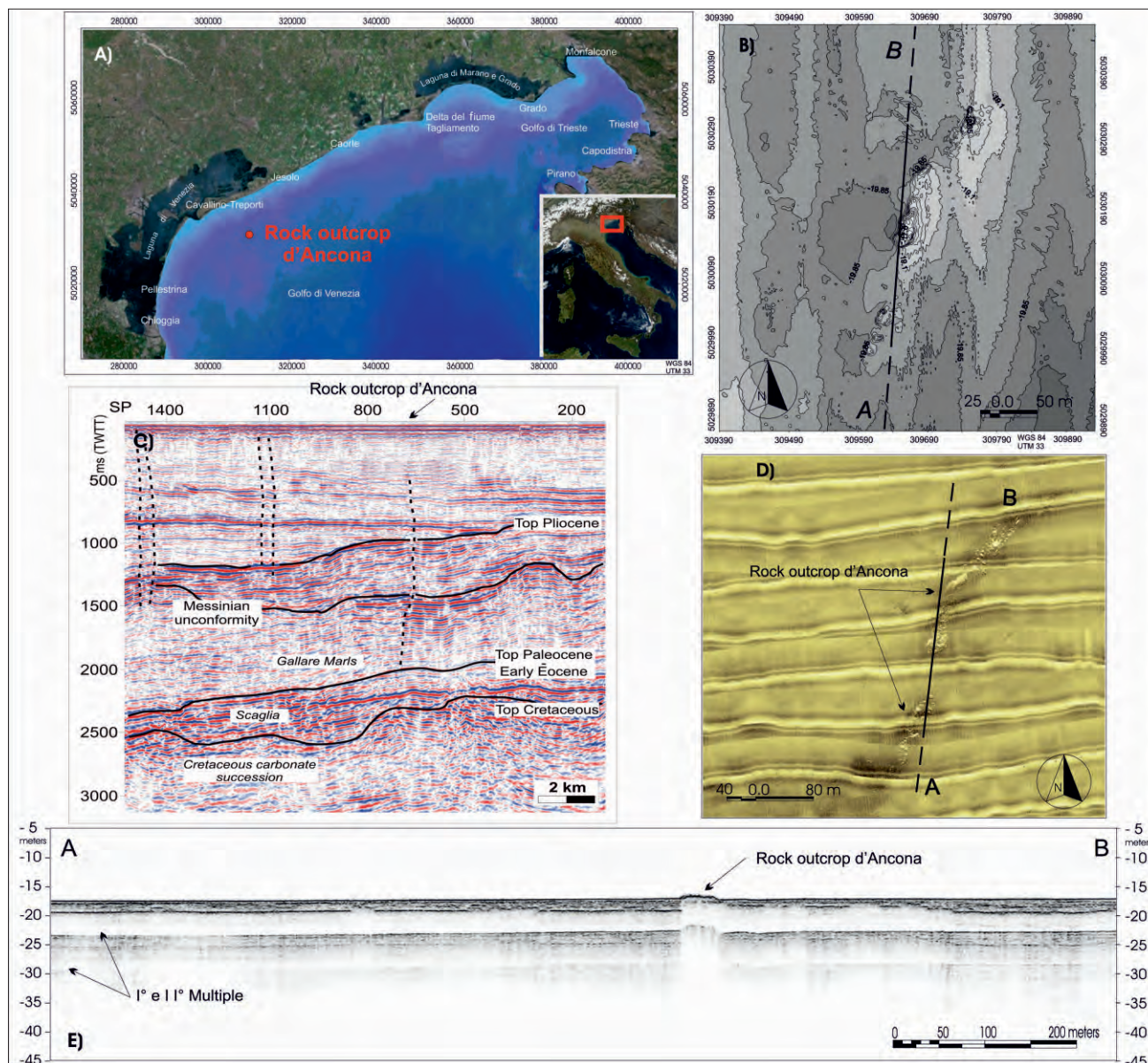


Fig. 2 - A) Mappa con l'ubicazione dell'affioramento roccioso presente al largo della Laguna di Venezia denominato Affioramento d'Ancona. B) Rappresentazione bidimensionale del rilievo *multibeam* realizzato in corrispondenza dell'affioramento d'Ancona (*multibeam Reson SeaBat 8111*, 100 kHz). C) Linea sismica multicannel ST09-15(a) (modificata da fig. 6a, DONDA *et alii*, 2015). L'immagine mostra che l'affioramento roccioso si trova ubicato sulla verticale di un'area contraddistinta dalla presenza di anomalie acustiche e *chimneys*. D) Particolare del mosaico *side scan sonar* realizzato (500 kHz, *side scan sonar EdgeTech DF1000*); nella parte centrale del mosaico è evidente la presenza di un affioramento roccioso dalla morfologia allungata e sinuosa. E) Profilo acustico *sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profilers chirp EdgeTech SB-216S*) eseguito lungo la direzione di massimo sviluppo dell'affioramento roccioso in cui sono ben evidenti sacche di gas nell'immediato sottofondo dell'affioramento.

- A) Location Map of the rocky outcrop offshore the Venice Lagoon, called "Affioramento d'Ancona". B) Two-dimensional representation of the multi-beam survey performed in correspondence to the Ancona outcrop (*multibeam Reson SeaBat 8111*, 100 kHz). C) Multichannel seismic line ST09-15 (a) (modified by fig. 6a, DONDA *et alii*, 2015). The image shows that the rocky outcrop is located just above an area characterized by the presence of acoustic anomalies and *chimneys*. D) Detail of the Side Scan Sonar mosaic (500 kHz, Side Scan Sonar EdgeTech DF1000); in the central part of the mosaic, the presence of a rocky outcrop with an elongated and sinuous morphology is recognizable. E) Acoustic sub-bottom profiler Chirp (2-7 kHz, Portable Sub-bottom Profilers chirp EdgeTech SB-216S) performed along the direction of maximum development of the rocky outcrop, where gas pockets are visible just below the outcrop.

affioramenti rocciosi conosciuti come Tegnùe, Trezze, Grebeni, Bromboli (1), o in altri casi, sotto forma di piccoli vulcani di sedimento (sabbia-fango), fuoriuscite gassose più o meno intermittenti dal fondale marino, ed infine da chiazze

biancastre legate all'attività batterica/microbica ad opera di colonie di *Archaea* e *Beggiatoa* (GORDINI *et alii*, 2012).

Lastre e croste carbonatiche individuate sui fondali marini in altre aree geografiche sono state spesso

(1) Le prime segnalazioni sull'esistenza di tali corpi rocciosi risalgono al XVIII secolo, quando l'Abate Giuseppe Olivi nella sua opera "Zoologia Adriatica" ne fornisce per la prima volta una descrizione come "...elevazione di qualche massa calcarea nudo durissimo, il quale sorge isolato dal fondo molle. Tali eminenze, dette volgarmente Tenu... esistono dirimpetto a Maran, a Carole, ai Tre Porti... soprattutto dirimpetto a Malamocco e Chioggia..." (OLIVI, 1792). I più recenti studi hanno dimostrato che l'origine di tali depositi è effettivamente legata alle diffuse emissioni di gas (CONTI *et alii*, 2002; GORDINI, 2009; GORDINI *et alii*, 2012).

associate a condotti e *chimney* legati a fuoriuscite di gas metano in diversi contesti tettonici (CAMPBELL, 2006; ORPIN, 1997). Il gas metano che fuoriesce dal fondale marino presenta una precisa caratteristica isotopica legata a processi di ossidazione anaerobica del metano (AOM) e/o alla riduzione del solfato (SR). Si ritiene che l'aumento di alcalinità che si osserva in questi processi determini la precipitazione di carbonati autigenici impoveriti ($\delta^{13}\text{C}$ negativo; WHITICAR, 1999; MAZZINI *et alii*, 2004). L'attività batterica che promuove l'ossidazione anaerobica del metano, insieme al processo di riduzione del solfato, è stata studiata su croste carbonatiche, *mound* e *thrombolite* (REITNER *et alii*, 2005). Nel mare Adriatico sono state osservate e studiate alcune fuoriuscite di gas legate a morfologie riconducibili a *pockmark*, *mud volcano* e *gas seepage* (CONTI *et alii*, 2002; GORDINI, 2009; GORDINI *et alii*, 2012) che sono frequentemente associate a croste carbonatiche.

In alcuni casi, il gorgogliamento diffuso del gas è stato relazionato a gas poco profondi intrappolati nel Pleistocene superiore e al di sotto della superficie olocenica (TRINCARDI *et alii*, 2004; GARCÍA-GARCÍA *et alii*, 2007) mentre, in altri casi, è stata ipotizzata un'origine più profonda (MATTAVELLI *et alii*, 1983, 1992; DONDA *et alii*, 2015).

In questa breve nota vengono presentate le principali caratteristiche di tre casi studio, evidenziate da dati geofisici di alta risoluzione (profili *chirp*, *side scan sonar* e *multibeam*) e da dati geochemici. Il primo è rappresentato da fuoriuscite di fluidi presenti nelle immediate vicinanze

di due gruppi di affioramenti rocciosi ubicati a circa 10 km di distanza dalla costa dell'Isola di Grado (indicato come "Campione gas" in fig. 3). Il secondo, presente sul fondale marino prospiciente il delta del fiume Tagliamento ad una distanza dalla costa di circa 19 km (indicato come "Bardelli" in fig. 2), è rappresentato da un gruppo di rocce dalla marcata morfologia frastagliata riconducibili a due tronconi principali. L'estensione massima risulta pari a 6.300 metri quadrati. Le indagini geofisiche e le numerose immersioni subacquee eseguite hanno mostrato la presenza di abbondanti fuoriuscite di gas distribuite nell'intorno dell'affioramento ma anche in corrispondenza di fratture della roccia stessa (GORDINI, 2009; DONDA *et alii*, 2015; DONDA *et alii*, 2018).

Il terzo caso presentato (indicato come "D'Ancona" in fig. 3), è rappresentato da un gruppo di rocce presenti al largo della laguna di Venezia ad una distanza di circa 7,5 km dalle spiagge di Cavallino-Treporti. L'ammasso roccioso principale presenta un'orientazione preferenziale NNE-SSO con una marcata morfologia allungata e sinuosa per una superficie complessiva di 9.400 metri quadrati. Anche in questo caso le indagini geofisiche realizzate hanno mostrato l'abbondante presenza di gas intrappolato all'interno dei sedimenti superficiali e locali deboli/intermittenti gorgogliamenti di gas associati alla presenza di numerose chiazze biancastre/gri-griastre batteriche.

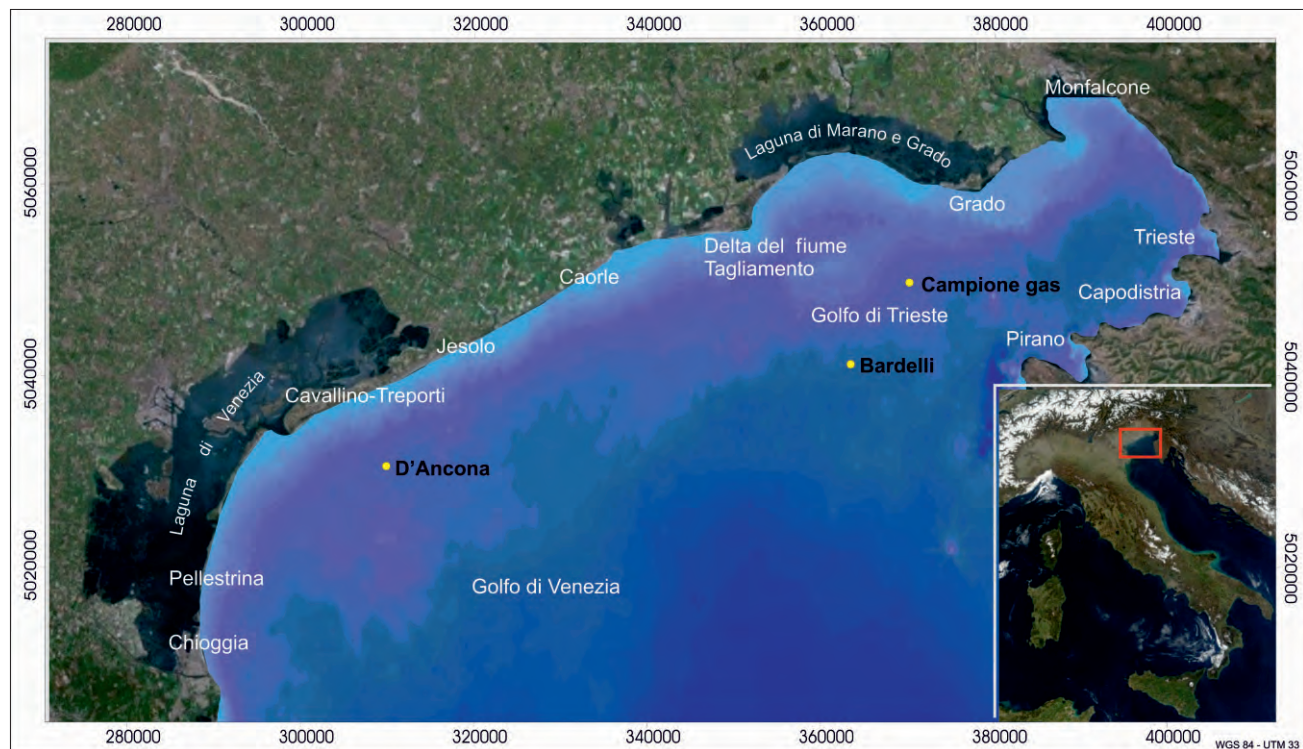


Fig. 3 - Mappa delle aree studiate nell'ambito di questo studio. In particolare, è indicata l'ubicazione del campione di gas prelevato in immersione e sottoposto ad analisi di laboratorio (Caso Studio 1). Affioramento Bardelli (Caso Studio 2). Affioramento d'Ancona (Caso Studio 3).
- Location map of the studied areas. In particular, the location of the gas sample (Case Study 1), Bardelli outcrop (Case Study 2), D'Ancona outcrop (Case Study 3) are shown.

2. - CASO STUDIO 1 - CAMPIONAMENTO E ANALISI CHIMICHE SUI GAS

Dalla letteratura scientifica dell'Adriatico settentrionale, più volte è emersa la presenza di orizzonti sedimentari che mostrano al loro interno quantità più o meno abbondanti di gas. Tale fluido, particolarmente evidente nelle prospezioni sismiche ad alta risoluzione, spesso è stato ricondotto geneticamente alla decomposizione della sostanza organica accumulata nei sedimenti dell'antica pianura alluvionale e ben documentata anche in studi realizzati in aree continentali e lagunari. Fino ad ora però mancava una caratterizzazione precisa e puntuale dei fluidi che fuoriescono in prossimità degli affioramenti rocciosi. In una prima campagna di campionamento subacqueo (GORDINI, 2009), sono stati realizzati tre campioni di gas prelevati in corrispondenza di fuoriuscite di fluidi presenti nelle immediate vicinanze di due gruppi di affioramenti presenti a circa 4 km di distanza dall'isola di Grado (indicati come "Campione gas" in fig. 3). L'area marina scelta, oltre ad evidenziare una forte concentrazione di affioramenti rocciosi di modeste dimensioni ed abbondanti fuoriuscite di gas attive osservabili in immersione (fig. 4C), presenta anche altre interessanti peculiarità che possono far pensare che i fenomeni di emissione di gas siano particolarmente importanti in questo tratto di mare: è stata infatti qui individuata la presenza di numerosi piccoli vulcani di sedimento (fig. 4A), aventi altezza pari a circa 2/3 cm e diametro 4/5 cm, particolarmente evidenti per il loro colore più scuro rispetto al sedimento circostante. Questa caratteristica è dovuta principalmente al trasporto di sedimenti più profondi e generalmente contraddistinti da un ambiente riducente, che avviene insieme ai fluidi che gorgogliano verso la superficie. Significative appaiono anche le numerose chiazze biancastre probabilmente legate all'attività batterica ad opera di colonie di *Archaea* e *Beggiatoa* (fig 4B) e dunque legate alle emanazioni di metano.

Il prelievo dei tre campioni di gas, eseguito in immersione, ha permesso di evidenziare che il gas è costituito prevalentemente da metano (81/84%), subordinatamente da azoto (15/18%) ed alcune tracce di ossigeno (0,7/1,3%).

3. - CASO STUDIO 2 - AFFIORAMENTO BARDELLI

La distribuzione areale di questo gruppo di rocce presenta un'orientazione preferenziale est-ovest con una morfologia frastagliata e riconducibile a due tronconi principali. L'estensione massima risulta pari a 250 m e larghezza massima pari a 90 m. La porzione centrale dell'affioramento ha morfologia circolare irregolare e molto frastagliata, con numerose ed ampie aree sabbiose alternate a

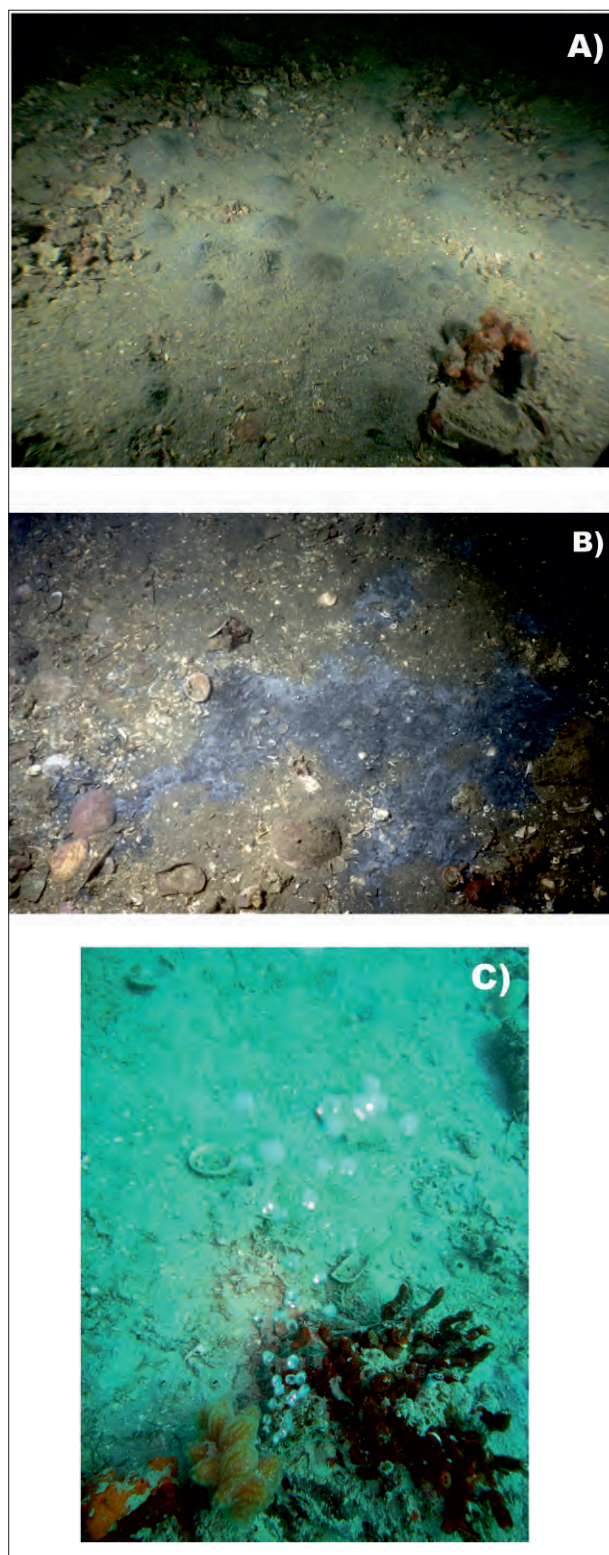


Fig. 4 - A) Piccoli vulcani di sedimento aventi altezza di alcuni centimetri, che vengono messi in risalto per il loro colore più scuro rispetto al sedimento circostante, individuati nelle vicinanze di alcuni affioramenti rocciosi in cui sono presenti abbondanti fuoriuscite di gas attive. B) Chiazze biancastre legate all'attività batterica ad opera di colonie di *Archaea* e *Beggiatoa* in presenza di emanazioni di metano. C) Abbondante gorgogliamento di gas osservabile in immersione.

- A) Small-scale sediment volcanoes with a height of a few centimeters, and characterized by a darker color in respect with the surrounding sediment, they have been identified close to some rocky outcrops, where there are abundant gas seeps. B) White patches linked to bacterial activity of *Archaea* and *Beggiatoa* colonies in correspondence to methane seeps. C) Abundant bubbling of gas observable during the scuba diving.

zone con blocchi/crostoni litoidi di varie dimensioni, separati da numerose e ben sviluppate fessure, da cui si individua il fondale sabbioso. Le dimensioni di tali spaccature sono pari a circa 0,2-0,3 m ed appaiono così ridotte e dalla geometria speculare lungo le cornici nette verticali dei blocchi rocciosi adiacenti, da far supporre che l'affioramento sia in realtà un unico blocco disarticolato. Dall'elaborazione e restituzione bidimensionale e tridimensionale dei dati *multibeam* acquisiti risulta che l'affioramento si sviluppa su di un fondale di profondità variabile tra -20,2 e -22,5 m (pendenza 4‰ circa). Il corpo roccioso di maggiore dimensione è caratterizzato da altezze massime nelle zone apicali pari a 1,2 m.

La successione sismo-stratigrafica superficiale (desunta da indagini *sub-bottom profiler chirp*) è contraddistinta da tre principali riflettori acustici che delimitano quattro sequenze deposizionali. L'unità acustica più profonda e quella centrale mostrano una geometria tabulare, interrotta localmente dalla diffusa presenza di gas. I corpi rocciosi evidenziano un limitato apparato radicale che porta ad interpretarli come "crostoni" di sabbia cementata, di spessore metrico, in parte sepolti dai sedimenti sabbiosi e sabbioso pelitici circostanti. Particolarmente significativa è la presenza di due ampi *plume* che si sviluppano lungo la colonna d'acqua, al di sopra degli affioramenti.

L'analisi della sezione lucida di un campione prelevato in immersione, permette di evidenziare la presenza di un livello sedimentario cementato di colore grigio, macroscopicamente costituito da gusci e frammenti di lamellibranchi e meno abbondanti gasteropodi. Le dimensioni dei bioclasti e dei gusci di individui interi, la cui disposizione non conferisce al deposito una struttura sedimentaria deposizionale predominante, sono valutabili da alcuni millimetri ad alcuni centimetri. I vuoti tra i gusci/frammenti conchigliari sono parzialmente riempiti sabbia medio-fine a matrice fangosa. Il limite superiore è rappresentato da una crosta centimetrica di materiale organogeno recente (probabilmente alghe calcaree, serpulidi, ecc.). Il campione studiato al microscopio petrografico risulta costituito prevalentemente da gusci e frammenti di lamellibranchi e gasteropodi (appartenenti rispettivamente alla famiglia delle Veneriidae e Cerithiidae) e alcuni foraminiferi del genere *Ammonia* sp. La componente organogena rappresenta circa il 65% del campione, mentre il rimanente 35% è costituito da granuli terrigeni, matrice e cemento. All'interno dei vuoti fra i bioclasti è presente un cemento di tipo aciculare aragonitico, generalmente abbondante, ma anche "ad orlo costante" e a tessitura fibroso raggiata. L'analisi con diffrazione ai raggi X evidenzia una notevole presenza di calcite (41,0%), significativa abbondanza di aragonite (21,5%) e subordinata dolomite (13,5%), per quanto riguarda le fasi carbonatiche. Sono presenti inoltre minerali silicici come il quarzo (12,5%), il plagioclasio - albite (2,5%) ed il feldspato-microclino

(2,0%), oltre alla presenza di una componente mafica rappresentata da miche (muscovite e biotite) ed argille con prevalenza di caolinite (per un totale di 8,2‰).

Le analisi isotopiche eseguite mostrano valori del $\delta^{13}\text{C}$ comprese tra -22.09‰ PDB e 24.07‰ PDB. Il solo cemento risulta molto negativo e pari a -49.80‰ PDB. Il $\delta^{18}\text{O}$ risulta pari a 0.14‰ PDB e 0.62‰ PDB.

4. - CASO STUDIO 3 - AFFIORAMENTO D'ANCONA

L'affioramento è rappresentato da un gruppo di rocce distribuite sul fondale marino del Golfo di Venezia che presenta un'orientazione preferenziale NNE - SSO con una marcata morfologia allungata e sinuosa di estensione massima pari a 600 m e larghezza massima pari a 35/37 m. Sono presenti essenzialmente due tronconi principali, distanti l'uno dall'altro circa 70 m e suddivisi da un'area pianeggiante sabbiosa in cui sono totalmente assenti blocchi e frammenti litoidi. Dall'elaborazione dei dati batimetrici *multibeam* risulta che l'affioramento si sviluppa su di un fondale di profondità variabile tra -19,4 e -20,6 m. Il fondale si presenta prevalentemente pianeggiante con locali approfondimenti. Gli *outcrops* di maggiore dimensione presentano altezze per lo più comprese tra 1,2 e 2,6 m rispetto al fondale circostante. I blocchi rocciosi di dimensioni minori e presenti nelle aree di transizione fra i blocchi principali mostrano un'ampia variabilità in altezza che può variare da 0,2 a 1,2 m.

L'indagine sismostratigrafica *sub-bottom profiler chirp* ha permesso di evidenziare che il radicamento del corpo roccioso è modesto e si può stimare essere non superiore a 1,0 m e comunque sviluppato all'interno del primo substrato sedimentario. Il tipo di risposta acustica del sottosuolo nell'intera area indagata mostra un andamento pressoché tabulare degli orizzonti presenti, con una stratificazione piano parallela, localmente articolata, di potenza variabile da decimetrica a metrica. Questa strutturazione del sottofondo viene spesso mascherata dalla presenza di aree contraddistinte dalla mancanza di segnale riflesso, alla cui sommità sono visibili riflettori più o meno continui di forte ampiezza (*bright spot*). Questa particolare facies è riconducibile all'abbondante presenza di gas all'interno dei sedimenti (GORDINI, 2009; DONDA *et alii*, 2018).

Il campione di roccia prelevato in immersione ed osservato in sezione lucida mostra la presenza di un livello basale di colore grigio, dello spessore di alcuni centimetri costituito da gusci e frammenti di lamellibranchi, gasteropodi e numerosi intraclasti fangosi di colore grigio scuro. I vuoti tra i gusci/frammenti conchigliari sono parzialmente riempiti da materiale terrigeno a granulometria medio-fine (sabbia). La porzione più superficiale è

costituita da una crosta pluricentimetrica-decimetica di materiale organogeno recente (alghie calcaree, serpulidi, ecc.).

In sezione sottile risulta evidente che il campione è costituito prevalentemente da gusci e frammenti di lamellibranchi e gasteropodi appartenenti rispettivamente al genere *Venus* sp., e *Bittium* sp. La componente organogenica risulta mal classificata e rappresenta circa il 67% del campione, mentre il rimanente 33% è costituito da granuli terrigeni (a basso grado di classazione), matrice e cemento. Il cemento risulta generalmente abbondante, spesso distribuito uniformemente sulle superfici dei granuli detritici e di quelli organogeni come cemento "ad orlo costante" ma anche con struttura aciculare e fibroso raggiata. I cristalli presentano un alto rapporto larghezza/lunghezza, tipico dell'aragonite. L'analisi XRD ha mostrato la presenza delle tre serie carbonatiche: calcite, dolomite ed aragonite con rispettivamente le percentuali di 9,3-11,8; 5,5-7,6 e 52,5-53,9% del totale del campione. La roccia risulta poi costituita anche da quarzo (10,2-11,0%), feldspati-microclino (2,5%), plagioclasti-albite (2,7-3,9%), miche (muscovite e biotite) ed argille con prevalenza di caolinite (per un totale di 13,0-13,6%).

I risultati ottenuti dalle analisi isotopiche eseguite su un campione di roccia mostra valori del $\delta^{13}\text{C}$ pari a -17.36‰ mentre il solo cemento risulta molto negativo e compreso tra -38.00‰ PDB e -39.40‰ PDB. Il $\delta^{18}\text{O}$ risulta rispettivamente pari a -0.69‰ PDB e 1.21‰ PDB.

Recentemente sono stati effettuati dei campionamenti di gas sia in corrispondenza dei due affioramenti Bardelli e d'Ancona, sia in altre zone dell'Adriatico settentrionale, che hanno confermato la predominanza di metano biogenico quale componente principale delle emissioni gassose presenti nell'area (DONDA *et alii*, 2018).

BIBLIOGRAFIA

- CAMPBELL K.A. (2006) - *Hydrocarbon seep and hydrothermal vent palaeoenvironments and palaeontology: past developments and future research directions*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **232**: 362-407
- CONTI A., STEFANON A. & ZUPPI G.M. (2002) - *Gas seeps and rock formation in the northern Adriatic Sea*. Continental Shelf Research, **22**: 2333-2344.
- DONDA F., FORLIN E., GORDINI E., PANIERI G., BUENZ S., VOLPI V., CIVILE D. & DE SANTIS L. (2015) - *Deep-sourced gas seepage and methane-derived carbonates in the Northern Adriatic Sea*. Basin Research, **27**: 531-545.
- DONDA F., TINIVELLA U., GORDINI E., PANIERI G., VOLPI V., CIVILE D., FORLIN E., FACCHIN L., BURCA M., COVA A. & FERRANTE G.M. (2018) - *The Origin of Gas Seeps in the northern Adriatic Sea*. Italian Journal of Geosciences, **138** (2), 171-183.
- GARCIA-GARCIA A., ORANGE D.L., MISEROCCHI S., CORREGGIARI A., LANGONE L., LORENSON T.D., TRINCARDI F. & NITTROUER C.A. (2007) - *What controls the distribution of shallow gas in the Western Adriatic Sea? Continental Shelf Research*, **27**: 359-374.
- GORDINI E. (2009) - *Integrazione di metodologie geofisiche, geomorfologiche, sedimentologiche e geochemiche per la definizione della genesi e dell'età degli affioramenti rocciosi presenti sul fondale marino dell'Adriatico settentrionale*. PhD Thesis. University of Trieste, Department of Geological, Environmental and Marine Science, 389 pp.
- GORDINI E., FALACE A., KALEB S., DONDA F., MAROCCO R. & TUNIS G. (2012) - *Methane-Related Carbonate Cementation of Marine Sediments and Related Macroalgal Coralligenous Assemblages in the Northern Adriatic Sea*. In: HARRIS P.T. & BAKER E.K. (Eds): "Seafloor Geomorphology as Benthic Habitats", Elsevier, 183-198.
- MATTAVELLI L., RICCHIUTO T., GRIGNANI D. & SCHOELL M. (1983) - *Geochemistry and habitat of natural gases in Po Basin, Northern Italy*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **67**: 2239-2254.
- MAZZINI A., IVANOV M.K., PARNELL J., STADNITSKAIA A., CRONIN B.T., POLUDETkina E., MAZURENKO L. & VAN WEERING T.C.E. (2004) - *Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea: geochemical characterization and relation to seeping fluids*. Marine Geology, **212** (1-4): 153-181.
- OLIVI G. (1792) - *Zoologia Adriatica*. Reale Accademia Scienze Lettere Arti, Bassano, 334 pp.
- ORPIN A.R. (1997) - *Dolomite chimneys as possible evidence of coastal fluid expulsion, uppermost Otago continental slope, southern New Zealand*. Marine Geology, **138**: 51-67.
- REITNER J., PECKMANN J., BLUMENBERG M., MICHAELIS W., REIMER A., THIEL V. (2005) - *Concretionary methane-seep carbonates and associated microbial communities in Black Sea sediments*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **227**: 18-30.
- TRINCARDI F., CATTANEO A., CORREGGIARI A. & RIDENTE D. (2004) - *Evidence of soft sediment deformation, fluid escape, sediment failure and regional weak layers within the late Quaternary mud deposits of the Adriatic Sea*. Marine Geology, **213**: 91-119.
- WHITICAR M.J. (1999) - *Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane*. Chemical Geology, **161**: 291-314.

Evidenze di *gas-seepage* associate a strutture tettoniche profonde in Mare Adriatico Centrale

Gas-seepage features related to deep tectonic structures in the Central Adriatic Sea

GELETTI R.(*), DEL BEN A.(**),
BUSETTI M.(*), VOLPI V.(*)

RIASSUNTO - L'analisi dei profili acustici *chirp* e dei dati di morfobatimetria *multibeam* acquisiti durante diverse campagne della N/R OGS Explora e la loro correlazione con i profili sismici multicanale, hanno messo in evidenza la presenza di fenomeni di *gas-seepage*, di sistemi di frattura e di domi salini profondi presenti nell'Adriatico Centrale. La loro distribuzione mostra una stretta relazione tra i loro reciproci sviluppi.

PAROLE CHIAVE: *gas-seepage*, *pockmark*, *chirp*, *multibeam*, sismica a riflessione, strutture alokinetiche, fondale marino, emissione fluida, Mare Adriatico Centrale

ABSTRACT - The analyses of *chirp* sub-bottom profilers and *multibeam* data acquired during several surveys of the R/V OGS Explora, and their correlation with multichannel seismic profiles, have highlighted the presence of gas seepages, fracture systems and deep salt features present in the Central Adriatic Sea. Their distribution shows a strict relation between their mutual development.

KEY WORDS: gas-seepages, pockmarks, *chirp*, multibeam, reflection seismics, halokinetic structures, fluid emission, ocean floors, Central Adriatic Sea

1. - GAS-SEEPAGE ASSOCIATO A STRUTTURE TETTONICHE PROFONDE

La batimetria dell'Adriatico Centrale (fig. 1) mette in luce la presenza di una depressione (Meso-Adriatic Depression: MAD) allungata in direzione NE-SO, da Sebenico, sulla costa Croata, a Pescara, ortogonale ai fronti esterni delle Catene

Appenninica e Dinarica.

Mentre il margine settentrionale di tale minimo batimetrico è determinato dal fronte della sequenza progradante successivo all'ultima glaciazione (TRINCARDI *et alii*, 2004), il margine meridionale e le strutture trasversali che separano il bacino in tre sottobacini (West-, Central-, East-MAD da GELETTI *et alii*, 2008) sembrano associati ad attività tettonica ancora attiva, come testimoniato sia dalle deformazioni recenti del fondo mare, che dalla presenza di sismicità.

L'analisi di dati superficiali quali *chirp sub-bottom* e *multibeam*, acquisiti dalla N/R OGS Explora nel 2005 (GELETTI *et alii*, 2008) nel MAD e lungo i suoi margini, ha permesso di confermare la presenza di strutture, quali *pockmark* e faglie poligonali, particolarmente concentrati all'interno della depressione e del suo margine meridionale. Queste strutture sono associate a risalita di gas attraverso la sequenza plio-quadernaria (*gas plume*, *bright spot* e *gas chimney*), già messe in evidenza dalla morfologia di dettaglio del fondo mare (STEFANON, 1980; CURZI & VEGGIANI, 1986; HOVLAND & CURZI, 1989; TRINCARDI *et alii*, 2004; RIDENTE & TRINCARDI, 2006). Ciò dimostra che tale processo è sicuramente ancora in atto, ma si sviluppava già in passato, come suggerito dalla presenza di analoghe morfologie, sepolte al di sotto dei sedimenti quadernari più recenti (GELETTI *et alii*, 2008).

L'integrazione con dati sismici a riflessione (fig. 2), quali profili della Zona B e profili CROP (Banca dati ViDEPI, 2009), ci ha permesso di associare tali evidenze superficiali a sistemi di fratture, determinati da strutture profonde, interpretate per lo

(*)Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Trieste
(**)Dipartimento di Matematica e Geoscienze (DMG), Università di Trieste

più come diapiri salini prodotti da tettonica aloclinetica delle sequenze evaporitiche triassiche della formazione di Burano (GRANDIC & MARKULIN, 2000; GELETTI *et alii*, 2008). Tali diapiri risultano prevalentemente distribuiti secondo un *trend* parallelo ai fronti simmetrici delle Catene Appenninica e Dinarica, suggerendo una probabile connessione, anche in termini di età, con gli eventi tettonici compressivi.

La messa in luce di deformazioni tuttora in atto è inoltre correlabile ad importanti eventi sismici registrati nell'area circostante l'isola di Jabuka ($M_L=5,5$, HERAK *et alii*, 2005).

La presenza di gas all'interno della sequenza plio-quadernaria del Mar Adriatico, in particolare di gas metano di natura prevalentemente biogenica, rappresenta chiaramente un fattore determinante allo sviluppo di strutture ad essa connesse, che si esprime nel dato sismico attraverso evidenze di *bright spot*, *gas chimney*, *gas plume* (figg. 2, 3, 4), oltre che delle strutture determinate dalla mobilizzazione dei sedimenti, qui discusse. L'insieme dei dati analizzati evidenzia così la presenza abbondante di fenomeni di *gas seepage* nell'area tettonicamente attiva dell'Adriatico centrale (GELETTI *et alii*, 2008).

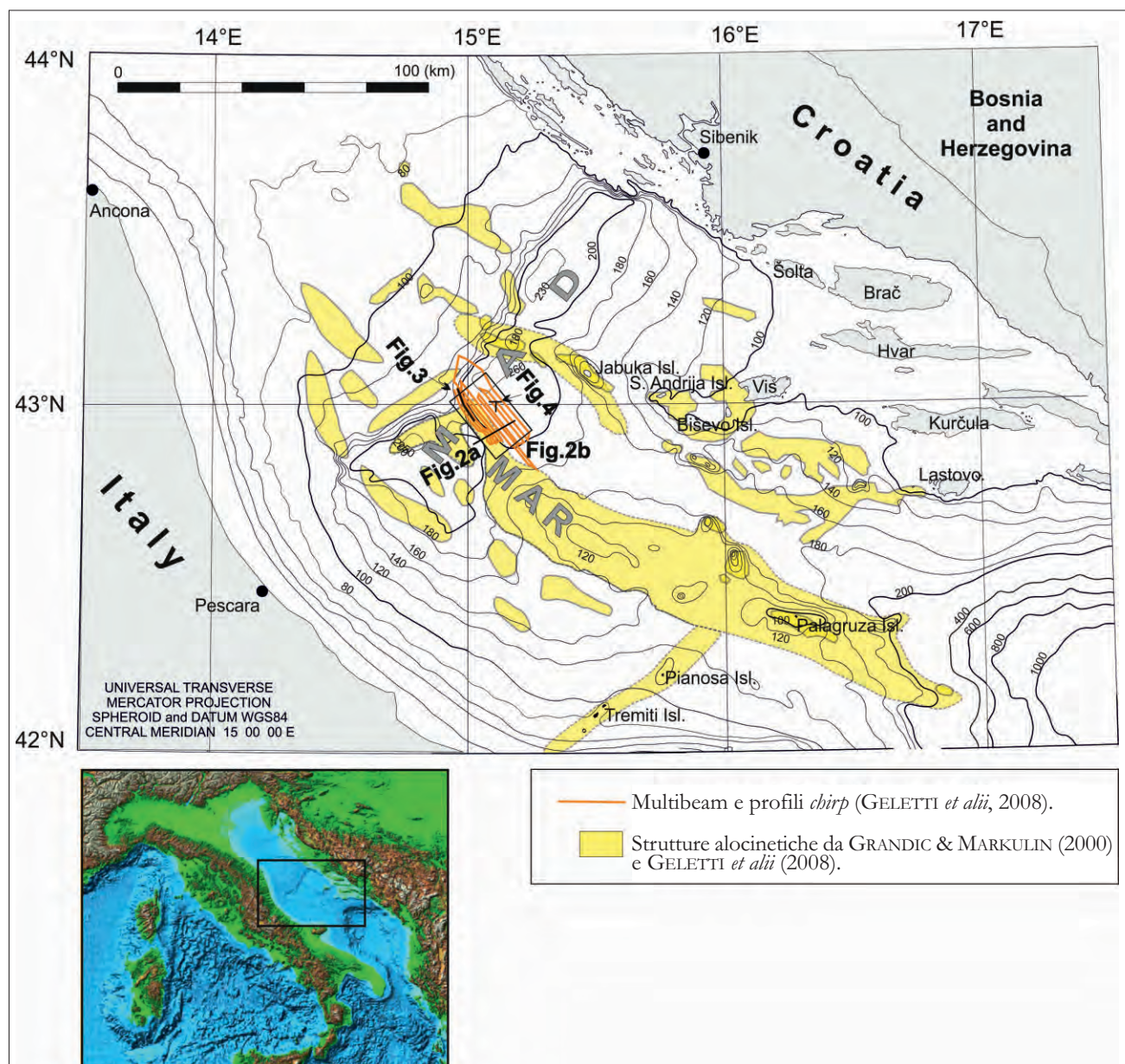


Fig. 1 - Mappa batimetrica del Mare Adriatico Centrale interessato dai fenomeni di *gas seeping* dove sono mappati i profili *chirp* e *multibeam* acquisiti nel 2005 dalla N/R OGS Explora (GELETTI *et alii*, 2008), le posizioni delle figure che seguono e l'indicazione delle principali strutture aloclinetiche presenti nell'area (modificata da GELETTI *et alii*, 2008).

- Bathymetric map of the Central Adriatic Sea, affected by gas seeping phenomena. Also mapped the *chirp* and *multibeam* profiles acquired in 2005 by the R/V OGS Explora (GELETTI *et alii*, 2008), the positions of the figures in the text and the indication of the main halokinetic structures present in the area (modified from GELETTI *et alii*, 2008).

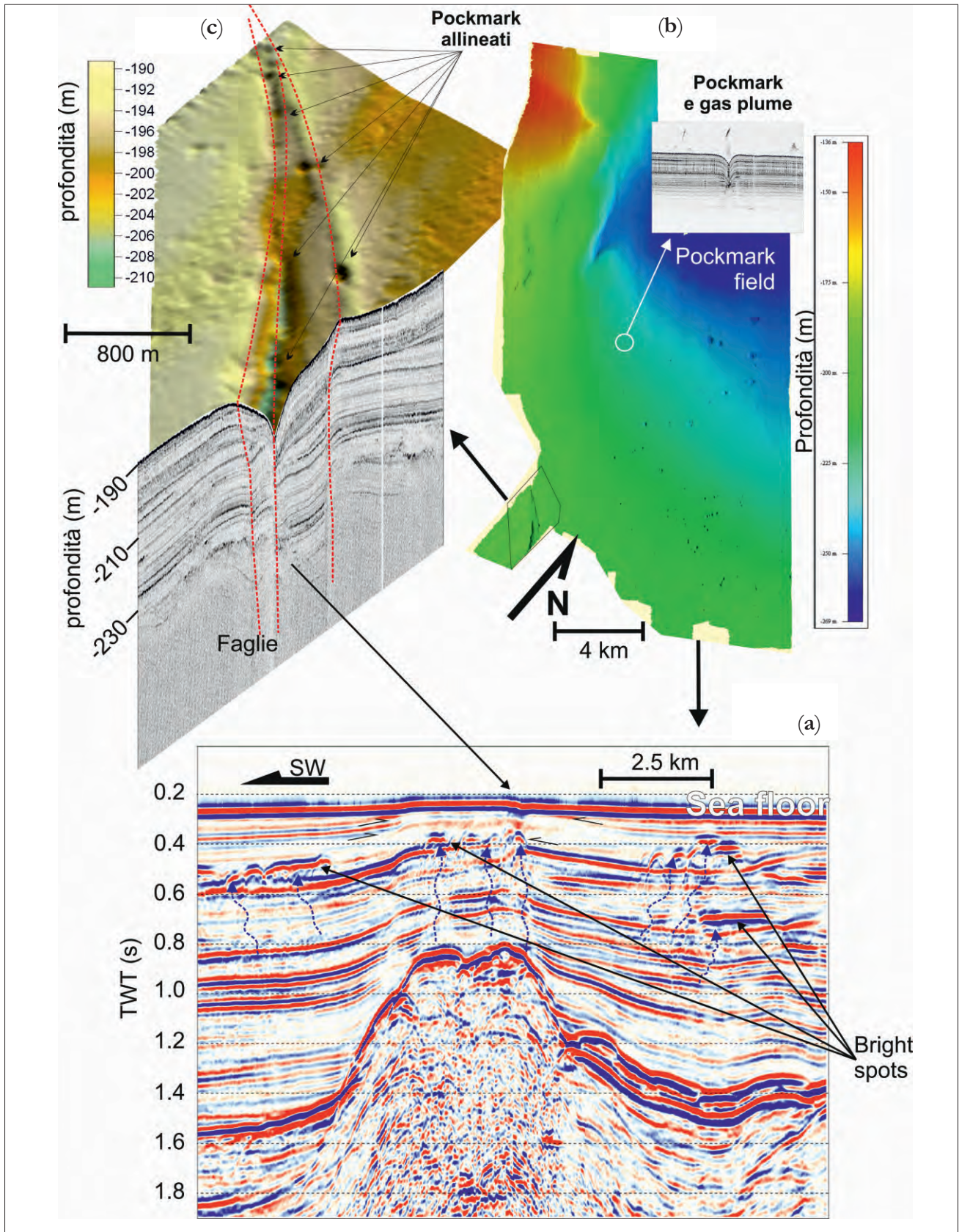


Fig. 2 - a) Immagine del profilo sismico a riflessione CROP-M15 con le evidenze di *bright spot* indicanti la presenza di gas nei sedimenti plio-quaternari, b) batimetria *multibeam* (MB) ed una immagine (c) pseudo 3D con profilo *chirp* e MB dove è messo in luce un sistema di faglie attive lungo le quali si possono individuare alcuni *pockmark*. Dalla linea sismica si evince la presenza di una struttura diapirica posta in profondità che deforma anche il fondo mare (GELETTI et alii, 2008, modificato).
 - a) Image of the seismic reflection profile CROP-M15 with the evidence of *bright spots* indicating the presence of gas in the Plio-Quaternary sediments; b) *multibeam bathymetry* (MB) and a pseudo 3D image (c) with *chirp* profile and MB where a system of active faults is highlighted, along which some *pockmarks* can be identified. The seismic line shows the presence of a deep diapiric structure that also deforms the sea floor (GELETTI et alii, 2008, modified).

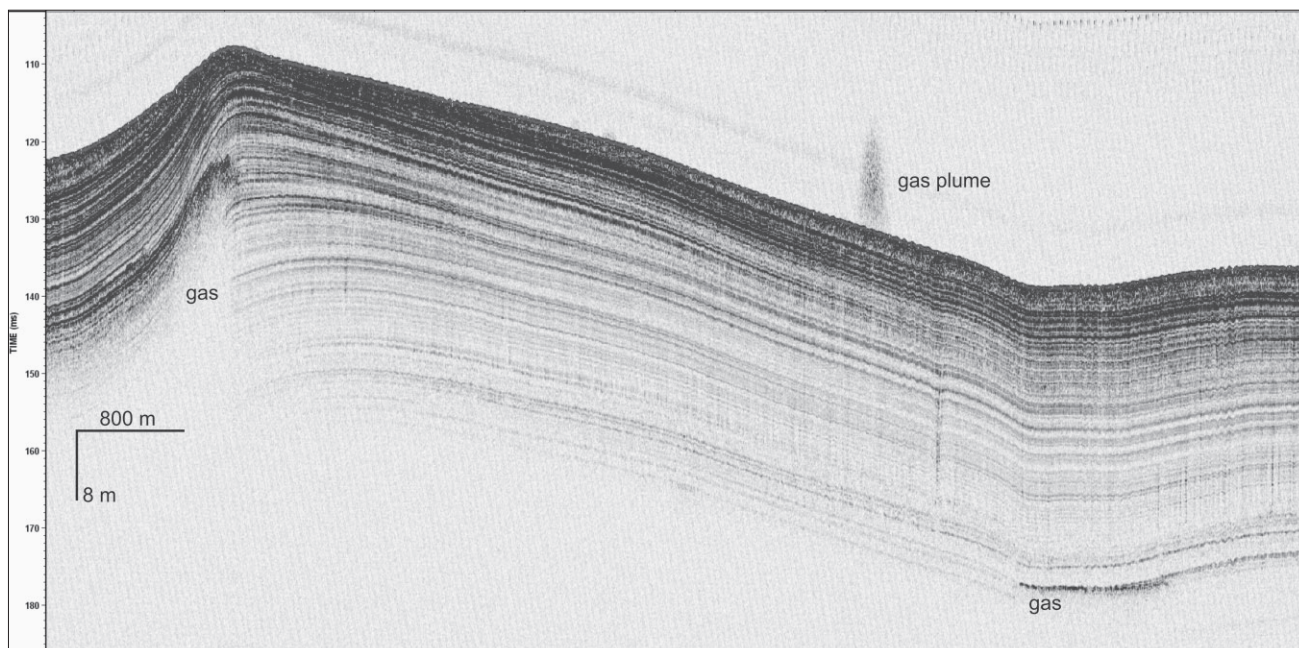


Fig. 3 - Particolare di linea *chirp* con una evidenza di *gas plume* (posizione in figura 1). - Detail of a *chirp* line with evidence of *gas plume* (position in figure 1).

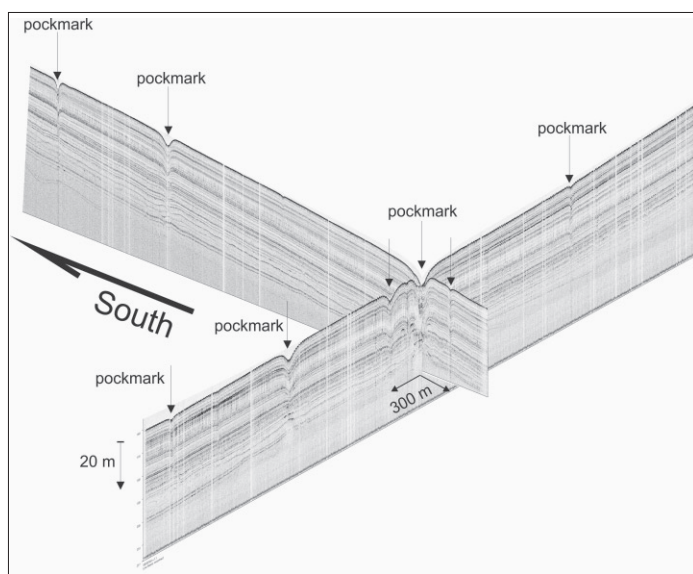


Fig. 4 - Immagine di *pockmark* visibili su due profili *chirp* ortogonali entro la piana del MAD (posizione in figura 1).
- Image of *pockmarks* visible on two orthogonal *chirp* profiles within the MAD plain (position in figure 1).

BIBLIOGRAFIA

- CURZI P. V. & VEGGIANI A. (1986) - *I pockmarks nel Mare Adriatico Centrale*. Acta Naturalia de "Lateneo Parmense", **21**: 79-90.
- GELETTI R., DEL BEN A., BUSETTI M., RAMELLA R. & VOLPI V. (2008) - *Gas seeps linked to salt structures in the Central Adriatic Sea*. Basin Res., **20**(4): 473-487.
- GRANDIC S. & MARKULIN Z. (2000) - *Triassic synrift euxinic basins as a factor of exploration risk in the Croatian offshore area*. Nafta, Special Issue, 2nd International Symposium on petroleum Geology, April 22-24 1999: 41-50.
- HERAK D., HERAK M., PRELOGOVIC E., MARKUSIC S. & MARKULIN Z. (2005) - *Jabuka island (Central Adriatic Sea) earthquakes of 2003*, Tectonophysics, 398: 167-180.
- HOVLAND M. & CURZI P.V. (1989) - *Gas seepage and assumed*

mud diapirism in the Italian Central Adriatic Sea. Marine and Petroleum Geology, **6**: 161-169.

- RIDENTE D. & TRINCARDI F. (2006) - *Active foreland deformation evidenced by shallow folds and faults affecting late Quaternary shelf-slope deposits (Adriatic Sea, Italy)*. Basin Res., **18**: 171-188.
- STEFANON A. (1980) - *The acoustic response of some gas-charged sediments in Northern Adriatic Sea*. Bottom Interacting Ocean Acoustics Conference, SACLANT ASW Center, La Spezia: 73-84.
- TRINCARDI F., CATTANEO A., CORREGGIARI A. & RIDENTE D. (2004) - *Evidence of soft sediment deformation, fluid escape, sediment failure regional weak layers within the late Quaternary mud deposits of the Adriatic Sea*. Marine Geology, 213: 91-119.
- ViDEPI PROJECT (Visibilità Dati Esplorazione Petrolifera in Italia) (2009) - <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>

Emissioni gassose sottomarine nel tratto costiero prospiciente Tor Caldara (Lazio meridionale, Italia)

Submarine shallow-water gas vents facing Tor Caldara (Southern Latium, Italy)

MANCINELLA D.(*), MANTERO D.(*), TESTARDI M.(*)

RIASSUNTO - L'area di Tor Caldara è interessata dalla diffusa presenza di manifestazioni gassose legate all'attività secondaria del Vulcano Laziale, che si impostano in corrispondenza di faglie di estensione regionale. Alcune emissioni gassose si trovano anche sui fondali antistanti la falesia. I punti di emissione gassosa sottomarina presentano caratteristiche differenti a seconda della natura del substrato geologico. Le emissioni impostate su fondo sabbioso sono infatti caratterizzate dalla presenza di ossidi metallici precipitati, che formano un deposito di forma subcircolare centrato sul punto di emissione. Le emissioni impostate su substrato coerente, invece, ospitano colonie filamentose di solfobatteri appartenenti ad un nuovo genere e ad una nuova specie qui identificati.

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, vulcanismo, acque costiere, solfatara, solfobatteri

ABSTRACT - The Tor Caldara area is affected by the widespread rising of endogenous gases, linked to the secondary activity of the Vulcano Laziale, which are set in connection with regional faults. Some gaseous emissions are also found on the seabed facing the cliffs. Submarine gas vents have different characteristics depending on the nature of the geological substrate. Gas vents set on the sandy bottom are characterized by the presence of precipitated metal oxides, making a sub-circular shaped deposit centered on the emission point. Gas vents set on a coherent substrate, on the other hand, host filamentous colonies of sulphobacteria belonging to a new genus and to a new species, identified here.

KEY WORDS: volcanism, shallow-water, solfataras, sulphobacteria, fluid emission, ocean floors

1. - INTRODUZIONE

L'area di Tor Caldara, tutelata da una Riserva Naturale Regionale, è interessata da numerose ed estese emissioni gassose legate all'attività secondaria del distretto vulcanico Albano. Alcune emissioni gassose sono situate anche nel tratto di mare prospiciente la falesia, ad una profondità non superiore ai 3,5 metri e ad una distanza di qualche centinaio di metri dalla costa (fig. 1).

Le caratteristiche mineralogiche ed ecologiche dell'ambiente circostante i punti di emissione gassosa sono condizionate dalla natura incoerente oppure coerente del fondale.

2. - L'AREA DI TOR CALDARA: BREVE INQUADRAMENTO GENERALE

Istituita con la legge n. 50 del 1988 dalla Regione Lazio, la Riserva Naturale Regionale Tor Caldara custodisce, tra le altre, alcune valenze di notevole rilevanza per ciò che riguarda il patrimonio geologico. L'area è sede di manifestazioni tardive con venute gassose, connotate da forti contrasti cromatici.

In un habitat fitoforestale di tipo xerico prevalente si aprono antiche aree estrattive legate allo sfruttamento dei minerali contenuti nei sedimenti della duna antica e delle argille e ghiaie plio-plei-

(*) Regione Lazio – Direzione Capitale Naturale, Parchi e Aree Protette Via del Pescaccio 96-98, 00166 - Roma



Fig. 1 - Ubicazione delle emissioni gassose sottomarine.
- Location of the submarine gas vents.

stoceniche, livelli permeati dalla risalita di gas ricchi, tra gli altri, in zolfo (fig. 2).

Lo zolfo, impiegato nell'ambito dello Stato Pontificio per la produzione di coloranti tessili, veniva estratto dai sedimenti tramite processi di riscaldamento/decantazione che venivano attuati tramite la realizzazione di forni e l'utilizzo di appositi contenitori fittili detti "caldane", da cui il toponimo Torre delle Caldane mutato successivamente in Tor Caldara (MANTERO, 1995).

L'attività idrotermale ha favorito con tutta probabilità, congiuntamente ai sistemi di riscaldamento delle acque tramite combustione di prodotti vegetali, il funzionamento delle terme di pertinenza di una villa costiera di età imperiale indagata nei decenni scorsi e localizzata proprio al di sotto ed in prossimità della Torre cinquecentesca (GIACOPINI, 2003).

Le ghiaie di origine fluviale presenti nei sedimenti pleistocenici, spesso utilizzate quali materia prima nelle diffuse attestazioni delle industrie litiche di modo 1, 2, e 3 e tardo preistoriche (Paleolitico inferiore, medio e superiore e Oloceniche), presentano il cortice e le superfici di distacco ricoperti da una caratteristica patina bruna dovuta a processi di mineralizzazione dello zolfo. I suoli de-

terminano localmente l'esistenza di specie legate alle emissioni gassose come le praterie ad *Agrostis albula* e i popolamenti del rarissimo zigolo termale (*Cyperus polystachyos*), la cui presenza a Tor Caldara costituisce, unitamente alla stazione di Ischia, l'unica attestazione in ambito mediterraneo.

3. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Lungo il margine tirrenico il vulcanismo Laziale, appartenente alla Provincia Comagmatica Romana, è attivo dal Pleistocene superiore, con carattere alcalino-potassico ed eruzioni prevalentemente esplosive (DE RITA *et alii*, 1995).

Dal Messiniano superiore al Pliocene inferiore, successivamente alla fase di raccorciamento crostale coincidente con la formazione della catena appenninica, si verifica una fase distensiva che riutilizza in parte le stesse discontinuità tettoniche originatesi durante la fase compressiva (SALVINI, 1991; FACCENNA *et alii*, 1994).

Questi lineamenti tettonici, rimasti attivi dal Pleistocene superiore sino al limite con l'Olocene (FUNICIELLO *et alii*, 1992), sono tuttora da con-



Fig. 2 - Rigonfiamento del terreno causato dalla risalita di gas endogeni nella Riserva Naturale Regionale Tor Caldara.
- *Ground swelling caused by the rise of endogenous gases in Tor Caldara Regional Natural Reserve.*

siderarsi sistemi capaci di riattivazione con generazione di terremoti che possono risentirsi anche nell'area romana (GASPARINI *et alii*, 1991; PANTOSTI & VELONÀ, 1991).

La complessa rete di lineamenti strutturali a prevalente carattere distensivo costituisce una via preferenziale di risalita di fluidi profondi (TARCHINI, 2009), con risorgenze termali, manifestazioni gassose, deposizione locale di travertini e sviluppo di *sinkhole*.

Le manifestazioni gassose sottomarine situate nel tratto di mare prospiciente la falesia di Tor Caldara (fig. 3), sono quindi inquadrabili all'interno dell'esteso circuito idrogeologico costituito da zone di risalita di fluidi endogeni allineati lungo direttrici tettoniche che, attraverso la Solforata di Pomezia, giungono fino ad Ardea.

4. - LE EMISSIONI GASSOSE SOTTOMARINE DI TOR CALDARA

La presenza di emissioni gassose sottomarine nei pressi di Tor Caldara (fig. 4) è nota da tempo presso la popolazione locale, a causa anche della facilità d'individuazione dovuta alla modesta profondità del fondale ed alla vicinanza alla riva. Ad esempio ANTONELLI *et alii* (2010), in una pubbli-

cazione divulgativa riguardante le solfatare del Lazio, ne segnalano la presenza nei fondali antistanti la Riserva Naturale.

Sono state individuate due distinte zone di emissione gassosa: la prima su substrato sabbioso, indicata in figura 1 come punto 1 e avente coordinate Lat.: 45°57'20.57" N - Long.: 231°88'68.17" E; la seconda su substrato roccioso, indicata in figura 1 come punto 2 e avente coordinate: Lat. 45°57'68.9" N - Long. 231°88'41.92" E.



Fig. 3 - Falesia antistante le emissioni sottomarine.
- *Cliff facing submarine gas vents.*



Fig. 4 - Emissione gassosa sottomarina in risalita.
- Rising submarine gas vent.

Non sono state effettuate analisi della composizione dei gas sottomarini emessi ma, vista la loro evidente appartenenza all'ampio areale compreso tra Lavinio e Anzio (ANTONELLI *et alii*, 2010), con ottimo livello di confidenza è possibile ipotizzare che essi presentino CO₂ come gas principale ed un contenuto minore di altre sostanze come H₂S, N₂, CH₄ e ²²²Rn, come evidenziato da molti autori (CHIODINI & FRONDINI, 2001; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2003; CARAPEZZA *et alii*, 2003; TUCCIMEI *et alii*, 2006).

I punti di emissione gassosa presentano caratteristiche differenti a seconda della natura del substrato geologico. Le emissioni su fondo sabbioso sono infatti caratterizzate dalla presenza di ossidi metallici precipitati, che formano un deposito di forma subcircolare centrato sul punto di emissione e di colore nettamente più scuro rispetto alle sabbie circostanti (figg. 5, 6). Tali punti di emissione appaiono grossomodo allineati lungo un tratto di circa 10 m di lunghezza, a testimonianza della loro probabile origine in corrispondenza di un lineamento tettonico.



Fig. 5 - Depositi mineralizzati di forma sub-circolare.
- Sub-circular shaped mineral deposits.



Fig. 6 - Emissioni gassose su fondo sabbioso. Profondità: circa 3 metri.
- Gas vents on the sandy bottom. Depth: approximately 3 meters.

Le emissioni su fondo roccioso sono caratterizzate dalla presenza di colonie bentoniche filamentose di solfobatteri (fig. 7). PATWARDHAN & VETRIANI (2016), hanno identificato questi organismi come batteri mesotermi, anaerobi facoltativi e chemiolitoautotrofi facoltativi e, dopo aver effettuato un'analisi genetica, hanno istituito un nuovo genere ed una nuova specie: *Varunaivibrio sulfuroxidans*.

Il substrato roccioso su cui si impostano tali colonie batteriche è costituito prevalentemente da argille sabbiose del Pliocene, le stesse che affiorano alla base della falesia di Tor Caldara. In alcuni casi, però, esse si impostano su biocostruzioni litoidi derivanti dalla giustapposizione dei tubuli di *Sabellaria alveolata*, un verme polichete.



Fig. 7 - Colonie bentoniche filamentose di solfobatteri.
- Benthic filamentous colonies of Sulfobacteria.

5. - CONCLUSIONI

L'area di Tor Caldara è interessata dalla diffusa presenza di manifestazioni gassose legate all'attività secondaria del Vulcano Laziale che si impostano

in corrispondenza di faglie. Alcune emissioni gassose sono presenti anche nel tratto di mare antistante la falesia. Le emissioni impostate su substrato incoerente presentano un deposito di forma circolare centrato nel punto di emissione e costituito da solfuri e ossidi metallici. Le emissioni impostate su substrato coerente, in alcuni casi di origine biotica (*Sabellaria alveolata*), ospitano colonie filamentose di solfobatteri (fig. 7), appartenenti ad un nuovo genere e ad una nuova specie identificati in questo sito.

Ringraziamenti

Si ringraziano per il supporto fornito Vittorio Castellana e Damiano Antonelli (Riserva Naturale Regionale Tor Caldara).

BIBLIOGRAFIA

- ANNUNZIATELLIS A., CIOTOLI G., LOMBARDI S. & NOLASCO F. (2003) - *Short and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area*. Journ. of Geochem. Exploration, **77**: 93-108.
- ANTONELLI D., ARGENTI E., FATTORI C., MANCINELLA D., MANTERO D., MASTRANDREA N., ORLANDINI R. & TUFANO M. (2010) - *Indagine e ricerca sulla pericolosità connessa all'emissione di gas endogeni nel territorio della Regione Lazio*. INGV - Reg. Lazio, Relazione finale, Parte I: 82-101.
- ANTONELLI D., MANTERO D. & MASTRANDREA N. (2010) - *Tor Caldara*. In: BARBERI F., CARAPEZZA M.L., DE SIMONE G., DIANO G., FISHER C., LELLI M., LUCCHETTI C., MELIAN G., PAGLIUCA N., PEREZ N., RANALDI M., RICCI T., SOLIGO M., TARCHINI L., TUCCIMEI P., VOGEL A. & WEBER K.: "Percorsi geologici nel Lazio - le Solfatare", pp. 49, Ed. Regione Lazio - ARP, Roma.
- CARAPEZZA M.L., BADALAMENTI B., CAVARRA R. & SCALZO A. (2003) - *Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani volcano (Cava de' Selci, Roma)*. J. Volc. Geoth. Res., **23**: 81-94.
- CHIODINI G. & FRONDINI F. (2001) - *Carbon dioxide degassing from the Alban Hills volcanic region, central Italy*. Chem. Geol., **177**: 67-83.
- DE RITA D., FACCENNA C., FUNICIELLO R. & ROSA C. (1995) - *Stratigraphy and volcano-tectonics*. In: TRIGILA R. (Ed.): "The volcano of the Alban Hills", 33-71, Roma.
- FACCENNA C., FUNICIELLO R. & MARRA F. (1994) - *Inquadramento geologico-strutturale dell'area romana*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **50**: 32-47.
- FUNICIELLO R., MATTEI M. & VOLTAGGIO M. (1992) - *Recent strike-slip faulting and problems of possible reactivation in Rome area*. In: BOSCHI E. & DRAGONI M. (Eds): "Earthquake prediction": 225-236.
- GASPARINI C., FUNICIELLO R., MONTONE P., PAROTTO M. & SALVINI F. (1991) - *Il campo di fratturazione superficiale dei Colli Albani (Roma): implicazioni per un modello sismotettonico dell'area*. In: BOSCHI E. & DRAGONI M. (Eds): "Aree sismogenetiche e rischio sismico in Italia IP", Il Cigno, Roma, 251-258.
- GIACOPINI L. (2003) - *Riserva Naturale Tor Caldara. La villa romana*. In: CANEVA G. & TRAVAGLINI C.M. (Eds): "Atlante storico - Ambientale Anzio e Nettuno", Prov. Roma, Univ. Roma Tre: 336-341.
- MANTERO F.M. (1995) - *Lo zolfo, i chirografi e i boschi*. In: BONIFAZI L., GIACOPINI L., MANTERO D. & MANTERO F.M.: "Tor Caldara. Dalla selva al bosco. Un ambiente, la sua storia, i suoi abitanti", Città di Anzio, RNR Tor Caldara, Reg. Lazio, Prov. Roma, WWF, pp. 198, Viella Ed., Roma.
- PANTOSTI D. & VELONÀ M. (1991) - *Parametri geologici di input per la microzonazione: i caratteri della fratturazione superficiale della città di Roma*. In: BOSCHI E. & DRAGONI M. (Eds): "Aree sismogenetiche e rischio sismico in Italia IP", Il Cigno, Roma: 237-249.
- PATWARDHAN S. & VETRIANI C. (2016) - *Varunaivibrio sulfuroxidans gen. Nov., sp. Nov., a facultatively chemolithoautotrophic, mesophilic alphaproteobacterium from a shallow-water gas vent at Tor Caldara, Tyrrhenian Sea*. Int. Journ. of Syst. and Evol. Microb., **66**: 3579-3584.
- SALVINI F. (1991) - *Tettonica a blocchi in settori crostali superficiali: modellizzazione ed esempi di dati strutturali in Appennino centrale*. Studi Geol. Camerti, vol. spec. 1991/2, CRÖP 11: 237-247.
- TARCHINI L. (2009) - *Le emissioni di gas endogeno dei Colli Albani e dell'Isola di Vulcano e valutazione della loro pericolosità*. Tesi di dottorato, Univ. Roma Tre, pp. 155.
- TUCCIMEI P., MORONI M. & NORCIA D. (2006) - *Simultaneous determination of ^{222}Rn ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: influence of particle size, humidity and precursors concentration*. Applied Radiation and Isotopes, **64**: 254-263.

Evidenze morfologiche di campi di *pockmark* e fuoriuscite di fluidi sui fondali del Mar Tirreno

Morphological evidences of pockmarks fields and fluid escapes on the seafloor of the Tyrrhenian Sea

LORETO M.F.(*)

RIASSUNTO - Il fondale del Mar Tirreno è caratterizzato dalla presenza di numerose fuoriuscite di fluidi/gas e di morfologie che testimoniano il verificarsi di questo fenomeno. L'analisi dettagliata dei dati di morfo-batimetria a media risoluzione, resi disponibili all'intera comunità nell'ambito del programma Europeo EMODnet, ha permesso di identificare la presenza di depressioni sub-circolari, *pockmark*, lungo il margine peri-tirrenico che testimoniano l'avvenuta fuoriuscita di fluidi e gas dal fondale marino provenienti da livelli sedimentari profondi. In particolare, sono stati identificati tredici campi di *pockmark* per un numero totale di diverse centinaia di occorrenze puntuali. Di questi campi: a) sei sono stati identificati nel Tirreno settentrionale, tra il margine Sardo - Corso e la Toscana; b) quattro nel Tirreno sud occidentale, lungo il margine nord della Sicilia; c) due nel Tirreno orientale al largo della Calabria; d) uno al largo del Lazio nel Tirreno centrale. Sono stati identificati *pockmark* sia di piccole che di grandi dimensioni. I *pockmark* di piccole dimensioni hanno forma circolare e sono disposti in modo casuale sia allineati lungo direzioni preferenziali. In generale, questi hanno un diametro medio di 500 m e profondità media di 15/20 m e sono distribuiti in modo casuale al tetto di ridge sedimentari o nell'intorno di sistemi vulcanici. Alcune volte si allineano lungo incisioni prodotte dal flusso di correnti che formano dei *gully* oppure prodotti dall'attività di faglie. I *pockmark* di grandi dimensioni, detti "*Giant pockmark*", spesso risultano dalla fusione di *pockmark* minori ma contigui e formano strutture coalescenti allungate. I *Giant pockmark* hanno diametro che frequentemente supera i 2 km e profondità di 60/120 m e sono per lo più organizzati in sciami allineati lungo incisioni controllate principalmente da processi tettonici e in minor parte da flussi di correnti profonde. Nella zona del Tirreno orientale le fuoriuscite intense di fluidi/gas in grado di creare sul fondale marino enormi depressioni sono spesso associate a sistemi vulcanici.

PAROLE CHIAVE: emissione fluida, fondale marino, *pockmark*, batimetria, gas, margine continentale

ABSTRACT - The Tyrrhenian seafloor is characterized by the presence of abundant fluids/gas escapes and morphologies witnessing the occurrence of this phenomenon. The detailed analyses of middle resolution morpho-bathymetric data, made available to the entire community in the frame of the EMODnet European program, allowed to identify the presence of sub-circular depressions, named *pockmarks*, along the peri-Tyrrhenian margin which witness the escapes of fluids at seafloor fed by deep levels. We identified thirteen fields of *pockmarks* and several hundreds of single *pockmarks* belonging to them. Among these: a) six are located in the Northern Tyrrhenian, amongst Sardinia-Corsica and Tuscany; b) four are located in the Southwestern Tyrrhenian, North of Sicily; c) two are in the Eastern Tyrrhenian, offshore Calabria region; and d) one is offshore Lazio in the Central Tyrrhenian sea. *Pockmarks* of both small and very large dimensions are present. The small *pockmarks* have circular shape, and are either randomly distributed or aligned along preferential directions. Generally, these have an average diameter and depth of 500 m and 15/20 m, respectively, and have random distribution at the top of sedimentary ridges or within volcanic systems. Sometimes they align along engraves generated by deep water currents, forming "*gullies*", or generated by tectonic structures. The large dimension *pockmarks*, named "*Giant pockmarks*", result by merging of several (two, three or more) small *pockmarks* forming coalescent and elongated structures. *Giant pockmarks* have average diameter that frequently exceeds 2 km and depth ranging from 60 to 120 m. These are mostly organized in swarms along engraves mainly controlled by tectonic processes and in minor part by deep water currents. In the Eastern Tyrrhenian Sea the fluids/gas escapes able to leave large depressions on the seafloor are frequently associated with volcanic systems.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, *pockmarks*, bathymetry, gas, continental margin

(*)Istituto di Scienze Marine (ISMAR), CNR sede di Bologna, Via P. Gobetti 101, 40129 Bologna

1. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0001, TIRRENO SETTENTRIONALE

I *pockmark* sono crateri sui fondali marini generati dalla fuoriuscita di fluidi, spesso arricchiti da grandi quantitativi di gas, che si accumulano negli strati sedimentari sottostanti. Quando la pressione esercitata dal fluido supera quella litostatica esercitata dal sedimento, il fluido buca i sedimenti e fuoriesce liberandosi nella colonna di acqua sovrastante. L'identificazione dei *pockmark* sui fondali marini è stata possibile grazie a dati batimetrici ad alta risoluzione. Nel corso dell'ultimo decennio e grazie alla batimetria di alta risoluzione (MARANI *et alii*, 2004; EMODnet Bathymetry Consortium, 2018) è stato possibile individuare numerosi campi di *pockmark* mai osservati in precedenza sui fondali del Mar Tirreno.

Il fondale marino del Tirreno settentrionale (fig. 1a) presenta localmente delle morfologie tipi-

che dei *pockmark* (buchi quasi tondeggianti di vario diametro e profondità) organizzati in sciami alla profondità media di 700-1.100 m.

Quest'area, delimitata con un poligono denominato TYR0001 (fig. 1b), si estende per 346 km² ed include più di 60 singoli *pockmark* organizzati in gruppi o lungo linee, posizionati al tetto di un rilievo sottomarino allungato in direzione NO-SE. Tra gli eventi osservati ve ne sono alcuni di dimensioni rilevanti, ad esempio quello indicato con la freccia grigia in figura 1 (b, c) è caratterizzato da un salto batimetrico di circa 42 m e una pendenza media delle pareti interne di ca. 7° (vedi anche il profilo batimetrico in figura 1). Questo *pockmark* ha un diametro di ca. 900 m e un'area di quasi 1 km². Tali dimensioni ci portano a classificarlo come *pockmark* gigante. Altri *pockmark* minori hanno profondità media di ca. 10 m e diametri di 400 m. L'analisi delle morfologie dell'area circostante, ossia piccoli rilievi circolari e forme ondulate, e la

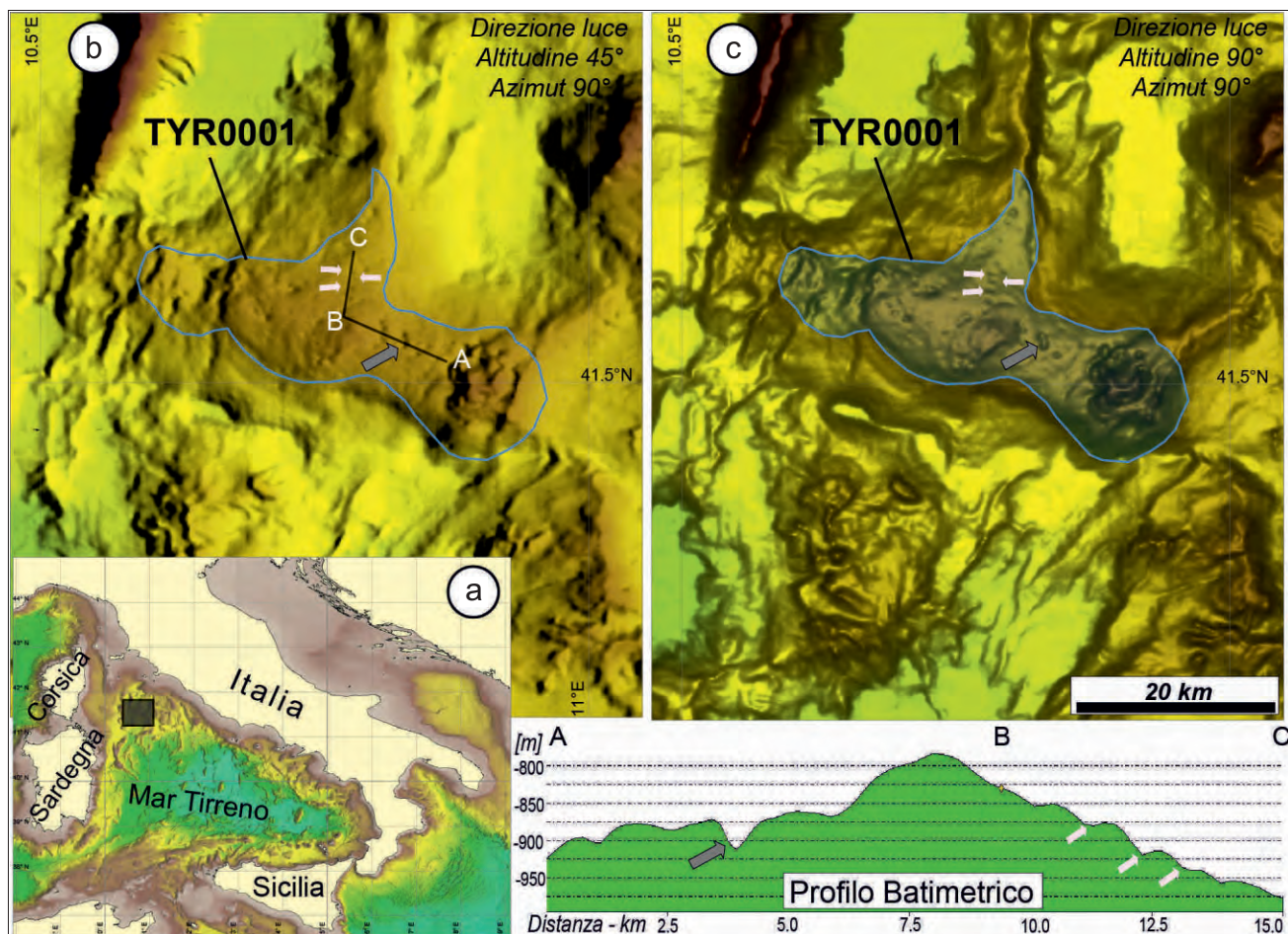


Fig. 1 - Campo di *pockmark* TYR0001 localizzato nel Tirreno settentrionale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). L'area di questo campo di *pockmark* è delimitata da un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* sono indicati con le frecce bianche, mentre la freccia grigia indica un *pockmark* gigante. La linea nera nella mappa (b) indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*. A, B, C indicano i vertici del profilo batimetrico.

- *Pockmarks* field TYR0001 located within the northern Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetric data (grid cell size of 200 x 200 m; ascii data downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded by using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). The area of *pockmarks* field TYR0001 is marked by a transparent light blue polygon (c). Thick white arrows point at the *pockmarks* morphologies, while the thick grey arrow points at a giant *pockmark*. Black line in map (b) marks the bathymetric profile extracted across the *pockmarks* field. A, B, C point at the vertices of the bathymetric profile.

presenza di rocce basaltiche riscontrate sul vicino Monte Etruschi (KELLER, 1981), ci permette di ipotizzare un'origine vulcanica dei fluidi che hanno dato origine a questo campo. Sulla base della sola batimetria ed essendo un campo di *pockmark* mai studiato in precedenza non è possibile definirne l'attività, l'età e la geochimica.

2. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0002, TIRRENO SETTENTRIONALE

Sempre nell'area del Tirreno settentrionale, sul fondale marino sono presenti delle morfologie sub-circolari tipiche dei *pockmark* (fig. 2a), raggruppati al tetto di un piccolo rilievo che si trova ad una profondità media di 750-800 m. Questo campo denominato TYR0002 ha un'estensione di ca. 28.4 km² ed include ca. 14 singoli *pockmark*.

Questi apparentemente sono allineati in direzione NO-SE. Tra gli eventi osservati ce n'è uno che potrebbe essere classificato come gigante (freccia grigia in fig. 2b, c). Questo è caratterizzato da un salto batimetrico di 49 m e una pendenza media delle pareti di ca. 7° (vedi profilo batimetrico). Questo *pockmark* ha un diametro di 1,2 km e un'area di quasi 1 km². Altri *pockmark* minori mostrano un salto batimetrico di ca. 10 m e diametro di ca. 500 m. Considerata la presenza di morfologie sub-coniche, poco più a sud (fig. 2c), e le effusioni magmatiche che caratterizzano il Monte Tiberino, localizzato immediatamente ad est (CELLA *et alii*, 1998) anche per questo campo è ipotizzata un'origine vulcanica dei fluidi ad esso associabili. Sulla base della sola batimetria ed essendo un campo di *pockmark* mai studiato in precedenza non è possibile definirne l'attività, l'età e la geochimica.

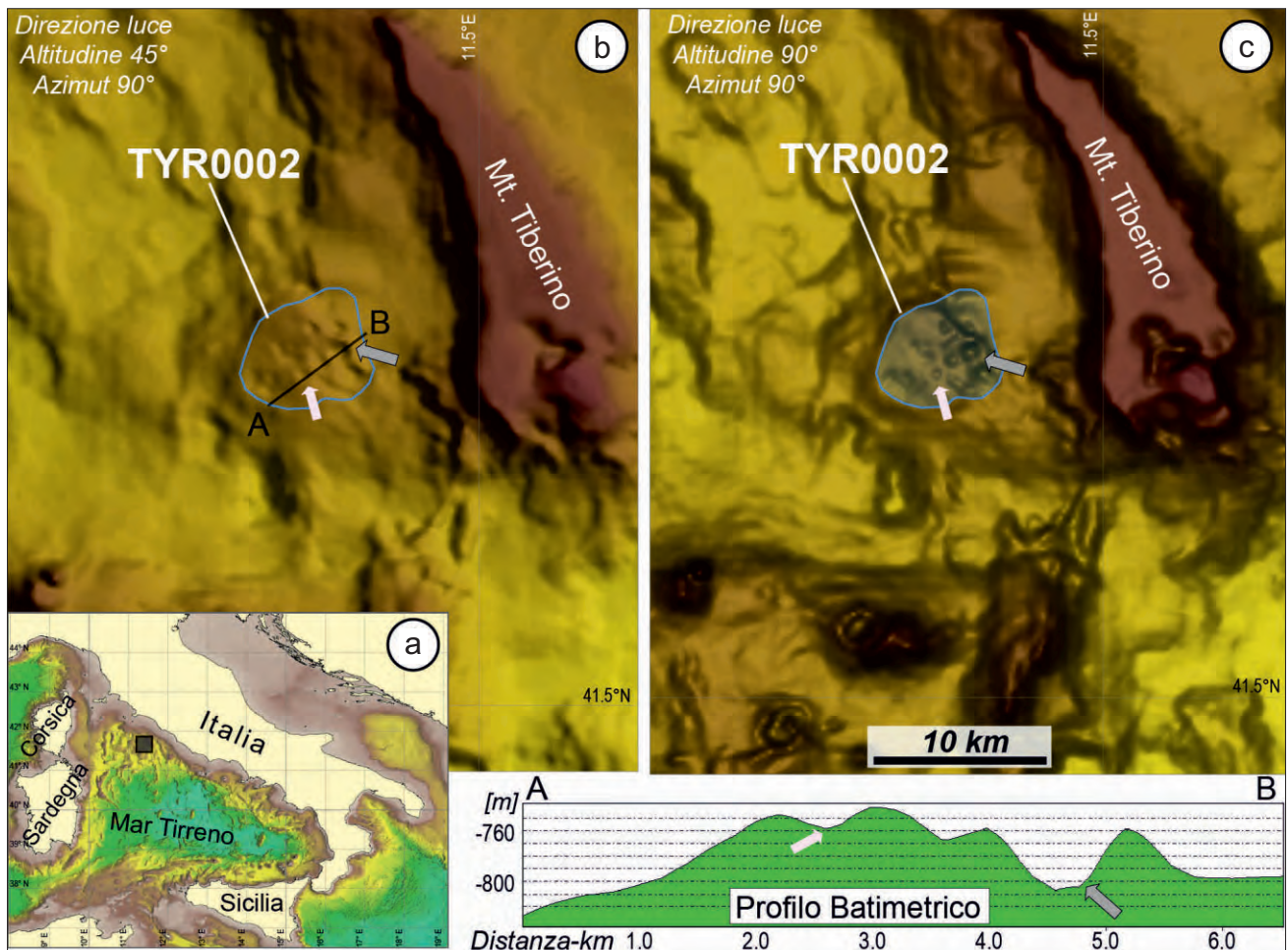


Fig. 2 - Campo di *pockmark* TYR0002 localizzato nel Tirreno settentrionale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). L'area di questo campo di *pockmark* è delimitata con un poligono azzurro trasparente (c). La freccia bianca indica uno dei tanti *pockmark* che costituiscono il campo TYR0002, mentre la freccia grigia indica un *pockmark* gigante.

La linea nera nella mappa (b) indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*. A, B indicano i vertici del profilo batimetrico.

- *Pockmarks* field TYR0002 located within the northern Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). The area of *pockmarks* field is represented by a transparent light blue polygon (c). The thick white arrow points at one of the *pockmarks* belonging to this field, while the thick grey arrow points at a giant *pockmark* belonging to this field. Black line marks the bathymetric profile in map (b) extracted across the *pockmarks* field. A, B point at the vertexes of the bathymetric profile.

3. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0003, TIRRENO SETTENTRIONALE

Questo piccolo campo di *pockmark* (fig. 3a), si differenzia leggermente dagli altri campi per l'organizzazione dei singoli *pockmark*, i quali sono principalmente allineati in direzione NE-SO, al tetto di un *ridge* che man mano si approfondisce da 400 a 1.000 m. L'area è stata delimitata da un poligono denominato TYR0003 (fig. 3b, c) che si estende per ca. 140 km² e conta al suo interno più di 15 *pockmark* con profondità variabile nel range di 10-30 m (freccie bianche). Questi hanno un diametro mediamente compreso tra 400 e 600 m e pendenza delle pareti interne tra 3° e 6° (profilo batimetrico). A nord dei *pockmark* si osservano

morfologie simili ma di dimensioni superiori (freccie grigie), sembrerebbero *pockmark* giganti caratterizzati da salti batimetrici fino a 100 m e diametro superiore a 1.5 km (profilo batimetrico in figura 3). Purtroppo sulla base di questi dati non è possibile definire con esattezza l'origine di queste depressioni; considerato che si allineano lungo un *ridge* e formano delle importanti depressioni non necessariamente circolari è possibile ipotizzare un'origine tettonica. Potrebbero essere controllate dal sistema di faglie estensionali che ha permesso l'assottigliamento della crosta continentale e l'apertura dei bacini Magnaghi e Vavilov. Dalle informazioni petrografiche dei campioni di roccia presi nelle aree circostanti, ossia rocce di origine plutonica poco più a nord e rocce di origine magmatica non

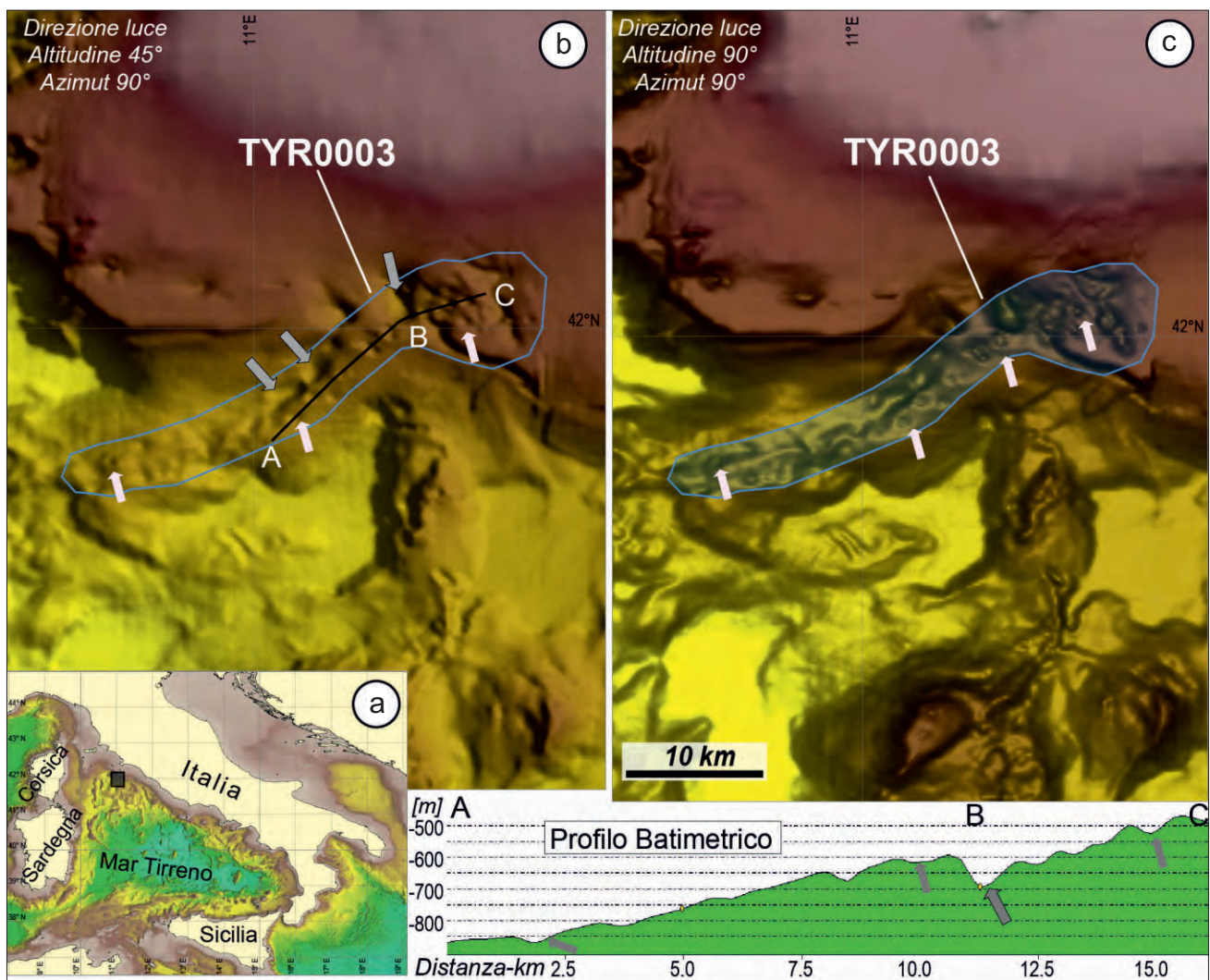


Fig. 3 - Campo di *pockmark* TYR0003 localizzato nel Tirreno nord-occidentale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). L'area del campo di *pockmark* TYR0003 è delimitata da un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* sono indicati con le frecce bianche, mentre le frecce grigie indicano i *pockmark* coalescenti che formano depressioni di grandi dimensioni (b, c). La linea nera in mappa (b) indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*. A, B, C indicano i vertici del profilo batimetrico.

- *Pockmarks* field TYR0003 located within the north-western Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). The area of *pockmarks* field TYR0003 is represented by a transparent light blue polygon (c). Thick white arrows point at the *pockmarks* morphologies, while thick grey arrows point at the coalescent structures that form very large depressions (b, c). Black line in map (b) marks the bathymetric profile extracted across the *pockmarks* field. A, B, C point at the vertexes of the bathymetric profile.

chiaramente classificate poco più a sud (SARTORI, 2005), possiamo ipotizzare che i fluidi fuoriusciti da questi *pockmark* potrebbero essere stati di origine magmatica e che la loro posizione sia controllata dalla tettonica dell'area. L'età delle rocce plutoniche, con sorgente mantellica campionate nelle aree emerse (Toscana e Lazio), è Tortoniano - Recente (SARTORI, 2005, e referenze in esso contenute). Quindi, potremmo ipotizzare un'attività del campo TYR0003 fino al Recente.

4. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0004, TIRRENO SETTENTRIONALE

Anche questo campo di *pockmark* si trova nel Tirreno settentrionale (fig. 4a). La sua peculiarità è l'allineamento dei *pockmark* in direzioni sia longitudinali sia trasversali rispetto al margine continentale. La direzione dominante sembra essere N-S, lungo la

quale corre una profonda depressione di -150 m rispetto alle aree circostanti, con pendenza media di 9° e immersione a ovest. Questa depressione inter-cetta una serie di *pockmark* di piccole dimensioni allineati in direzione E-O, spesso coalescenti (vedi fig. 4b, c, destra). All'intersezione dei due sistemi (N-S e E-O) si possono formare *pockmark* giganti (freccia grigia). Questi ultimi raggiungono la profondità di 130 m a ridosso della scarpata N-S (profilo batimetrico; fig. 4), un diametro di 2.4 km e una pendenza di 10° . I *pockmark* minori mostrano profondità variabile in un range di 15-25 m, diametro tra 400 e 600 m, e pendenza tra 2° e 4° . Questo campo di *pockmark*, chiamato TYR0004, si estende per ca. 270 km². Una seconda scarpata orientata N-S con salto batimetrico minore è presente poco più a ovest. Tali caratteristiche sono diagnostiche di un sistema controllato dalla tettonica. In quest'area è stato identificato un sistema di faglie estensionali, orientate ca. N-S che hanno controllato l'assotti-

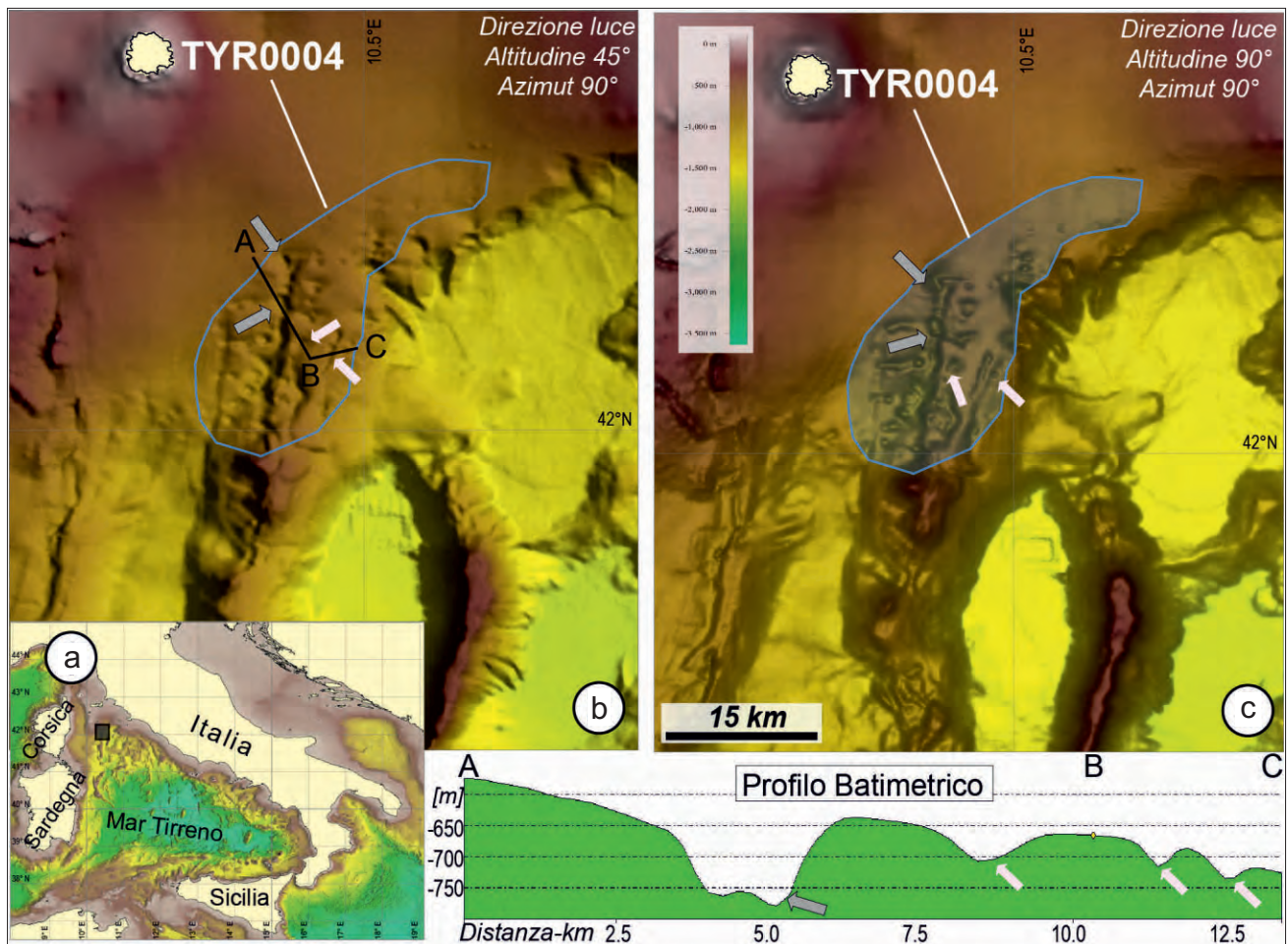


Fig. 4 - Campo di *pockmark* TYR0004 localizzato nel Tirreno settentrionale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica (a). Dati batimetrici a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). L'area di questo campo è delimitata con un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* sono indicati con le frecce bianche, mentre le frecce grigie indicano i *pockmark* coalescenti che intersecano la scarpata N-S (b, c). La linea nera nella mappa (b) indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*. A, B, C indicano i vertici del profilo batimetrico. - Pockmarks field TYR0004 located within the northern Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m, downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). The area of pockmarks field TYR0004 is represented by a transparent light blue polygon (c). Thick white arrows point at the pockmarks morphologies, while the thick grey arrows point at the coalescent structures crossing the N-S escarpment (b, c). Black line in map (b) marks the bathymetric profile extracted across the pockmarks field. A, B, C point at the vertices of the bathymetric profile.

gliamento crostale durante l'apertura del bacino di retro-arco tirrenico (TRINCARDI & ZITELLINI, 1987). Sulla base delle informazioni petrografiche delle rocce campionate nelle aree circostanti, ossia rocce di origine plutonica a nord e rocce di origine magmatica a sud (SARTORI, 2005), possiamo ipotizzare che i fluidi associabili a questi *pockmark* potrebbero essere di origine magmatica e che la loro posizione sia controllata dalla tettonica. L'età delle rocce plutoniche, con sorgente mantellica campionate nelle aree emerse (Toscana e Lazio), è Tortoniano - Recente (SARTORI, 2005, e referenze in esso contenute). Quindi, potremmo ipotizzare un'attività del campo TYR0004 fino al Recente.

5. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0005, TIRRENO SETTENTRIONALE

In prossimità del margine orientale Corso-Tirrenico settentrionale (fig. 5a) è presente un campo di *pockmark* qui denominato TYR0005.

Questo campo (fig. 5b) si estende per 800 km² ed è composto da numerosi *pockmark* di piccole dimensioni; questi hanno profondità che variano da -3 m a -15 m al massimo. Di conseguenza hanno diametro che varia in un range di 300-700 m, con prevalenza dei diametri minori, mentre lo slope delle pareti varia tra 2° e 7°. In generale, i *pockmark* in questo campo si distribuiscono lungo un asse ca. N-S che connette la scarpata continentale a nord con un *ridge* orientato circa E-O a sud (vedi profilo batimetrico in figura 5). Queste due zone, nord e sud, sono state campionate e le analisi delle rocce recuperate mostrano una provenienza da una sorgente magmatica non ben definita con età di messa in posto tra i 4 e 5 Ma (SARTORI, 2005). Questo *ridge* si trova in una grande baia della piattaforma continentale al largo della Corsica. Essendo questi *pockmark* di dimensioni ridotte risultano più difficili da localizzare sulla mappa batimetrica a media risoluzione qui utilizzata, ma la rappresentazione con una differente inclinazione della

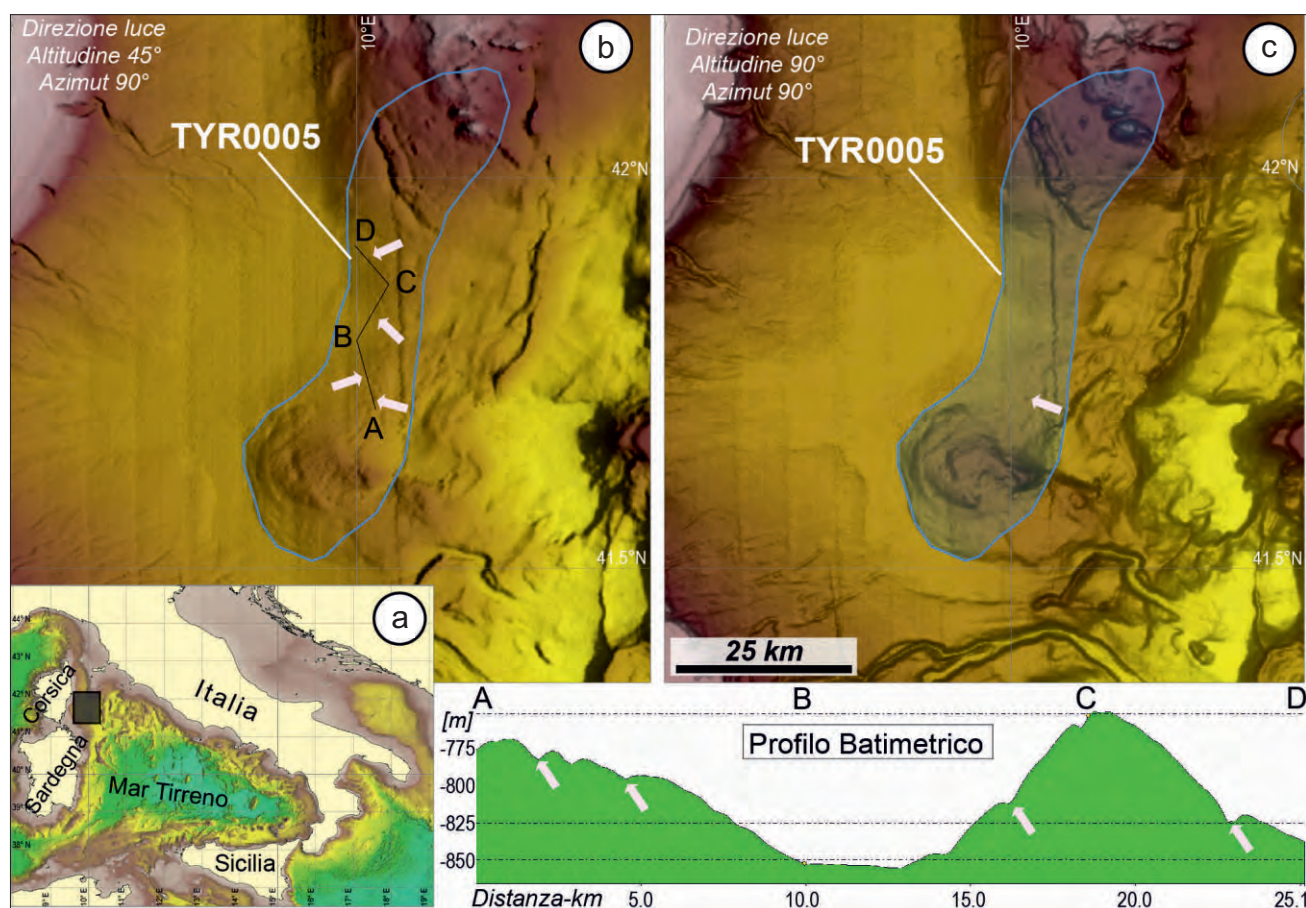


Fig. 5 - Campo di *pockmark* TYR0005 localizzato nel Tirreno settentrionale, vedi riquadro nero nella mappa (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). L'area del campo di *pockmark* TYR0005 è delimitata da un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* sono indicati con le frecce bianche (b, c). La linea nera nella mappa (b) indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*. A, B, C, D indicano i vertici del profilo batimetrico.

- *Pockmarks* field TYR0005 located within the northern Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). The area of *pockmarks* field TYR0005 is marked by a transparent light blue polygon (c). Thick white arrows point at the *pockmarks* morphologies (b, c). Black line in map (b) marks the bathymetric profile extracted across the *pockmarks* field. A, B, C, D point at the vertexes of the bathymetric profile.

luce (azimut 45° o 90°) migliora la visualizzazione degli elementi morfologici (fig. 5c). Considerata la vicinanza con le rocce di origine magmatica campionate in prossimità delle due zone rilevate, sulle quali sono presenti anche dei *pockmark*, possiamo ipotizzare un'origine vulcanica/magmatica dei fluidi da essi fuoriusciti. L'età di attività di questo campo è difficile da definire, non essendoci altri dati o informazioni in bibliografia, potremmo ipotizzare un'età miocenica - pliocenica legata all'apertura del bacino di Vavilov (KASTENS *et alii*, 1988).

6. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0006, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE

Al largo della Sicilia, nel Tirreno sud-occidentale (fig. 6a), è presente un piccolo campo di *pockmark* dalla forma sub-circolare, qui denominato TYR0006. Questo campo è composto principalmente da *pockmark* di grandi dimensioni (fig. 6b, c), ossia con profondità batimetriche che variano

da -10 a -60 m, tutti contenuti in un poligono di piccole dimensioni (estensione areale di ca. 66 km²). I grandi *pockmark* sono caratterizzati da un diametro che varia in un range di 600-900 m, e uno *slope* delle pareti che varia in un range di 4° - 7° (vedi profilo batimetrico in fig. 6). Questi hanno una dimensione areale che può raggiungere quasi 0.8 km². Inoltre, zone di subsidenza di dimensioni elevate (area di 0.72 km²) sono caratterizzate da 3 piccoli *pockmark* vicini tra loro o coalescenti (dettaglio in figura 6b, freccia verde). L'estensione areale di questo campo potrebbe essere maggiore rispetto a quanto osservato e ciò è dovuto alla carenza di dati ad alta/media risoluzione. Infatti esso è stato osservato sulla base dei dati scaricati dal portale di EMODnet/Bathymetry che hanno una risoluzione di 200 x 200 m. Il campo TYR0006 è posizionato a sudovest del seamont Aceste/Tiberio (A-T in fig. 6a), il quale rappresenta una *ridge* vulcanica lungo ca. 60 km; le rocce vulcaniche su di esso campionate sono risultate di tipo Basalti di Isole Oceaniche (OIB-type;

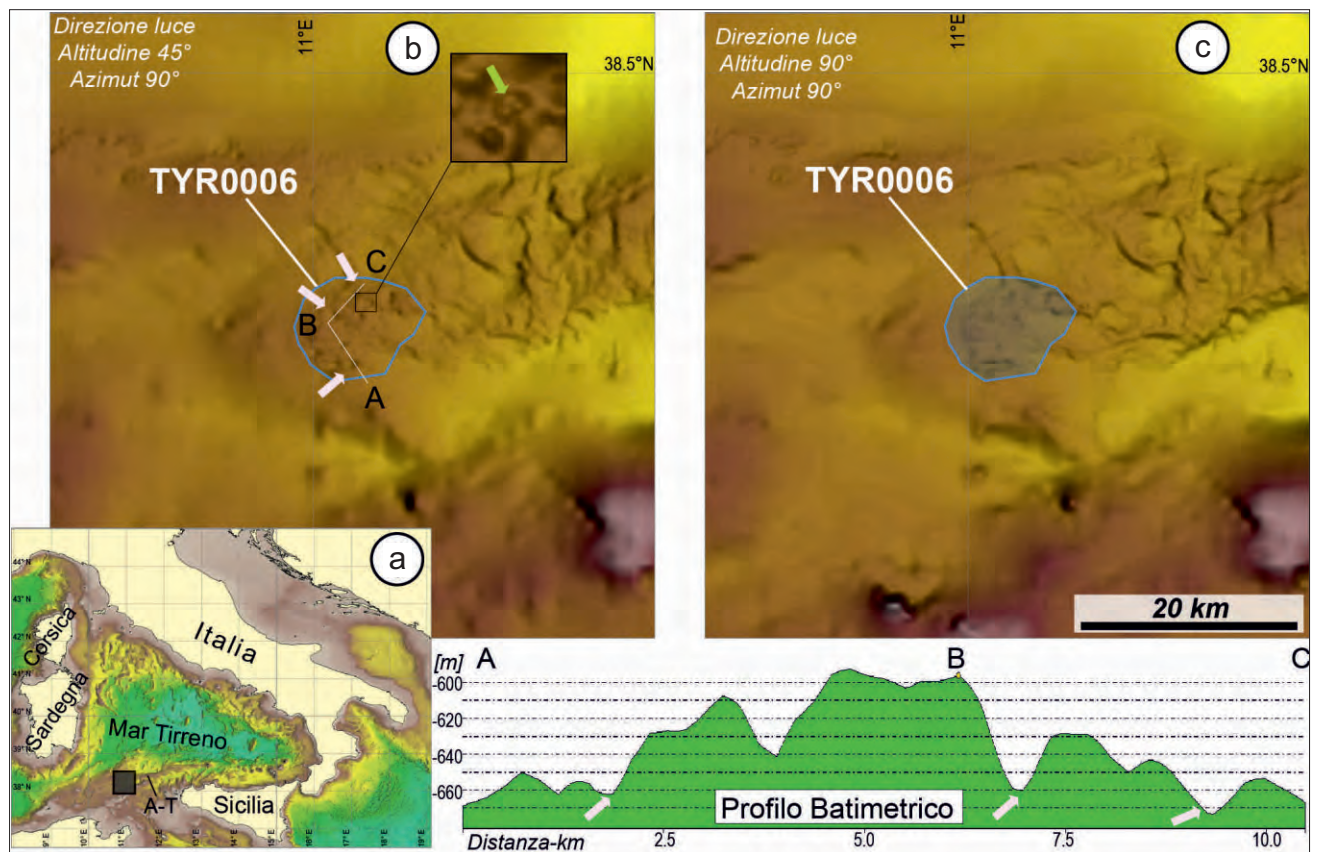


Fig. 6 - Campo di *pockmark* TYR0006 localizzato nel Tirreno sud-occidentale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). A-T: monte Aceste/Tiberio. L'area di questo campo è delimitata da un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* sono indicati con le frecce bianche (b). La freccia verde indica un gruppo di 3 *pockmark* che formano una struttura coalescente. La linea bianca nella mappa (b) indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*. A, B, C indicano i vertici del profilo batimetrico.

- *Pockmarks* field TYR0006 located within the south-western Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m, downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). A-T: Aceste/Tiberio seamont. The area of *pockmarks* field TYR0006 is marked by a transparent light blue polygon (c). In map (b); thick white arrows point at the *pockmarks* morphologies. Green thick arrow points at the coalescent structure composed by 3 *pockmarks*. White line marks the bathymetric profile extracted across the *pockmarks* field. A, B, C point at the vertexes of the bathymetric profile.

SERRI *et alii*, 2001), messe in posto ca. 5 Ma (SARTORI, 2005) durante l'apertura del bacino di Vavilov. Considerata la vicinanza del *ridge* Aceste al campo TYR0006 possiamo ipotizzare un'origine vulcanica. Questo campo potrebbe essere stato attivato durante il Pliocene, ma mancando qualunque altro tipo di dato non è possibile definire l'effettiva età di attività.

7. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0007, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE

In prossimità del Canale di Sardegna, Tirreno sud-occidentale, è presente un campo di *pockmark* dalla forma allungata in direzione ca. E-O (fig. 7a), qui chiamato TYR0007. Questo campo è composto principalmente da *pockmark* di grandi dimensioni (freccie bianche in figura 7b), ossia aventi profondità variabile in un range di 20-40 m, racchiusi in un poligono che si estende per ca. 240 km². In generale questi *pockmark* si allineano in gruppi di 3 o 4 in direzione ca. N-S; probabilmente il campo è molto più esteso

rispetto a quanto qui osservato e ciò è dovuto alla bassa risoluzione della batimetria disponibile (dove mancante quella a media risoluzione è presente quella GEBCO con risoluzione di 900 x 900 m). I grandi *pockmark* hanno diametro elevato, variabile in un range di 0.9 - 1.5 km, e uno *slope* delle pareti interne che varia da 4° a 7° (vedi il profilo batimetrico in figura 7). Alcuni di questi *pockmark* hanno una dimensione areale di quasi 2 km² e, quando formano strutture coalescenti, possono superare i 3 km² di estensione (dettaglio in figura 7c). Questo campo si trova tra il seamount Aceste - Tiberio (A-T) e la scarpata tra Sicilia e Tunisia (SS-T, fig. 7a). Dalle analisi delle rocce campionate su Aceste, composte da Basalti di tipo Isole Oceaniche (OIB-type; SERRI *et alii*, 2001) di età ca. 5 Ma (SARTORI, 2005), si può ipotizzare che anche questo campo di *pockmark* abbia origine magmatica. La scarpata tra Sicilia e Tunisia fiancheggia il profondo canale di Sardegna, aperto durante la fase di *rifting* del bacino di retro arco tirrenico e bordato da faglie estensionali (TRINCARDI & ZITELLINI, 1987) con probabile componente trascorrente. Di conseguenza

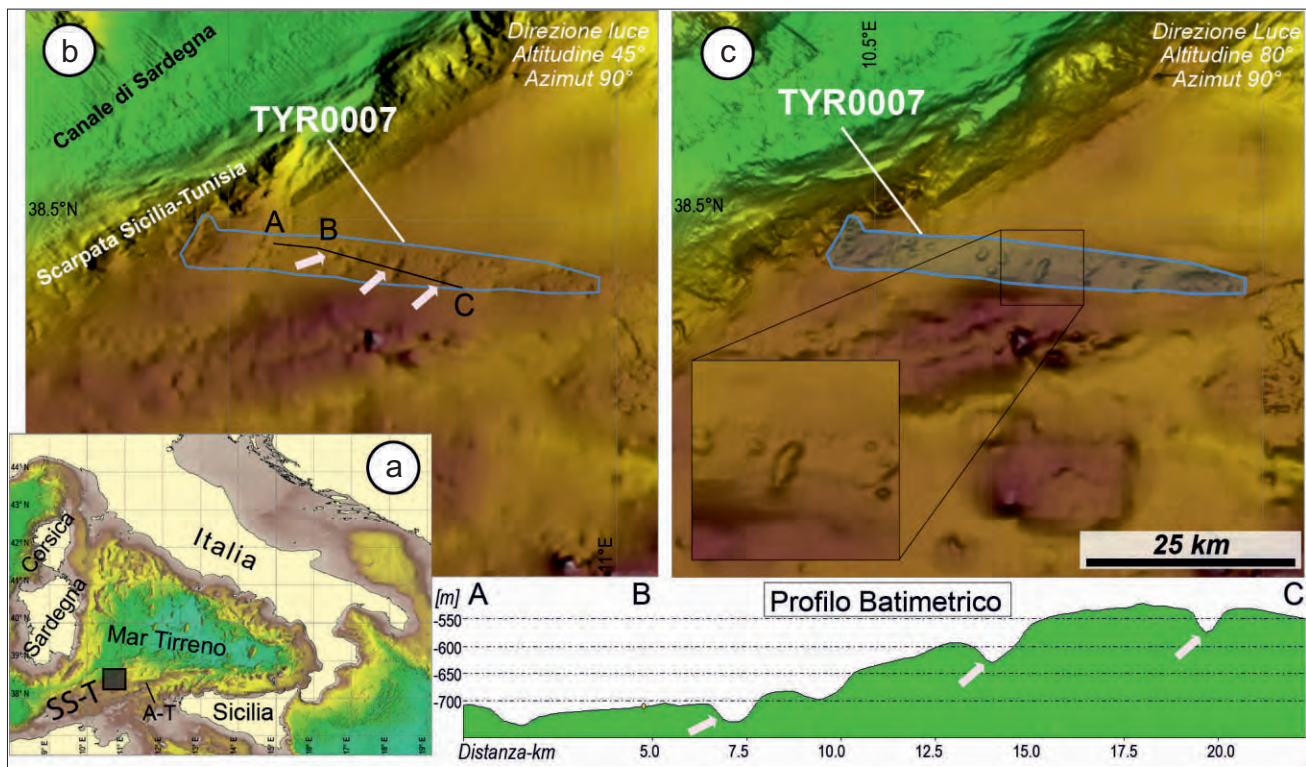


Fig. 7 - Campo di *pockmark* TYR0007 localizzato nel Tirreno sud-occidentale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). A-T: monte Aceste - Tiberio; SS-T: Scarpata Sicilia-Tunisia. L'area del campo di *pockmark* TYR0007 è indicata con un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* di grandi dimensioni sono indicati con le frecce bianche (b). Linea nera indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark* (b). A destra è mostrato un dettaglio batimetrico di un *pockmark* gigante (c). A, B, C indicano i vertici del profilo batimetrico.

- *Pockmarks* field TYR0007 located within the south-western Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). A-T: Aceste - Tiberio seamount; SS-T: Sicily-Tunisia slope. The area of *pockmarks* field TYR0007 is indicated by a transparent light blue polygon (c). Thick white arrows point at the *pockmarks* morphologies with large dimensions (b). Solid black line in map (b) marks the bathymetric profile extracted across the *pockmarks* field. On right, the inset bathymetric map shows a giant *pockmark* (c). A, B, C point at the vertices of the bathymetric profile.

l'origine di questi *pockmark* potrebbe essere vulcanica/tettonica di età Messiniano-Tortoniano. Nulla si può dire sull'attività attuale del sistema.

8. - CAMPO DI *POCKMARK* TYR0008, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE

In prossimità del Canale di Sardegna, nel Tirreno sud-occidentale, è presente un campo di *pockmark* dalla forma allungata in direzione ca. E-O (fig. 8a) e qui chiamato TYR0008. Questo campo che si estende per circa 280 km² è composto da *pockmark* di dimensioni molto variabili e profondità tra i 20 e i 60 m, mentre il diametro varia tra 800 e 1.500 m (freccie bianche in figura 8 b). Lo *slope* delle pareti varia in un *range* di 2° - 5.3° (vedi profilo batimetrico in figura 8). Anche in questo campo si osservano a volte strutture coalescenti. I *pockmark* si distribuiscono in modo random anche se con maggiore concentrazione di eventi alla base di una piccola scarpata morfologica orientata ENE-OSO (freccia azzurra; fig. 8b). Questo campo potrebbe essere molto più esteso di quello che osserviamo, tale limitazione è dovuta alla mancanza di dati di batimetria a media/alta risoluzione nell'area

circostante. Il campo TYR0008 si trova a circa 70 km dal monte Aceste - Tiberio (A-T; fig. 8a), composto da Basalti di tipo Isole Oceaniche (OIB-type; SERRI *et alii*, 2001) messi in posto ca. 5 Ma (SARTORI, 2005), e a pochi km dalla scarpata Sicilia-Tunisia (fig. 8a) che borda un grande bacino sedimentario formatosi nel canale di Sardegna. Questo canale si è aperto durante la fase di *rifting* pre-messiniana come testimoniato dalle faglie estensionali osservate nella parte nord (TRINCARDI & ZITELLINI, 1987). Vista la posizione di questo campo di *pockmark* ne ipotizziamo un'origine vulcanica/tettonica di età Messiniano-Tortoniano. Nulla si può dire sull'attività attuale del sistema.

9. - FLUID VENTING E *POCKMARK* TYR0009 NEI SEDIMENTI PLIO-QUATERNARI DEL BACINO DI PAOLA, CALABRIA OCCIDENTALE (TIRRENO SE)

Al largo della Calabria occidentale (inset in figura 9) è presente un ampio bacino sedimentario, di età plio-quadernaria chiamato Bacino di Paola, al cui interno sono stati identificati campi

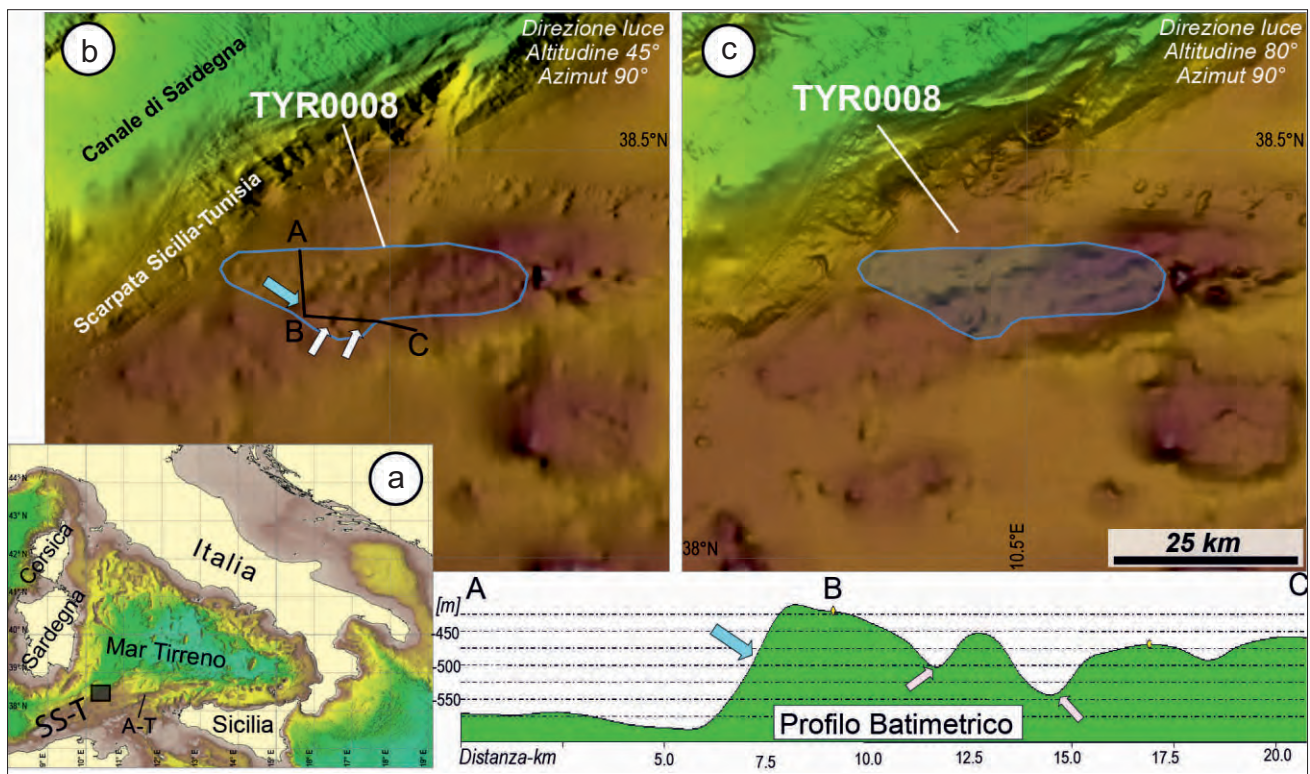


Fig. 8 - Campo di *pockmark* TYR0008 localizzato nel Tirreno sud-orientale, vedi riquadro nero nella mappa (a). Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). A-T: monte Aceste - Tiberio; SS-T: Scarpata Sicilia-Tunisia. L'area di questo campo è rappresentata da un poligono azzurro trasparente (c). Alcuni *pockmark* sono indicati con le frecce bianche, mentre con la freccia azzurra è indicata la scarpata morfologica orientata in direzione ENE-OSO (b e profilo batimetrico). La linea nera indica il profilo batimetrico estratto attraverso il campo di *pockmark*, i cui vertici sono indicati con le lettere A, B, C (b).

- *Pockmarks* field TYR0008 located within the south-western Tyrrhenian Sea, see black square in the inset map (a). Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>). A-T: Aceste - Tiberio seamount; SS-T: Sicily-Tunisia slope. The area of this *pockmarks* field is marked by a light blue polygon (c). Thick white arrows point at *pockmarks* morphologies, while thick light blue arrow points at the morphological escarpment ENE-WSW oriented (b). Solid black line marks the bathymetric profile extracted across the *pockmarks* field which vertex are marked by A, B, C (b).

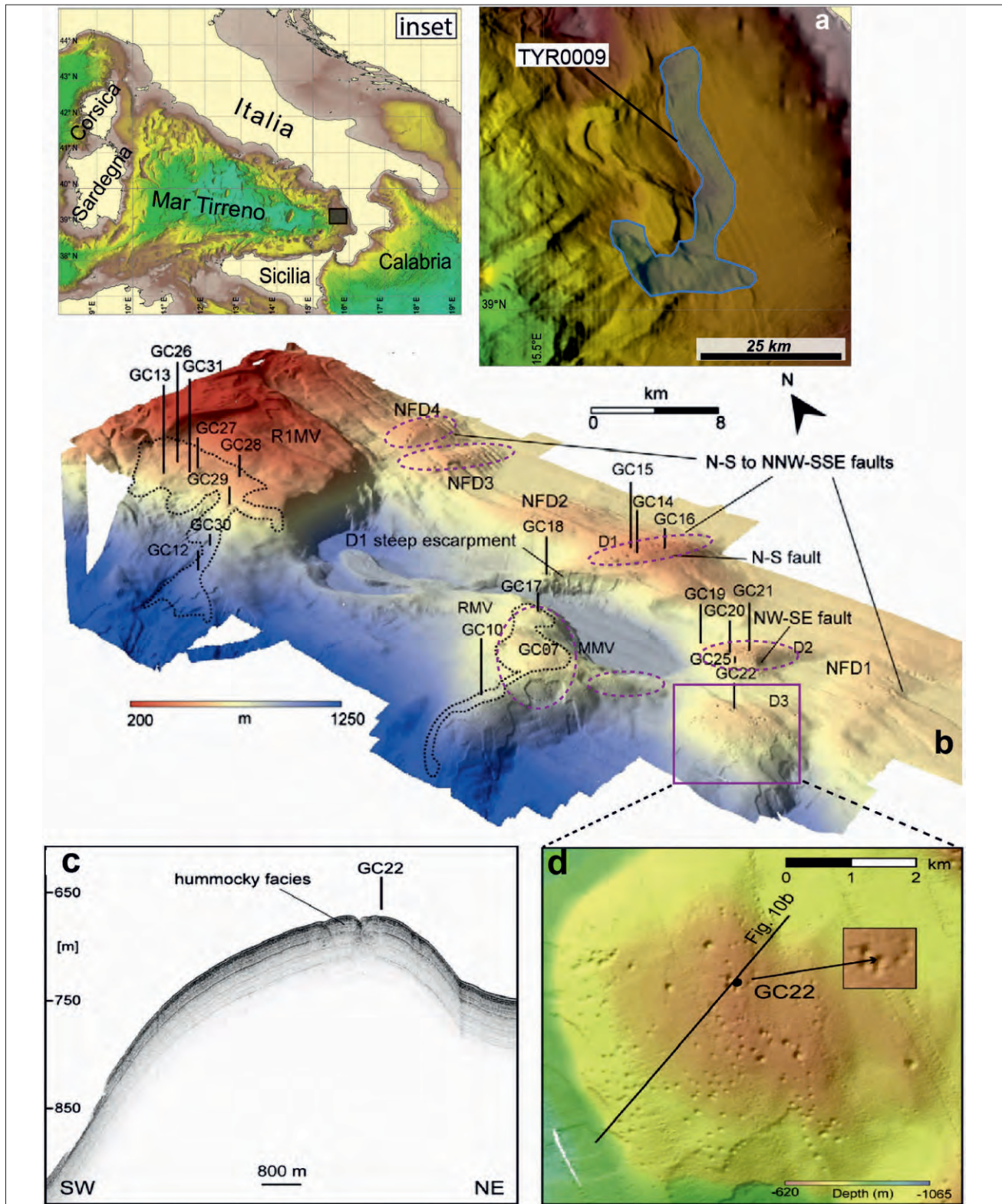


Fig. 9 - Campo di *pockmark* e *fluid vent* TYR0009 localizzato nel Tirreno sud-orientale, vedi riquadro nero in alto a sinistra. Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) Mappa batimetrica a media risoluzione sulla quale è riportato in azzurro il poligono che rappresenta l'area del campo TYR0009; (b) Vista 3D della mappa batimetrica ad alta risoluzione (MARANI *et alii*, 2004) mostrante i campi di *pockmark* e varie informazioni sull'area di studio; (c) Profilo *chirp* mostrante la morfologia dei *pockmark* nei sedimenti superficiali e l'ubicazione della carota GC22. (d)

Dettaglio di uno dei campi di *pockmark*. Le immagini b - d sono modificate da ROVERE *et alii* (2014).

- *Pockmarks and Fluid vent field TYR0009 located within the southwestern Tyrrhenian Sea, see black square in top left map. Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m, downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) Middle resolution morpho-bathymetric map showing the area of field TYR0009 marked by the light blue polygon; (b) 3D view of the high resolution morpho-bathymetric map (data from MARANI *et alii*, 2004) in which the *pockmarks* fields and further information are detectable; (c) Chirp profile acquired across some *pockmarks*. The location of the sediment gravity core GC22 is also included; (d) Detail of one of the *pockmarks* field. Images b - d are modified from ROVERE *et alii* (2014).*

di *pockmark*, fuoriuscite di gas dal fondale marino, diapiri, flussi e vulcani di fango studiati da ROVERE *et alii* (2014). Alla profondità di 600-800 m sotto il livello del mare è presente un'area di ca. 300 km² (fig. 9a) caratterizzata dalla presenza di almeno 6 campi di *pockmark* (fig. 9b). Questi *pockmark* hanno dimensioni molto ridotte, ossia diametro tra 20 e 150 m e profondità tra 1 e 10 m (fig. 9d), e solitamente sono localizzati al tetto di zone rilevate rispetto alle aree circostanti. Essendo tali le dimensioni risulta impossibile la loro identificazione sulla batimetria a media risoluzione resa disponibile dal Progetto EMODnet (fig. 9a). La presenza di faglie normali, parte del sistema dell'Arco Calabro, in prossimità di questi campi di *pockmark* suggerisce un controllo tettonico della risalita e fuoriuscita del gas dai sedimenti. Inoltre utilizzando il sistema “*multi-beam water column acoustic measurements*”, in quest'area sono state registrate delle fuoriuscite di gas che dal fondale marino si elevano fino a 630 m nella colonna d'acqua (ROVERE *et alii*, 2014). La presenza del gas nei sedimenti è stata anche confermata dall'analisi dei campioni di sedimenti presi in prossimità dei *pockmark*. Ciò è anche osservabile sui profili di sismica ad altissima risoluzione (*chirp*), acquisiti in queste zone, i quali mostrano un effetto di sbiancamento dei riflettori sismici indicativo della presenza di possibili accumuli di gas. Infine, le carote di sedimento prelevate nei *pockmark* (come ad esempio la GC22; fig. 9c) non mostrano deformazioni da *gas escape* nella parte prossima al fondale marino, contrariamente a quanto registrato nella colonna d'acqua nelle aree circostanti. Questo lascia intendere che i *pockmark* sono strutture da fuga di gas fossili o attualmente non attivi, mentre la fuoriuscita di gas è ora attiva in zone prossimali. Maggiori dettagli sono riportati in ROVERE *et alii* (2014).

10. - FUGA DI FLUIDI AL TETTO DI UN *SEAMOUNT* DI ORIGINE VULCANICA IN PROSSIMITÀ DELLA COSTA CALABRA, TIRRENO SUD-ORIENTALE - TYR0010

A largo della penisola di Capo Vaticano, Calabria (Tirreno sud-orientale; inset in figura 10) è presente un *seamount* (fig. 1a) di origine vulcanica (DE RITIS *et alii*, 2010; LORETO *et alii*, 2015a). Al tetto di questo sono stati individuati tramite immagini di sismica ad altissima risoluzione (*chirp*; fig. 10b, c) e, successivamente, campionati dei fluidi. Al tetto del *seamount* sono presenti numerose piccole *plume*, più di 30, osservate sui profili di sismica ad altissima risoluzione (fig. 10c). Tra le varie fuoriuscite ne è presente una di grandi dimensioni che si erge fino a 7 m sul fondale marino (fig. 10b) e sembra essere composta da almeno 4 sfiati (F1 -F4). Inoltre, questa *plume*, chiamata “*Gush-Shaped Fluid Flux*”, mostra un

chiaro canale di risalita che taglia i sedimenti superficiali. Questo campo di *fluid escape* è qui stato identificato come TYR0010. Inoltre, sono state effettuate le analisi cromatografiche dei gas (He, H, O₂, N₂, CO, CH₄ and CO₂) contenuti nei fluidi campionati lungo la zona di massimo adensamento degli sfiati (pallini verdi in fig. 10a). I risultati mostrano valori chiaramente più alti degli *standard* di riferimento (ASSW; fig. 10d) mentre i valori del $\delta^3\text{He}$ elevati rispetto allo *standard* di riferimento sono indicativi di una provenienza da zone profonde ossia da mantello (LORETO *et alii*, 2015b). Questi “*fluid vent*” non lasciano morfologie da collasso tipo *pockmark*, o almeno sulla batimetria ad alta risoluzione non sono stati osservati. Maggiori informazioni e dettagli sono riportati in LORETO *et alii* (2015b).

11. - *POCKMARK FIELD* IDENTIFICATO IN PROSSIMITÀ DEL CANYON CAPRERA AL LARGO DELLA SARDEGNA, TIRRENO SETTENTRIONALE - TYR0011

La scarpata continentale di Olbia al largo della Sardegna nord-orientale (*inset* in figura 11) è incisa da un sistema di canali sottomarini composto da più rami (Canale di Caprera) e da numerose depressioni interpretate come *pockmark* (vedi fig. 11a, b). I *pockmark* si concentrano principalmente nella parte a sud del canale, alla profondità compresa tra 500 e 800 m, e sporadicamente sono presenti al tetto di *mound* di origine carbonatica (DALLA VALLE & GAMBERI, 2011). Alcuni di questi *pockmark* hanno dimensioni piuttosto elevate tanto da poter essere osservati sulla batimetria a media risoluzione (dimensione della cella di 200 x 200 m) se illuminati con direzione della luce di 90° ed esagerazione verticale di 1:15 (fig. 11a). Tra questi *pockmark* ve n'è uno di grandi dimensioni, “*Giant pockmark*” (freccia bianca; fig. 1a e b), che mostra una morfologia ellittica con diametro massimo di 1,5 km e profondità di 20 m. Mentre i *pockmark* di minori dimensioni presenti su un'area molto ampia (ca. 300 km²) sono osservabili solo su dati batimetrici a più alta risoluzione (dimensione della cella di 25 x 25 m; fig. 11b) pubblicati in DALLA VALLE & GAMBERI (2011). Numerosi piccoli *pockmark* si allineano lungo dei *gully* con profondità delle depressioni di ca. 10 m (fig. 11c). Lo studio di queste morfologie da *fluid escape* è stato fatto utilizzando, oltre ai dati di batimetria, anche dati di sismica a media risoluzione (SPARKER). L'analisi integrata di questi dati ha permesso di stabilire una relazione tra i *pockmark* e l'evoluzione dei *gully*. Inoltre, sono stati confrontati i *pockmark* con le strutture tettoniche sepolte che hanno modellato il margine sardo, e con gli elementi di instabilità gravitativa osservati nell'area. Maggiori dettagli sono in DALLA VALLE & GAMBERI (2011).

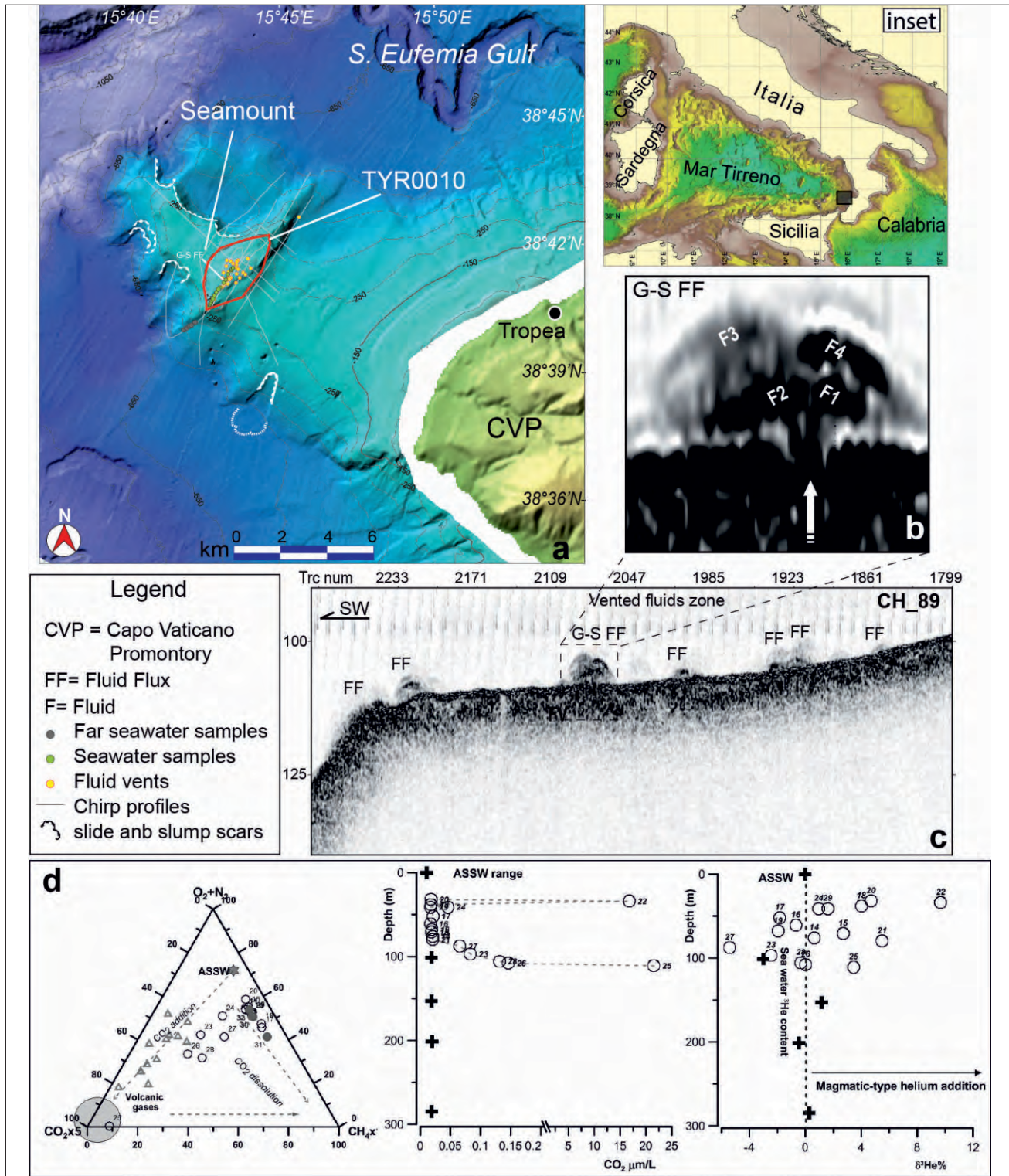


Fig. 10 - Campo di *fluid vent* TYR0010 localizzato nel Tirreno sud-orientale, vedi riquadro nero nella mappa batimetrica in alto a destra. Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) Mappa batimetrica ad alta risoluzione (dimensione delle celle della griglia 10 x 10 m) acquisita nell'ambito del progetto ISTEGE (LORETO *et alii*, 2012) sulla quale è riportata in rosso l'area del campo TYR0010. I punti di "fluid vent" sono indicati con i pallini gialli; i punti di campionamento delle acque sono indicati con i pallini verdi; (b) Dettaglio della "Gusb-shaped Fluid Flux" (G-S FF), F1, F2, F3, F4 indicano le plume minori componenti la principale; (c) Profilo Chirp acquisito lungo la zona dei fluid vent; (d) Plot delle analisi chimiche della CO_2 , CH_4 e $\delta^3\text{He}$ contenuti nei campioni di acqua. Le immagini a - d sono modificate da LORETO *et alii* (2015b).

- Fluid vent field TYR0010 located within the southwestern Tyrrhenian Sea, see black square in the top right map. Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) High resolution morpho-bathymetric map (grid cell size 10x10 m), acquired during the ISTEGE cruise project (LORETO *et alii*, 2012), of the seamount where the vent field TYR0010 is marked by a red line. Fluid vents are marked by yellow dots; sampled seawater points are marked by green dots; (b) Detail of the "Gusb-shaped Fluid Flux" (G-S FF) recorded by chirp; F1, F2, F3, F4 mark the minor plumes composing the major one; (c) Chirp profile acquired along the vented fluid zone; (d) Plot of geochemical analysis results of CO_2 , CH_4 and $\delta^3\text{He}$ content in seawater samples. Images a - d are modified from LORETO *et alii* (2015b).

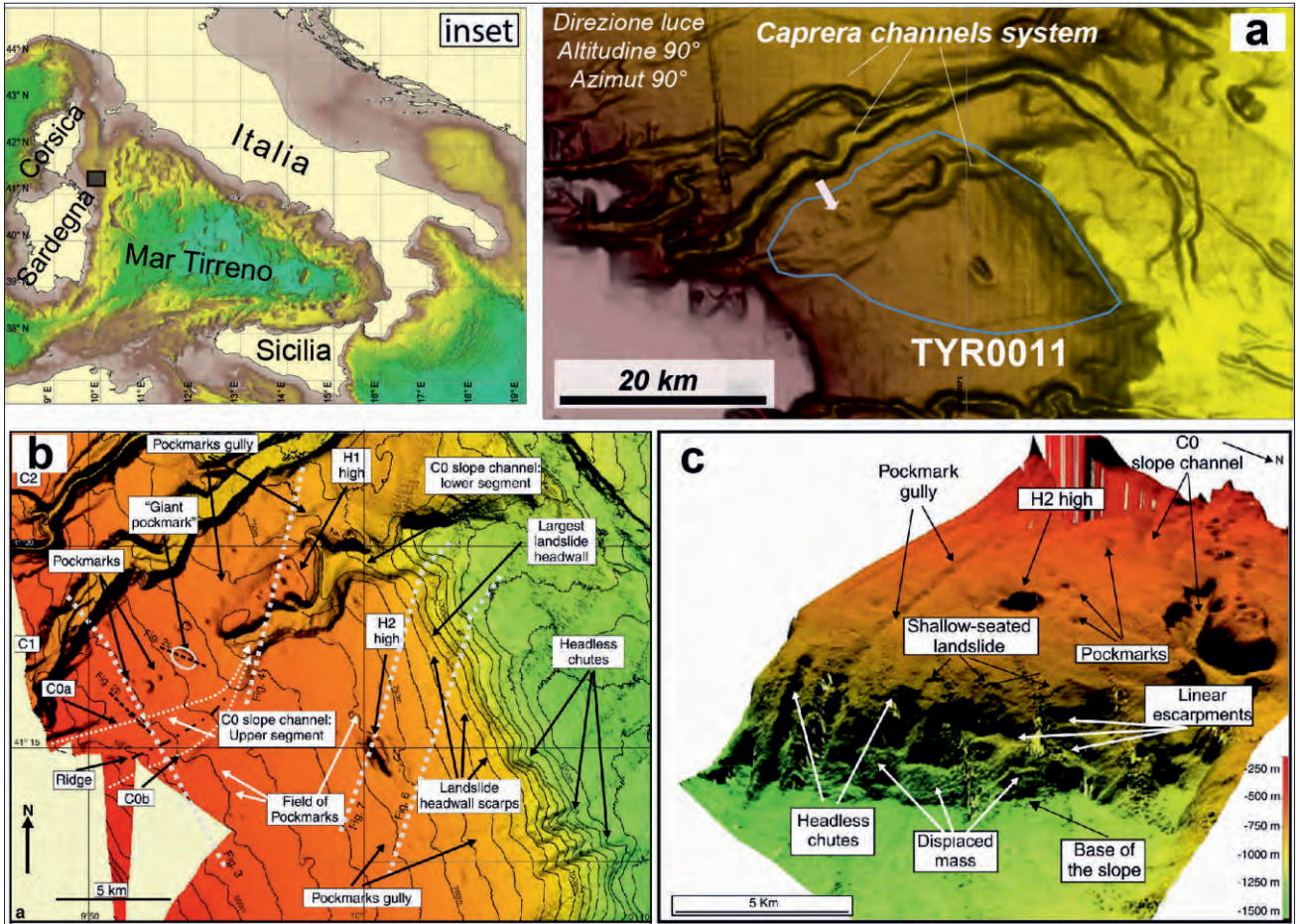


Fig. 11 - Campo di *pockmark* TYR0011 localizzato nel Tirreno settentrionale, vedi riquadro nero nella mappa morfo-batimetrica in alto a sinistra. Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) Mappa batimetrica a media risoluzione sulla quale è riportato in azzurro il poligono dell'area del campo TYR0011. La freccia bianca indica il *pockmark* gigante; (b) Mappa batimetrica ad alta risoluzione dell'area di analisi mostrante gli elementi morfologici interpretati; (c) Immagine 3D dell'area dei *pockmark* e dei *gully* lungo i quali si allineano i *pockmark*. Le figure b, c sono modificate da DALLA VALLE & GAMBERI (2011).

- *Pockmarks* field TYR0011 located within the northern Tyrrhenian Sea, see black square in the upper left map. Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) Area of *pockmarks* field TYR0011 represented on middle resolution bathymetry map and marked by transparent light blue polygon; (b) High resolution bathymetry map of the studied area including the morpho-features; (c) 3D view of the *pockmarks* area and of the *pockmarks* gully. Figures b, c are modified from DALLA VALLE & GAMBERI (2011).

12. - *POCKMARK* E STRUTTURE DA *FLUID ESCAPE* AL LARGO DELLA SICILIA SETTENTRIONALE, TIRRENO MERIDIONALE - TYR0012

Al largo del golfo di Palermo, Sicilia settentrionale (*inset* in figura 12), è stato individuato e studiato un piccolo campo di *pockmark* (PENNINO *et alii*, 2014), disposti lungo una direzione ca. N-S, presente sul margine della piattaforma continentale (fig. 12a). Questo campo, qui chiamato TYR0012, è composto da soli 3 *pockmark* ed ha estensione areale di ca. 5 km². La sua identificazione è stata possibile solo grazie all'acquisizione di dati di batimetria ad alta risoluzione (fig. 12b). I *pockmark* sono posizionati lungo lo *shelf break* ad una profondità che va da 260 a 375 m, hanno forma conica e un diametro che varia in un range di 300-335 m e profondità tra 18 e 30 m. Inoltre, sono stati cam-

pionati i sedimenti in prossimità di queste depressioni e l'analisi del fluido contenuto nello spazio poroso ha evidenziato un arricchimento negli isotopi pesanti rispetto all'acqua di mare del Mediterraneo, mentre le concentrazioni di alcuni ioni (Cl, SO₄, Na, K, ecc.; fig. 12c) sembra indicare l'esistenza di una sorgente esterna di fluidi. I *pockmark* osservati si allineano con delle strutture tettoniche attive e in prossimità di frane sottomarine prossime alla scarpata continentale. Questo suggerisce che esista una relazione locale tra controllo strutturale, fuga di fluidi e frane. I fluidi possono essere stati veicolati dalle faglie, e in superficie potrebbero aver creato una condizione di instabilità dei sedimenti favorendo l'innesco di frane. In quest'area sono stati individuati anche dei *mound* probabilmente composti da carbonati autigenici. Non è ancora chiaro se questi *pockmark* siano attivi o meno. Maggiori dettagli sono riportati in PENNINO *et alii* (2014).

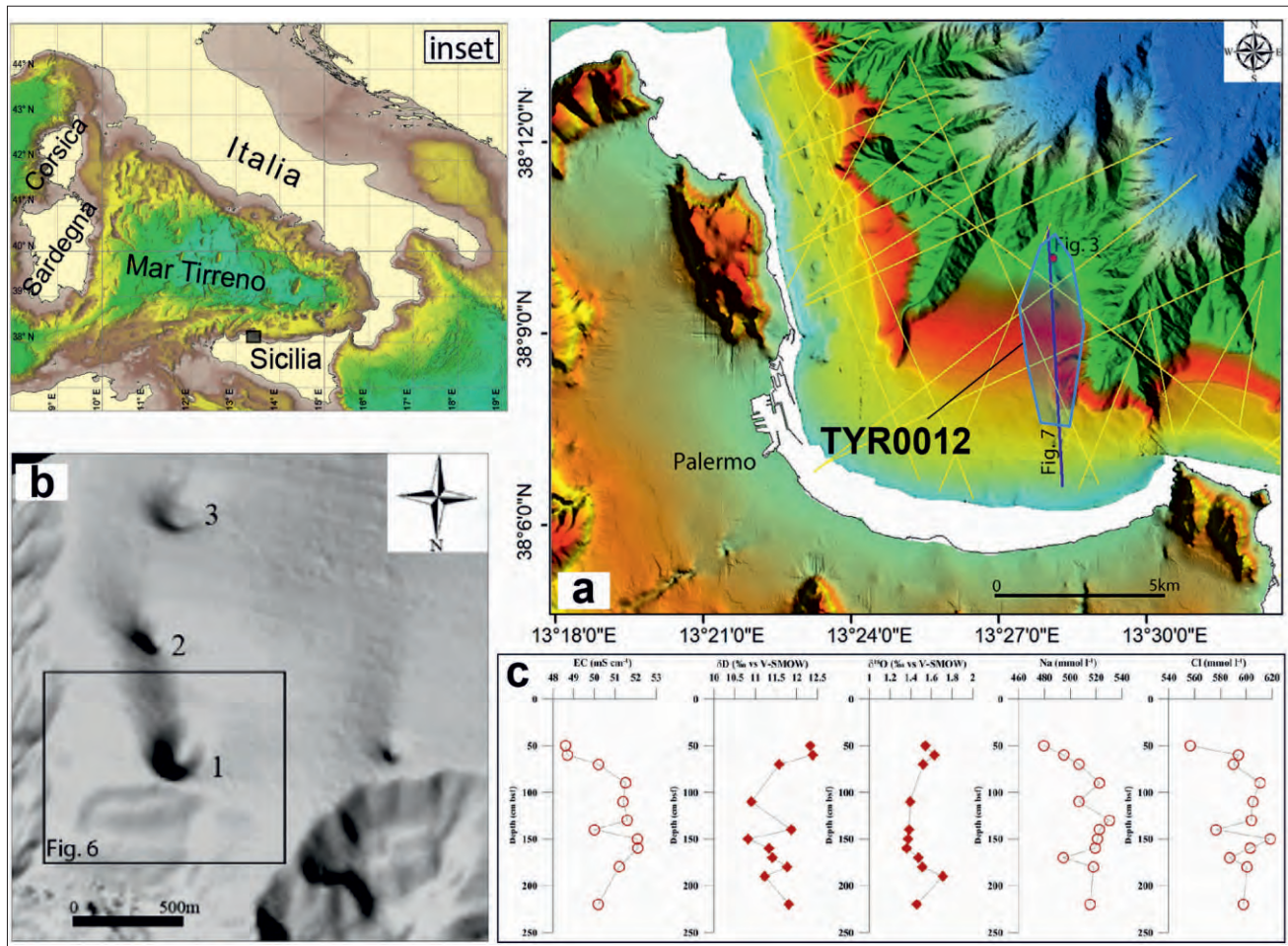


Fig. 12 - Campo di *pockmark* TYR0012 localizzato nel Tirreno settentrionale, vedi riquadro nero mappa batimetrica in alto a sinistra. Dati batimetrica a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il *software open source* GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) Mappa batimetrica ad alta risoluzione sulla quale è riportato in azzurro il poligono rappresentativo dell'area del campo TYR0012; (b) Mappa batimetrica ad alta risoluzione dei tre *pockmark* in dettaglio; (c) Grafici degli ioni Cl, Na, O, ottenuti dall'analisi del fluido di poro. Le immagini a - c sono modificate da PENNINO *et alii* (2014).
 - *Pockmarks* field TYR0012 located within the southern Tyrrhenian Sea, see black square in the upper left map. Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); (a) High resolution morpho-bathymetric map on which the transparent light blue polygon represent the *pockmarks* filed TYR0012; (b) Detail of high resolution morpho-bathymetric map of the three *pockmarks*; (c) Graphs of pore water brine-ions content. Images a - c are modified from PENNINO *et alii* (2014).

13. - *POCKMARK FIELD* TYR0013 NELL'AREA DEL RIDGE VULCANICO DI VENTOTENE, TIRRENO CENTRALE

A nord dell'Isola di Ventotene (Tirreno centrale; inset in figura 13, 13a) è stato recentemente identificato e caratterizzato un sistema vulcanico composto da quattro piccoli edifici allineati lungo una direzione NO-SE, chiamato "*Ventotene Volcanic Ridge*", il cui fondale marino è costellato da piccole depressioni interpretate come *pockmark* (CUFFARO *et alii*, 2016). I *pockmark*, di piccole dimensioni, sono caratterizzati da forma tondeggiante con diametro medio di ca. 50 m (fig. 13b); localmente si concentrano lungo la scarpata NE-SO dove creano una depressione di dimensioni elevate con diametro da 80 a 1.000 m e profondità variabile da 5 a 300 m. Queste strutture coalescenti sono state definite "*Giant*

pockmark" (linea verde in figura 13b). I *Giant pockmark* si localizzano in alcune zone, dove sono presenti delle strutture tettoniche; mentre i piccoli *pockmark* si distribuiscono in modo random nell'intorno degli edifici vulcanici (pallini azzurro). L'area totale di questo campo, qui chiamato TYR0013, è di ca. 40 km². Il ruolo di questi *pockmark* è quello di consentire la fuga di fluidi/gas che risalgono dalle zone profonde, fluidi che potrebbero essere di origine vulcanica vista la posizione, ma la cui risalita è controllata dalle faglie che fanno parte del sistema Appenninico di retro arco. Il *Ridge* Vulcanico di Ventotene potrebbe essere parte del sistema vulcanico dell'Isola di Ventotene, attivo dal tardo Pleistocene. Il campo di *pockmark* potrebbe essere ancora attivo, essendo questo il sistema di degassamento dell'area. Per maggiori dettagli consultare CUFFARO *et alii* (2016).

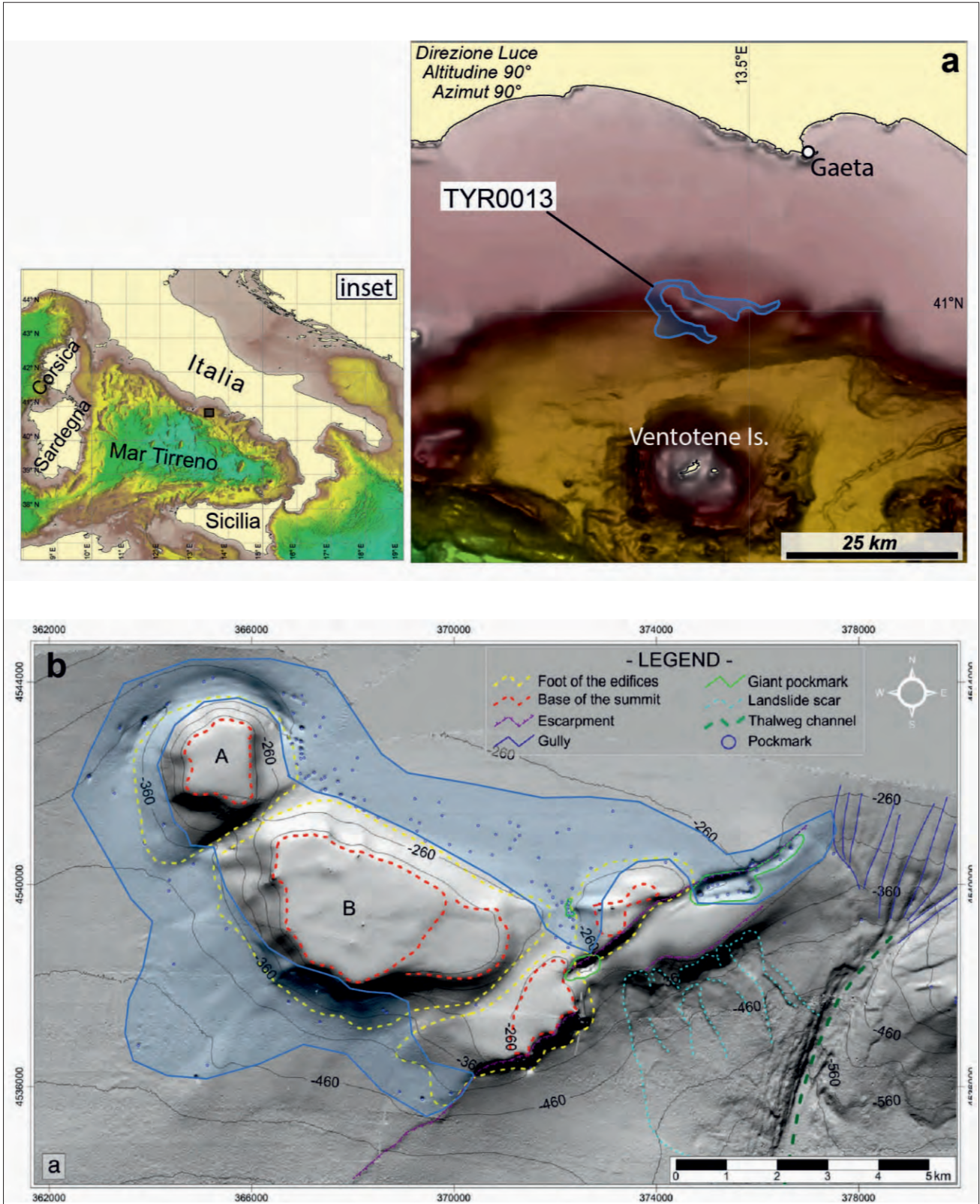


Fig. 13 - Campo di *pockmark* TYR0013 localizzato nel Tirreno centrale, vedi riquadro nero mappa in alto a sinistra. Dati batimetria a media risoluzione (dimensione delle celle della griglia di 200 x 200 m; dati ascii scaricati dal portale di EMODnet/bathymetry) rappresentati in mappa, l'elaborazione del dato è stata fatta con il software open source GMT (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); a) Poligono azzurro rappresentante l'area del campo TYR0013 digitalizzato sulla batimetria a media risoluzione; b) Mappa batimetrica ad alta risoluzione con interpretazione degli elementi morfologici della zona del Ridge Vulcanico di Ventotene (modificata da CUFFARO *et alii*, 2016). In trasparenza con colore azzurro è riportato il campo di TYR0013.

- *Pockmarks* field TYR0013 located within the central Tyrrhenian Sea, see black square in the upper left map. Middle resolution bathymetry map (grid cell size of 200 x 200 m; downloaded from EMODnet/Bathymetry portal) gridded using the open source GMT software (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>); a) Transparent light blue polygon, representing the area of TYR0013, digitized on middle resolution bathymetry; b) High resolution morpho-bathymetric map including the morpho-features of the Ventotene Volcanic Ridge (modified from CUFFARO *et alii*, 2016). The TYR0013 field is also included as transparent light blue polygon.

BIBLIOGRAFIA

- CELLA F., FEDI M., FLORIO G. & RAPOLLA A. (1998) - *Boundaries of magmatic anomaly sources in the Tyrrhenian region*. Ann. Geofis., **41**(3): 433-447.
- CUFFARO M., MARTORELLI E., BOSMAN A. *et alii* (2016) - *The Ventotene Volcanic Ridge: a newly explored complex in the central Tyrrhenian Sea (Italy)*. Bull. Volcanol, **78**(12), 86.
- DALLA VALLE G. & GAMBERI F. (2011) - *Pockmarks and seafloor instability in the Olbia continental slope (north-eastern Sardinian margin, Tyrrhenian Sea)*. Marine Geophysical Research, **32**: 193-205.
- DE RITIS R., DOMINICI R., GUIDO V., NICOLOSI I., CHIAPPINI M., SPERANZA F., ROSA R., DONATO P. & SONNINO M. (2010) - *A buried volcano in the Calabrian Arc (Italy) revealed by high-resolution aeromagnetic data*. J. Geophys. Res., **115**(B11), B11101.
- KASTENS K., MASCLE J., AUROUX C., BONATTI E., BROGLIA C., CHANNELL J. & HIEKE W. (1988) - *ODP LEG 107 in the Tyrrhenian Sea: Insight into passive margin and back-arc basin evolution*. Geological Society of American Bulletin, **100**(7): 1140-1156.
- KELLER J. (1981) - *Alkali basalts from the Tyrrhenian Sea basin, magmatic and geodynamic significance*. Bull. Volcanol., **44**: 327-333.
- LORETO M.F., ITALIANO F., DEPONTE D., FACCHINI L. & ZGUR F. (2015b) - *Mantle degassing on a near shore volcano, SE Tyrrhenian Sea*. Terra Nova 27.3, 195-205.
- LORETO M.F., PEPE, F., DERITIS R., VENTURA G., FERRANTE V., SPERANZA F., TOMINI I. & SACCHI M. (2015a) - *Geophysical investigation of Plei-stocene volcanism and tectonics offshore Capo Vaticano (Calabria, southeastern Tyrrhenian Sea)*. J. of Geodyn., **90**, 71-86.
- LORETO M.F., ZGUR, F., FACCHINI, L., FRACASSI U., PETTENATI F., TOMINI I., BURCA M., DIVIACCO P., SAULI C., COSSARINI G., DE VITTOR C., SANDRON D. & THE EXPLORA TEAM OF TECHNICIANS (2012) - *In search of new imaging for historical earthquakes: a new geophysical survey offshore western Calabria (southern Tyrrhenian Sea, Italy)*. Boll. di Geof. Teor. e Appl., **53**.4.
- MARANI M.P., GAMBERI F. & BONATTI E. (2004) - *From seafloor to deep mantle: architecture of the Tyrrhenian backarc basin*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **64**, 194, Serv. Geol. d'It., Roma.
- PENNINO V., SULLI A., CARACAUSI A., GRASSA F. & INTERBARTOLO F. (2014) - *Fluid escape structures in the north Sicily continental margin*. Mar. and Petrol. Geol., **55**: 202-213.
- ROVERE M., GAMBERI F., MERCORELLA A., RASHED H., GALLERANI A., LEIDI E., MARANI M., FUNARI V. & PINI G.A. (2014) - *Venting and seepage systems associated with mud volcanoes and mud diapirs in the southern Tyrrhenian Sea*. Marine Geol., **347**: 153-171
- SARTORI R. (2005) - *Bedrock geology of the Tyrrhenian Sea insight on Alpine paleogeography and magmatic evolution of the basin*. CROP Project: *Deep Seismic Exploration of the Central Mediterranean and Italy*, Elsevier, Amsterdam: 69-80.
- SERRI G., INNOCENTI F. & MANETTI P. (2001) - *Magmatism from Mesozoic to Present, petrogenesis, time-space distribution and geodynamic implications*. In: VAI G.B. & MARTINI P.I., G.B. and P.I. Martini (Eds): *"Anatomy of an Orogen, the Apennines and adjacent Mediterranean basins"*, Kluwer Academic Publishers: 77-104.
- TRINCARDI F. & ZITELLINI N. (1987) - *The rifting of the Tyrrhenian Basin*. Geo-marine letters, **7**(1): 1-6.

Siti web consultati: link e data di consultazione

- <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/gebco-bathymetry-basemap> (accesso 10/10/2016).
- <http://www.isprambiente.gov.it/it/biblioteca/pubblicazioni-della-biblioteca/thist-1/thist> (18/10/2017).
- <http://www.soest.hawaii.edu/gmt/> (GMT Pages maintained by: Paul Wessel, Last updated: July 1, 2018).

Il sistema idrotermale sottomarino a largo dell'Isola di Zannone (Arcipelago Pontino occidentale, Mar Tirreno)

*Submarine hydrothermal system off the Zannone Island
(western Pontine Archipelago, Tyrrhenian Sea)*

INGRASSIA M.(*), BEAUBIEN S.(**), BOSMAN A.(*), CHIOCCI F.L.(*)(**),
CONTE A.M.(*), DI BELLA L.(**), FREZZA V.(**), GRAZIANI S.(**),
ITALIANO F.(***), MACELLONI L.(****),
MARTORELLI E.(*), SPOSATO A.(*)

RIASSUNTO - Recenti studi coordinati dal CNR-IGAG hanno permesso di scoprire un sistema idrotermale attivo al largo dell'Isola di Zannone (Arcipelago Pontino occidentale, Mar Tirreno centrale). Tale sistema idrotermale, costituito da cinque grandi depressioni (lunghezza >250 m) è stato studiato con un approccio multidisciplinare (indagini geofisiche, geochimiche, micropalontologiche, mineralogico-petrografiche, ecc.) che ha permesso di comprendere alcuni degli aspetti legati alla sua genesi, la natura delle emissioni e la definizione dei processi che controllano la fuoriuscita di fluidi. In particolare, la struttura denominata *Zannone Giant Pockmark*, ZGP rappresenta un caso unico nel Mediterraneo, per via delle grandi dimensioni (0.5 km²), per la presenza di numerose e particolari morfologie (es. crateri, *mound*, *pockmark*) legate all'attività delle emissioni di fluidi dal fondale. La natura delle emissioni, arricchite in CO₂ e CH₄, ed i rapporti isotopici (³He/⁴He) sono indicativi di fluidi idrotermali derivanti da una sorgente magmatica profonda.

Le caratteristiche dell'area di studio (bassa profondità, vicinanza alla costa, attività persistente) rendono le manifestazioni idrotermali di Zannone un sito ideale per installare un laboratorio sottomarino finalizzato al monitoraggio e allo studio delle emissioni, alla valutazione della pericolosità geologica (es. possibilità di esplosioni idrotermali) e all'impatto ambientale (es. processi di acidificazione locale).

PAROLE CHIAVE: sistema idrotermale, Mar Tirreno, CO₂, acidificazione, pericolosità geologica, fondale marino, emissione fluida

ABSTRACT - Recent studies, coordinated by the CNR-IGAG, have allowed us to discover a previously unknown active hydrothermal system off the coast of Zannone Island (western Pontine Archipelago, central Tyrrhenian Sea). This hydrothermal system, composed of five large-scale depressions (length >250 m), was studied through multidisciplinary investigations (geophysical, geochemical, micro-paleontological, mineralogical-petrographical, etc), which permitted to define the geological processes forming the main depressions, to infer the origin of the fluids, and to explore the sub-seafloor architecture. In particular, the Zannone Giant Pockmark - ZGP represents a unique case in the Mediterranean area of large-scale complex depression (0.5 km²) formed by numerous craters, mounds, and pockmarks associated with different types of emissions. The emitted fluids, enriched in CO₂ and CH₄, and the helium isotopic ratios (³He/⁴He) indicate that the vented volatiles are released from a deep residual magma body.

The characteristics of the study area (shallow-water depth, proximity to the coastline, continuous venting activity) make the Zannone Hydrothermal Field a strategic site for installation of a multi-disciplinary permanent seafloor observatory for monitoring the fluid emission processes, possible geological hazards assessment (e.g. hydrothermal explosions), and for studying the environmental impacts (e.g. acidification process).

KEY WORDS: Hydrothermal system, Tyrrhenian Sea, CO₂, acidification process, geological hazards, fluid emission, ocean floors

(*) CNR-IGAG, Rome, Italy; (**) Sapienza University of Rome, Rome, Italy; (***) INGV, Palermo, Italy; (****) NIUST, University of Mississippi, University, Mississippi, USA

1. - INTRODUZIONE

Studi recenti coordinati dal CNR-IGAG hanno permesso di scoprire un sistema idrotermale attivo al largo dell'Isola di Zannone (Arcipelago Pontino occidentale, Mar Tirreno centrale). I principali lineamenti morfologici prodotti dall'attività idrotermale sono ampie depressioni (lunghezza >250m), identificate per la prima volta grazie a rilievi *multibeam* acquisiti con navi da ricerca del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

Successivamente alla scoperta delle depressioni sono state condotte ricerche multidisciplinari (indagini geofisiche, geochimiche, micropalontologiche, mineralogico-petrografiche, ecc.), in parte realizzate nell'ambito del *Progetto Ritmare*, e finalizzate alla comprensione degli aspetti legati alla genesi delle depressioni, allo studio delle emissioni e alla definizione dei processi che controllano la fuoriuscita di fluidi. Particolare attenzione è stata dedicata alla depressione di maggiore interesse (*Zannone Giant Pockmark*, ZGP), caratterizzata da numerose emissioni attive. Lo ZGP rappresenta infatti un caso del tutto peculiare e praticamente unico nel Mediterraneo, per via delle grandi dimensioni (0.5 km²), per la presenza di numerose tipologie di emissione e per le particolari morfologie (es. crateri, *mound*, *pockmark*) legate all'attività delle emissioni. Ad oggi esempi di depressioni idrotermali a fondo mare prodotte dalla fuoriuscita di fluidi con complessità morfologica paragonabile sono molto rari (ad esempio a largo di Panarea, MONECKE *et alii*, 2012, sui fondali del lago di Yellowstone, MORGAN *et alii*, 2003) e i meccanismi imputati alla loro genesi ed evoluzione poco o solo in parte definiti (es. attività idrotermale esplosiva, processi di collasso, processi di *self-sealing* e alterazione).

2. - ARCIPELAGO PONTINO

L'arcipelago pontino è localizzato a circa 30 km di distanza dalle coste laziali ed è suddiviso in due gruppi di isole distinte, le isole pontine occidentali costituite dalle tre isole di Ponza, Palmarola e Zannone, e le isole pontine orientali costituite dalle isole di Ventotene e Santo Stefano.

Le isole occidentali rappresentano i *remnant* di un complesso di domi riolitici sottomarini, principalmente costituiti da vulcaniti emesse durante due cicli eruttivi avvenuti tra il Pliocene (rioliti calcoalcaline di Ponza e Zannone, ~4-3 Ma) ed il Pleistocene (rioliti alcaline e iperalcaline di Palmarola, ~1.5 Ma). Il ciclo pleistocenico si conclude a ~1 Ma, con la messa in posto di lave

trachitiche subaeree a sud-est di Ponza (CONTE & DOLFI 2002; CADOUX *et alii*, 2005). L'attività delle isole orientali è invece datata tra 0.8 - 0.13 Ma, con deposizione di prodotti basaltici e trachibasaltici (METRICH *et alii*, 1988; PECCERILLO, 2005).

L'arcipelago pontino risulta essere interamente di natura vulcanica, fatta eccezione per l'Isola di Zannone, che risulta caratterizzata da unità affioranti di natura metamorfica e sedimentaria (PECCERILLO, 2005).

3. - ZANNONE GIANT POCKMARK (ZGP)

Sul fondo mare il sistema idrotermale è evidenziato principalmente dalla presenza di cinque depressioni di grandi dimensioni (lunghezza > 250 m) situate a profondità comprese tra i 100 e i 150 m. La depressione principale (ZGP in fig. 1a) è composta da cinque depressioni minori originate da collassi/esplosioni legati all'attività idrotermale (INGRASSIA *et alii*, 2015).

Al suo interno sono presenti numerose strutture associate ad emissioni di fluidi come *pockmark*, *mound*-croste autigene (fig. 1b,c), colonie di *matte* batteriche (fig. 1d) e strutture di emissione di fluidi (fig. 1e; INGRASSIA *et alii*, 2015; MARTORELLI *et alii*, 2016).

Analisi geochimiche hanno dimostrato come tali emissioni siano arricchite in CO₂ e CH₄, con rapporti isotopici (³He/⁴He) indicativi di fluidi idrotermali derivanti da una sorgente magmatica profonda (MARTORELLI *et alii*, 2016). Le analisi video hanno evidenziato come il fondale dello ZGP sia caratterizzato da un'elevata eterogeneità dovuta alla presenza di complesse strutture morfologiche associate ad attività idrotermale. Dati diretti di campionamento del fondale hanno evidenziato la presenza di specifiche e rare comunità bentoniche a foraminiferi agglutinanti come *Spiculosisiphon oceana*, *Jaculella acuta*, *Deuterammia rotaliformis*, del tutto peculiari per l'area mediterranea (DI BELLA *et alii*, 2016). Tali comunità sono indicative della presenza di intensi fenomeni di dissoluzione/acidificazione.

Di recente (campagna oceanografica ZHF 2017 - CNR-IGAG) è stato installato un modulo multiparametrico con l'obiettivo di caratterizzare l'attività di emissione e di studiarne le variazioni nel tempo. Ciò permetterà di approfondire le conoscenze sui sistemi idrotermali di acqua bassa che a tutt'oggi risultano ancora poco studiati e di comprendere le interazioni che intercorrono tra processi chimico-fisici, biologici e geologici, nonché il loro impatto sull'ambiente marino (es. processi di acidificazione).

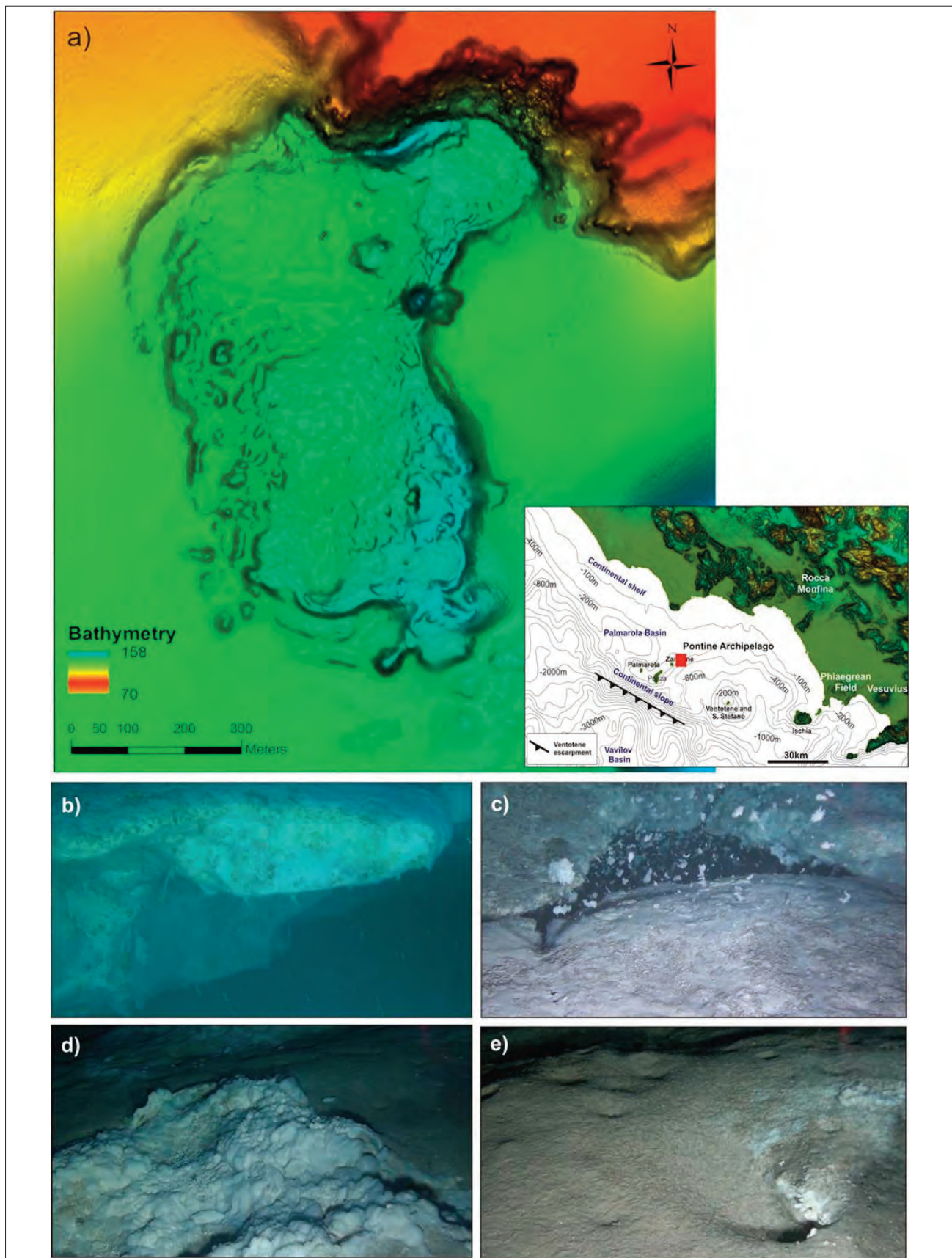


Fig. 1 - a) Carta morfobatimetrica dello Zannone Giant Pockmark (ZGP) ed inset con localizzazione dello ZGP (quadrato rosso); b, c) croste autigene associate ad emissioni di fluidi; d) comunità batteriche associate ad emissioni di fluidi; e) pockmark ed emissione puntuale su fondale sabbioso.
 - a) Morpho-bathymetric map of the Zannone Giant Pockmark (ZGP), with inset showing its location (red square); b, c) autogenic crusts related to fluid emissions; d) bacterial mats; e) pockmarks and bubbles stream on the sandy seafloor.

BIBLIOGRAFIA

- CADOUX A., PINTI D.L., AZNAR C., CHIESA S. & GILLOT P. Y. (2005) - *New chronological and geochemical constraints on the genesis and geological evolution of Ponza and Palmarola volcanic islands (Tyrrhenian Sea, Italy)*. Lithos, **81**(1), 121-151.
- CONTE A.M. & DOLFI D. (2002) - *Petrological and geochemical characteristics of Plio-Pleistocene volcanics from Ponza Island (Tyrrhenian sea, Italy)*. Mineralogy and Petrology, **74**(1), 75-94.
- DI BELLA L., INGRASSIA M., FREZZA V., CHIOCCI F.L. & MARTORELLI E. (2016) - *The response of benthic meiofauna to hydrothermal emissions in the Pontine Archipelago, Tyrrhenian Sea (central Mediterranean Basin)*. Journal of Marine Systems, **164**, 53-66.
- INGRASSIA M., MARTORELLI E., BOSMAN A., MACELLONI L., SPOSATO A. & CHIOCCI F.L. (2015) - *The Zannone Giant Pockmark: first evidence of a giant complex seeping structure in shallow-water, central Mediterranean Sea, Italy*. Marine Geology, **363**, 38-51. Doi: 10.1016/j.margeo.2015.02.005
- MARTORELLI E., ITALIANO F., INGRASSIA M., MACELLONI L., BOSMAN A., CONTE A.M., BEAUBIEN S.E., GRAZIANI S., SPOSATO A. & CHIOCCI F.L. (2016) - *Evidence of a shallow water submarine hydrothermal field off Zannone Island from morphological and geochemical characterization: implications for Tyrrhenian Sea Quaternary volcanism*. Journal of Geophysical Research Solid Earth, **121**, 8396-8414.
- METRICH N., SANTACROCE R. & SAVELLI C. (1988) - *Ventotene, a potassic Quaternary volcano in central Tyrrhenian Sea*. Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol., **43**, 1195-1213.
- MONECKE T., PETERSEN S., HANNINGTON M.D., ANZIDEI M., ESPOSITO A., GIORDANO G. & HOCKING M. (2012) - *Explosion craters associated with shallow submarine gas venting off Panarea island, Italy*. Bulletin of volcanology, **74**(9), 1937-1944.
- MORGAN L.A., SHANKS W.C., LOVALVO D.A., JOHNSON S.Y., STEPHENSON W.J., PIERCE K.L. & SCHULZE B. (2003) - *Exploration and discovery in Yellowstone Lake: results from high-resolution sonar imaging, seismic reflection profiling, and submersible studies*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **122**(3), 221-242.
- PECCERILLO A. (2005) - *Plio-quaternary volcanism in Italy*. **365**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

I sistemi di emissione di CO₂ dell'isola d'Ischia (Mar Tirreno)

The CO₂ vent's systems off the island of Ischia (Tyrrhenian Sea)

GAMBI M.C.(*), GAGLIOTI M.(*), TEIXIDO N.(*)

RIASSUNTO - Vengono descritti sette sistemi di emissione sommersa di gas di origine vulcanica attorno all'isola d'Ischia (Golfo di Napoli): il Castello Aragonese (che è anche il geosito marino n. 20 della Regione Campania), la Vullatura, le Chiane del Lume, la grotta del Mago, la secca della Madonna, la Marina di Lacco Ameno e la spiaggia di Chiaia. Nei siti, localizzati a profondità tra 0,5 (Castello) e 48 m (secca Madonna), il gas è composto per oltre il 90% da CO₂, senza presenza di gas tossici, che fuoriesce alla stessa temperatura delle acque circostanti. Il surplus di CO₂ provoca in alcuni di questi siti una notevole riduzione del pH, e quindi un'acidificazione naturale delle acque circostanti, che nelle zone di emissione più intensa arriva anche a valori minimi di 7,0-6,5 (Castello) e di 6,5-6,2 (Vullatura), anche se con ampie oscillazioni giornaliere. Questi sistemi pertanto sono utilizzati dai ricercatori come laboratori naturali per lo studio degli effetti dell'acidificazione marina su specie ed habitat bentonici. Nel complesso i diversi sistemi includono ambienti vari e spesso misti, quali fondi rocciosi ricoperti da densi popolamenti macroalgali (Castello, Chiane del Lume), prateria di *Posidonia oceanica* (Castello, Vullatura, Chiane del Lume), ambienti rocciosi semi-oscuro (Grotta del Mago), il coralligeno (secca della Madonna) e sabbie e ghiaie (Vullatura, Chiane del Lume, Chiaia, marina di Lacco Ameno).

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, fumarola, sistema litorale, habitat bentonici, acidificazione marina, Mar Tirreno

ABSTRACT - In this contribution we describe seven systems of submerged emission of volcanic gases around the Island of Ischia (Gulf of Naples): the Castello Aragonese (which is also the marine geosite no. 20 of the Campania Region), the Vullatura, the Chiane del Lume, the cave Grotta del Mago, the deep rocky bank Madonna, the Marina di Lacco Ameno and the beach of Chiaia. At the sites, located at a

depth between 0.5 (Castello) and 48 m (Madonna bank), the gas is composed for more than 90% by CO₂, without the presence of toxic gases, which comes out at the same temperature of the surrounding waters. The CO₂ surplus causes in some of these sites an important reduction of the water pH, and therefore a natural acidification of the surrounding waters, which in the most intense emission zones also reaches minimum values of 7.0-6.5 (Castello) and of 6.5-6.2 (Vullatura), although with wide daily oscillations. These systems are therefore used by researchers as natural laboratories for the study of the effects of marine acidification on benthic species and habitats. On the whole, the various vent systems include different and often mixed environments, such as rocky bottoms covered by dense macroalgal populations (Castello, Chiane del Lume), the seagrass *Posidonia oceanica* meadows (Castello, Vullatura, Chiane del Lume), semi-dark rocky environments (Grotta del Mago), the coralligenous outcrops (Madonna bank) and sands and gravels (Vullatura, Chiane del Lume, Chiaia beach, Marina di Lacco Ameno).

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, fumaroles, littoral system, benthic habitat, ocean acidification, Tyrrhenian Sea

1. - INTRODUZIONE

L'isola d'Ischia è ben nota per le sue risorse ambientali, culturali e paesaggistiche sia a terra che a mare che hanno portato alla istituzione sia di SIC (marini e terrestri) nell'ambito della rete Natura 2000, sia nel 2008 dell'Area Marina Protetta del Regno di Nettuno (GAMBI *et alii*, 2003; www.nettuno.org), nonché di diversi Geositi emersi e

(*) Stazione Zoologica Anton Dohrn, Dip.to Ecologia Marina Integrata, Centro Villa Dohrn-Ecologia del benthos, Ischia. Villa Comunale 80121 Napoli

sommersi (MONTI, 2011). Ischia presenta una lunga e ben documentata storia vulcanica; le eruzioni hanno generato differenti rocce basaltiche e numerosi depositi di frane detritiche anche a mare (fondi ad “*hummock*”) (CHIODINI *et alii*, 2004; DE ALTERIIS *et alii*, 2010), che fanno delle coste e dei fondali dell’isola un “arcipelago” di secche, massi e faraglioni, canyon, resti di edifici vulcanici e veri e propri vulcani monogenici (es. banchi d’Ischia e di Forio), falesie verticali profonde e grotte, di elevata complessità (DE ALTERIIS *et alii*, 2006; SBRANA & TOCCACELI, 2011). Il vulcanismo dell’area si manifesta ancora oggi attraverso una intensa attività secondaria caratterizzata da idrotermalismo (acque e fanghi) e fenomeni di emissioni gassose e fumarole presenti in varie parti interne e costiere dell’isola (TEDESCO, 1996), che testimoniano la presenza di cospicui depositi sub-croscali di CO₂ (PECORAINO *et alii*, 2005). I sistemi sommersi di emissione di gas sono concentrati ad Ischia soprattutto nella zona nord-orientale dell’isola e alcuni di questi sono studiati da oltre dieci anni dal punto di vista biologico dagli ecologi marini della Stazione Zoologica di Napoli (SZN) perché rappresentano laboratori naturali per lo studio degli effetti dell’acidificazione marina sul biota bentonico. Infatti la CO₂, gas dominante in questi sistemi, provoca un abbassamento del pH ed un’alterazione della chimica dei carbonati definita come “acidificazione marina” (*ocean acidification*) (HALL-SPENCER *et alii*, 2008; GAMBI, 2014; FOO *et alii*, 2018). Nel presente contributo viene descritto brevemente ognuno di questi sistemi, che è stato possibile osservare direttamente in immersione con ARA, o con ispezioni visive dalla superficie (*snorkeling*).

2. - IL CASTELLO ARAGONESE

Il Castello Aragonese di Ischia (fig. 1), rappresenta un geosito marino della Regione Campania (geosito n. 20) (MONTI, 2011; GAMBI & RICEVUTO, 2012). Il sito, così definito per la presenza del Castello Aragonese considerato monumento nazionale, rappresenta un isolotto (duomo vulcanico) adiacente ad una zona di faglia (RITTMANN & GOTTINI, 1980). L’isolotto è collegato da una strada e da un ponte all’isola di Ischia, e le coste a nord (40°43.870’N; 13°57.796’E) e sud (40°43.919’N; 13°57.832’E) rispetto al congiungimento tra l’isolotto e la strada, sono interessate da intense emissioni di gas (campo fumarolico) (fig. 1) rappresentato per oltre il 90% da anidride carbonica e senza traccia di gas tossici (es. solfuri) (HALL-SPENCER *et alii*, 2008; FOO *et alii*, 2018). Questa zona rappresenta il primo sistema di emissione sommersa marina di CO₂ studiata al mondo dal punto di vista bio-ecologico, con ad oggi oltre 70 lavori scientifici pubblicati e oltre 650 specie censite (FOO *et alii*, 2018; GAGLIOTI *et alii*, 2018). Una descrizione della zona in relazione al geosito marino ed alle emissioni gassose è fornita anche

da GAMBI & RICEVUTO (2012) nell’ambito del *Meeting Marino* ISPRA sui geositi marini, mentre l’indicazione della presenza di emissioni è anche riportata nella carta di SBRANA & TOCCACELI (2011), per la parte nord della costa del Castello. Informazioni più di dettaglio anche sugli aspetti biologici ed ecologici di specie ed habitat che caratterizzano la zona sono sintetizzate in una *review* di FOO *et alii* (2018). Analisi più recenti della composizione dei gas, svolte ad agosto 2017 in collaborazione con l’INGV a seguito dell’evento sismico su Ischia del 21 agosto 2017, hanno confermato valori di CO₂ di 93,14% a sud e 94,73% a nord (Italiano F., Pecoraino G., dati inediti).

Il fenomeno di emissione di gas si registra in una zona estesa per circa 150 m x 20 m lungo la parete rocciosa e nelle immediate sue adiacenze, sia nord che sud dell’isolotto del Castello (fig. 1), ed in entrambi i lati il fondale è caratterizzato da una prateria della fanerogama marina *Posidonia oceanica*, tasche di sedimento sabbioso e massi rocciosi. A nord le emissioni ricoprono una superficie di circa 2.000 m² per una fuoriuscita totale di 0,7x10⁶ L al giorno; a sud interessano un’area di circa 3.000 m² con un’emissione totale di 1,4 x 10⁶ L al giorno, acidificando una massa d’acqua di circa 18.000 m³ (HALL-SPENCER *et alii*, 2008). Nella zona interessata dalle emissioni di gas la temperatura e la salinità sono simili ed omogenee a quelle delle aree limitrofe senza emissione. Il pH medio varia lungo un gradiente che va da 8,10 (normale), a circa 150 m dalle emissioni più dense, fino a 7,0 - 6,5 nelle aree a maggiore densità di bolle (RICEVUTO *et alii*, 2014). Tuttavia, misure continue *in situ* hanno messo in evidenza un andamento molto variabile del pH, che nella zona a maggiore emissione di bolle si abbassa anche sotto 6,0 (KROEKER *et alii*, 2011), e con valori che oscillano fortemente anche nell’ambito giornaliero probabilmente in relazione sia all’azione di idrodinamismo e marea, sia per il *buffering* del pH dovuto alla produzione di ossigeno per attività fotosintetica da parte delle dense coperture vegetali presenti sia sul fondo colonizzato in larga misura da *Posidonia oceanica*, sia sulle pareti verticali ricoperte da cospicui popolamenti algali (*Dictyota* spp., *Halopteris scoparia*, *Cladophora* spp, *Sargassum vulgare*) (FOO *et alii*, 2018).

3. - LA VULLATURA

Questo sito è indicato come “porto S. Antonio” nel lavoro di TEDESCO (1996) per un errore toponomastico in quanto l’area di emissione dei gas si trova allineata davanti alla “porta” della chiesa di S. Antonio, di fronte alla spiaggia della Mandra ad Ischia (40°44.168’N; 13°57.462’E), e non esiste ad Ischia alcun toponimo simile. I pescatori ed ormeggiatori locali conoscono bene la zona ed il fenomeno, e infatti definiscono l’area come “Vullatura” (fig. 2) (cioè bollitura) perché l’attività di emissione è così intensa che le acque sembrano

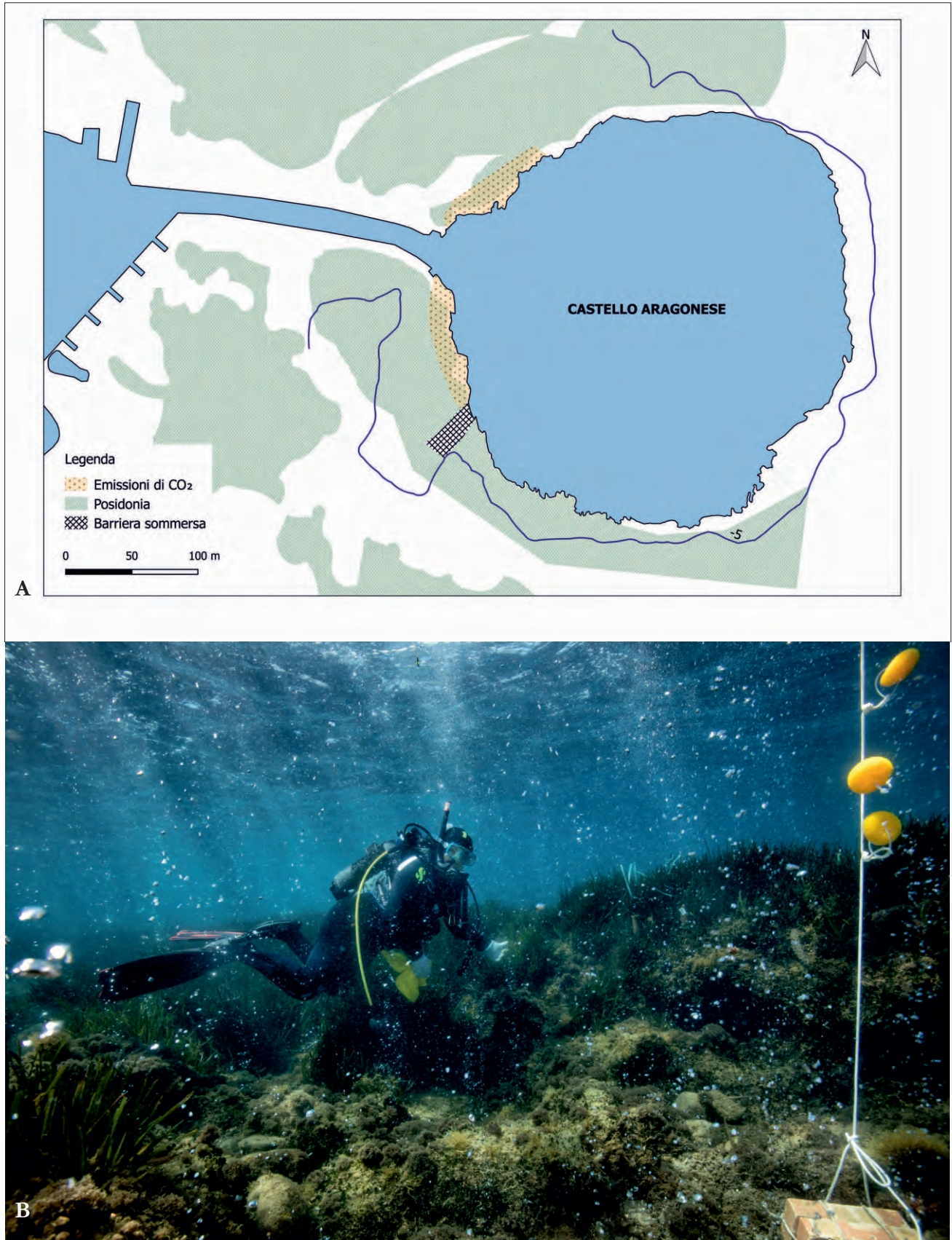


Fig. 1- Castello Aragonese (Ischia): A) mappa GIS del Castello con indicate le zone a nord e sud interessate da emissioni di gas dal fondale (0,5-4 m) (aree rosa chiaro puntinato) e la distribuzione di *Posidonia oceanica* (in verde); B) una foto della zona a massima emissione di gas del lato sud (2 m di profondità); si noti la presenza di posidonia attorno alle emissioni (Foto: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli).

- Castello Aragonese (Ischia): A) GIS map of the Castello area with indication of the CO₂ vents on the north and south side of the islet (0.5-4 m depth) (dotted pale pink areas) and distribution of the seagrass *Posidonia oceanica* meadows (green); B) a view of the high venting zone on the south side, surrounded by *Posidonia* shoots (Photo: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli).

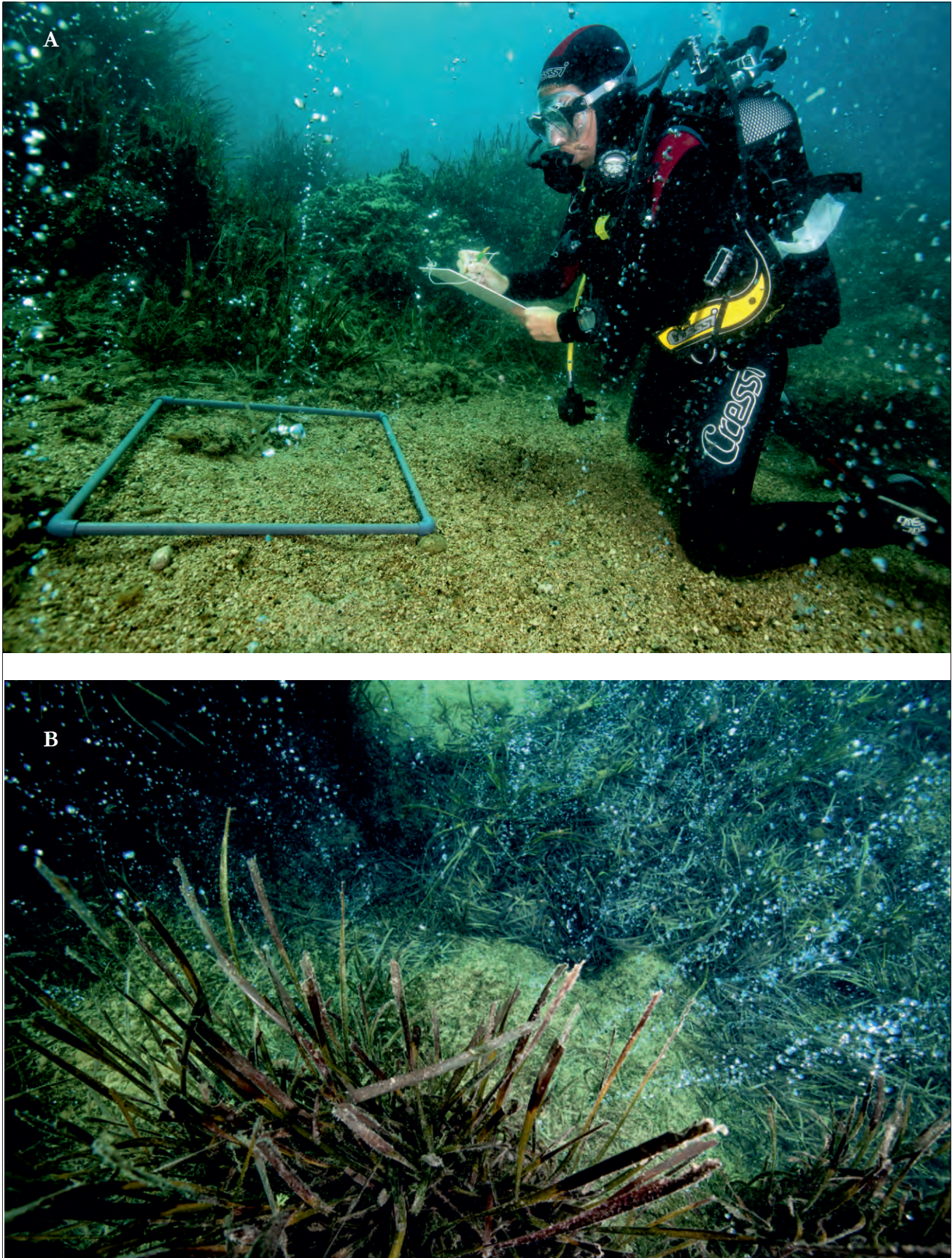


Fig. 2 - La Vullatura (Ischia, 3-6 m di profondità): A) visione della zona di massima emissione di bolle con operatore subacqueo intento alla misura di flusso dei gas; B) visione dall'alto di intense emissioni di bolle in cui è visibile *Posidonia oceanica* e il suo detrito fogliare sul fondo (Foto: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli).
 - The Vullatura vent's system (Ischia, 3-6 m depth): A) view of the highest intensity venting zone with a scientific diver measuring the gas flux; B) view of intense gas emissions from above, note the *Posidonia oceanica* seagrass shoots and leaf detritus on the bottom (Photo: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli).

“ribollire” (GAMBI, 2014) (fig. 2). L'area, attualmente organizzata come campo di boe in concessione ad una cooperativa di ormeggiatori (Ischia Barche srl), si trova a circa 150 m dalla linea di costa, e a circa 500 m dal lato nord-ovest del Castello Aragonese, allineata sulla stessa linea di faglia che scorre tra il duomo vulcanico del Castello e le coste dell'isola. Il campo fumarolico ha una forma sub-ovale di circa 40 m per 25 m, con una profondità che va da 3 a 6 m. La differenza di profondità è dovuta al fatto che su un fondo di sabbia grossolana a 5-6 m si innalzano ampie zone di prateria di *Posidonia oceanica* insediata su una cospicua *matte* alta da 2 a 3 m, e che forma anche creste e pinnacoli. Le emissioni sono più intense e dense in aree di radura circondate da posidonia (fig. 2), e meno dense nelle zone a posidonia viva e/o *matte* morta. Il gas fuoriesce, come nel sito del Castello, alla stessa temperatura delle acque circostanti. La porzione di posidonia viva ricopre circa il 60% del fondo presente, mentre pochi altri organismi riescono a colonizzare sia il fondo che la *matte* morta di posidonia, tra cui le alghe *Flabellia petiolata* e *Codium bursa*, ed il porifero *Crambe crambe* (GAMBI 2014; GAMBI & TEIXIDO, 2016). Analisi del rapporto isotopico dei gas in questa zona sono reperibili in TEDESCO (1996, indicata come porto S. Antonio), mentre le uniche analisi relative alla composizione del gas disponibili sono quelle effettuate in collaborazione con INGV a seguito dell'evento sismico su Ischia del 21 agosto 2017, che hanno evidenziato il 95.9% di CO₂ e tracce trascurabili di altri gas (<1%, metano, N₂ e O₂) (Italiano F., Pecoraino G. dati inediti). Una valutazione preliminare del pH, misurato in continuo *in situ*, ha evidenziato una notevole variabilità nella zona ad emissione più intensa, con valori che per il 90% sono al disotto della normalità (8.10), e che possono scendere anche a 6,4-6,2, con ampie fluttuazioni nell'arco della giornata (Teixido N. e Gambi M.C., dati inediti), probabilmente anche in questo caso in relazione a condizioni idrografiche locali ed all'attività di buffering del pH per la produzione di ossigeno per fotosintesi da parte delle dense coperture di posidonia che circondano le emissioni stesse.

4. - LE CHIANE DEL LUME

Le Chiane del Lume (fig. 3), si trovano lungo la costa est dell'isola d'Ischia tra la grotta del Mago e la Baia di Cartaromana (40°42.919'N; 13°58.009'E), circa 200 m fuori Punta del Lume. Si tratta di un campo fumarolico documentato sia da testimonianze di uomini di mare e subacquei locali (Rando V., Sorvino P., Lauro G.) che da elaborazioni cartografiche più recenti, quali il progetto CARG della Regione Campania (foglio 464, SBRANA & TOCCACELI, 2011), e pubblicazioni (GAMBI, 2014).

Il sito è costituito da un'ampia radura detritica posta tra 10 e 12 m di profondità, larga circa 25 m

e lunga circa 50 m, e circondata quasi totalmente da ampie macchie di *Posidonia oceanica* insediata su una *matte* alta circa 50-60 cm (fig. 3). Su un lato della radura è presente un banco roccioso (fig. 3b) lungo circa 20 m e ad una estremità del quale è presente un pinnacolo che si innalza da 10 a 4 m di profondità. Le emissioni gassose sono molto dense, caratterizzate da bolle molto piccole e con fuoriuscita continua ed una distribuzione spaziale uniforme e diffusa (fig. 3a); le emissioni sono facilmente rilevabili anche dalla superficie mediante un comune ecoscandaglio, poiché determinano un fenomeno di interferenza con l'ecoriflesso dello strumento stesso.

Analisi della composizione dei gas emessi, svolte ad agosto 2017 in collaborazione con l'INGV a seguito dell'evento sismico su Ischia del 21 agosto 2017, attestano una composizione chimica delle emissioni rappresentata per circa il 95% da CO₂, ed altri elementi in tracce (<1%, es. CH₄, O₂, N₂) (Italiano F., Pecoraino G., dati inediti). La temperatura del gas emesso risulta anche in questo caso analoga a quella delle acque dell'ambiente circostante.

Alcune misurazioni del pH, effettuate *in situ* in continuo, confermano la presenza di un moderato effetto di acidificazione, con valori di pH che nel 70% circa dei rilievi risultano al di sotto dei valori normali riscontrati in ambiente marino mediterraneo (pH > 8,10), con valori medi attorno 7,90 e con alcuni picchi minimi di 7,20 (<http://highco2seas.com/>) (Teixido N. e Gambi M.C., dati inediti). Gli habitat che è possibile rinvenire nell'area sono sia la prateria di posidonia che i popolamenti fotofili di fondi rocciosi presenti lungo il banco roccioso che definisce uno dei lati del campo fumarolico (GAMBI, 2014). Osservazioni con ecoscandaglio, informazioni aneddotiche di pescatori e subacquei locali, ed una immersione di uno degli Autori (GAMBI M.C.), nonché un rilievo presente nella carta CARG, foglio 464 di SBRANA & TOCCACELI (2011), indicano che sia a nord delle Chiane (verso la grotta del Mago), sia a sud (verso Cartaromana) vi sono altri due campi fumarolici meno estesi e con caratteristiche simili alle Chiane del Lume, cioè radure di sedimenti detritici circondate da posidonia (GAMBI, 2014).

5. - LA GROTTA DEL MAGO

La grotta del Mago (fig. 4), situata sul lato sud-est dell'isola d'Ischia (40°42.698'N; 13°57.851'E), è una cospicua cavità semisommersa lungo tutto il suo sviluppo, che si estende per circa 110 m di lunghezza, ed è costituita da una grande camera iniziale di ingresso (circa 40 m di lunghezza) che immette in uno stretto corridoio il quale termina con una camera finale più piccola e completamente oscura (circa 60 m di lunghezza) (fig. 4). Per tutto lo sviluppo della cavità vi è sempre comunicazione con la superficie e la grotta è accessibile anche in *snorkeling*. Questa cavità semisommersa, formatasi

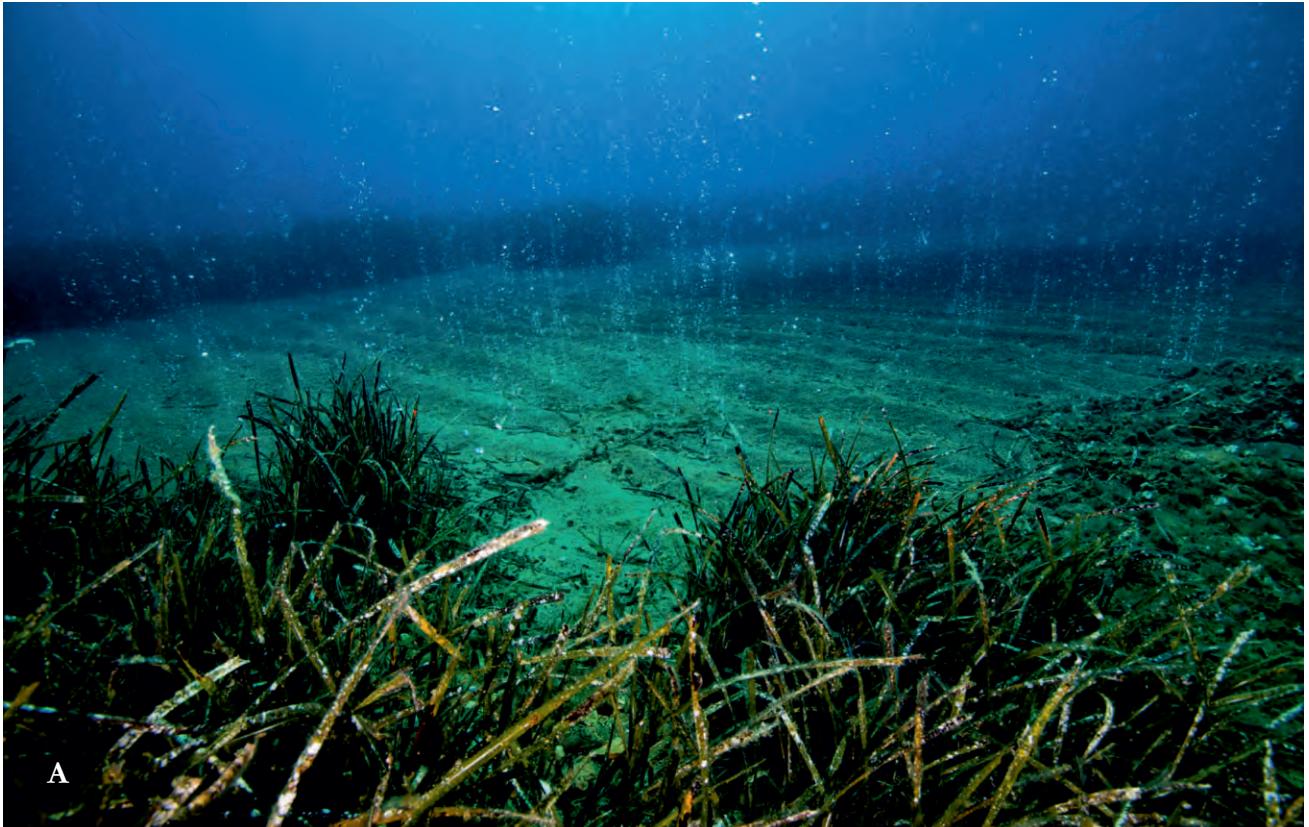


Fig. 3 - Le Chiane del Lume (Ischia, 10-12 m di profondità): emissioni di CO₂ su radura detritica circondata da *Posidonia oceanica* (A, foto: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli) e da un banco roccioso (B, foto: Teixido N.).

- The CO₂ vent's system of the Chiane del Lume (Ischia, 10-12 m depth) on a coarse detritus clearing surrounded by *Posidonia oceanica* meadows (A, photo: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli), and a rocky bank (B, photo: Teixido N.).

in seguito all'azione erosiva del mare su materiali eruttivi inseriti in una matrice trachitica più friabile (FRIEDLANDER, 1938), rappresenta uno dei primi sistemi di grotta investigati in Italia per studiare gli

effetti dei gradienti di idrodinamismo e luce sui popolamenti bentonici (CINELLI *et alii*, 1977; GAMBI *et alii*, 2003). La grotta infatti è molto esposta all'azione del moto ondoso, come testimoniato dai notevoli

ripple-mark riscontrabili sui fondi sabbiosi nella camera grande di ingresso e nella prima parte dello stretto corridoio che conduce alla camera interna.

Nel complesso dei lavori svolti sui popolamenti del sito (sintetizzati in GAMBÌ *et alii*, 2003) sono state rilevate 353 specie tra alghe ed invertebrati bentonici; i popolamenti di fondo duro della grotta sono dominati, soprattutto nella camera grande di ingresso, da una facies del madreporario termofilo *Astroides calycularis* (madrepora arancione) (DAPPIANO & GAMBÌ, 2004) e da alcune specie abbondanti di poriferi (es., *Chondrosia reniformis*, *Chondrilla nucula*, *Spirastrella cunctatrix*, *Ircinia oros*), alcune delle quali con colonie decolorate in corrispondenza delle porzioni più interne della cavità meno esposte alla luce (fig. 4c).

Sul fondo della camera grande di ingresso della grotta (6-7 m di profondità) (CE in fig. 4a) caratterizzato da ghiaia e sabbia grossolana, affioramenti rocciosi e massi sparsi, sono presenti emissioni gassose continue e diffuse che fuoriescono alla stessa temperatura delle acque circostanti. Le emissioni sono presenti anche in una limitata area antistante la camera di ingresso (CE)

ed all'inizio del corridoio (C), mentre scompaiono inoltrandosi in direzione della camera più interna (CI) della grotta. Come confermato da comunicazioni personali di ricercatori che in passato hanno lavorato in questa zona (Pronzato R., Pansini M., Cinelli F.), si tratta di emissioni già note negli anni '70, ma che non erano così estese e cospicue come adesso (Gambi M.C., osservazione personale). La grotta del Mago è uno dei siti considerati da TEDESCO (1996) nello studio sulla composizione isotopica dei gas fumarolici di Ischia, mentre recenti analisi condotte nell'area ad agosto 2017, in collaborazione con l'INGV a seguito dell'evento sismico su Ischia del 21 agosto 2017, attestano una composizione chimica delle emissioni costituita per circa il 95% da CO₂ ed altri elementi in tracce (<1%, CH₄, O₂, N₂) (Italiano F., Pecoraino G., *et alii*, dati inediti). Misure di pH condotte *in situ* in continuo confermano un effetto di acidificazione piuttosto consistente ed uniforme all'interno della camera grande di ingresso della grotta (con valori quasi sempre inferiori a 8.0 e con picchi minimi anche prossimi a 7.0) (Teixido N. e Gambi M.C., dati inediti). Le peculiarità sopra

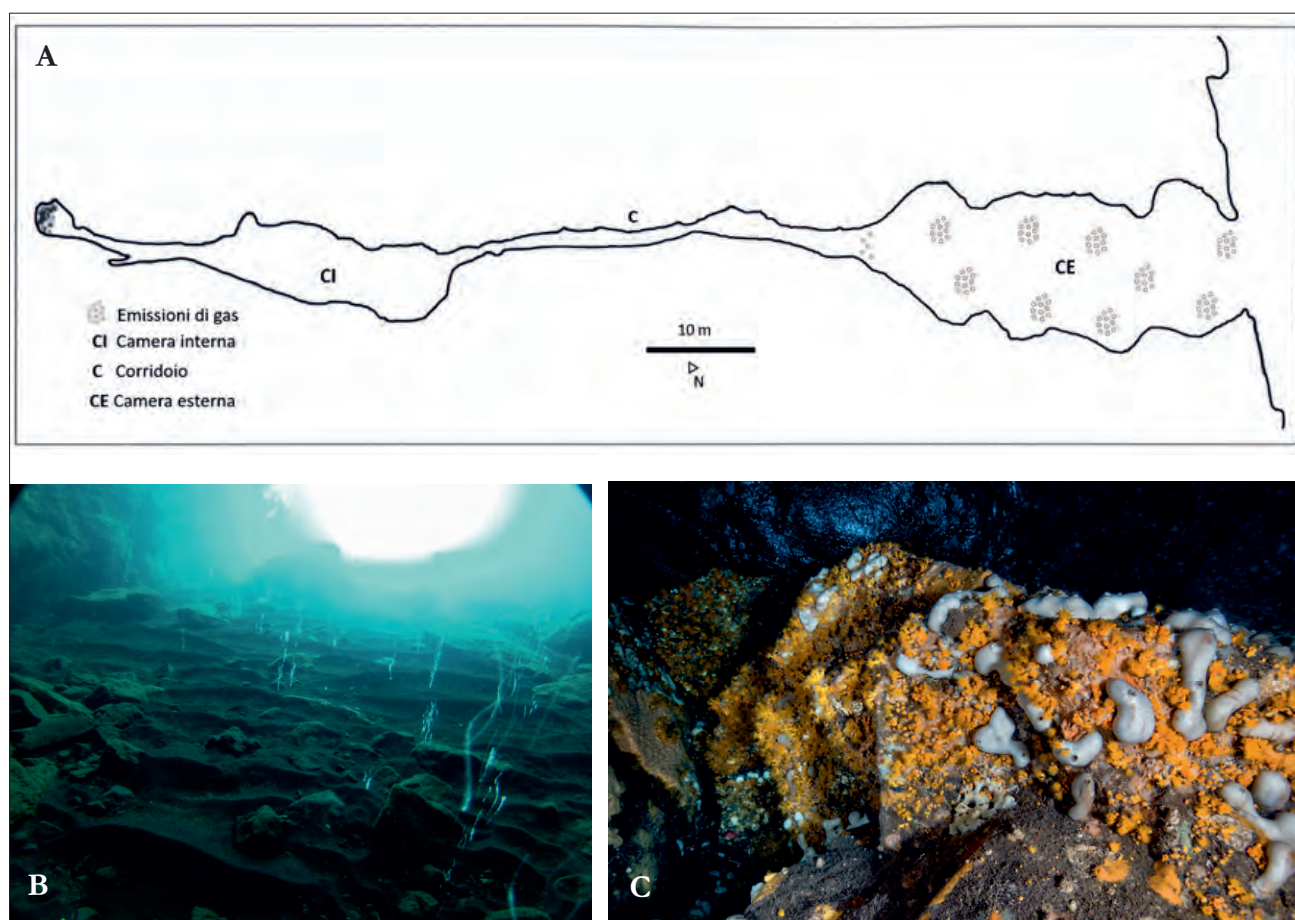


Fig. 4 - La grotta del Mago (Ischia, 6-7 m di profondità): A) visione dall'alto della planimetria della grotta, (da CINELLI *et alii*, 1977, modificato), con indicata la zona di emissione di gas (CO₂); B) emissioni di CO₂ sul fondale della camera esterna (Foto: Gambi M.C.); C) popolamenti ad *Astroides calycularis* (madrepora arancione) e poriferi nelle pareti della camera grande di ingresso (Foto: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli).

- The Mago's Cave (Ischia, 6-7 m depth) A) planimetric map from above (from CINELLI *et alii*, 1977, modified); with location of the CO₂ emissions; B) emission of gas from the sandy bottom of the large chamber of entrance of the cave (Photo: Gambi M.C.); C) the orange scleractinia *Astroides calycularis* and sponges on the walls of the cave's large chamber of entrance (Photo: Vassallo P., copyright: Stazione Zoologica di Napoli).

indicate fanno della grotta del Mago un laboratorio naturale per lo studio degli effetti dell'acidificazione su comunità ed habitat sciafili, cioè in condizioni di semi-oscurità. Tuttora sono in corso studi volti a indagare composizione e struttura dei popolamenti bentonici, e grado di adattamento eco-fisiologico e genetico delle popolazioni di *Astroides calycularis* in risposta all'effetto di acidificazione dovuto alle emissioni di CO₂ (<http://highco2seas.com/>).

6. - LA SECCA DELLA MADONNINA

La Secca della Madonnina (40°43.291'N; 13°58.865'E) è il sito più profondo in cui finora sono state documentate emissioni gassose attorno all'isola d'Ischia per osservazione diretta in immersione subacquea (GAMBI, 2014). Il sito prende il nome dal fatto che in un anfratto della parete, a 43 m di profondità, un subacqueo abbia collocato una piccola statua di bronzo raffigurante la Madonna quale ex-voto. La secca, situata nel canale tra Ischia e Procida, è soggetta a forti correnti, e si trova ad una distanza di circa 400 m dal complesso delle secche della Catena-Pertuso, queste ultime inserite all'interno della zona A (riserva integrale) dell'AMP del Regno di Nettuno (<https://www.nettunoamp.org/>); la Madonnina si trova invece per poche decine di metri fuori da tale zona A. La secca si estende ad una profondità compresa tra 36 e 48 m, ed è costituita da due grandi faraglioni a sommità piatta (cappello) (GAMBI, 2014). Le emissioni di gas si trovano su un fondo di sabbia grossolana a 47-48 m di profondità e si estendono su un'area di circa 25 m di lunghezza e 3-4 m di larghezza dalle pareti rocciose. L'area interessata dalla fuoriuscita di gas si trova ad un'estremità dei due faraglioni, le bolle escono in modo continuo e spazialmente uniforme, ed alla stessa temperatura delle acque circostanti. I due faraglioni risultano pressoché spogli di popolamenti bentonici, soprattutto nella sommità piatta del "cappello", sebbene l'habitat che ci si aspetterebbe di trovare a queste profondità e condizioni idrologiche dovrebbe essere quello tipico del coralligeno Mediterraneo, come infatti si osserva nelle secche attigue alla Madonnina di Catena e Pertuso (GAMBI *et alii*, 2003). Le pareti sia verticali che orizzontali del "cappello" della secca risultano molto povere e il coralligeno è privo dei tipici organismi strutturanti cospicui quali gorgonie (*Paramuricea*, *Eunicella* spp., *Leptogorgia*, *Savalia*), briozoi, spugne perforanti. Gli organismi biocostruttori sono limitati ad alghe coralline incrostanti, con formazioni comunque non cospicue e poco consistenti ed alla spugna *Aplysina cavernicola* (GAMBI, 2014; GAMBI & TEIXIDO, 2016). In questo sito le poche misure *in situ* del pH disponibili, effettuate sul "cappello" della secca a 36 m, evidenziano livelli molto modesti di acidificazione con valori che oscillano da 8,04 e 8,12. Non è stato possibile prelevare ancora gas da questa zona

molto profonda (-48 m), tuttavia, per analogia con quanto osservato in altri sistemi di emissione analoghi ma più superficiali localizzati nello stesso settore nord-est dell'isola di Ischia, si può ipotizzare che anche alla Madonnina il gas sia a dominanza di CO₂.

7. - MARINA DI LACCO AMENO

Il sito si trova all'interno del porto turistico della Marina di Lacco Ameno, un approdo per 300 posti barca costruito nel 2013, che si trova all'ingresso dell'abitato di Lacco Ameno (Ischia) provenendo dal vicino comune di Casamicciola. Le emissioni si sviluppano lungo una direttrice lineare per circa 115 m che scorre parallela alla linea di costa e localizzata tra la massicciata rocciosa della strada (parcheggio comunale di Lacco Ameno) e il primo molo galleggiante (orientato a sud) per ormeggi (40°45.140'N; 13°53.546'E e 40°45.117'N, 13°53.621'E). La profondità va da 0,5 a circa 1,2 m ed il fondale è di sabbia frammista a pietre e modesti affioramenti rocciosi. Il gas, che non è stato prelevato ed analizzato essendo in zona portuale, è presumibilmente composto da CO₂ come la maggior parte delle emissioni sommerse di Ischia (TEDESCO, 1996; HALL-SPENCER *et alii*, 2008; Italiano F., Pecoraino G., dati inediti). Le bolle fuoriescono in modo intermittente e discontinuo dal fondo, meno regolare rispetto a quanto si rileva in altri siti attorno ad Ischia. Una perlustrazione visiva su tutto il porto turistico ha permesso di rilevare la presenza sporadica di emissioni anche in altre aree della zona portuale lungo la banchina a nord e su profondità maggiori (3-4 m). Questo indica che tutta l'area può essere in varia misura interessata da emissioni, ma la presenza del porto ne limita la possibilità di accesso ed ispezione in immersione.

8. - SPIAGGIA DI CHIAIA (FORIO)

La zona di emissione si trova di fronte alla spiaggia di Chiaia, nel Comune di Forio, ed è localizzata nel passaggio tra le prime due scogliere artificiali (a partire dal lato di sud-ovest della spiaggia stessa, provenendo dall'abitato di Forio) che si estendono parallele alla costa, a circa 65 m dalla riva, ed a protezione della spiaggia stessa (40°44.526'N; 13°51.810'E). Il campo fumarolico è uno dei pochi siti sommersi di emissione di gas presente nel settore occidentale dell'isola d'Ischia, dove invece sono più frequenti le fumarole a terra (TEDESCO, 1996). L'estensione delle bolle è molto modesta interessando una zona di circa 10 x 15 m di ampiezza, ed è localizzata su un fondale di sabbia adiacente alla franata di massi della prima delle due barriere artificiali a 2,5-3 m di profondità. Le bolle, che sono di dimensioni relativamente grandi, escono in modo discontinuo ed intermittente dal fondale. Campionamento ed analisi del gas sono

stati effettuati anche in questo sito nell'agosto del 2017, in collaborazione con INGV a seguito dell'evento sismico su Ischia del 21 agosto 2017, ed hanno evidenziato valori di CO₂ del 40,54% e di metano (CH₄) del 5,88% (Italiano F., Pecoraino G., dati inediti), valori entrambi che si discostano molto da quelli di altre emissioni sommerse di Ischia in cui domina la CO₂, con oltre il 90%, ed il metano è solo in tracce (<1%).

Ringraziamenti

Si ringraziano i geologi Italiano F. e Pecoraino G. (INGV, Palermo) per aver permesso la citazione dei dati preliminari di composizione dei gas dei sistemi descritti. Un ringraziamento al Sig. Lauro G. ed alla società cooperativa "Ischia Barchè" per l'accesso al sito della Vullatura. Parte delle osservazioni sui sistemi descritti sono state svolte nell'ambito di due progetti: "Window to the future" - finanziato dalla National Geographic Society - e High-CO₂ Seas - finanziato dalla Total Foundation.

Un ringraziamento speciale ai Sig.ri Angelo Miragliuolo (Casamicciola) e Michelangelo Calise (Forio) per averci segnalato, sul sito <https://www.citizensciencerdn.org>, la presenza dei campi fumarolici della Marina di Lacco e della spiaggia di Chiaia, rispettivamente.

BIBLIOGRAFIA

- CHIODINI G., AVINO R., BROMBACH T., CALIRO S., CARDELLINI C., DE VITA S., FRONDI F., MAROTTA E. & VENTURA G. (2004) - *Fumarolic and diffuse soil degassing west to Mount Epomeo, Ischia (Italy)*. J. Vulcan. Geother. Res., **133**: 291-309.
- CINELLI F., FRESI E., MAZZELLA L., PANSINI M., PRONZATO R. & SVOBODA A. (1977) - *Distribution of benthic phyto- and zoocenoses along a light gradient in a superficial marine cave*. In: KEEGAN B.F., O'CEIDIG P.O. & BOADEN P.J.S. (Eds): *Biology of Benthic organisms*, Pergamon Press, Oxford: 173-183.
- DAPPIANO M. & GAMBÌ M.C. (2004) - *New data on occurrence of thermophile scleractinia (Cnidaria, Antozoa) in the Phlaegrean islands (Ischia, Procida, Vivara - Gulf of Naples), with special attention to Astroidescalycularis*. In: *Marine Biogeography of the Mediterranean Sea: patterns and dynamics of biodiversity*. Part II, Biogeographia, **25**: 31-46.
- DE ALTERIIS G., TONIELLI R., PASSARO S. & DE LAURO M. (2006) - *Isole Flegree (Ischia e Procida). Serie batimetrica dei fondali della Campania con carta allegata alla scala 1:30.000*. Liguori Editore, Napoli, pp. 73.
- DE ALTERIIS G., INSINGA D.D., MORABITO S., MORRA V., CHIOCCI F.L., TERRASI F., LUBRITTO C., DI BENEDETTO C. & PAZZANESE M. (2010) - *Age and submarine debris avalanches and tephrostratigraphy off shore Ischia Island, Tyrrhenian Sea, Italy*. Mar. Geol., **277**(1-4): 48-60.
- FRIEDLANDER I. (1938) - *Sui bradisismi dell'isola di Ischia e sulla "Grotta del Mago"*. Boll. Reg. Soc. Geogr. It., **3**(1), 4-54.
- FOO S.A., BYRNE M., RICEVUTO E. & GAMBÌ M.C. (2018) - *The carbon dioxide vents of Ischia, Italy, a natural laboratory to assess impacts of ocean acidification on marine ecosystems: an overview of research and comparisons with other vent systems*. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., **56**: 236-310.
- GAGLIOTI M., RICEVUTO E. & GAMBÌ M.C. (2018) - *Pattern and first map of biodiversity related to ocean acidification in CO₂ vents of Ischia*. Biol. Mar. Mediterr. (in press).
- GAMBÌ M.C. (2014) - *Emissioni sommerse di CO₂ lungo le coste dell'isola d'Ischia. Rilievi su altre aree come possibili laboratori naturali per lo studio dell'acidificazione e cambiamento climatico a mare*. Notiziario S.I.B.M., **66**: 67-79 (www.sibm.it).
- GAMBÌ M.C., DE LAURO M. & JANNUZZI F. (Eds) (2003) - *Ambiente marino costiero e territorio delle isole Flegree (Ischia Procida Vivara - Golfo di Napoli). Risultati di uno studio multidisciplinare*. Soc. Naz. Sci., Lett. Arti Napoli, Mem. Accad. Sci. Fisic. Matem., **5**: pp. 425, Liguori Editore, Napoli.
- GAMBÌ M.C. & RICEVUTO E. (2012) - "Messages in the bubbles". *Il Geosito marino del Castello Aragonese di Ischia (Napoli): relazioni tra geologia e biologia in rapporto al cambiamento climatico*. In: D'ANGELO S. & FIORENTINO A. (a cura di): *Contributi al Meeting Marino 25-26 ottobre 2012*. Atti ISPRA, Roma: 89-96, (www.isprambiente.gov.it/it/publicazioni/atti).
- GAMBÌ M.C. & TEIXIDO N. (2016) - *Un'isola laboratorio per lo studio dell'acidificazione marina*. In: *Il Vulcano Ischia, Ambiente, Rischio, Comunicazione*, **11**: 46-52.
- HALL-SPENCER J.M., RODOLFO-METALPA R., MARTIN S., RANSOME E., FINE M., TURNER S.M., ROWLEY S.J., TEDESCO D. & BUIA M.C. (2008) - *Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification*. Nature, **454**: 96-99.
- KROEKER K.J., MICHELI F., GAMBÌ M.C. & MARTZ T.R. (2011) - *Divergent ecosystem responses within a benthic marine community to ocean acidification*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **108**(35), 14515-14520.
- MONTI L. (2011) - *Isola d'Ischia. Guida geologico-ambientale*. Regione Campania, Assessorato Difesa del Suolo, Litografia Artistica Cartografica, Firenze: pp. 356.
- PECORAINO G., BRUSCA L., D'ALESSANDRO W., GIAMMARCO S., INGUACCHIATO S. & LONGO M. (2005) - *Total CO₂ output from Ischia Island volcano (Italy)*. Geochem. Journ., **39**: 451-458.
- RICEVUTO E., KROEKER K.J., FERRIGNO F., MICHELI F. & GAMBÌ M.C. (2014) - *Spatio-temporal variability of polychaete colonization at volcanic CO₂ vents (Italy) indicates high tolerance to ocean acidification*. Mar. Biol., **161**(12): 2909-2919.
- RITTMANN A. & GOTTINI V. (1980) - *L'Isola d'Ischia. Geologia*. Boll. Serv. Geol. d'It., **101**(1981): 131-274, IPZS, Roma.
- SBRANA A. & TOCCACELI R.M. (a cura di) (2011) - *Carta Geologica della Regione Campania - Foglio n. 464 Isola di Ischia*. Regione Campania Assessorato Difesa del Suolo, Litografia Artistica Cartografia, Firenze: pp. 216 + carta alla scala 1.10.000.
- TEDESCO D. (1996) - *Chemical and isotopic investigation of fumarolic gases from Ischia Island (Southern Italy): evidence of magmatic and crustal contribution*. J. Vulcanol. Geother. Res., **74**: 233-242.

Siti web consultati:

- <https://www.nettunoamp.org/> (accesso 10/02/2019).
<http://highco2seas.com/> (accesso 10/02/2019).
<https://www.citizensciencerdn.org/> (accesso 10/02/2019).

Morfologia delle sorgenti sottomarine dell'area di Taranto (Mar Ionio)

Morphology of submarine springs in Taranto area (Ionian Sea)

VALENZANO E.(*), D'ONGHIA M.(**),
DE GIOSA F.(***), DEMONTE P.(***),

RIASSUNTO - Le sorgenti sottomarine dell'area di Taranto sono note fin dall'antichità e vengono chiamate localmente "citri". L'acqua dolce, che fuoriesce ad alta pressione, proviene da una falda acquifera circolante nei calcari mesozoici (Calcere di Altamura Fm.) confinata dalle argille subappennine plio-pleistoceniche.

Nuovi dati batimetrici *multibeam*, hanno permesso per la prima volta di mappare e determinare in dettaglio la morfologia legata alle risorgive. Il *citro* di San Cataldo, nel Mar Grande, consiste in una depressione dalla forma complessa di circa 300 x 190 m. I fianchi di questa depressione sono interessati da recenti fenomeni di instabilità. Nel Mar Piccolo le risorgive sono associate a depressioni sub-circolari del fondale con diametro e profondità variabili.

PAROLE CHIAVE: sorgenti carsiche sottomarine, acqua dolce, Taranto, Mar Ionio, fondale marino, emissione fluida

ABSTRACT - Submarine springs in Taranto area are known since historical times with the local term "citri". Freshwater, outflowing at high pressure, comes from a karst aquifer developed into Mesozoic limestones, confined by a thick cover of Middle-Upper Pleistocene silts.

New multibeam bathymetric data allowed to map and describe with high detail the spring vent morphologies for the first time. The *citro* di San Cataldo, located in the Mar Grande, consists in a complex depression 300 x 190 m wide. The flanks of this depression show signs of recent erosional activity. In the Mar Piccolo, the springs are associated to sub-circular depressions with variable width and depth.

KEY WORDS: submarine karst spring, submarine groundwater discharge, Taranto, Ionian Sea, fluid emission, ocean floors

1. - INTRODUZIONE

I due "mari" che circondano la città di Taranto, il Mar Piccolo a nord ed il Mar Grande a sud, sono caratterizzati dalla presenza di numerose risorgive sottomarine di acqua dolce, note con il termine locale *citri* (fig. 1). Questi elementi geologici sono spesso visibili ad occhio nudo. Infatti, l'acqua dolce meno densa, che risale a partire dalle scaturigini di maggiore portata, forma sulla superficie del mare, polle circolari ampie alcuni metri in alcuni casi rilevate di alcuni cm rispetto al livello del mare (fig. 1).

I *citri* hanno suscitato la curiosità di diversi autori che ne hanno intuito l'importanza anche per l'economia locale. I primi studi di carattere scientifico (CERRUTI 1938; 1948) hanno evidenziato la capacità delle emissioni di fungere da regolatrici termo-aline nel bacino semichiuso del Mar Piccolo, rendendolo adatto alla mitilicoltura. Inoltre, le risorgive di Taranto rappresentano uno dei primi tentativi di sfruttamento delle acque di falda sottomarine (COTECCHIA *et alii* 1989; 1990, STEFANON & COTECCHIA, 1969). Pionieristiche opere di ingegneria furono collocate sulle bocche di emissione di due *citri* e successivamente abbandonate per motivi di carattere tecnico ed economico. Nell'area di Taranto, densamente antropizzata, le emissioni fluide rivestono notevole importanza nell'evoluzione della porzione costiera sommersa e nella cir-

(*)Dipartimento Di Scienze Della Terra e Geoambientali, Università Degli Studi Di Bari "Aldo Moro", Bari

(**)Conisma, Roma

(***)Environmental Surveys S.R.L., Taranto



Fig. 1 - Manifestazione subaerea nell'area del Citro Galeoso.
- *Subaerial Event in the Citro Galeoso.*

colazione di acqua e sedimenti. Infine, va sottolineato il potenziale geo-turistico dei *citri*, già inseriti nella lista dei geo-siti pugliesi (MASTRONUZZI *et alii*, 2015).

In questo lavoro riportiamo i risultati dei primi dati batimetrici di dettaglio sulle risorgive e sulla loro posizione, dati che costituiscono la necessaria base di partenza per la pianificazione di nuovi studi multidisciplinari.

2. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area di Taranto è caratterizzata dalla presenza di una successione - dal basso verso l'alto - di calcari mesozoici (Calcarea di Altamura Fm), di calcareniti ed argille marnose del Plio-Pleistocene (Calcarenite di Gravina Fm ed argille subappennine) e di depositi calcarenitici trasgressivi del Pleistocene medio e superiore (MARTINIS & ROBBA, 1971). A nord e ad est il basamento carbonatico affiora ed è dislocato da faglie normali (PAGLIARULO & BRUNO, 1990; COTECCHIA *et alii*, 1989), che proseguono presumibilmente a sud-ovest, al di sotto della copertura plio-quadernaria. Il paesaggio fisico è caratterizzato da una serie di terrazzi marini disposti a gradinata, debolmente inclinati verso mare (CIARANFI *et alii*, 1988) e da una serie di depressioni di forma sub-circolare; tre di queste oggi sono occupate dal Mar Grande e dai due seni del Mar Piccolo. L'origine di questi bacini è fortemente legata alle variazioni del livello del mare ed è attribuibile all'incisione di una valle fluviale (MASTRONUZZI & SANSÒ, 1998; VALENZANO *et alii*, 2018) obliterata nel Mar Piccolo da un elevato spessore di sedimenti dell'ultima trasgressione olocenica (VALENZANO *et alii*, sottomesso) fino a dare origine ad un fondale prevalentemente piatto con profondità di circa 13-15 m (LISCO *et alii*, 2016).

Le risorgive carsiche sottomarine *citri* sono localizzate nel Mar Grande in prossimità della città vecchia (*citro* o Anello di San Cataldo) e nella parte settentrionale dei due seni del Mar Piccolo (Primo

Seno ad ovest, Secondo Seno ad est, figura 2). I punti di emissione presentano una morfologia sub-circolare, generalmente a forma di imbuto, con pareti scoscese che si sviluppano in sedimenti limosi poco consolidati. È stato osservato per alcuni *citri* del Primo Seno che le emissioni fuoriescono da fessure nella Calcarenite di Gravina (STEFANON & COTECCHIA, 1969; COTECCHIA *et alii*, 1990). Le emissioni subacquee drenano un acquifero circolante nei sottostanti carbonati (Calcarenite di Gravina Fm e Calcarea di Altamura Fm) resi permeabili dai fenomeni carsici e confinato dalle argille subappennine. Le sorgenti subacquee fanno parte di un complesso sistema idrogeologico, che include anche alcune sorgenti costiere subaeree da cui partono brevi corsi d'acqua (in blu in figura 2). Queste ultime sono assimilabili, per l'assetto stratigrafico e per composizione delle acque, a quelle sommerse (ZUFFIANÒ *et alii*, 2016).

Il primo censimento dei *citri* (CERRUTI, 1938) si basava sull'osservazione delle manifestazioni subaeree, sulla distinzione fra sorgenti perenni e stagionali e sulla misura della temperatura dell'acqua. Il lavoro di CERRUTI (1938) costituisce il censimento più completo sulle emissioni di acqua dolce di Taranto ed è stato preso come riferimento per la toponomastica e la localizzazione delle sorgenti.

2.1. - DATI DISPONIBILI

I dati batimetrici sono stati acquisiti mediante un ecoscandaglio *multibeam* R2sonic 2022. I rilievi sono stati svolti a giugno 2016, nel Mar Grande e a gennaio 2017 nel Mar Piccolo. In alcuni punti l'acquisizione di dati è stata limitata dalla presenza degli impianti di mitilicoltura nel Mar Piccolo. Ai dati batimetrici sono state sovrapposte, mediante georeferenziazione in Arc GIS, le posizioni dei *citri* riportate in letteratura.

3. - RISULTATI

3.1. - MAR GRANDE

Il rilievo *multibeam* in corrispondenza del *citro* di San Cataldo (fig. 3), ha permesso di evidenziare una ampia depressione (190 x 300 m) dalla forma di una spirale discendente verso il basso, 20 m più profonda rispetto al fondale circostante. Due cavità a forma di imbuto, collocate ad est e ad ovest sul fondo della depressione costituiscono i punti di emissione. La punta della cavità ad est è rilevabile nei dati batimetrici fino alla profondità di 48 m al di sotto del livello medio mare (lmm), mentre quella ad ovest è visibile fino a 52 m lmm, questa scaturigine è affiancata da un'impronta circolare poco profonda, probabilmente anch'essa legata all'espulsione dei fluidi. Dati geofisici (VALENZANO *et alii*, 2016) mostrano che le pareti sono costituite da una facies stratificata, probabilmente argille

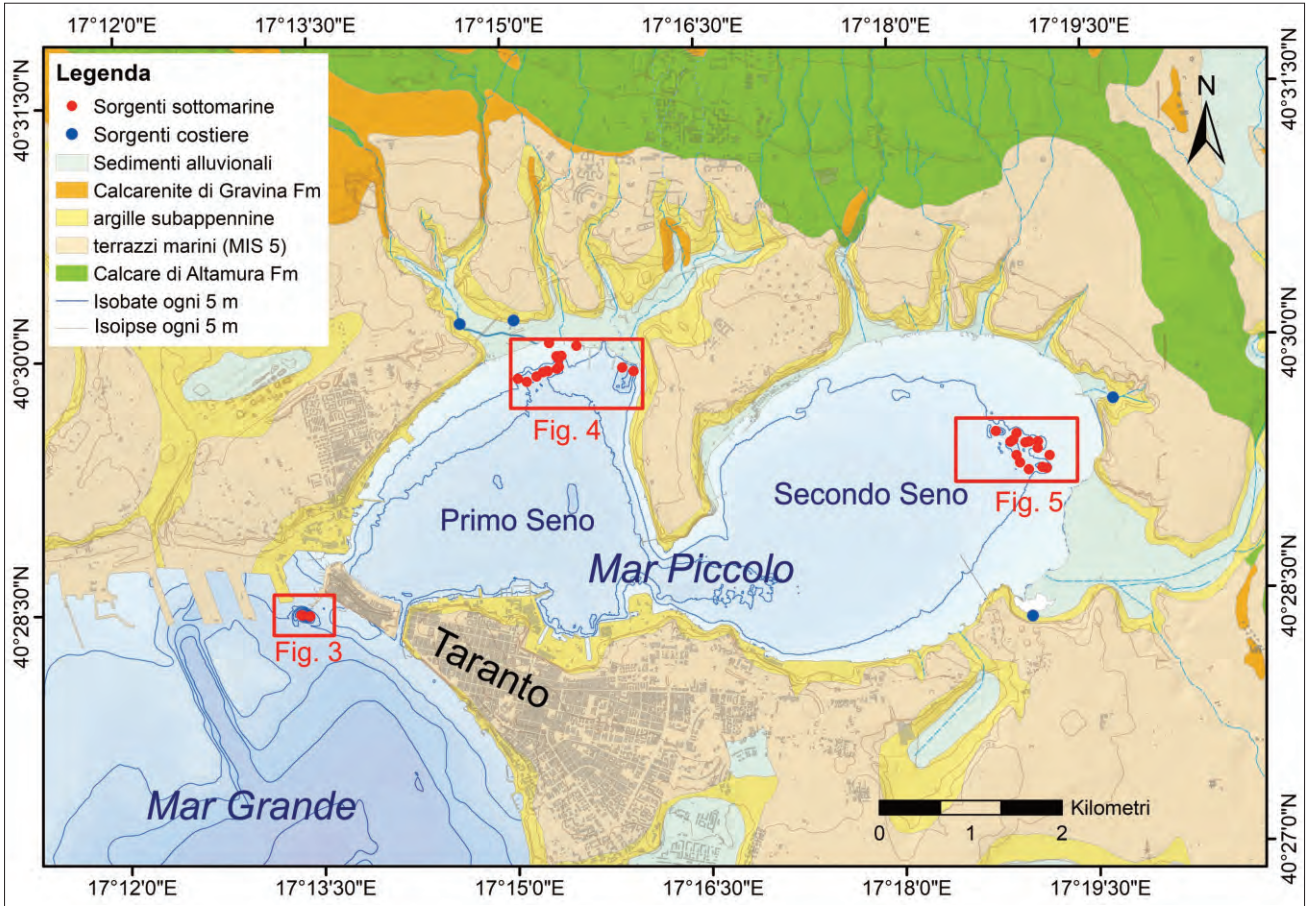


Fig. 2 - Posizione delle sorgenti carsiche nell'area di Taranto.
 - Location of the karst springs in the Taranto area.

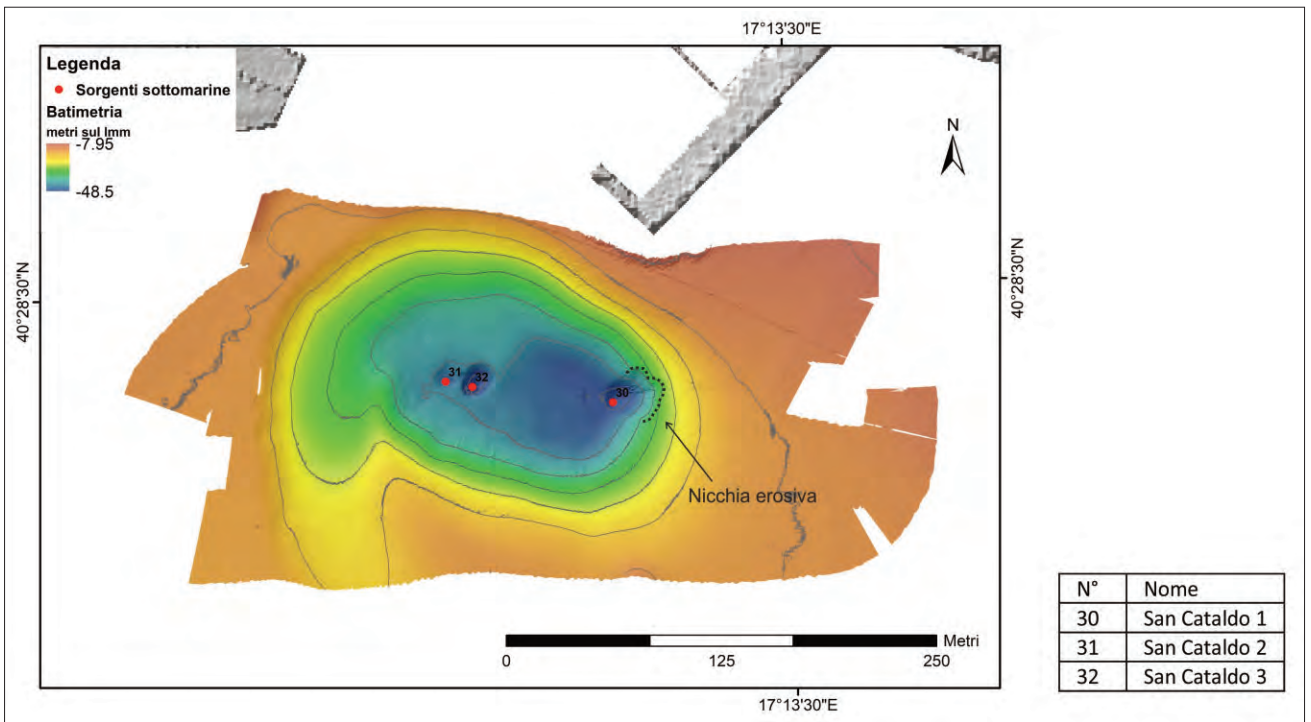


Fig. 3 - Rilievo batimetrico del Citro di San Cataldo nel Mar Grande.
 - Bathymetric survey of the Citro di San Cataldo in the Mar Grande.

subappennine, mentre il fondo delle depressioni è a meno di 20 m da una facies acustica caotica attribuibile ai carbonati (Calcarea di Altamura e Calcarenite di Gravina). Il fianco est della depressione principale è interessato da una nicchia erosiva in prossimità della scaturigine orientale, la presenza della nicchia testimonia fenomeni di instabilità recenti.

3.2. - MAR PICCOLO, PRIMO SENO

Nel Primo Seno del Mar Piccolo sono riportati in letteratura 15 punti di emissione, molti dei quali di carattere stagionale (CERRUTI, 1938). I nuovi dati hanno permesso di localizzare quasi tutte le risorgive segnate in letteratura e di identificare un'area depressa (lunga 500 m ca) formata probabilmente dalla coalescenza di più depressioni, nella quale sembra essere assente la copertura sedimentaria limosa che in genere caratterizza i fianchi dei *citri* (STEFANON & COTECCHIA, 1969).

La profondità media è di circa 12-15 m rispetto al lmm, mentre il fondale è profondo 2-3 m.

I *citri* con attività documentata (CERRUTI, 1938, STEFANON & COTECCHIA, 1969) sono tre: il *citro* Galeso (o Galese), il *citro* San Marco ed il Citrello (rispettivamente 1, 5, 15 in figura 4). Galeso e Citrello sono stati recentemente oggetto di rilievi subacquei (D'ONGHIA *et alii*, 2016). L'acqua fuoriesce da una grotta sub-orizzontale che si sviluppa al contatto stratigrafico fra Calcarenite di Gravina e Calcarea di Altamura (fig. 5). La bocca della cavità è occupata da un cilindro di policarbonato del diametro di 2 m, parte della struttura di captazione risalente agli anni 90. La cavità al di sotto del *citro* Galeso è stata accatastata presso il catasto delle grotte e delle cavità artificiali con il nome «Antro di Nerea», codice PU-1802 (D'ONGHIA *et alii*, 2016).

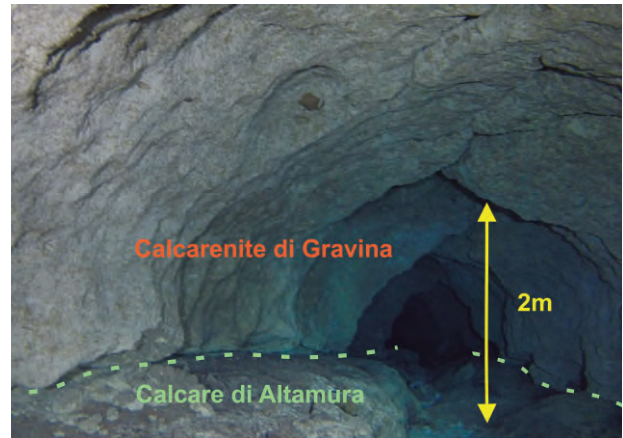


Fig. 5 - Cavità al di sotto del citro Galeso, «Antro di Nerea», codice catastale regionale PU-1802.

- Cave «Antro di Nerea» below citro Galeso, regional cadastral code PU-1802.

3.3. - MAR PICCOLO, SECONDO SENO

Nel secondo seno del Mar Piccolo, le emissioni sono legate a depressioni di dimensioni maggiori (70-100 m di diametro) con fianchi costituiti da una spessa successione di limi olocenici (VALENZANO *et alii*, in prep.). Rispetto ai punti di emissione del Primo Seno, in quest'area la profondità delle depressioni è generalmente maggiore (fino a 25 m di profondità rispetto al fondale circostante) ed è possibile osservare allineamenti per gruppi di 3-4 depressioni principali. A queste si associano anche raggruppamenti di depressioni più piccole con diametro inferiore a 10 m (22, 18, 29 in figura 6) L'emissione maggiore, tutt'oggi attiva è il *citro* Le Copre (16 in figura 6).

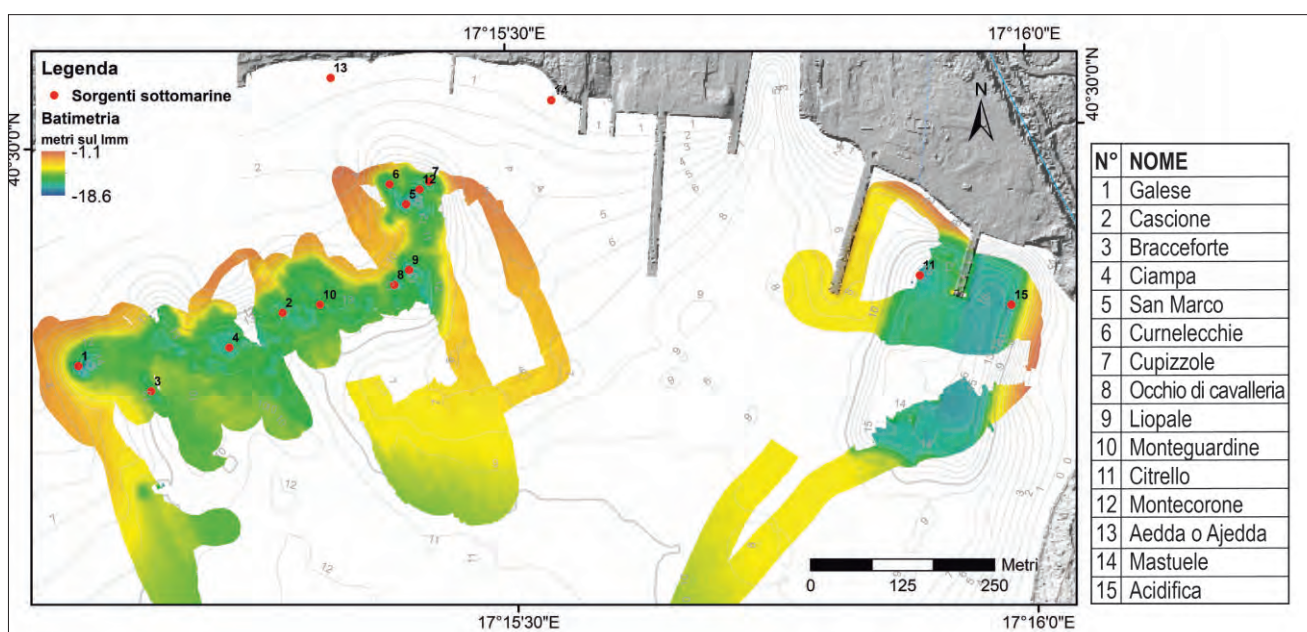


Fig. 4 - Rilievo batimetrico delle sorgenti sottomarine nel Primo Seno del Mar Piccolo.
- Bathymetric survey of the submarine springs in the Primo Seno of the Mar Piccolo.

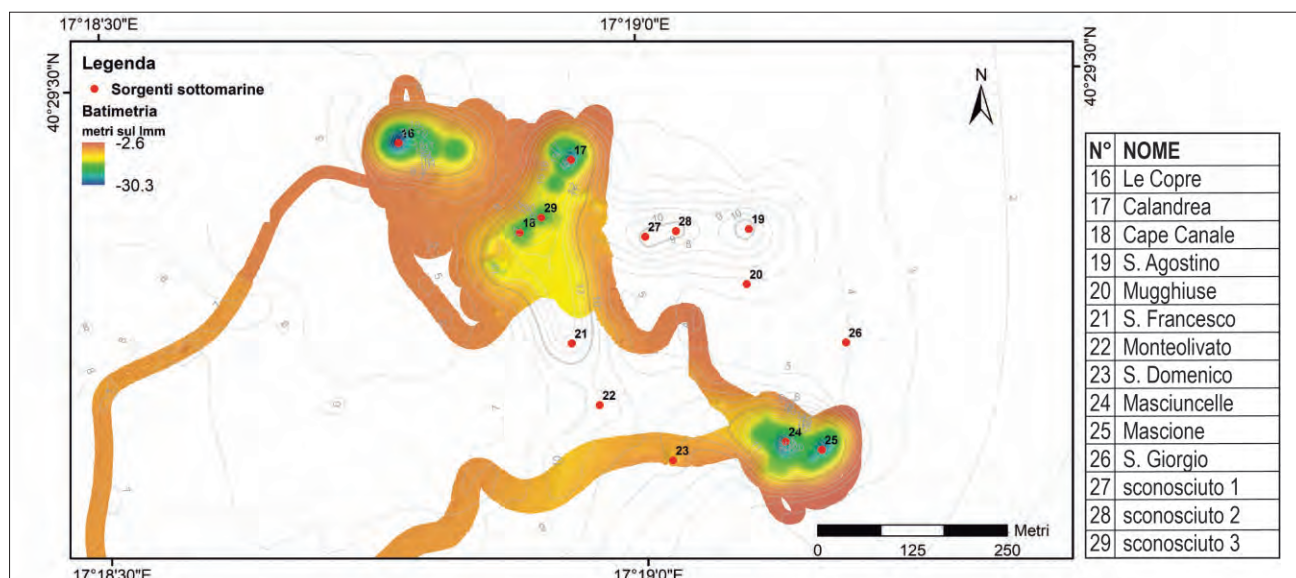


Fig. 6 - Rilievo batimetrico delle sorgenti sottomarine nel Secondo Seno del Mar Piccolo. - Bathymetric survey of the submarine springs in the Secondo Seno of the Mar Piccolo.

4. - CONCLUSIONI

I rilievi batimetrici hanno permesso di individuare e caratterizzare le forme associate alle emissioni di acqua dolce nell'area di Taranto.

Il punto di emissione di ciascuna sorgente identificata in letteratura corrisponde ad una depressione o ad un'area depressa localizzabile con precisione. Sono state identificate un elevato numero di forme secondarie legate probabilmente ad emissioni di minore entità. Queste sono di notevole importanza nella valutazione del bilancio idrico e nella costruzione di modelli idrogeologici.

La rimozione continua dei sedimenti ad opera del flusso di acqua dolce che fuoriesce dalle scaturigini è un importante agente nella modellazione del fondale. Nel Mar Grande, la presenza di una nicchia erosiva legata al *citro* di San Cataldo suggerisce una tendenza all'avanzamento dei fenomeni di erosione che in futuro potrebbe avere ripercussioni sulle infrastrutture costiere.

BIBLIOGRAFIA

- CERRUTI A. (1938) - *Le sorgenti sottomarine (Citri) del Mar Grande e Mar Piccolo di Taranto*. Annali Istituto Superiore Navale Di Napoli, Napoli, **7**: pp. 7.
- CERRUTI A. (1948) - *Ulteriori notizie sulle sorgenti sottomarine del Mar Grande e del Mar Piccolo di Taranto e sulla loro eventuale utilizzazione*. Boll. Pesca, Piscic., Idrobiol., Roma, A. 29, **111**, f. 1, 1194.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Memorie della Società Geologica Italiana, **41**: 449-460.
- COTECCHIA F., LOLLINO G., PAGLIARULO R., STEFANON A., TADOLINI T. & TRIZZINO R. (1989) - *Studi e controlli in situ per la captazione della sorgente sottomarina Galeso*. Mar Piccolo di Taranto. Conv. Int. Geoling. Suolosottosuolo, Torino, 27-30:475-484.
- COTECCHIA F., LOLLINO G., PAGLIARULO R., STEFANON A., TADOLINI T. & TRIZZINO R. (1990) - *Hydrogeological conditions and field monitoring of Galeso submarine spring in the Mar*

Piccolo of Taranto (southern Italy). 11th Proceeding of Salt water intrusion meeting: Gdansk: 171-208.

- D'ONGHIA F.M., MESSINA F., PETRUZZELLI M., SACCOTELLI G. & VELARDO R. (2016) - *Citro Galeso ed il fiume nascosto*. Abstract. SPELAION 2016-Puglia Hypogea, Bari, (09/12/2016).
- LISCO S., CORSELLI C., DE GIOSA F., MASTRONUZZI G., MORETTI M., SINISCALCHI A., MARCHESE F., BRACCHI V., TESSAROLO C. & TURSÌ A. (2016) - *Geological maps of a marine area polluted by industrial discharges (Mar Piccolo, Taranto, southern Italy): the physical basis for remediation*. Journal of Maps, **12**(1): 173-180.
- MARTINIS B. & ROBBA E. (1971) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, F. 202 'Taranto'*. Serv. Geol. d'It.: 56 pp., Cava dei Tirreni, Italia, Arti Grafiche E. Di Mauro.
- MASTRONUZZI G. & SANSÒ P. (1998) - *Morfologia e genesi delle Isole Chèradi e del Mar Grande (Taranto, Puglia, Italia)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, **21**: 131-138.
- MASTRONUZZI G., VALLETTA S., DAMIANI A., FIORE A., FRANCESCANGELI R., GIANDONATO P.B., IURILLI V. & SABATO L. (2015) - *Geositi della Puglia. Riconoscimento e verifica dei geositi e delle emergenze geologiche della Regione Puglia*. Graphic Concept Lab., Bari, 394.
- PAGLIARULO R. & BRUNO G. (1990) - *Implicazioni tettonico-strutturali nella circolazione idrica profonda nell'area del Mar Piccolo di Taranto (Puglia)*. Bollettino Soc. Geol. It., **109**: 307-312.
- STEFANON A. & COTECCHIA F. (1969) - *Prime notizie sulle caratteristiche di efflusso e sulle modalità di investigazione delle sorgenti subacquee ai fini di una loro captazione*. Quaderni de La Ricerca Scientifica, **58**: 165-195.
- VALENZANO E., DE GIOSA F., D'ONGHIA M., SACCOTELLI G., CAPOLONGO D., LISCO S., MORETTI M., MASTRONUZZI G. (2016) - *Morphology of the karst submarine spring of the Mar Grande (Taranto) and evidence of recent erosional activity*. Abstract. Geosub 2016 Ustica, Italy, (17/09/2016).
- VALENZANO E., SCARDINO G., CIPRIANO G., FAGO P., CAPOLONGO D., DE GIOSA F., LISCO S., MELE D., MORETTI M. & MASTRONUZZI G. (2018) - *Holocene Morpho-sedimentary evolution of Mar Piccolo basin (Taranto, Southern Italy)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **41**, 119-135.
- ZUFFIANÒ L.E., BASSO A., CASARANO D., DRAGONE V., LIMONI P.P., ROMANAZZI A., SANTALOAIA F. & POLEMIO M. (2016) - *Coastal hydrogeological system of mar Piccolo (Taranto, Italy)*. Environmental Science and Pollution Research, **23**(13), 12502-12514.

Vulcani di fango e strutture coralline associate a evidenze gassose in Canale d'Otranto - Adriatico Meridionale

Mud volcanoes and Coral mounds related to gas seepages in the Otranto Channel - South Adriatic Sea

GELETTI R.(*), DEL BEN A.(**), COLIZZA E.(**),
LUCCHI R.G.(*), CANDONI O.(*),
MOCNIK A.(**)

RIASSUNTO - Diverse campagne della R/V OGS Explora evidenziano la presenza di strutture coralline e vulcani di fango nel Canale d'Otranto. Il progetto OCSS15 ha prodotto profili acustici *chirp* ad alta risoluzione, dati morfo-batimetrici e linee sismiche a medio-alta risoluzione, nonché carotaggi a gravità e bennate. Questi dati vanno ad integrare i profili sismici preesistenti per determinare i potenziali habitat del fondale marino (ad esempio rilievi e *pockmark* associati a strutture coralline), le strutture sottomarine (ad es. vulcani di fango, *pockmark*, ecc.), gli strati sedimentari superficiali con evidenze di migrazione di fluidi attraverso le fratture.

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, vulcano di fango, strutture coralline, *gas-seepage*, *chirp*, *multibeam*, sismica a riflessione, carote a gravità

ABSTRACT - Several surveys of the R/V OGS Explora highlight the presence of coral structures and mud volcanoes in the Otranto Channel. The OCSS15 project, produced high-resolution *chirp* profiles, multibeam swath bathymetry and medium-resolution multi-channel seismic reflection lines, as well as sampling by gravity corer and grab. These data have integrated pre-existing seismic profiles to analyse the potential seabed habitats (e.g. mounds and pockmark-associated coral reefs), the submarine structures (e.g. mud volcanoes,

pockmarks, etc.), the shallow sediment layers and gas seeps features like bright spots and other acoustic evidence of gas migration through some micro-fractures.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors mud volcanoes, coral mounds, gas-seepages, pockmark, *chirp*, multibeam, reflection seismic, gravity core

1. - EVIDENZE MORFOLOGICHE E RELAZIONI CON ACCUMULI GASSOSI PROFONDI

Il Canale d'Otranto, posto tra l'estremità orientale del Salento e la costa albanese con una larghezza minima di circa 70 km (fig. 1), connette i mari Adriatico e Ionio. La fisiografia dei margini opposti di questo Stretto riflette l'interazione tra processi tettonici e deposizionali e i fenomeni erosionali connessi alla dinamica delle correnti marine (RIDENTE & TRINCARDI, 2006).

Nel 2015 il progetto OCSS15 (GELETTI *et alii*, 2018) ha prodotto dati ad alta risoluzione con metodologie *chirp*, *multibeam* e di sismica multicannale

(*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Trieste
(**) Dipartimento di Matematica e Geoscienze (DMG), Università di Trieste

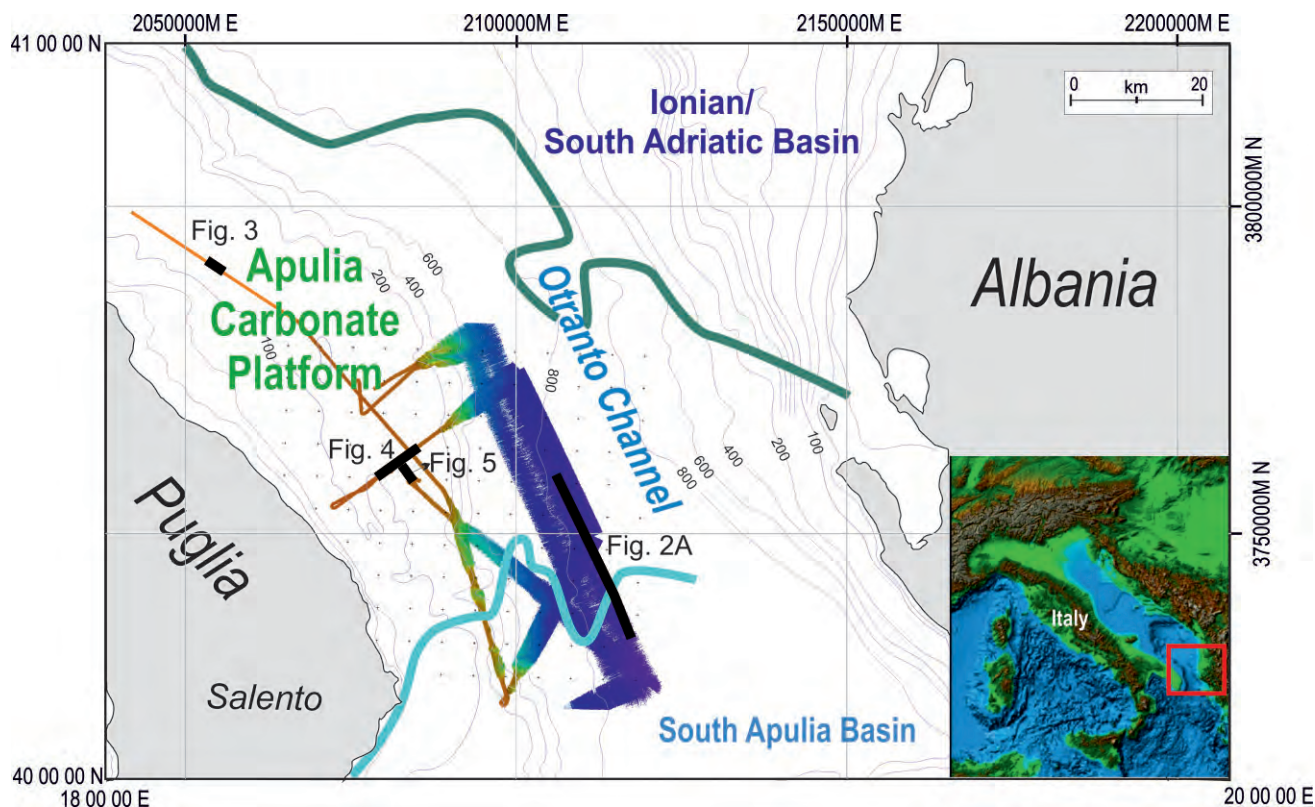


Fig. 1 - Mappa batimetrica del Canale d'Otranto e posizione del rilievo *multibeam* acquisito dal progetto OCSS15. Margini della piattaforma Apula da NICOLAI & GAMBINI (2007) e da DEL BEN *et alii* (2011).

- Bathymetric map of the Otranto Channel and position of the *multibeam* during the OCSS15 acquisition project. Margin of Apulian platform from NICOLAI & GAMBINI (2007) and from DEL BEN *et alii* (2011).

a media risoluzione, oltre che campionamenti con carotiere a gravità. Queste informazioni sono state utilizzate ad integrazione di pre-esistenti profili sismici ad alta penetrazione MS (*Mediterranean Sea project*) (fig. 2) e dei profili sismici presenti nella banca dati ViDEPI.

La parte centrale del canale è caratterizzata da un fondo mare sugli 800 m di profondità. Verso ovest il fondale risale rapidamente fino ai 120 m dello *shelf break* al margine della piattaforma continentale, dove sono presenti diversi canali allungati perpendicolarmente al margine stesso. In prossimità della costa il fondo mare mostra la presenza di piccoli rilievi attribuibili a vulcani di fango, come evidenziato dalla campagna OCSS15 (fig. 3, 4). Oltre ai vulcani di fango, si possono osservare numerosi fenomeni di *gas-venting* con *plume* che si alzano per diverse decine di metri dal fondo marino, come mostrano i dati *chirp* acquisiti (fig. 3).

Diverse campagne di ricerca geofisica/geologica (GELETTI, 2008; ROMEO *et alii*, 2011; GELETTI *et alii*, 2018) svolte lungo la parte centrale del Canale d'Otranto a profondità di circa 800 metri, hanno evidenziato la presenza di numerosi rilievi che raggiungono 600 m di diametro e 40 m di altezza dal fondo mare (fig. 2). In particolare nel febbraio 2008 la registrazione da parte della R/V OGS-Explora di una strisciata MB e di un profilo

chirp, sembrava corroborare l'ipotesi di presenza di *carbonate mound* e di strutture coralline a circa 800 metri di profondità nel Canale d'Otranto, ipotesi basata su vecchi profili sismici MS (GELETTI, 2008; DEL BEN *et alii*, 2008). Nel febbraio 2011, in occasione di un rilievo per posa di cavi telefonici, alcuni carotaggi compiuti dalla N/R OGS-Explora dimostravano definitivamente la presenza di coralli di mare profondo raccogliendone alcuni campioni nell'area (ROMEO *et alii*, 2011). I coralli sono stati campionati anche verso costa, sulla piattaforma Apula a 120 metri di profondità vicino ai vulcani di fango di figura 4, su rilievi alti una decina di metri e larghi alcune centinaia (fig. 5) nell'ambito della campagna OCSS15.

HOVLAND & CURZI (1989) hanno descritto alcuni vulcani di fango nel Mare Adriatico centrale caratterizzati da fuoriuscita di gas che sono stati correlati a zone di accumulo superficiale di gas. Le strutture evidenziate dalla campagna OCSS15 nel Canale d'Otranto, alte pochi metri e larghe alcune decine di metri (fig. 3, 4), confermano tale correlazione. Inoltre, l'integrazione con profili sismici che indagano la sequenza sedimentaria più profonda, mostra come tali accumuli superficiali siano talvolta alimentati da giacimenti a gas di maggiori dimensioni posti a profondità di alcune centinaia di metri dal fondo mare (DEL BEN

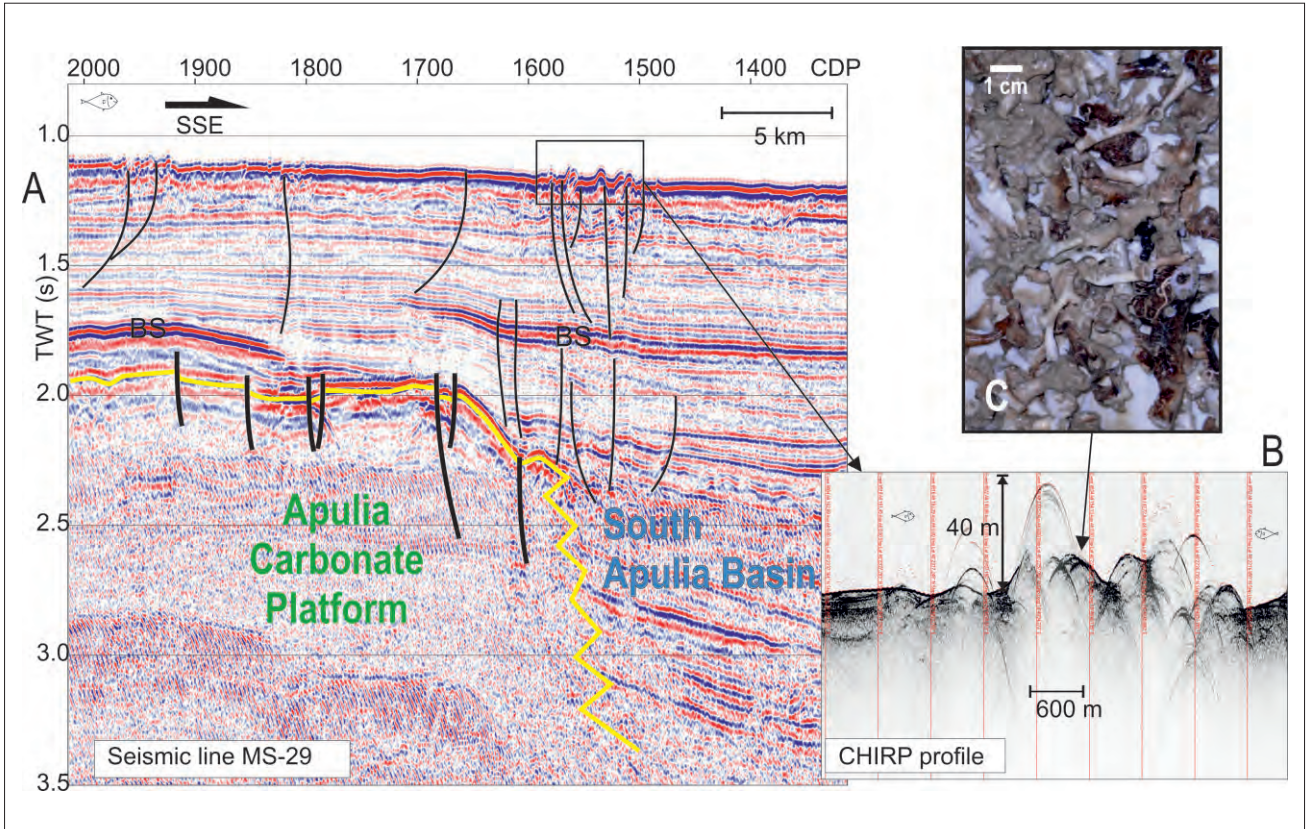


Fig. 2 - A) Parte del profilo sismico MS-29: è possibile notare la correlazione tra i giacimenti a gas profondi, evidenziati da *bright spot* (BS), e le strutture di fondo mare relative a rilievi corallini (B) sviluppatesi sopra sistemi di fratture e *gas chimney* (modificato da DEL BEN *et alii*, 2011). C) frammenti di coralli campionati da ROMEO *et alii* (2011), su queste strutture.

- A) *Seismic profile MS-29: correlation between the deep gas reservoirs, evidenced by bright spots (BS), and sea bottom features related to coral mounds (B) developed above fracture systems and gas chimneys (modified from DEL BEN et alii, 2011).* C) *Coral fragments sampled by ROMEO et alii (2011), on these structures.*

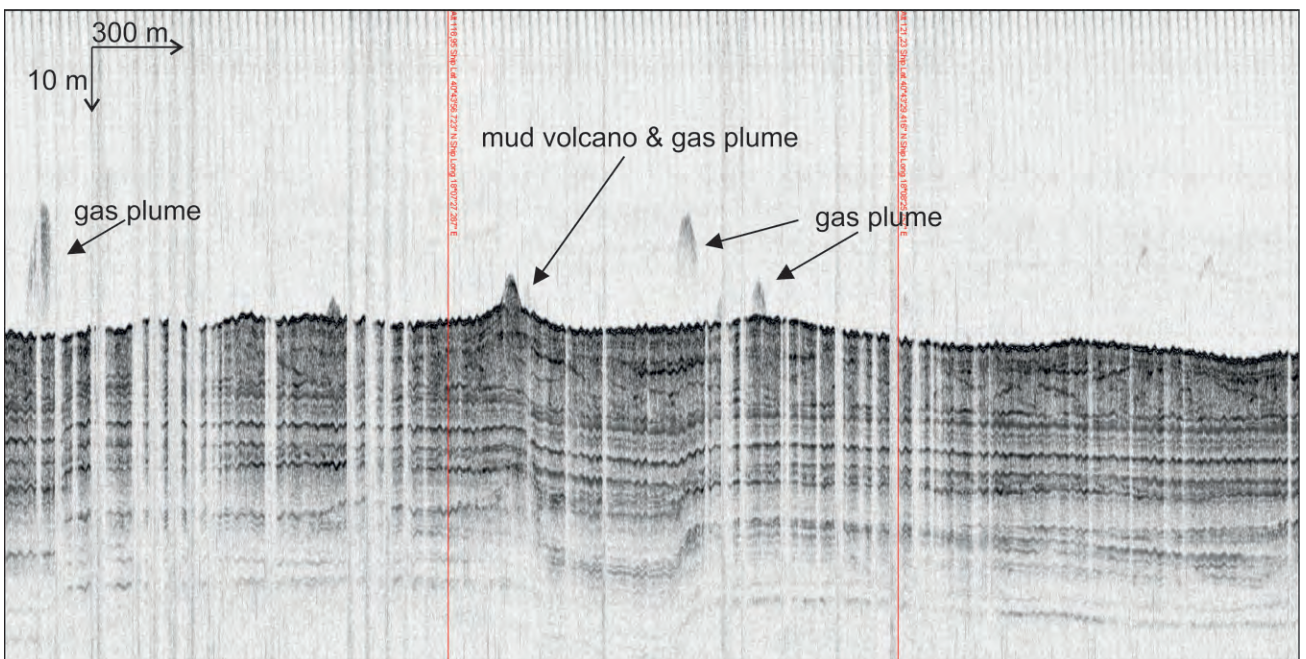


Fig. 3 - Particolare di linea *chirp* con evidenze di *gas plume* (posizione in figura 1).
 - *Detail of the chirp line with evidence of gas plumes (position in figure 1).*

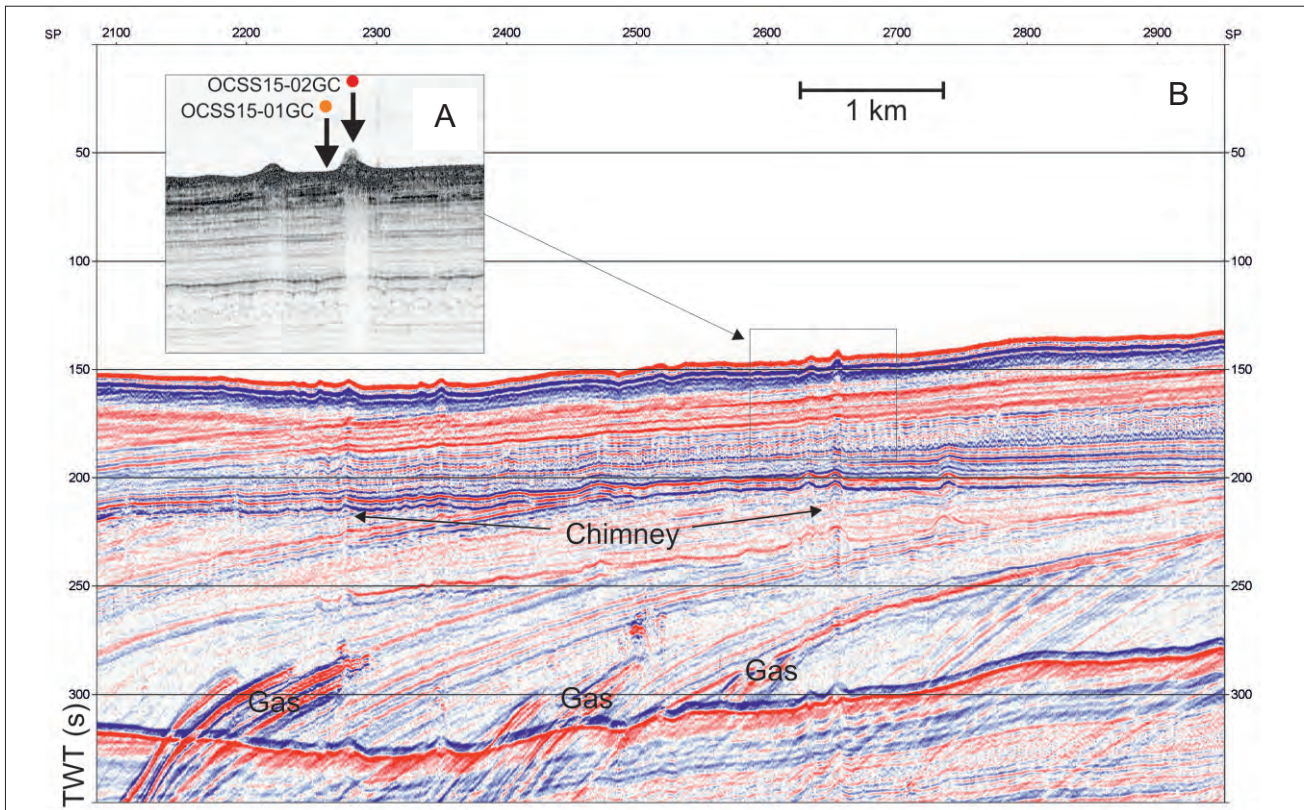


Fig. 4 - A) Profilo *chirp* attraverso alcuni *mud volcano* interessati dai carotaggi OCSS15-01GC e OCSS15-02GC acquisiti durante la campagna OCSS15 su profilo sismico B) registrato nella medesima campagna: le strutture di fondo mare sono correlate ai sottostanti accumuli di gas evidenziati da *bright spot* inclinati.
 - A) *chirp* profile crossing some of the *mud volcanoes* calibrated by OCSS15-01GC e OCSS15-02GC during the OCSS15 acquisition project. This *chirp* line was acquired on a seismic profile (B) of the same cruise: the sea bottom features are related to gas accumulations evidenced by some inclined *bright spots*.

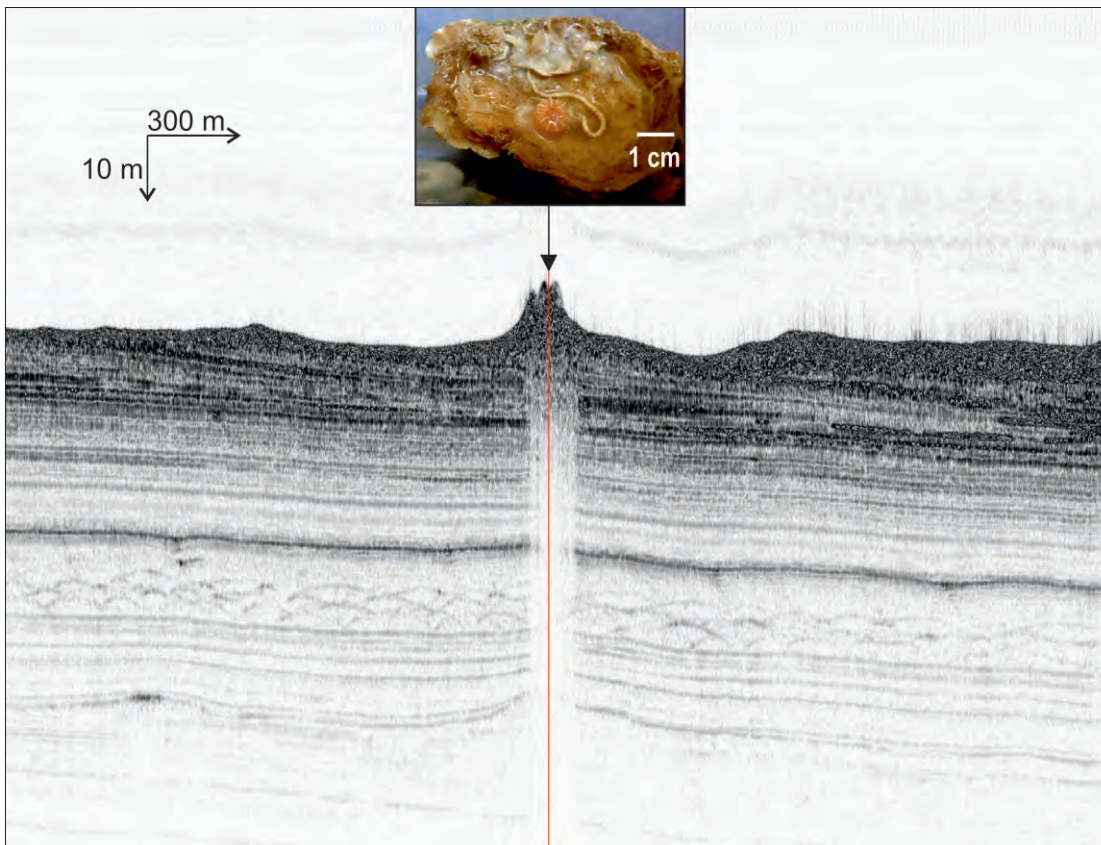


Fig. 5 - Profilo *chirp* (campagna OCSS15) con un rilievo su cui sono stati campionati i coralli (nella foto), carota OCSS15-03GC (posizione in figura 1).
 - *chirp* profile (OCSS15 cruise) with a mound on which the corals were sampled (see the photo), gravity core OCSS15-03GC (position in figure 1).

et alii, 2011). Il collegamento tra giacimenti profondi e strutture di fondo mare avviene attraverso sistemi di fratture e micro-fratture che alimentano anche una dispersione di gas diffusa nella sequenza sedimentaria, come evidenziano alcuni *gas chimney* (figg. 2, 4).

DEL BEN *et alii* (2011), hanno mostrato come i giacimenti a gas presenti nella sequenza plio-quadernaria profonda sono almeno in parte correlabili a compattazione differenziata e conseguente formazione di trappole anticlinaliche e chiusure stratigrafiche in *pinch-out* sviluppatesi al di sopra di strutture della piattaforma carbonatica Apula e del suo margine.

L'insieme delle analisi effettuate dimostra come le morfologie di fondo mare, quali vulcani di fango, *carbonate mound* e strutture coralline, siano associate a strutture tettoniche e morfologiche più antiche poste a maggiori profondità. L'approccio per una comprensione completa dei fenomeni associati richiede quindi, ove possibile, l'integrazione di diverse metodologie di indagine a diversa risoluzione, supportate dal campionamento dei sedimenti marini.

BIBLIOGRAFIA

- DEL BEN A., GELETTI R., MOCNIK A., FORTE E. & PIPAN M. (2008) - *Relazione tra "Cold Seeps", "Bright Spots" e strutture profonde nel Canale di Otranto, Sud Adriatico*. Presented at the 27th GNGTS Annual National Meeting, 6-8 October 2008, Trieste, Expanded Abstract: 429-431.
- DEL BEN A., FORTE E., GELETTI R., MOCNIK A. & PIPAN M. (2011) - *Seismic exploration of a possible gas-reservoir in the South Apulian Foreland*. Boll. Geof. Teor. Appl., **52**, N. 4: 607-623, doi: 10.4430/bgta0016.
- GELETTI R. (2008) - *OGS-Explora Cruise 2007/08 in Adriatic Sea*. Ist. Naz. di Ocean. e di Geof. Sper. - OGS, Trieste, Italy, Open File Report n. 2008/39, RIMA 15, GEMAR.
- GELETTI R., DEL BEN A., COLIZZA E. & LUCCHI R.G. (2018) - *Gas seepage related to deep features in the Otranto Channel (South Adriatic Sea) - OCSS15 project*. Ist. Naz. di Ocean. e di Geof. Sper. - OGS, Trieste, Italy, Open File Report n. 2018/36 GEO 8 GEOS.
- HOVLAND M. & CURZI P.V. (1989) - *Gas seepage and assumed mud diapirism in the Italian Central Adriatic Sea*. Marine and Petroleum Geology, **6**: 161-169.
- NICOLAI C. & GAMBINI R. (2007) - *Structural architecture of the Adria-platform-and-basin system*. In: A. MAZZOTTI, E. PATACCA & P. SCANDONE (Eds), "CROP-04", Boll. Soc. Geol. Ital., Special Issue 7: 21-37.
- RIDENTE D. & TRINCARDI F. (2006) - *Active foreland deformation evidenced by shallow folds and faults affecting late Quaternary shelf-slope deposits (Adriatic Sea, Italy)*. Basin Res., **18**: 171-188.
- ROMEO R., GELETTI R., CABURLOTTO A., ZGUR F., CODIGLIA R., COVA A., FACCHIN L. & RAMELLA R. (2011) - *Deep-water coral communities in the Otranto Channel revealed by acoustic methods and gravity cores during a 2011 R/V OGS Explora survey*. In: Geoitalia 2011, VIII Forum Italiano di Scienze della Terra, Abstract 10.1474/Epitome, 04.0954, ISSN 1972-1552.
- VIDEPI PROJECT (Visibilità Dati Esplorazione Petrolifera in Italia) (2009) - <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>

Mud volcanoes and seafloor fluid seepage on the Calabrian accretionary prism (Ionian Sea)

Vulcani di fango ed emissioni fluide nel prisma di accrezione della Calabria (Mar Ionio)

CERAMICOLA S.(*), PRAEG D.(*)(***), COVA A.(*), LOHER M.(****),
BOHRMANN G.(****), MASCLE J.(*****)

ABSTRACT - The occurrence of mud volcanoes (MVs) in the deep Ionian Sea was first recognised in the early 1980s from the recovery of cores of mud breccia, initially hypothesised to record tectonic or diapiric processes, but eventually shown to record a long (> 1 Ma) history of seafloor extrusion from the accretionary prisms along the Europe-Africa subduction zone. Provinces of MVs were identified along the crest of the Mediterranean Ridge south and west of Greece, but few data were available from the Calabrian offshore until early in this century when new geophysical and geological data were acquired in the context of European-funded programmes. The acquisition of regional multibeam bathymetric and backscatter data, as well as seismic reflection profiles and cores from selected features, resulted in the discovery of a new province of MVs on the Calabrian accretionary prism (CAP), as well as insights into their activity through time. A total of 54 MVs were identified on the inner CAP across water depths of 150-2750 m from their distinctive morphologies and/or high backscatter character, in several cases proven by coring. Seismic reflection grids across two proven MVs showed them to record a history of activity dating back to an interpreted mid-Pliocene unconformity, one of the longest known records of extrusion. Sediment cores indicate recurrent eruptive episodes during the last glacial-interglacial cycle (<56 ka). Seafloor investigations of several MVs were undertaken using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) and Remotely Operated Vehicles (ROVs), which found evidence of phases of mud breccia extrusion and ongoing seepage of gas-rich fluids to support the growth of authigenic carbonate structures, chemosynthetic ecosystems and possible gas hydrate formation. The Calabrian deep-sea MV province is an active system in which extrusive episodes potentially constitute recurrent geohazards, separated by longer periods of quiescence in which fluid seepage drives geosphere-biosphere coupling.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, mud volcanoes, gas, continental margin

RIASSUNTO - La presenza di vulcani di fango (MV) nelle acque profonde del Mar Ionio è stata riconosciuta all'inizio degli anni '80 dalla presenza di breccie di fango in carotaggi. Inizialmente si era ipotizzato che questa litologia indicasse processi tettonici o diapirici, mentre successivamente la sua genesi è stata attribuita ad un lungo (> 1 Ma) processo di estrusione sul fondo marino avvenuto nei prismi di accrezione nella zona di subduzione Europa-Africa. Province di MV sono state identificate lungo la cresta del *Mediterranean Ridge* a sud e a ovest della Grecia, ma pochi dati relativi all'*offshore* calabrese sono stati disponibili fino all'inizio di questo secolo, quando nuovi dati geofisici e geologici sono stati acquisiti nel contesto di programmi finanziati dall'UE. L'acquisizione dei dati batimetrici e di *backscatter multibeam*, così come profili di sismica a riflessione e carotaggi hanno portato alla scoperta di una nuova provincia di MV sul prisma di accrezione calabrese (CAP), insieme a informazioni sulla loro attività nel tempo. Sulla CAP interna sono stati identificati 54 MV, a profondità comprese tra 150 e 2750 metri, identificati sulla base delle caratteristiche morfologiche e/o dell'elevato *backscatter*, supportati in diversi casi da carotaggi. Le registrazioni sismiche eseguite in corrispondenza di due MV hanno mostrato tracce di attività risalente a una discordanza del Pliocene medio, uno dei record di estrusione fra i più antichi. I campioni di sedimento indicano episodi eruttivi ricorrenti durante l'ultimo ciclo glaciale-interglaciale (<56 ka). Le indagini su diversi MV sommersi sono state realizzate utilizzando strumenti autonomi sottomarini (AUV) e strumenti teleguidati (ROV), che hanno identificato tracce di estrusione di breccie di fango e infiltrazioni di fluidi ricchi di gas associate a strutture carbonatiche autigene, ecosistemi chemiosintetici e probabile formazione di gas-idrati. La provincia di MV nelle acque profonde della Calabria è un sistema attivo in cui gli episodi di estrusione possono dare origine a *geohazard* ricorrenti, separati da periodi più lunghi di quiescenza durante i quali la fuoriuscita di fluidi crea un collegamento tra geosfera e biosfera.

PAROLE CHIAVE: emissione fluida, fondale marino, vulcano di fango, gas, margine continentale

(*)OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico, Trieste, Italy

(**)Institute of Petroleum and Natural Resources, Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre - RS, Brazil

(***)Géoazur - UMR7329 CNRS, 250 rue Albert Einstein, Batiment 1, 06560 Valbonne, France

(****)MARUM - Center for Marine Environmental Sciences and Faculty of Geosciences University Bremen, PO Box 33 04 40, D-28334 Bremen, Germany

(*****)Observatoire Océanologique de Villefranche sur Mer, 181 Chemin du Lazaret 06230 Villefranche-sur-Mer, France

1. - INTRODUCTION

Mud volcanism is a form of extrusive activity driven by the upward migration of overpressured fluids within sedimentary successions, so as to cause the liquefaction of mud-rich units and the episodic extrusion of solids, liquids and gases (DEVILLE *et alii*, 2003; PLANKE *et alii*, 2003; LEÓN *et alii*, 2007). This process may result in a wide range of extrusive edifices, including cones, pies, ridges and calderas, typically composed of a sedimentary diamict commonly referred to as mud breccia (BROWN & WESTBROOK, 1988; KOPF, 2002; DIMITROV, 2002). Mud volcanoes (MVs) are characteristically linked to hydrocarbon systems at depth (ETIOPE *et alii*, 2009), and in submarine settings may act as hosts to gas hydrates and to chemosynthetic ecosystems that mediate the release of greenhouse gases to the oceans (e.g. FOUCHER *et alii*, 2009). MVs are found within sedimentary successions on both passive and active margins, but most commonly form within accretionary wedges along convergent plate boundaries (HIGGINS & SAUNDERS, 1974; KOPF, 2002; DIMITROV, 2002).

2. - PREVIOUS STUDIES

Submarine MVs are abundant in the eastern Mediterranean Sea, particularly along the accretionary prisms of the Africa-Europe subduction zone where they have received great attention (KOPF, 2002; DIMITROV, 2002). Mud breccias were first identified over 30 years ago in cores from the Prometheus Dome (CITA *et alii*, 1981), one of a number of 2-5 km wide semi-circular anomalies observed on GLORIA long-range sidescan sonar imagery. The anomalies were initially interpreted as halokinetic features but recognised to be MVs due to their high acoustic backscatter and irregular mainly positive relief (BELDERSON *et alii*, 1978; see FUSI & KENYON, 1996). Scientific drilling of two features, the Milano and Napoli MVs, showed them to have recorded the extrusion of mud breccias over at least 1.75 Ma (ROBERTSON *et alii*, 1996; ROBERTSON & KOPF, 1998). Sediment cores obtained on the MVs showed mud breccias covered by a variable thickness of hemipelagic sediments (e.g. CITA *et alii*, 1981; CAMERLENGHI, *et alii* 1992), while seafloor video transects revealed small-scale fluid escape features, authigenic carbonate crusts, and biological systems (LIMONOV *et alii*, 1996; VOLGIN & WOODSIDE, 1996; CRONIN *et alii*, 1997; HUGUEN *et alii*, 2005; ZITTER *et alii*, 2005; FOUCHER *et alii*, 2009). Regional multibeam coverage obtained by French scientists revealed a belt over 1.000 km long containing hundreds of backscatter anomalies of varying size and morphology (HUGUEN *et alii*, 2004, 2005; CHAMOT-ROOKE *et alii*, 2005a,b; MASCLE *et alii*, 2014). A quantitative analysis of backscatter anomalies south and west of Greece revealed 215 features (averaging 2-9 km²). Sediment coring documented mud breccias

within 2.25 m of the seabed inferred to record eruptions over the last ≤ 60 ka, whereby over 90% of the MVs were located within a 70 km wide band along the prism-backstop boundary (RABAUTE & CHAMOT-ROOKE, 2007). The anomalous concentration of MVs within the inner, older part of the prism has been proposed to reflect a combination of the presence of a Messinian evaporite layer, and different forms of tectonism along the backstop boundary (CAMERLENGHI *et alii*, 1995; ROBERTSON & KOPF, 1998; CHAMOT-ROOKE *et alii*, 2005a; RABAUTE & CHAMOT-ROOKE, 2007).

3. - CALABRIAN ACCRETIONARY PRISM

The Calabrian accretionary prism (CAP) is contiguous with the larger Mediterranean Ridge (fig. 1), but had received little attention in regard to mud volcanism prior to this century. In 1981, two cores containing ‘pebbly mudstones’ were recovered from a seismically unstratified body on the inner prism (fig. 1; MORLOTTI *et alii*, 1982; BARBIERI *et alii*, 1982), but mud diapirism as proposed by CITA *et alii* (1981) was rejected in favour of a process of tectonic chaoticisation along thrusts (MORLOTTI *et alii*, 1982; ROSSI & SARTORI, 1981). Partial coverage of the prism by long-rangeside-scan imagery had revealed several backscatter anomalies (BELDERSON *et alii*, 1978), later reassessed as mud volcanoes (FUSI & KENYON, 1996). No new data were available from the Calabrian offshore for over two decades, but it became apparent that mud volcanoes were likely to be found (SARTORI, 2003). This was confirmed during the HERMES-HYDRAMED campaign of the OGS Explora in 2005, which obtained the first regional multibeam coverage (including backscatter) of the CAP (fig. 1), and resulted in the identification of mud volcanoes at two sites (CERAMICOLA *et alii*, 2006; PRAEG *et alii*, 2009; CERAMICOLA *et alii*, 2014). Investigations of two bathymetric targets yielded cores of mud breccia from the Madonna dello Ionio and Pythagoras MVs (fig. 1), while seismic reflection grids across both features showed them to be the tops of buried extrusive edifices. These are >1 km thick and interfinger with sediments above a regional unconformity inferred to be of mid-Pliocene age (3-3.5 Ma), making these edifices among the longest-lived mud volcanoes on record (PRAEG *et alii*, 2009; SOMOZA *et alii*, 2012). The two extrusive structures were further investigated during HERMES campaigns equipped with ROVs, which found geological and biological evidence of seabed seepage (FOUCHER *et alii*, 2009).

4. - NEW INTERPRETATIONS

Several authors subsequently suggested that mound-like seabed features might be mud volcanoes (FUSI *et alii*, 2006; MORELLI *et alii*, 2011; VOLPI *et alii*, 2011), although these studies were not supported by backscatter imagery. The

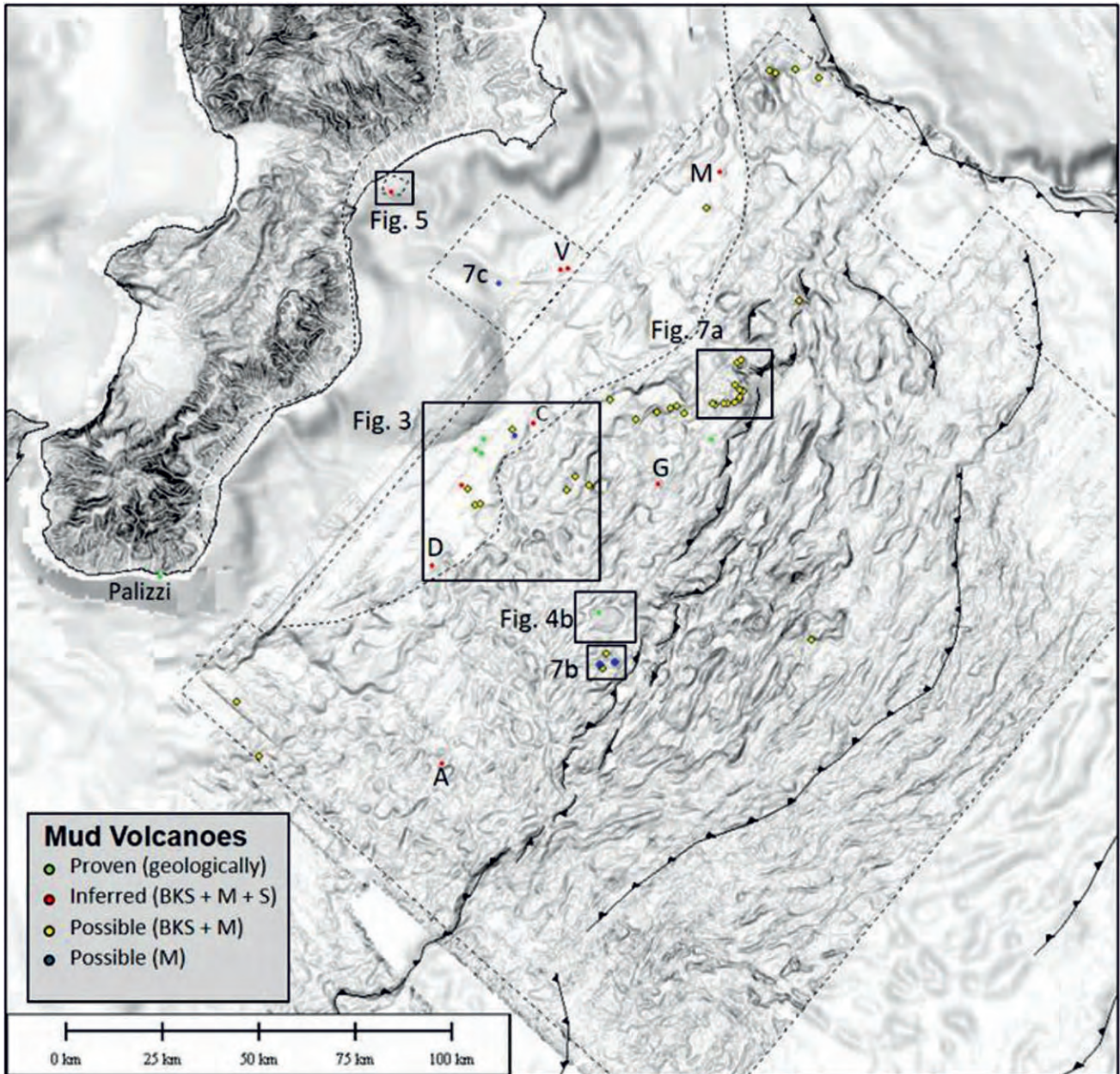


Fig. 1 - Map showing the regional distribution of mud volcanoes in relation to the main tectonic features of the Calabrian accretionary prism seen from shaded-relief bathymetry (from CERAMICOLA *et alii*, 2014). The study was based on the first regional multibeam bathymetry/backscatter datasets acquired in the area by OGS in 2005 and in 2009, as well as *chirp* subbottom profiles and cores from selected sites. These data allowed the identification of proven, inferred and possible mud volcanoes across the inner accretionary prism and fore-arc basins. Sedimentation rates in cores were used to argue that high backscatter areas record episodic extrusions of mud breccia over the last <56 ka.

- La mappa mostra la distribuzione regionale dei vulcani di fango in relazione alle principali caratteristiche tettoniche del prisma d'accrescimento calabrese sulla base della batimetria a rilievo ombreggiato (da CERAMICOLA *et alii*, 2014). Lo studio si è basato sui primi dataset regionali di batimetria/backscatter multibeam acquisiti nell'area da OGS nel 2005 e nel 2009, così come su profili di subbottom *chirp* e campionamenti mirati. Questi dati hanno permesso l'identificazione di vulcani di fango certi, dedotti e probabili attraverso il prisma d'accrescimento interno e i bacini di fore-arc. I tassi di sedimentazione, studiati attraverso i carotaggi, confermano che le aree di alto backscatter identificano estrusioni episodiche di breccie di fango negli ultimi 56 ka.

'chaotic tectonites' cored by MORLOTTI *et alii* (1982) were reinterpreted as mud breccias (PANIERI *et alii*, 2013). Separately, seismic reflection studies revealed evidence of significant out-of-sequence tectonism within the pre-Messinian accretionary prism (MINELLI & FACCENNA, 2010) and it was suggested that the post-Messinian thrusts may have provided pathways for fluid flow and mud volcanism (POLONIA *et alii*, 2011; PANIERI *et alii*, 2013).

5. - DATA COLLECTION

During the HERMES HYDRAMATED campaign high backscatter patches were detected on the seafloor, and sediment cores proved the existence of a new province of mud volcanoes (PRAEG *et alii*, 2009 CERAMICOLA *et alii*, 2014). The acquisition was carried out in the framework of the projects HERMES (Hotspot Ecosystem research along the Margins of European seas)

and HYDRAMED (Marie Curie Individual fellowship), both funded by the EC. A total of 54 MVs were identified across water depths of 150-2750 m using up to four geophysical criteria: distinctive morphology, high backscatter, unstratified subbottom facies and, in one case, a hydroacoustic anomaly in the water-column (CERAMICOLA *et alii*, 2014). Fourteen MVs were identified from 3-4 criteria, of which five were previously proven by cores containing mud breccia beneath up to 1.6 m of hemipelagic sediments (Madonna dello Ionio MVs 1-3, Pythagoras MV, and the newly named Sartori MV), while nine others were identified for the first time (Athena, Catanzaro, Cerere, Diana, Giunone, Minerva, 'right foot', Venere 1 and 2). Forty other as yet unnamed MVs were inferred from 1-2 geophysical criteria (three from distinctive morphology alone). All but one possible MV lay on the inner plateau of the CAP, landwards of the Calabrian Escarpment in a zone up to 120 km wide that includes the inner pre-Messinian wedge and the fore-arc basins, where they were interpreted to record the ascent from depth of overpressured fluids that interacted with tectonic structures and with evaporitic or shale seals within the fore-arc basins (CERAMICOLA *et alii*, 2014). The rise of fluids may have been triggered by post-Messinian out-of-sequence tectonism that affected the entire pre-Messinian prism, but Plio-Quaternary sedimentation rates and depositional styles supported the inference that significant mud volcanism has taken place only on the inner plateau. Sedimentation rates across the CAP applied to a 12 khz sonar detection depth of 225 cm imply that all MVs with backscatter signatures (50 of 54) have extruded mud breccias within the last 56 ka, and within the last 12.5 ka in the fore-arc basins. Ages of extrusion estimated from the depth of cored mud breccias at five MVs, and a seismo-stratigraphic relationship at a sixth, indicate extrusive episodes at the last glacial maximum ca. 20 ka BP and during the postglacial period. Extrusive episodes within the Calabrian MV province constitute recurrent geohazards, separated by longer periods of quiescent (subdued) fluid seepage that are likely to support gas hydrate formation and chemosynthetic ecosystems.

6. - DISCUSSION

Based on the results above, a group led by G. Bohrmann of MARUM, collaborating with a team from OGS, carried out further investigations of MVs on the Ionian Calabrian margin during campaigns of the R/V METEOR (BOHRMANN *et alii*, 2015) and the R/V POSEIDON (BOHRMANN *et alii*, 2016). These cam-

paigns resulted in a wealth of acoustic data providing high resolution imagery of the seafloor as well as of the water column, surveying almost all of the MVs identified by OGS in order to detect gas bubbles rising from the seafloor. During both campaigns a Kongsberg EM2040 (300 kHz) system was mounted on an autonomous underwater vehicle (AUV), the MARUM-SEAL 5000, and revealed morphological details of the Ionian Sea MVs at resolutions of up to 1.6 m lateral and decimetre-scale vertical (LOHER *et alii*, 2018a). Particular attention was focused on Venere MV (fig. 2), the only feature on the Calabrian margin observed to be emitting gas to the watercolumn. The 100 m high twin cones of Venere mud volcano with a subsidence caldera composed of inward-dipping ring faults, are situated at 1,600 m water depth within the Squillace Canyon. Sites of gas bubble emissions and chemosynthesis-based ecosystems have been documented at several sites along the periphery of the caldera. The molecular composition of hydrocarbons and isotopic composition of methane indicate a thermogenic origin of hydrocarbons emitted at Venere MV and together with the presence of strongly freshened pore water in recently extruded mud breccia, point to fluid sources located deep (>3 km) within the forearc basins of the CAP (LOHER *et alii*, 2018). Seafloor bathymetry and backscatter data obtained by a ship-based system and an autonomous underwater vehicle (AUV) allowed mapping of mudflow deposits of the mud volcano as well as of bedforms in the surrounding canyon. Repeated surveying by AUV documented active mud movement at the western summit between 2014 and 2016 (LOHER *et alii*, 2018a). Through sediment coring and the ages of buried ash layers (tephrochronology), it was possible to date buried mudflow deposits based on sedimentation rates in overlying hemipelagic sediments. An average extrusion rate of 27,000 m³/yr over the last 882 years was estimated. These findings supported a three-stage evolutionary model of Venere mud volcano during the last 4,000 years, which includes i) the onset of quiescence at the eastern cone (after 2,200 years ago), ii) erosive events in Squillace Canyon (prior to 882 years ago), and iii) mud flows from the eastern cone (since 882 years). This study revealed new interactions between a mud volcano and a deep sea canyon and the potential geohazards associated with them.

REFERENCES

- BARBIERI F., MORLOTTI E., POERIO L., RAFFI I. & TORELLI L. (1982) - *Dati geologici preliminari sul bacino di Crotona-Spartivento (Mar Ionio)*. Acta Naturalia de l'Ateneo Parmense, **18**, 141-155.
- BELDERSON R.H., KENYON N.H., STRIKE A.H. (1978) - *Local submarine salt-karst formation on the Hellenic Outer Ridge, eastern Mediterranean*. Geology, **6**: 716-720.

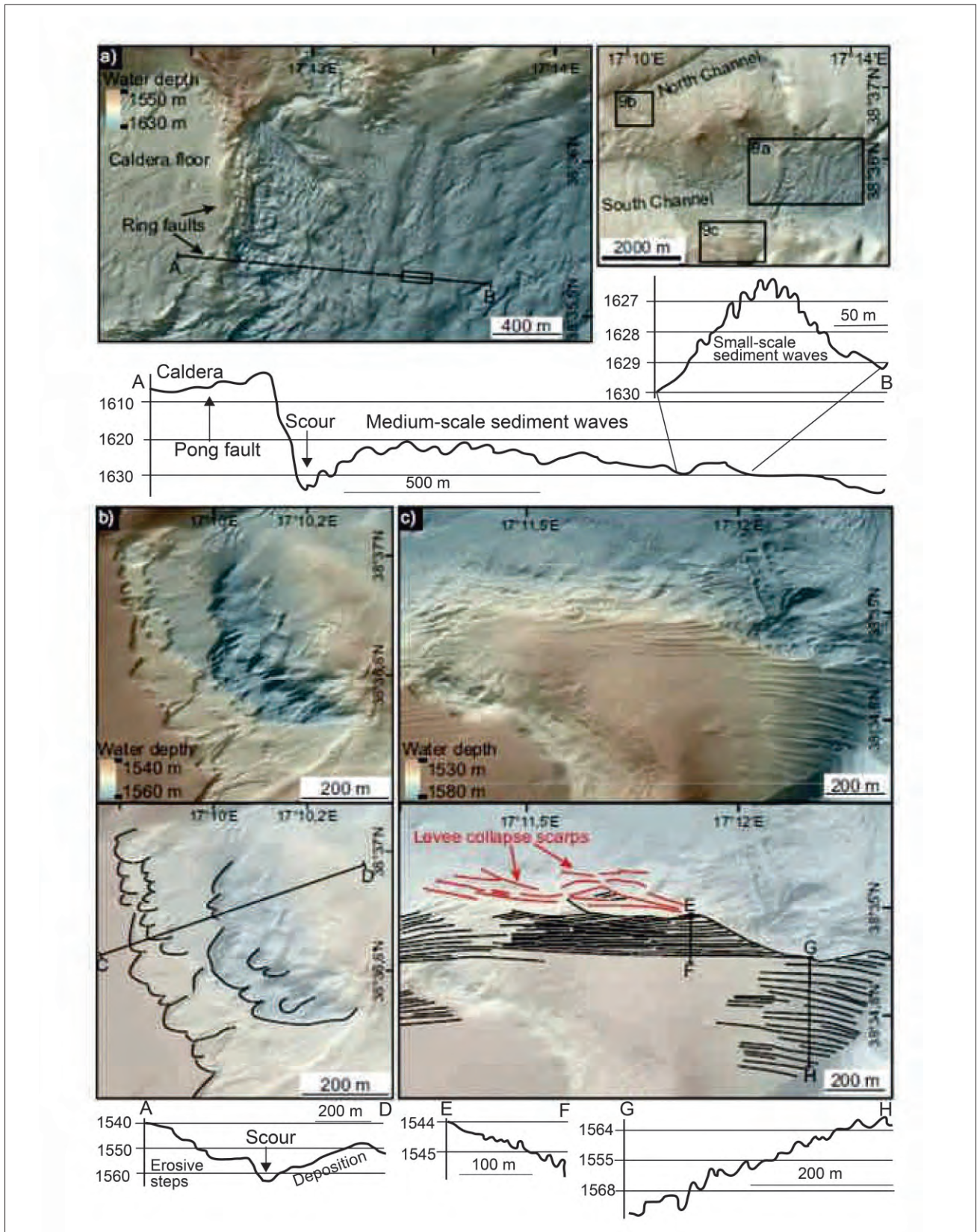


Fig. 2 - Detailed AUV-derived bathymetric maps, interpreted seafloor features and topographic cross-sections in the vicinity of Venere mud volcanoes (see V in fig. 1 for location), a: Grooves covering the southern levee of Squillace Canyon; b: Scour along the northern channel of Squillace Canyon; c: Scour at the downslope edge of the caldera giving way to medium-scale sediment waves, which are overprinted by small-scale sediment waves. Figure modified from LOHER *et alii* (2018a).

- Mappe batimetriche di dettaglio derivate da registrazioni AUV, interpretate, e sezioni topografiche nelle vicinanze dei vulcani di fango Venere (V in figura 1), a: solchi lungo l'argine meridionale del Canyon di Squillace; b: Scour lungo il canale settentrionale del Canyon di Squillace; c: Scour lungo il versante della caldera passano a onde di sedimenti di media grandezza, sovrastate da onde di sedimenti minori. Figura modificata da LOHER *et alii* (2018a).

- BOHRMANN G., ALVAREZ R., BILLER T., BUCHHEISTER S., BÜTTNER H., CANONI O., DEHNING K., FERREIRA C., GEPRÄGS P., HEINKEN S., HÜTTICH D., JOHANSEN C., KLAR, S., KLÜBER S., LEYMAN T., MAI H.A., MARCON Y., MARY F., MEINECKE G., MENAPACE W., NOWALD N., PAPE T., PRÄG D., RAEKE A., REHAGE R., RENKEN J., REUTER C., ROHLEDER C., RÖMER M., SAHLING H., SANS I COLL C., SCHADE T., SEITER C., SPALEK P., SPIESECKE U., TAMBORRINO, L., TORRES, M., VON WAHL T., WIEBE M., WINTERSTELLER P. & ZARROUK M. (2015) - *Report and preliminary results of R/V METEOR cruise M112, Dynamic of Mud Volcanoes and Seeps in the Calabrian Accretionary Prism, Ionian Sea, Catania (Italy) - Catania (Italy), November 6 - December 15, 2014: Berichte. MARUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, v. No. 306, p. 217.*
- BOHRMANN G., BACHMANN K., BUCHHEISTER S., CANDONI O., CERAMICOLA S., LOHER, M., MEINECKE, G., RENKEN, J., SPIESECKE U., VON WAHL T. & WINTERSTELLER P. (2016) - *Report and preliminary results of R/V POSEIDON cruise POS499, Calabrian Mud Volcanoes, Catania (Italy) - Catania (Italy), 04 May - 22 May, 2016: Berichte. MARUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, v. No. 311, p. 76.*
- BROWN K. & WESTBROOK G.K. (1988) - *Mud diapirism and subcretion in the Barbados Ridge accretionary complex: the role of fluids in accretionary processes. Tectonics, 7(3), 613-640.*
- CAMERLENGHI A., CITA M.B., HIEKE W. & RICCHIUTO T. (1992) - *Geological evidence of mud diapirism on the Mediterranean Ridge accretionary complex. Earth and Planetary Science Letters, 109: 493-506.*
- CAMERLENGHI A., CITA M.B., DELLA VEDOVA B., FUSI N., MIRABILE L. & PELLIS G. (1995) - *Geophysical evidence of mud diapirism on the Mediterranean Ridge accretionary complex. Marine Geophysical Researches, 17(2): 115-141.*
- CERAMICOLA S., PRAEG D. & OGS EXPLORA SCIENTIFIC PARTY (2006) - *Mud volcanoes discovered on the Calabrian Arc: preliminary results from the HERMES-HYDRAMED IONIO 2005 campaign. CIESM Workshop Monographs, n. 29: 35-39.*
- CERAMICOLA S., PRAEG D., COVA A., ACCETTELLA D. & ZECCHIN M. (2014) - *Seafloor distribution and last glacial to postglacial activity of mud volcanoes on the Calabrian accretionary prism, Ionian Sea. Geo-Marine Letters, 34(2-3): 111-129. DOI: 10.1007/s00367-013-0354-y*
- CHAMOT-ROOKE N., RANGIN C., LE PICHON X., DOTMED WORKING GROUP (2005b) - *DOTMED: a synthesis of deep marine data in the Eastern Mediterranean. Mém. Soc. Géol. France ns 177, CD-ROM.*
- CHAMOT-ROOKE N., RABAUTE A. & KREEMER C. (2005a) - *Western Mediterranean Ridge mud belt correlates with active shear strain at the prism-backstop geological contact. Geology, 33: 861-864*
- CITA M.B., RYAN W.B.F. & PAGGI L. (1981) - *Prometheus Mud Breccia - an example of shale diapirism in the western Mediterranean Ridge. Annales géologiques des Pays helléniques, 30: 543-570.*
- CRONIN B.T., IVANOV M.K., LIMONOV A.F., EGOROV A., AKHMANOV G.G., AKHMETJANOV A.M., KOZLOVA E. & SHIPBOARD SCIENTIFIC PARTY TTR-5 (1997) - *New discoveries of mud volcanoes on the Eastern Mediterranean Ridge. Journal of the Geological Society, London, 154: 173-182*
- DEVILLE E., BATTANI A., GRIBOULARD R., GUERLAIS S., HERBIN J.P., HOUZAY J.P., MULLER C. & PRINZHOFER A. (2003) - *The origin and processes of mud volcanism: new insights from Trinidad. In: Subsurface Sediment Mobilization (VAN RENSBERGEN P., HILLIS R.R., MALTMAN A.J. & MORLEY C.K. Eds); Geological Society, London, Special Publications, 216: 475-490.*
- DIMITROV L.I. (2002) - *Mud volcanoes - the most important pathway for degassing deeply buried sediments. Earth-Sci. Rev., 59: 49-76.*
- ETIOPE G., FEYZULLAYEV A., MILKOV A.V., WASEDA A., MIZOBE K.C.H.S. & SUN C. H. (2009). *Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes. Marine and Petroleum Geology, 26(9), 1692-1703.*
- FOUCHER J.P., WESTBROOK G.K., BOETIUS A., CERAMICOLA S., DUPRÉ S., MASCLE J., MIENERT J., PFANNKUCHE O., PIERRE C. & PRAEG D. (2009) - *Structure and drivers of cold seep ecosystems. Oceanography, 22(1), 92-109.*
- FUSI N., SAVINI A. & CORSELLI C. (2006) - *Evidence of mud diapirism and coral colonies in the Ionian Sea (Central Mediterranean) from high resolution chirp sonar survey. Annals of Geophysics, 49(2/3): 751-765,*
- FUSI N. & KENYON N.H. (1996) - *Distribution of mud diapirism and other geological structures from long-range sidescan sonar (GLORLA) data, in the Eastern Mediterranean Sea. Marine Geology, 132: 21-38.*
- HIGGINS G.E. & SAUNDERS J.B. (1974) - *Mud volcanoes—their nature and origin: contribution to the geology and paleobiology of the Caribbean and adjacent areas. Verh. Naturforsch. Ges., Basel, 84: 101-52.*
- HUGUEN C., MASCLE J., WOODSIDE J., ZITTER T. & FOUCHER J.P. (2005) - *Mud volcanoes and mud domes of the Central Mediterranean Ridge. Near-bottom and in-situ observations. Deep-Sea Research. Part 1, v. 52: 1911-1931*
- HUGUEN C., MASCLE J., CHAUMILLON E., KOPF A., WOODSIDE J. & ZIETTER T. (2004) - *Structural setting and control of mud volcanoes from the Central Mediterranean Ridge (Eastern Mediterranean). Marine Geology, 209: 245-263.*
- KOPF A. (2002) - *Significance of mud volcanism. Reviews of Geophysics, 40(2): 1-51.*
- LEÓN R., SOMOZA L., MEDIALDEA T., GONZÁLEZ F.J., DÍAZ-DEL-RÍO V., FERNÁNDEZ-PUGA M.C., MAESTRO A. & MATA M.P. (2007) - *Sea-floor features related to hydrocarbon seeps in deepwater carbonate-mud mounds of the Gulf of Cádiz: from mud flows to carbonate precipitates. Geo-Mar. Lett., 27(2/4): 237-247. doi:10.1007/s00367-007-0074-2*
- LIMONOV A.F., WOODSIDE J.M., CITA M.B. & IVANOV M.K. (1996) - *The Mediterranean Ridge and related mud diapirism: a background. Mar. Geol., 131: 7-19.*
- LOHER M., CERAMICOLA S., WINTERSTELLER P., MEINECKE G., SAHLING H. & BOHRMANN G. (2018a) - *Mud volcanism in a canyon: Morphodynamic evolution of the active Venere mud volcano and its interplay with Squillace Canyon, Central Mediterranean. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(2), 356-378.*
- LOHER M., MARCON Y., PAPE T., RÖMER M., WINTERSTELLER P., DOS SANTOS FERREIRA C., PRAEG D., TORRES M., SAHLING H. & BOHRMANN G. (2018b) - *Seafloor sealing, doming, and collapse associated with gas seeps and authigenic carbonate structures at Venere mud volcano, Central Mediterranean. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 137: 76-96.*
- MASCLE J., MARY F., PRAEG D., BROSOLO L., CAMERA L., CERAMICOLA S. & DUPRÉ S. (2014) - *Distribution and geological control of mud volcanoes and other fluid/free gas seepage features in the Mediterranean Sea and nearby Gulf of Cadiz. Geo-Marine Letters, 34(2-3): 89-110. DOI: 10.1007/s00367-014-0356-4.*
- MINELLI L. & FACCENNA C. (2010) - *Evolution of the Calabrian accretionary wedge (central Mediterranean). Tectonics 29:TC4004. doi:10.1029/2009TC002562.*
- MORELLI D., CUPPARI A., COLIZZA E. & FANUCCI F. (2011) - *Geomorphic setting and geohazard-related features along the Ionian*

- Calabrian margin between Capo Spartivento and Capo Rizzuto (Italy)*. Mar Geophys Res 32:139-149. doi:10.1007/s11001-011-9130-4.
- MORLOTTI E., SARTORI R., TORELLI L., BARBIERI F. & RAFFI I. (1982) - *Chaotic deposits from the external Calabrian Arc (Ionian Sea, eastern Mediterranean)*. Memorie della Società Geologica Italiana, **24**: 261-275.
- PANIERI G., POLONIA A., LUCCHI R.G., ZIRONI S., CAPOTONDI L., NEGRI A. & TORELLI L. (2013) - *Mud volcanoes along the inner deformation front of the Calabrian Arc accretionary wedge (Ionian Sea)*. Mar. Geol., **336**: 84-98
- PLANKE S., SVENSEN H., HOVLAND M., BANKS D.A. & JAMTVEIT B. (2003) - *Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan*. Geo-Marine Letters, **23**: 258-268.
- POLONIA A., TORELLI L., MUSSONI P., GASPERINI L., ARTONI A., KLAESCHEN D. (2011) - *The Calabrian Arc subduction complex in the Ionian Sea: regional architecture, active deformation and seismic hazard*. Tectonics 30:TC5018. doi:10.1029/2010TC002821.
- PRAEG D., CERAMICOLA S., BARBIERI R., UNNITHAN V. & WARDELL N. (2009) - *Tectonically-driven mud volcanism since the late Pliocene on the Calabrian accretionary prism, central Mediterranean Sea*. Mar. Petrol. Geol., **26**: 1849-1865.
- RABAUTE A. & CHAMOT-ROOKE N. (2007) - *Quantitative mapping of active mud volcanism at the western Mediterranean Ridge-backstop contact*. Mar. Geophys. Res., **28**: 271-293.
- ROBERTSON A.H.F. & KOPF A. (1998) - *Tectonic setting and processes of mud volcanism on the Mediterranean Ridge accretionary complex: evidence from leg 160*. In: ROBERTSON A.H.F., EMEIS K.-C., RICHTER C. & CAMERLENGHI A. (Eds): Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, **160**: 665-680.
- ROBERTSON A.H.F. & THE OCEAN DRILLING PROGRAM, LEG 160, SHIPBOARD SCIENTIFIC PARTY (1996) - *Mud volcanism on the Mediterranean Ridge; initial results of Ocean Drilling Program Leg. 160*. Geology, **24**(3): 239-242.
- ROSSI S. & SARTORI R. (1981) - *A seismic reflection study of the external Calabrian Arc in the northern Ionian Sea (eastern Mediterranean)*. Marine Geophysical Researches, **4**: 403-426.
- SARTORI R. (2003) - *The Tyrrhenian back-arc basin and subduction of the Ionian lithosphere*. Episodes, **26**(3): 217-221
- SOMOZA L., MEDIALDEA T., LEÓN R., ERCILLA G., VÁZQUEZ J.T., FARRAN M., HERNÁNDEZ-MOLINA F.J., GONZÁLES J., JUAN C. & FERNÁNDEZ-PUGA M.C. (2012) - *Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea)*. Mar. Geol., 332/334: 4-26
- VOLGIN A.V. & WOODSIDE J.M. (1996) - *Sidescan sonar images of mud volcanoes from the Mediterranean Ridge: possible causes of variations in backscatter intensity*. Mar. Geol., **132**:39-53.
- VOLPI V., ACCETTELLA D., GIUSTINIANI M. & TINIVELLA U. (2011) - *New Geophysical Evidences of Fluid Related Features in the Western Ionian Sea Part II: Data Interpretation*. Journal of Shipping and Ocean Engineering, **1**(2), 116-123.
- ZITTER T.A.C., HUGUEN C. & WOODSIDE J.M. (2005) - *Geology of mud volcanoes in the eastern Mediterranean from combined sidescan sonar and submersible surveys*. Deep. Sea. Res., I 52: 457-475.

Nuove recenti conoscenze sul sistema idrotermale del complesso vulcanico dell'Isola di Panarea (Arcipelago delle Eolie, Mar Tirreno Meridionale)

New recent insights into the hydrothermal system of the Panarea Island (Aeolian Archipelago, South Tyrrhenian Sea)

SPAGNOLI F.⁽¹⁾, ANDALORO F.⁽²⁾, CANESE S.⁽³⁾, CAPACCIONI B.^(4†), ESPOSITO V.⁽⁵⁾, GIORDANO P.⁽⁶⁾, ROMEO T.⁽²⁾⁽⁷⁾, BORTOLUZZI G.^(6†)

RIASSUNTO - A seguito del violento rilascio di gas, verificatosi nel 2002 e 2003, nell'area prospiciente gli isolotti a est dell'isola vulcanica di Panarea, sono state condotte numerose ricerche per comprendere l'origine, la natura e gli effetti di queste emissioni. Tali ricerche hanno evidenziato vari punti di rilascio di gas e fluidi idrotermali ricchi di CO₂ nell'area di mare a est di Panarea e hanno prodotto diverse stime della CO₂ totale rilasciata dal sistema sottomarino a partire dal post-glaciale ad oggi. Alla luce di questo, l'ISMAR-CNR e l'ISPRA hanno condotto delle ricerche specifiche tra il 2013 e il 2015 per caratterizzare il campo idrotermale sommerso compreso tra l'isola di Panarea e l'isolotto di Basiluzzo (NE di Panarea), dal punto di vista morfologico, biologico e chimico-fisico, in particolare per ciò che riguarda i flussi bentici diffusi. Le campagne oceanografiche hanno consentito di individuare e caratterizzare tre aree con intensa attività idrotermale. La prima area, situata a sud-est dell'isola di Panarea (Secca dei Pesci), è caratterizzata da un'intensa attività esalativa di fluidi acidi, ricchi di carbonio inorganico disciolto (DIC), a temperatura ambiente ma con deboli contenuti in metalli. La seconda area, scoperta nel 2015, situata ai piedi della scarpata a nord-est dell'isola di Panarea, è stata denominata *Smoking Land* per la presenza di circa 200 camini idrotermali di dimensioni consistenti (1-4 m di altezza; circa 4 m in media di diametro di base), in parte attivi e in parte quiescenti. L'ultima area, situata a nord-est degli isolotti di Dattilo, Bottaro, Lisca Bianca, Lisca Nera e Panarelle, è caratterizzata da depressioni circolari, anche esse in parte attive e in parte inattive. In queste ultime due aree, le misure di flussi bentici disciolti hanno evidenziato un andamento a macchia di leopardo con rilascio di fluidi acidi, a temperatura ambiente, ricchi di DIC, Fe e altri metalli (Mn, Zn, Al). Queste due aree sono loca-

lizzate ai margini di un avvallamento allungato in direzione OSO-ENE. Esse sono il risultato di una circolazione idrotermale con risalita, lungo faglie distensive, di gas di origine vulcanica mescolati ad acqua di mare penetrata nel sottofondo marino. Adiacenti alle aree attive sono presenti aree inattive, cariche di gas in sovrappressione per la presenza di uno strato superficiale di ossidi e idrossidi di Fe che ne impedisce la fuoriuscita, e aree quiescenti per una degassificazione già avvenuta. Da questo assetto deriva la necessità di un continuo monitoraggio atto a prevedere possibili future situazioni di pericolo per le aree circostanti.

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, fluido idrotermale, camino idrotermale, depositi minerali, processi idrotermali, vulcanismo sottomarino, geochimica

ABSTRACT - After the strong volcanic gas releases, occurred in 2002 and 2003, in the area near the islets to the east of the Panarea volcanic island, several researches have been carried out to understand the origin, nature and effects of these emissions. These researches evidenced various sites of CO₂-rich hydrothermal gas and fluid leakage in the marine area east of Panarea; furthermore, they have provided different estimates of total CO₂ released by the submarine volcanic system from post-glacial times to today. In light of this, ISMAR-CNR and ISPRA carried out researches between 2013 and 2015 focused on the characterization of the marine hydrothermal field between the island of Panarea and the islet of Basiluzzo (NE of Panarea), from a morphological, biological and chemical-physical point of view, in particular for what concerns diffusive benthic fluxes. Oceanographic cruises allowed to identify and characterize three areas with intense hydrothermal activity. The first area, located on the

(1) Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Largo Fiera della Pesca, 60125, Ancona, Italy

(2) Stazione Zoologica Anton Dohrn, Centro Interdipartimentale Siciliano, Via dei Mille 46, 98057 Milazzo (ME)

(3) Dipartimento per il monitoraggio e la tutela dell'ambiente e per la conservazione della biodiversità, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca ambientale (ISPRA), Via Branconi 48, Roma, Italy

(4) Dipartimento di Biologia, Geologia e Scienze Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 67, Bologna, Italy

(5) Sezione Oceanografia - OGS, Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, via Auguste Piccard 54, 34151, Trieste, Italy

(6) Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Via Gobetti 101, 40126, Bologna, Italy

(7) Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Via dei Mille 46, 98057 Milazzo (ME)

Corresponding author. E-mail: federico.spagnoli@cnr.it

South-East of the island of Panarea (*Secca dei Pesci*), is characterized by intense emissions of acidic fluids, rich in dissolved inorganic carbon (DIC), at the same temperature of the surrounding environment, but with weak metal contents. The second area, discovered in 2015, located at the bottom of the slope to the North-East of the island of Panarea, has been called "*Smoking Land*" due to the presence of about 200 hydrothermal chimneys of considerable size (1-4 m high, with an average base diameter of about 4 m), partly active and partly quiescent. The last area, located to the North-East of the Dattilo, Bottaro, Lisca Bianca, Lisca Nera and Panarelle islets (DBLP in the following) islets, is characterized by circular depressions, these, too, partly active and partly inactive. In these two last areas, the dissolved benthic flux measurements showed a fragmented patchwork pattern with emissions of acidic fluids, at the same temperature of the surrounding environment, rich in DIC, Fe and other metals (Mn, Zn, Al). These two areas are located at the borders of a depression extended WSW-ESE. They are the result of a hydrothermal circulation of rising volcanic gas, mixed with sea water percolated in the marine crust, along normal faults. Near the active release areas there are inactive areas, with overpressured gas inside, due to the presence of a Fe-oxides and hydroxides surface layer that prevents the leakage, and quiescent areas for an already occurred degassing. From this setting derives the need for continuous monitoring to prevent possible future hazards for the surrounding areas.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, hydrothermal fluids, hydrothermal vents, chimneys, mineral deposits, hydrothermal processes, sub-marine volcanism, geochemistry

1. - INTRODUZIONE

A seguito del violento rilascio di gas dal fondale verificatosi nel 2002 e 2003 nell'area degli isolotti a est dell'isola di Panarea (fig. 1), sono state condotte numerose e approfondite ricerche volte a investigare la morfologia, i campi magnetico e di gravità, il rilascio di fluidi e i flussi benthici del fondale, le caratteristiche chimico-fisiche della colonna d'acqua, la mineralogia e la geochimica dei sedimenti e la biodiversità associate al complesso vulcanico sottomarino di Panarea (ALIANI *et alii*, 2010; ANZIDEI *et alii*, 2005; ANDALORO *et alii* 2008, 2012; BORTOLUZZI *et alii*, 2014; BORTOLUZZI *et alii*, 2017; BORTOLUZZI *et alii*, in prep.; CALIRO *et alii*, 2004; CAPACCIONI *et alii*, 2005; CAPACCIONI *et alii*, 2007; CARACAUSI *et alii*, 2005; CHIODINI *et alii*, 2006; ESPOSITO *et alii*, 2006; MONECKE *et alii*, 2012; PRICE *et alii*, 2015; TUDINO *et alii*, 2014). L'isola di Panarea, gli isolotti di Dattilo, Bottaro, Lisca Bianca, Lisca Nera e Panarelle (DBLP) e di Basiluzzo costituiscono la parte emersa di un edificio vulcanico molto più ampio la cui sommità è stata erosa e smussata dall'idrodinamica marina e dalla sedimentazione vulcanoclastica (ROMAGNOLI *et alii*, 2013) (fig. 1). L'attività fumarolica del complesso vulcanico di Panarea è conosciuta fin dai tempi storici; attualmente tale attività è visibile sulla spiaggia di Calcara a Panarea, a sud dell'isolotto di Basiluzzo e nel fondale circondato dagli isolotti DBLP. Tale attività è caratterizzata da rilasci di gas costituiti

prevalentemente da CO₂ e da fluidi termali con temperature fino a 140°C (ITALIANO & NUCCIO, 1991). Studi condotti nell'area (GAMBERI *et alii*, 1997; MARANI *et alii*, 1997; SAVELLI *et alii*, 1999) hanno evidenziato aree caratterizzate da depositi di solfuri, sedimenti, croste e camini di ossidi-idrossidi di ferro e affioramenti di rocce vulcaniche recenti in varie zone a nord-est, est e sud-est dell'isola di Panarea e processi di degassificazione sulla Secca dei Pesci (SE Panarea), nell'area degli isolotti e a ovest e nord di Basiluzzo.

Il fondale marino nei pressi degli isolotti, come accennato, è stato oggetto di una esplosione gassosa iniziata il 3 novembre 2002, cui è seguita una intensa attività esalativa negli anni successivi e in particolare nel 2003. Le emissioni erano costituite da una emulsione composta da una fase gassosa con 95-98% di CO₂, (CAPACCIONI *et alii*, 2005, 2007; ALIANI *et alii*, 2010) che produceva *plumes* a minore pH nella colonna d'acqua (TASSI *et alii*, 2009; ALIANI *et alii*, 2010). Le ricerche condotte con subacquei, ROV e *multibeam* a seguito dei fenomeni di degassificazione del 2002-2003 hanno evidenziato vari punti di rilascio di gas nell'area degli isolotti (ANZIDEI *et alii*, 2005; ESPOSITO *et alii*, 2006) il più intenso dei quali si trovava immediatamente a SO di Bottaro dove il gas raggiungeva la superficie dalla profondità di 15 m (BORTOLUZZI *et alii*, 2014). Il flusso in seguito all'esplosione iniziale e ai rilasci successivi ha portato all'immissione di notevoli quantità di CO₂ nella colonna d'acqua. CALIRO *et alii* (2004) hanno stimato una fuoriuscita di gas di 10⁹ L/g nel novembre 2002 in tutta l'area di emissione e da 4 a 2*10⁷ L/g da maggio a luglio 2003 nel sito di maggior emissione (PEG1). ALIANI *et alii* (2010) hanno invece prodotto una stima dei flussi di 2.6*10⁸ L/g nel dicembre 2002 e di 0.3*10⁸ L/g nel settembre 2003. Inoltre, sulla base dei dati pregressi, MONECKE *et alii* (2012) hanno ipotizzato emissioni nella colonna d'acqua di 70*10⁶ tonnellate di CO₂ negli ultimi 10.000 anni. L'attività esalativa ha comportato anche un cambiamento delle associazioni biotiche superficiali (GUGLIANDOLO *et alii*, 2006; MANINI *et alii*, 2008).

Le ricerche condotte dall'ISMAR-CNR e dall'ISPRA con diverse campagne tra il 2013 e il 2015 hanno contribuito a caratterizzare maggiormente il campo idrotermale sommerso compreso tra Panarea e Basiluzzo e a sud est di Panarea. In particolare, sono state condotte: indagini specifiche con *multibeam* e ROV per individuare morfologie, sorgenti idrotermali attive e associazioni bentoniche; rilievi con sonde multiparametriche e con sonde di pH, pCO₂ e metano e prelievi e analisi di campioni per caratterizzare la colonna d'acqua e individuare variazioni connesse con il rilascio di fluidi e gas idrotermali; misure di flussi benthici disciolti e rilasci di fluidi idrotermali dal fondale, con impiego di una camera benthica automatica; prelievo di carote di sedimento, per studiare le caratteristiche biogeochimiche, sedimentologiche, mineralogiche e micro e macro bentoniche dei fondali interessati

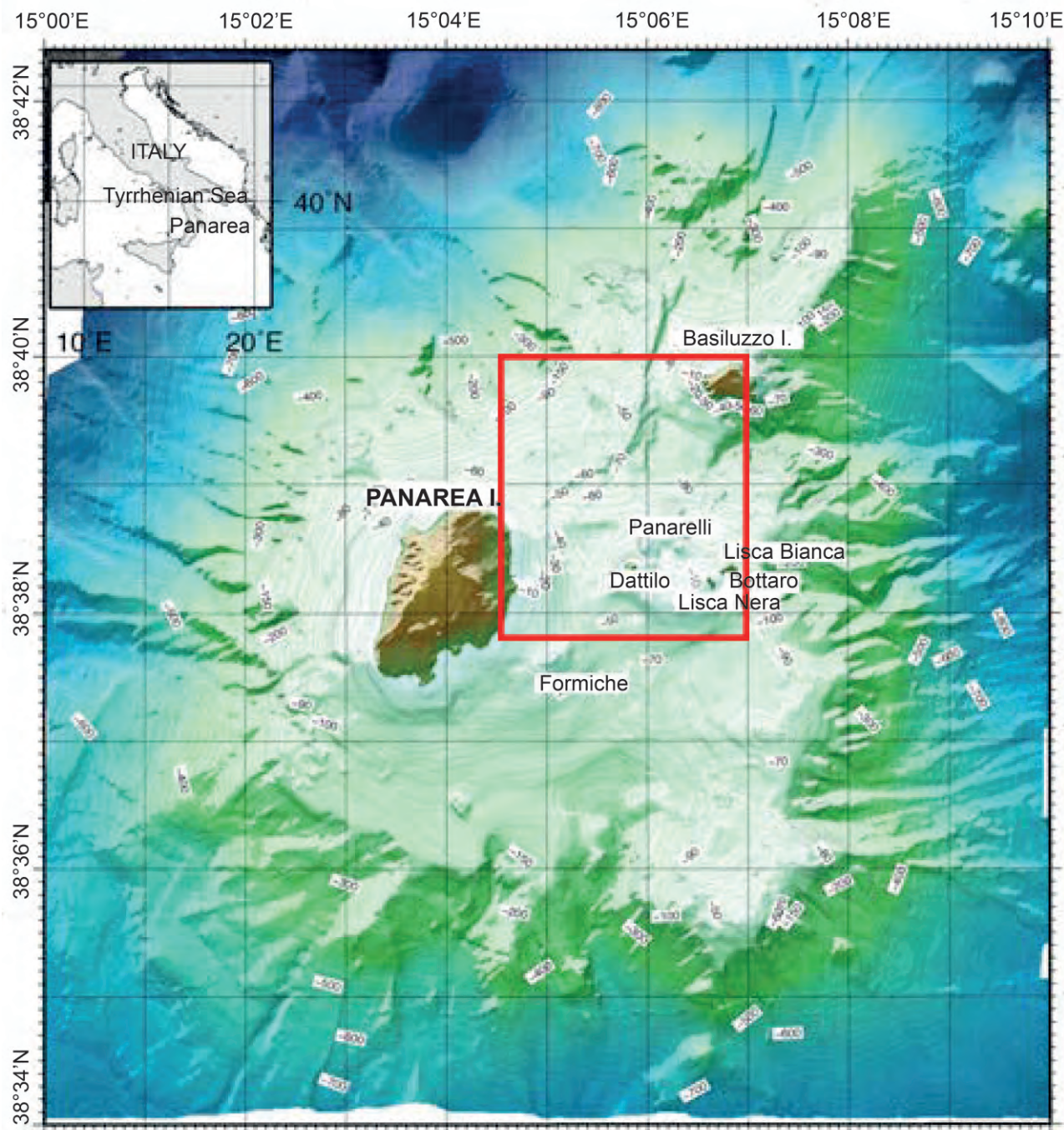


Fig. 1 - Morfologia del complesso vulcanico di Panarea con evidenziata l'area oggetto di ricerche intensive negli anni 2013-2015.
 - *Morphology of the Panarea Volcanic complex with the location of the study area of the 2013-2015 investigations.*

dall'idrotermalismo dell'area. Sui campioni della colonna d'acqua sono stati misurati alcalinità, Carbonio Inorganico Disciolto (DIC) e contenuto di metalli; con la camera benthica sono stati misurati i flussi benthici di DIC, H^+ , ossigeno ed elementi in traccia in punti specifici tra Panarea e Basiluzzo (fig. 2). Tali indagini hanno portato alla scoperta di una nuova area con idrotermalismo attualmente attivo e una morfologia del fondale caratterizzata da camini idrotermali e a una maggiore definizione di due aree con idrotermalismo attivo già individuate e parzialmente descritte da GAMBERI *et alii* (1997, 1998).

2. - NUOVE EVIDENZE DALL'AREA IDROTERMALE SOTTOMARINA TRA LE ISOLE DI PANAREA E BASILUZZO

Le indagini del 2013-2015 hanno permesso di individuare una attuale intensa attività idrotermale consistente in emanazioni fluide e gassose in tre zone situate: i) ai piedi della scarpata a nord-est dell'isola di Panarea, fino all'isolotto di Basiluzzo; ii) nell'area a nord-est degli isolotti, tra gli stessi e l'isolotto di Basiluzzo; iii) in un'area a sud-est dell'isola di Panarea (Secca dei Pesci) (fig. 2).

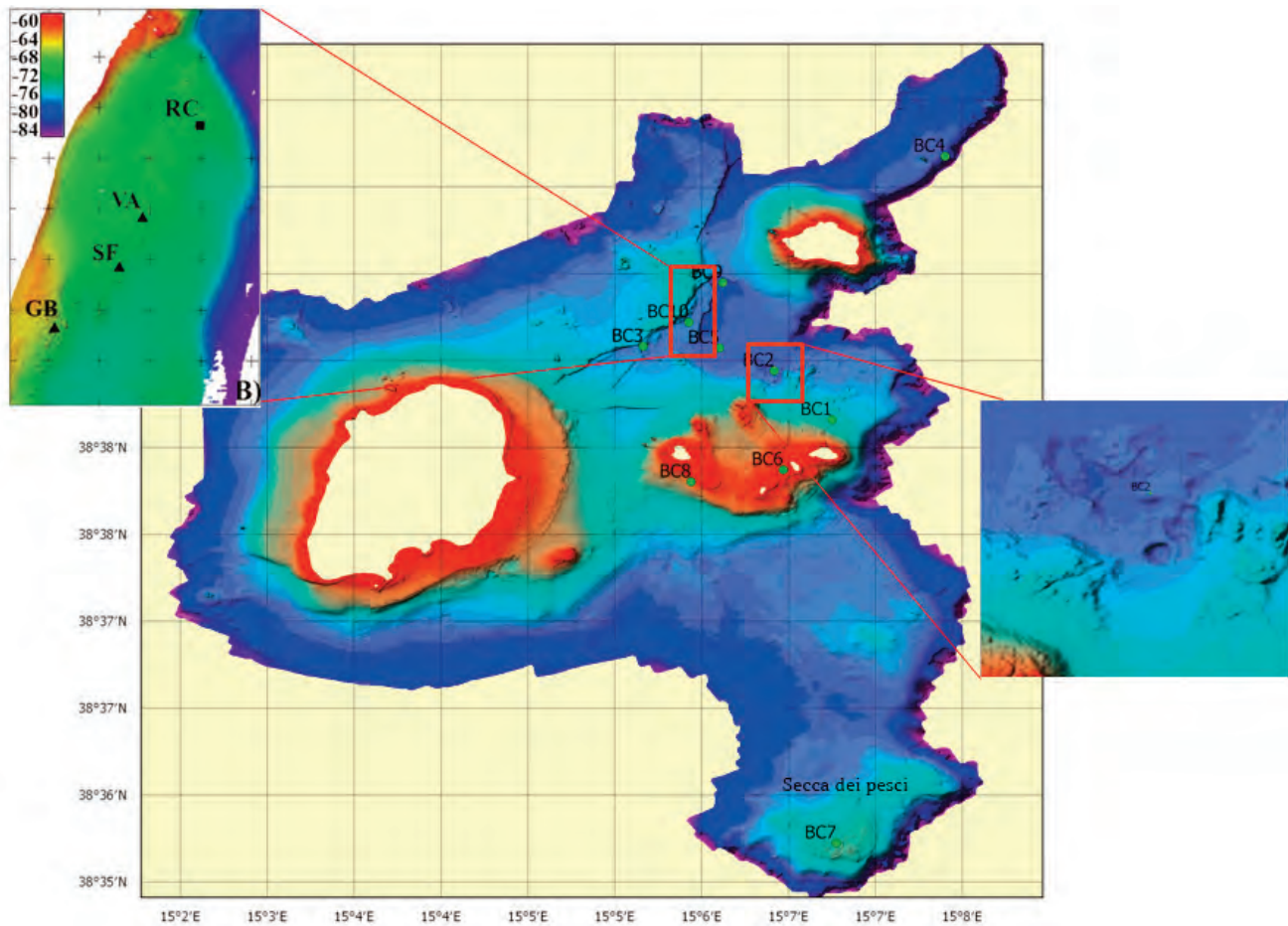


Fig. 2 - Morfologia di dettaglio del fondale tra Panarea e Basiluzzo con indicazione delle stazioni di misura dei flussi bentici (BC). Nei riquadri la zona dei camini (*Smoking Land*) e la zona delle depressioni circolari.
 - High resolution morphology of the seabed between Panarea and Basiluzzo islands with the location of the benthic flux measurement stations (BC). In the boxes the “Smoking Land” and the circular depression areas.

L'area situata alla base della scarpata tra Panarea e Basiluzzo è caratterizzata dalla presenza di un esteso e attivo campo di camini idrotermali denominato “*Smoking land*” (figg. 2, 3, 4). Il campo, individuato per la prima volta nel 2015 (ESPOSITO *et alii*, 2018) ha un'area di circa 0,5 km², allungata in direzione NE-SO (fig. 2, 3), ed è composto da più di 200 camini idrotermali di varia grandezza, con una forma generalmente conica, una inclinazione di 45-90°, un'altezza da 1 a 4 m e un diametro di base di circa 3,8 m di media (fig. 3, 4). I camini idrotermali sono attualmente in parte attivi e in parte quiescenti, quelli attivi sono sede di emissioni sia fluide che gassose.

L'area a nord-est dell'isolotto di Panarelle è invece caratterizzata da una serie di piccole depressioni circolari delle dimensioni di qualche metro (fig. 5) in parte caratterizzate da rilascio di gas e in parte inattive.

Le misure di flussi bentici disciolti hanno evidenziato: nelle due aree dei camini e delle depressioni circolari, un andamento a macchia di leopardo con siti caratterizzati da un attivo rilascio di fluidi acidi, con temperatura simile all'acqua di

fondo, particolarmente ricchi di DIC e, in misura minore, di Fe e di altri metalli in tracce (Mn, Zn, Al), e siti con flussi trascurabili; nella piana com-

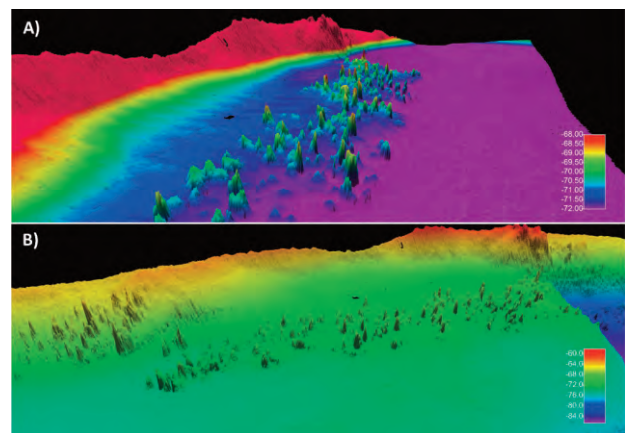


Fig. 3 - Modello tridimensionale del campo di camini idrotermali “*Smoking Land*” risultante dall'indagine *multibeam*.
 - Three-dimensional model of the hydrothermal chimneys field “*Smoking Land*” resulting from the *multibeam* investigation.

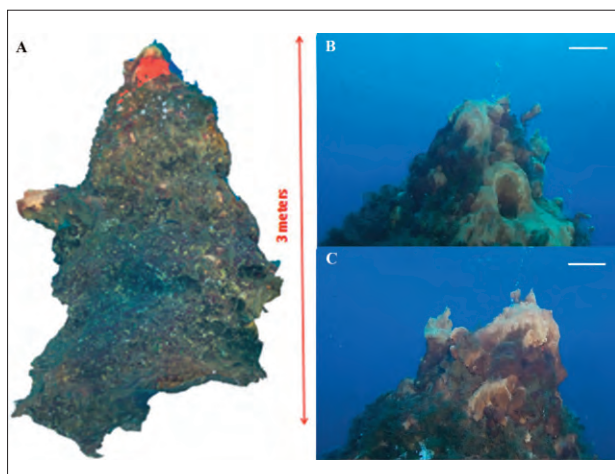


Fig. 4 - Ricostruzione di un camino idrotermale della "Smoking Land" ottenuta elaborando immagini HD riprese con il ROV.
- Reconstruction of a hydrothermal chimney of the "Smoking Land" performed on ROV HD video-image.

presa tra le due aree attive dei flussi trascurabili. La misura dei flussi bentici ha evidenziato anche un elevato rilascio di fluidi idrotermali acidi, ricchi di DIC e a temperatura ambiente ma con deboli contenuti in metalli nell'area della Secca dei Pesci.

Le misure dei parametri chimico-fisici e le analisi sui campioni di acqua hanno rilevato la presenza, nelle due aree dei camini e delle depressioni, di uno strato, nei pressi del fondale, con caratteristiche acide e con elevati contenuti di DIC e alcuni metalli, in particolare Fe, Mn e Zn, assenza di CH_4 e senza anomalie di temperature. La colonna d'acqua tra le due zone di rilascio attivo e nelle aree esterne non presenta anomalie di rilievo.

Le carote di sedimento, raccolte nelle due aree attive dei camini e delle depressioni, hanno evidenziato la presenza di uno strato superficiale di ossidi e idrossidi di ferro sopra un complesso strato sedimentario di rocce vulcaniche fortemente alterate; le carote, appena recuperate a bordo, rilasciavano grandi quantità di gas. Ciò è stato interpretato come un sedimento carico di gas la cui fuoriuscita è impedita dallo strato sigillante superficiale di ossidi e idrossidi di ferro.

L'analisi delle comunità viventi associate a questi ambienti ha evidenziato delle peculiarità raramente osservate in altri ecosistemi marini (ESPOSITO *et alii*, 2015; BORTOLUZZI *et alii*, 2017; ESPOSITO *et alii*, 2018).

Le due aree idrotermali attive dei camini e delle depressioni sono localizzate ai margini di un avvallamento allungato in direzione OSO-ENE della profondità di circa 80 m (fig. 2) senza attività idrotermale di rilievo. La depressione è il risultato di una struttura tettonica tipo *graben* delimitata dalla scarpata di Basiluzzo a NO e dagli isolotti DBLP a SE. La "Smoking land" e l'area con presenza di depressioni circolari sono quindi il risultato di una circolazione idrotermale nella quale l'acqua marina penetra nelle rocce del fondale dove incontra i gas di origine vulcanica provenienti da maggiori profondità che ne

provocano una elevata acidificazione e minore densità. Il liquido risultante tende quindi a fluire verso l'alto e a emergere, dopo aver dissolto i metalli contenuti nelle rocce attraversate, lungo delle vie preferenziali che sono i piani di faglia che si trovano lungo i fianchi del *graben*. In questo contesto si formano aree con rilascio idrotermale attivo accanto ad aree inattive ma cariche di gas in sovrappressione nel sottofondo, per la presenza di uno strato superficiale di ossidi e idrossidi di Fe che ne impedisce la fuoriuscita, e aree quiescenti per una degassificazione già avvenuta. Da questo assetto risulta che l'area idrotermale sottomarina tra le isole di Panarea e Basiluzzo potrebbe essere soggetta a future cicliche attività esplosive per una repentina degassificazione dei fondali carichi di fluidi e gas idrotermali come quella avvenuta negli anni 2002-2003, da ciò deriva la necessità di un continuo monitoraggio idoneo a prevedere possibili future situazioni di pericolo per le aree circostanti.

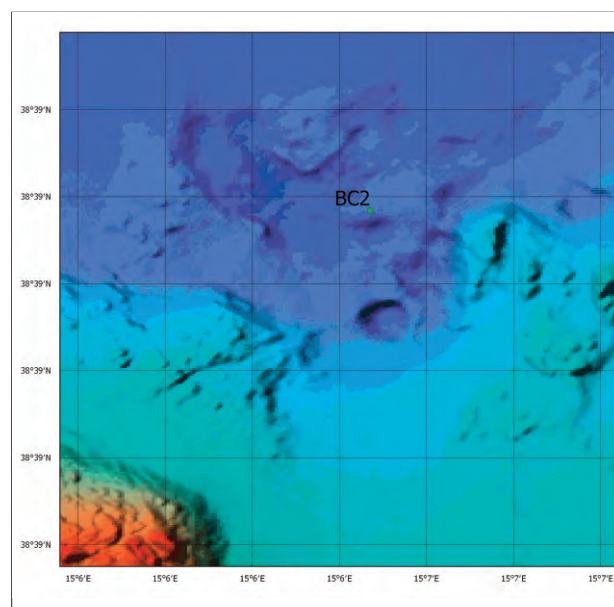


Fig. 5 - Morfologia del fondale a nord-est dell'area degli isolotti con la presenza delle numerose depressioni circolari.
- Morphology of the sea bottom to the North-East of the islets area with the circular depressions.

Ringraziamenti

Il ringraziamento più grande va a Giovanni Bortoluzzi che purtroppo ci ha lasciato e che è stato la vera anima di questo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- ALIANI S., BORTOLUZZI G., CARAMANNA G. & RAFFA F. (2010)
- Seawater dynamics and environmental settings after November 2002 gas eruption off Bottaro (Panarea, Aeolian Islands, Mediterranean Sea). *Continental Shelf Research*, **30**(12): 1338-1348.
- ANDALORO F., ROMEO T., ANCORA S. & ITALIANO F. (2008)
- La biodiversità marina in aree vulcaniche. Effetti dell'idrotermalismo sulle specie ittiche nell'area eoliana. In: P. COIRO, G.F.

- RUSSO (Ed.), I quaderni di uomo e natura n. 3: *Il Fuoco dal Mare, vulcanesimo e ambienti sottomarini*, **4**: 69-79.
- ANDALORO F., ROMEO T., RENZI M., GUERRANTI C., PERRA G., CONSOLI & FOCARDI S.E. (2012) - *Alteration of potential harmful elements levels in sediments and biota from the central Mediterranean Sea (Aeolian Archipelago) following an episode of intense volcanic activity*. *Environmental monitoring and assessment*, **184**(7): 4035-4047.
- ANZIDEI M., ESPOSITO A., BORTOLUZZI G. & DE GIOIA F. (2005) - *The high resolution bathymetric map of the exhalative area of Panarea (Aeolian Islands, Italy)*. *Annals of Geophysics*, **48**(6), 899-921.
- BORTOLUZZI G., ROMEO T., LACONO V., LA SPADA G., SMEDILE F., ESPOSITO V., SABATINO G., DI BELLA M., CANESE S., SCOTTI G., BO M., GIULIANO L., JONES D., GOLYSHIN P.N., YAKIMOV M.M. & ANDALORO F. (2017) - *Ferrous iron-and ammonium-rich diffuse vents support habitat-specific communities in a shallow hydrothermal field off the Basiluzzo Islet (Aeolian Volcanic Archipelago)*. *Geobiology*, **15**(5), 664-677.
- BORTOLUZZI G., SPAGNOLI F., ALIANI S., ROMEO T., CANESE S., ESPOSITO V., DIALTI L., COCCHI L., GRASSI M., MASSETTI G., MUCCINI F., LACONO V., YAKIMOV M., LA SPADA G., LIGI M., GIORDANO M., FRANCHI F., FERRANTE V., BORGOGNONI L., TUDINO T., GUIDERI M., IVALDI R., PRATELLESI M., MARZIANI F., NICCOLINI F., BARBIERI E., CAPACCIONI B. & ANDALORO F. (2014) - *New geological, geophysical and biological insights on the hydrothermal system of the Panarea Basiluzzo Volcanic complex (Aeolian Islands, Tyrrhenian Sea)*. In: B. CESARE, E. ERBA, B. CARMINA, L. FASCIO, F.M. PETTI & A. ZUCCARI (Eds). *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, **31**, Supplemento n. 1 - Settembre 2014, p. 403. ISSN 2035-8008, doi: 10.3301/ROL.2014.140.
- CALIRO S., CARACAUSI A., CHIODINI G., DITTA M., ITALIANO F., LONGO M., MINOPOLI C., NUCCIO P.M., PAONITA A. & RIZZO A. (2004) - *Evidence of a recent input of magmatic gases into the quiescent volcanic edifice of Panarea, Aeolian Islands, Italy*. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L07619.
- CAPACCIONI B., TASSI F., VASELLI O., TEDESCO D. & POREDA R. (2007) - *Submarine gas burst at Panarea Island (southern Italy) on 3 November 2002: A magmatic versus hydrothermal episode*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**, B05201.
- CAPACCIONI B., TASSI F., VASELLI D., TEDESCO D. & ROSSI P.L. (2005) - *The November 2002 degassing event at Panarea Island (Italy): the results of a 5 months geochemical monitoring program*. *Ann. Geophys.*, **48**(4-5): 755-765.
- CARACAUSI A., DITTA M., ITALIANO F., LONGO M., NUCCIO P.M., PAONITA A. & RIZZO A. (2005) - *Changes in fluid geochemistry and physico-chemical conditions of geothermal systems caused by magmatic input: The recent abrupt outgassing of the island of Panarea (Aeolian Islands, Italy)*. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **69**(12): 3045-3059.
- CHIODINI G., CALIRO S., CARAMANNA G., GRANIERI D., MINOPOLI C., MORETTI R., PERROTTA L. & VENTURA G. (2006) - *Geochemistry of the submarine gaseous emissions of Panarea (Aeolian Islands, Southern Italy): magmatic vs. hydrothermal origin and implications for volcanic surveillance*. *Pure Appl. Geophys.*, **163**(4): 759-780.
- ESPOSITO V., ANDALORO F., CANESE S., BORTOLUZZI G., BO M., DI BELLA M., ITALIANO F., SABATINO G., BATTAGLIA P., CONSOLI P., GIORDANO P., SPAGNOLI F., LA CONO V., YAKIMOV M.M., SCOTTI G. & ROMEO T. (2018) - *Exceptional discovery of a shallow-water hydrothermal site in the SW area of Basiluzzo islet (Aeolian archipelago, South Tyrrhenian Sea): An environment to preserve*. *PLoS ONE* **13**(1): e0190710: 1-27, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190710>.
- ESPOSITO V., GIACOBBE S., COSENTINO A., MINERVA C.S., ROMEO T., CANESE S. & ANDALORO F. (2015) - *Distribution and ecology of the tube-dweller *Ampelisca ledoyeri* (Amphipoda: Ampeliscidae) associated to the hydrothermal field off Panarea Island (Tyrrhenian Sea, Mediterranean)*. *Marine Biodiversity*, **45**: 763-768. doi:10.1007/s12526-014-0285-5.
- ESPOSITO A., GIORDANO G. & ANZIDEI M. (2006) - *The 2002-2003 submarine gas eruption at Panarea volcano (Aeolian Islands, Italy): Volcanology of the seafloor and implications for the hazard scenario*. *Marine Geology*, **227**(1), 119-134.
- GAMBERI F., MARANI M. & SAVELLI C. (1997) - *Tectonic, volcanic and hydrothermal features of a submarine portion of the Aeolian arc (Tyrrhenian Sea)*. *Marine Geology*, **140**: 167-181.
- GAMBERI F., SAVELLI C., MARANI M.P., LIGI M., BORTOLUZZI G., LANDUZZI V. & COSTA M. (1998) - *Contesto morfotettonico e depositi idrotermali di solfuri ed ossidi di ferro in una porzione sommersa dell'arco eoliano (in base ad indagini ad alta definizione)*. *Bollettino della Società Geologica italiana*, **117**: 55-71.
- GUGLIANDOLO C., ITALIANO F. & MAUGERI T. (2006) - *The submarine hydrothermal system of Panarea (Southern Italy): biogeochemical processes at the thermal fluids - sea bottom interface*. *Ann. Geophys.*, **49**(2-3), 783-792.
- ITALIANO F. & NUCCIO P.M. (1991) - *Geochemical investigations of submarine volcanic exhalations to the east of Panarea, Aeolian Islands, Italy*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **46**(1-2): 125-141.
- MANINI E., LUNA G.M., CORINALDESI C., ZEPELLI D., BORTOLUZZI G., CARAMANNA G., RAFFA F. & DANOVARO R. (2008) - *Prokaryote diversity and virus abundance in shallow hydrothermal vents of the Mediterranean Sea (Panarea Island) and the Pacific Ocean (North Sulawesi-Indonesia)*. *Microbial Ecol.*, **55**(4): 626-639.
- MARANI M.P., GAMBERI F. & SAVELLI C. (1997) - *Shallow-water polymetallic sulfide deposits in the Aeolian island arc*. *Geology*, **25**: 815-818.
- MONECKE T., PETERSEN S., HANNINGTON M.D., ANZIDEI M., ESPOSITO A., GIORDANO G., GARBE-SCHÖNBERG D., AUGUSTIN N., MELCHERT B. & HOCKING M. (2012) - *Explosion craters associated with shallow submarine gas venting off Panarea island, Italy*. *Bulletin of volcanology*, **74**(9): 1937-1944.
- PRICE R.E., LA ROWE D.E., ITALIANO F., SAVOV I., PICHLER T. & AMEND J.P. (2015) - *Subsurface hydrothermal processes and the bioenergetics of chemolithoautotrophy at the shallow-sea vents off Panarea Island (Italy)*. *Chemical Geology*, **407**: 21-45.
- ROMAGNOLI C., CASALBORE D., BORTOLUZZI G., BOSMAN, A., CHIOCCI F.L., D'ORIANO F., GAMBERI F., LIGI M. & MARANI M. (2013) - *Bathy-morphological setting of the Aeolian Islands*. *Geological Society, London, Memoirs*, **37**(1): 27-36.
- SAVELLI C., MARANI M. & GAMBERI F. (1999) - *Geochemistry of metalliferous, hydrothermal deposits in the Aeolian arc (Tyrrhenian Sea)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **88**(4): 305-323.
- TASSI F., CAPACCIONI B., CARAMANNA G., CINTI D., MONTEGROSSI G., PIZZINO L., QUATTROCCHI F. & VALSELLI O. (2009) - *Low-pH waters discharging from submarine vents at Panarea Island (Aeolian Islands, southern Italy) after the 2002 gas blast: origin of hydrothermal fluids and implications for volcanic surveillance*. *Appl. Geochem.*, **24**(2): 246-254.
- TUDINO T., BORTOLUZZI G. & ALIANI S. (2014) - *Shallow-water gaseohydrothermal plume studies after massive eruption at Panarea, Aeolian Islands, Italy*. *Journal of Marine Systems*, **131**: 1-9.

Isole Eolie: i campi di emissioni vulcaniche sottomarine di CO₂ a Vulcano e Panarea

Aeolian Islands: submerged CO₂ volcanic emission fields of Vulcano and Panarea

VIZZINI S.(*)(**), ANDOLINA C.(*), CARUSO C.(***), CORBO A.(***),
GUGLIANDOLO C.(****), LAZZARO G.(***), LONGO M.(***),
ITALIANO F.(***), MAZZOLA A.(*)(**)

RIASSUNTO - L'Arcipelago delle Isole Eolie si è originato circa un milione di anni fa da un'intensa attività vulcanica, che prosegue ancora oggi in alcune delle sette isole che lo compongono e nei circostanti fondali marini. Due delle isole, Vulcano e Panarea, sono caratterizzate dalla presenza di sorgenti di emissioni idrotermali sottomarine che rilasciano prevalentemente CO₂ in ambiente marino, inducendo una significativa riduzione dei normali livelli di pH. Questo fenomeno costante rende tali ambienti interessanti per lo studio degli effetti dell'acidificazione marina, sia in termini di alterazioni chimico-fisiche che di effetti biologici ed ecologici sugli organismi marini che li popolano. Qui presentiamo brevemente le principali caratteristiche geologiche ed ecologiche dei siti più studiati delle isole di Vulcano e Panarea, basandoci sulla letteratura scientifica prodotta principalmente dall'INGV e dalle Università degli Studi di Messina e Palermo.

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, sorgenti sottomarine di CO₂, acidificazione oceanica, comunità bentonica, geosito, Mar Tirreno

ABSTRACT - The Archipelago of the Aeolian Islands originated about one million years ago from an intense volcanic activity, which continues nowadays in some of the seven islands that compose the archipelago and also in the surrounding sea floor. Two islands, Vulcano and Panarea, are characterized by the presence of subsurface hydrothermal vents that release high concentrations of CO₂ in the marine environment, inducing significant reduction of normal pH levels. This constant phenomenon renders these sites interesting for the study of the effects of ocean acidification, both in terms of chemical-physical alterations and biological and ecological effects on the marine organisms that inhabit them. Here, we present briefly the main geological and ecological features of the most studied sites of the islands of Vulcano and Panarea, based on the scientific literature produced mainly by INGV and the Universities of Messina and Palermo.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, CO₂ vents, ocean acidification, benthic community, geosite, Tyrrhenian Sea

1. - INTRODUZIONE

L'arcipelago delle Isole Eolie, situato nel Mar Tirreno meridionale a largo della costa nord-orientale della Sicilia, è costituito da sette isole principali (Lipari, Vulcano, Salina, Stromboli, Filicudi, Alicudi e Panarea) e da numerosi *seamount* di origine vulcanica. La formazione dell'arcipelago ha avuto luogo circa un milione di anni fa, in seguito al processo di subduzione indotto dallo scorrimento della litosfera del Mar Ionio sotto l'arco calabro (BECCALUVA *et alii*, 1985; SAVELLI *et alii*, 1999). L'attività vulcanica, ancora oggi in corso in alcune delle isole e nei fondali marini circostanti, ha richiamato l'interesse di numerosi studiosi a livello mondiale a partire dal XVIII secolo. Ed è proprio sulla base dello studio dell'attività vulcanica eoliana che sono state definite due tipologie di attività eruttive, la vulcanica e la stromboliana. Dal 2000, le Isole Eolie sono inoltre state riconosciute patrimonio dell'umanità dall'UNESCO per il loro pregio naturalistico.

Due delle sette isole dell'arcipelago, Vulcano e Panarea, sono caratterizzate dalla presenza di note sorgenti di emissioni idrotermali sottomarine, la cui costante attività di degassamento si origina generalmente da un *vent* primario e si estende su una superficie più ampia, variabile a seconda delle caratteristiche del sito.

La caratterizzazione geochemica dei gas emessi ha rivelato la presenza dominante di CO₂ (BOATTA *et alii*, 2013). Una conseguenza naturale del rilascio di CO₂ in ambiente acquatico è l'abbassamento dei valori di pH, che non solo induce significative alterazioni chimico-fisiche, ma ha anche importanti ripercussioni sulla componente biologica che po-

(*)Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo, via Archirafi 18, 90123 Palermo

(**)Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare, CoNISMa, Piazzale Flaminio 9, 00196 Roma

(***)Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153, Palermo

(****) Dipartimento di Scienze Chimiche, Biologiche, Farmaceutiche e Ambientali, Università degli Studi di Messina, Viale F. Stagno d'Alcontres 31, 98166 Messina

pola questi ambienti (CATTANO *et alii*, 2016; VIZZINI *et alii*, 2017; BROWN *et alii*, 2018). Le basse profondità a cui le sorgenti di CO₂ sono localizzate e dunque la relativa facilità di raggiungimento, rende questi ambienti particolarmente adatti ad essere utilizzati come laboratori naturali per lo studio degli effetti dell'acidificazione marina sugli organismi acquatici e permette di testare gli effetti degli scenari stimati dai modelli previsionali dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), secondo i quali il pH marino potrebbe ridursi di 0.06-0.32 unità entro il 2100 (IPCC, 2014).

Una cospicua produzione scientifica, ha investigato rispettivamente la natura di queste sorgenti e gli effetti delle alterazioni indotte dall'acidificazione sulle comunità biotiche, e di seguito è presentato un breve sunto delle caratteristiche principali dei siti più studiati e localizzati nelle Isole di Vulcano e Panarea.

2. - VULCANO

L'Isola di Vulcano, nota per il suo cratere attivo, La Fossa, e le numerose fumarole solforose che possono raggiungere i 400-550 °C, presenta uno dei campi di emissioni vulcaniche sottomarine di CO₂ più attivi e studiati. La sorgente primaria si trova nella Baia di Levante (38°25.057'N; 14°57.599'E, figura 1), a partire dalla quale le emissioni si estendono per lo più parallelamente alla costa, a causa dell'azione dei venti provenienti da nord-ovest, e tracciano un gradiente di pH che va da 6.40 a 8.16 (BOATTA *et alii*, 2013). Complessivamente, però, la variabilità dei parametri chimico-fisici è piuttosto elevata all'interno della baia, il che suggerisce che lo scambio d'acqua tra la baia e il mare aperto, insieme all'azione dei venti dominanti nell'area influenzano l'estensione dell'area interessata dai *vent* (BOATTA *et alii*, 2013). Secondo studi

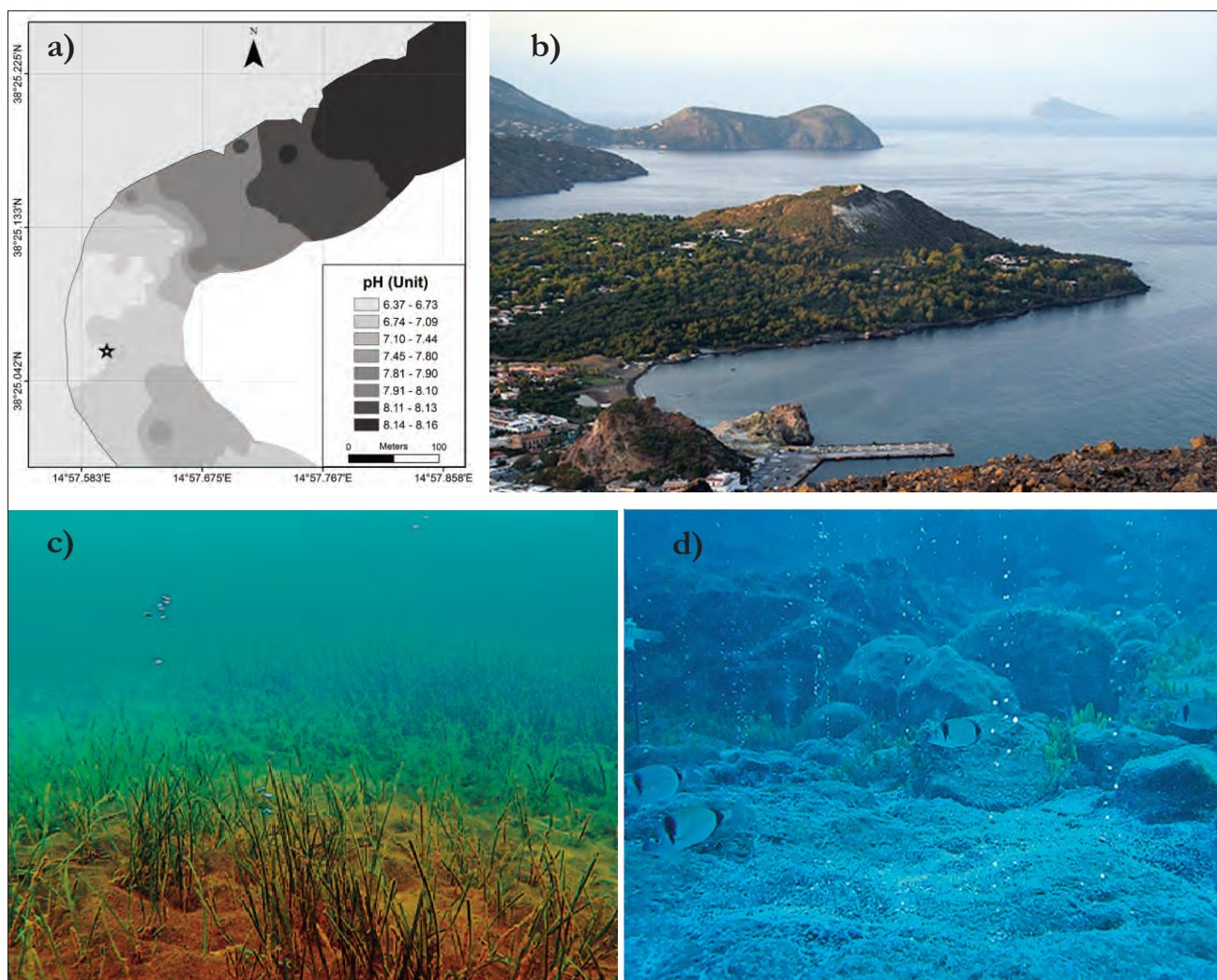


Fig. 1 - Baia di Levante presso l'Isola di Vulcano: a) mappa della baia in cui la stella indica la posizione del *vent* primario, mentre le differenti tonalità della scala di grigi indicano i livelli di pH registrati nella baia, come da legenda. Figura riadattata da VIZZINI *et alii* (2013); b) vista della baia dal cratere La Fossa; c) e d) fotografie subacquee di due siti della baia. In c) il substrato è colonizzato da una prateria di *Cymodocea nodosa*, in d) risulta scarsamente vegetato dalla macroalghe *Caulerpa prolifera*.

- Levante Bay in Vulcano Island: a) map of the bay where the star indicates the position of the primary vent, while the different shades of gray color indicate the levels of pH recorded in the bay, as in the legend. Figure adapted from VIZZINI *et alii* (2013); b) view of the bay from La Fossa crater; c) and d) underwater pictures of two sites of the bay. In c) the sediment is covered by *Cymodocea nodosa*, in d) the sediment is barely vegetated with the macroalgae *Caulerpa prolifera*.

precedenti (BAUBRON *et alii*, 1990; SEDWICK & STUBEN 1996; CAPACCIONI *et alii*, 2001), la composizione dei gas emessi è costituita prevalentemente da CO₂ (per circa il 97-99% vol.), mentre piccole concentrazioni di gas tossici come H₂S (che non superano il 2.2%) sembrano essere limitate al *vent* primario e diminuiscono nettamente su brevi distanze (20 m). Inoltre, come effetto indiretto dell'acidificazione dell'area, che può alterare le condizioni e le proprietà dei sedimenti, VIZZINI *et alii* (2013) hanno trovato una certa contaminazione dei sedimenti da parte di elementi in tracce come Ba, Fe, As, Cd, che seppur definita "bassa" secondo i comuni indici di inquinamento dei sedimenti, può influenzare l'area situata a circa 150-350 m dalla sorgente primaria.

La flora e la fauna marina presenti nell'area sono state oggetto di numerosi studi nell'ultimo decennio, volti ad esaminare gli adattamenti all'acidificazione e i possibili "vincitori e perdenti" del cambiamento in atto, sia in termini di fisiologia delle specie che di struttura delle comunità investigate. La baia, che ha una profondità compresa tra 1 e 3 m, ospita a partire da circa 200 m di distanza dal *vent* primario una prateria piuttosto disomogenea (con distribuzione a *patch*) della fanerogama *Cymodocea nodosa*, che si alterna a specie macroalgali del genere *Caulerpa* e *Dyctiota* (APOSTOLAKI *et alii*, 2014). I gruppi tassonomici strettamente dipendenti dalla chimica dei carbonati, come i molluschi gasteropodi, mostrano evidenti segni di corrosione delle conchiglie (DUQUETTE *et alii*, 2017), altri come i foraminiferi tendono a modificare le associazioni (PETTIT *et alii*, 2015), e alterazioni sono state rinvenute anche nella struttura degli otoliti (MIRASOLE *et alii*, 2017) e nel comportamento riproduttivo di alcune specie ittiche (MILAZZO *et alii*, 2016).

Dal punto di vista trofico si assiste ad una semplificazione della struttura della rete trofica bentonica (VIZZINI *et alii*, 2017). Tuttavia alcune specie sembrano giovare delle condizioni alterate di questi ambienti, è il caso dell'anemone di mare (*Anemonia viridis*) che mostra un'elevata densità nella baia di Levante e si trova distribuita su tutto il campo di emissioni di CO₂ (SUGGETT *et alii*, 2012). Inoltre studi sulla biodiversità delle comunità di batteri termofili hanno portato alla scoperta di nuovi ceppi pienamente adattati alle condizioni estreme di questi siti (MAUGERI *et alii*, 2002).

3. - PANAREA

L'Isola di Panarea, insieme agli isolotti e agli scogli circostanti, rappresenta la parte emersa di un vulcano sottomarino alto più di 2 km e largo all'incirca 20 km, smantellato nel tempo dall'erosione marina e da processi tettonici (GABBIANELLI *et alii*, 1993; GAMBÈRI *et alii*, 1997; CHIOCCI & ROMAGNOLI 2004) (fig. 2). L'isola è sede di numerosi geositi, sia terrestri che marini, che tutelano la geodiversità di quest'area di elevato interesse vulcanologico.

A largo della costa orientale, tra gli isolotti di Basiluzzo, Lisca Bianca, Bottaro, Lisca Nera, Dattilo e Panarelli è collocato il geosito "Fumarole di Basiluzzo a Panarea" (38°38.340'N, 15°06.378'E, D.A. Regione Siciliana n. 106 del 15/04/2015), in corrispondenza di un campo geotermico ampio all'incirca 4 km² (GABBIANELLI *et alii*, 1990) e storicamente noto per la sua attività fumarolica, i cui effetti sono stati osservati già nel periodo storico a.C. (Storia Geofisica Ambientale, 1996; ESPOSITO *et alii*, 2006). Il campo è caratterizzato da emissioni idrotermali sottomarine poste a basse profondità, circa 10-15 m (ITALIANO & NUCCIO, 1991; INGUAGGIATO & ITALIANO, 1998). Le emissioni fluide raggiungono la colonna d'acqua attraverso delle fratture e sono state identificate anche numerose aree in cui acque calde e gas permeano attraverso la sabbia del fondale marino (GUGLIANDOLO *et alii*, 2006). ITALIANO & NUCCIO (1991) hanno stimato che i gas e le acque termali fuoriescono da queste sorgenti sottomarine con un flusso di circa 10⁶-10⁷ L al giorno, mentre GUGLIANDOLO *et alii* (2006) hanno registrato che i flussi raggiungono valori di temperatura tra 48 e 54°C e valori di pH intorno a 4.7-5.4. Anche in questo sito, la composizione dei gas emessi è costituita principalmente da CO₂. Il 3 novembre 2002, in concomitanza con un evento sismico di bassa magnitudo (<1.8) registrato nell'area (SACCOROTTI *et alii*, 2003), si è verificato l'ultimo evento degassante esplosivo (CARACAUSI *et alii*, 2005) che ha portato alla formazione di un cratere largo circa 20x14 m e profondo circa 10 m in corrispondenza della sorgente primaria, vicino all'Isolotto di Bottaro, rendendo il sistema altamente energetico per circa un anno (CAPACCIONI *et alii*, 2005). Successive campagne esplorative condotte con il supporto di sistemi ROV (*Remotely Operated Vehicle*) hanno portato, nel 2015, alla scoperta di un nuovo sistema idrotermale situato a sud-ovest dell'Isolotto di Basiluzzo a circa 70-80 m di profondità. Il sistema è stato chiamato "*smoking land*" per la presenza di oltre 200 camini vulcanici, generalmente di forma conica, alti da 1 a 4 m, alcuni dei quali risultano attivi ed emettono una miscela di acque calde e gas (ESPOSITO *et alii*, 2018).

Studi recenti inerenti le comunità biotiche dell'area sono stati condotti a diversi livelli. Mentre GUGLIANDOLO *et alii* (2015) hanno caratterizzato la composizione della comunità procariotica, BELLISSIMO *et alii* (2014) si sono occupati di descrivere la comunità delle macroalghe bentoniche, che risulta essere costituita principalmente dalla specie *Cystoseira brachycarpa*. Infine, VIZZINI *et alii* (2010) hanno esaminato gli effetti dell'evento esplosivo del 2002 sulla crescita di una delle specie più importanti dell'area, la fanerogama marina *Posidonia oceanica*, specie endemica del Mediterraneo, che forma praterie a circa 10-15 m di profondità, nella zona compresa tra gli isolotti di Dattilo, Lisca Bianca, Bottaro e Lisca Nera. Un recente contributo di GUILINI *et alii* (2017), ha inoltre approfondito lo studio sulle caratteristiche morfologiche di questa importante pianta e sulla struttura della comunità epibionte associata.

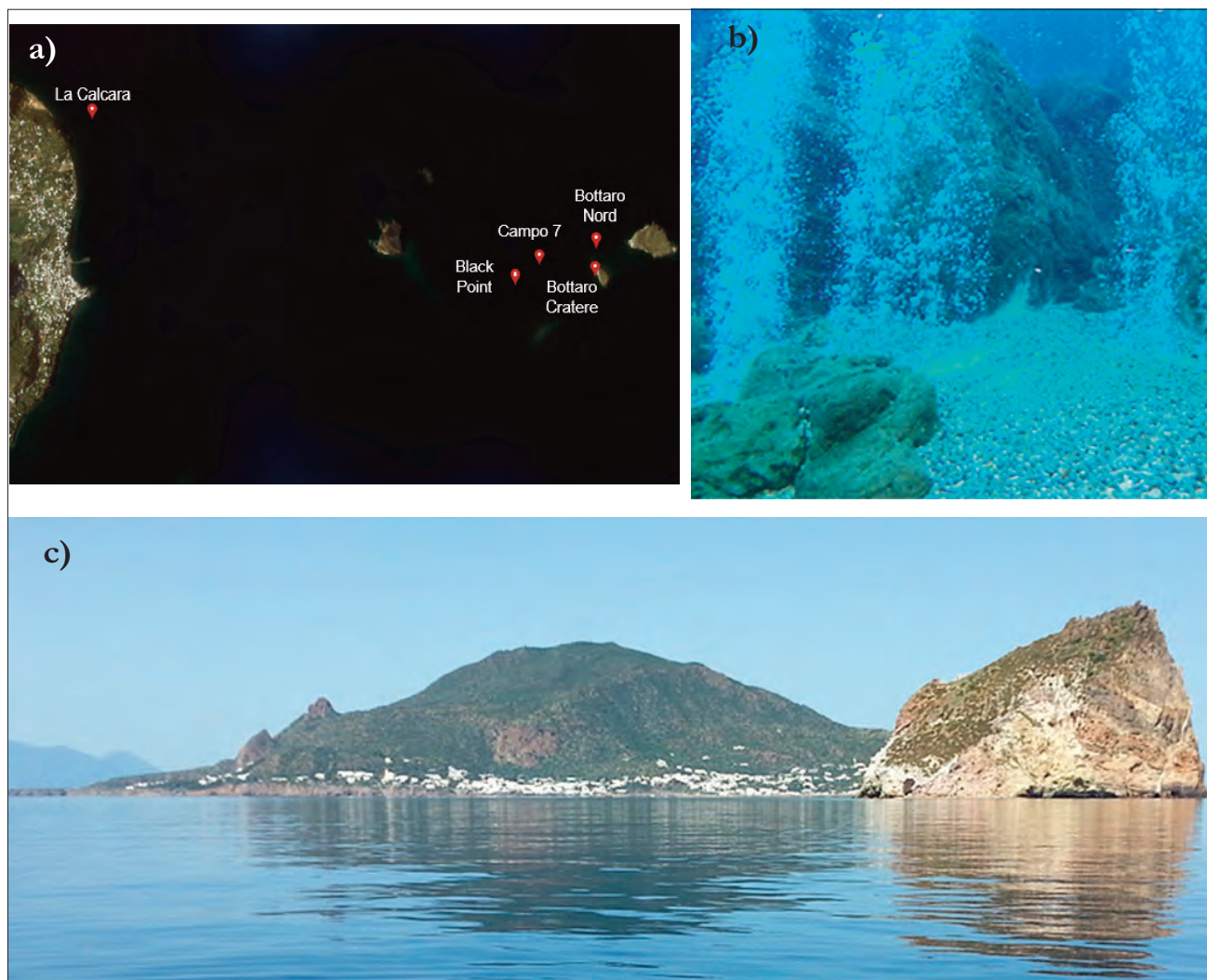


Fig. 2 - Isola di Panarea: a) mappa dell'area in cui i punti rossi indicano la posizione delle emissioni idrotermali sommerse; b) fondale adiacente all'Isolotto di Bottaro – campo idrotermale; c) vista dell'Isola di Panarea e dell'Isolotto di Dattilo.

- Panarea Island: a) map where the red points indicate the position of submarine hydrothermal emissions; b) seafloor close to Bottaro Islet - hydrothermal field; c) view of the Panarea Island and the little Islet Dattilo.

BIBLIOGRAFIA

- APOSTOLAKI E.T., VIZZINI S., HENDRIKS I.E. & OLSEN Y.S. (2014) - *Seagrass ecosystem response to long-term high CO₂ in a Mediterranean volcanic vent*. *Mar. Environ. Res.*, **99**: 9-15.
- BAUBRON J.C., ALLARD P. & TOUTAIN J.P. (1990) - *Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy*. *Nature*, **344**: 51-53.
- BECCALUVA L., GABBIANELLI G., LUCCHINI F., ROSSI P.L. & SAVELLI C. (1985) - *Petrology and K/Ar ages of volcanics dredged from the Eolian seamounts: implications for geodynamic evolution of the southern Tyrrhenian basin*. *Earth Planet Sci. Lett.*, **74**: 187-208.
- BELLISSIMO G., RULL LLUCH J., TOMASELLO A. & CALVO S. (2014) - *The community of *Cystoseira brachycarpa* J. Agardh emend. Giaccone (Fucales, Phaeophyceae) in a shallow hydrothermal vent area of the Aeolian Islands (Tyrrhenian Sea, Italy)*. *Plant Biosyst.*, **148**(1): 21-26.
- BOATTA F., D'ALESSANDRO W., GAGLIANO A.L., LIOTTA, M., MILAZZO M., RODOLFO-METALPA R. & PARELLO F. (2013) - *Geochemical survey of Levante Bay, Vulcano Island (Italy), a natural laboratory for the study of ocean acidification*. *Mar. Pollut. Bull.*, **73**: 485-94.
- BROWN N.E.M., MILAZZO M., RASTRICK S.P.S., HALL-SPENCER J.M., THERRIAULT T.W. & HARLEY C.D.G. (2018) - *Natural acidification changes the timing and rate of succession, alters community structure, and increases homogeneity in marine biofouling communities*. *Glob. Chang. Biol.*, **24**(1): e112-e127.
- CAPACCIONI B., TASSI F. & VASELLI O. (2001) - *Organic and inorganic geochemistry of low temperature gas discharges at the Baia di Levante beach, Vulcano Island, Italy*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **108**: 173-185.
- CAPACCIONI B., TASSI F., VASELLI D., TEDESCO D. & ROSSI P.M.L. (2005) - *The November 2002 degassing event at Panarea Island, Italy: the results of a 5 months geochemical monitoring program*. *Ann. Geophys.*, **48**: 755-765.
- CARACAUSI A., DITTA M., ITALIANO F., LONGO M., NUCCIO P.M. & PAONITA A. (2005) - *Massive submarine gas output during the volcanic unrest off Panarea Island (Aeolian arc, Italy): inferences for explosive conditions*. *Geochem. J.*, **39**: 459-467.
- CATTANO C., GIOMI F. & MILAZZO M. (2016) - *Effects of ocean acidification on embryonic respiration and development of a temperate wrasse living along a natural CO₂ gradient*. *Conserv. Physiol.*, **4**: 1-10.

- CHIOCCI F.L. & ROMAGNOLI C. (2004) - *Submerged depositional terraces in the Aeolian Islands (Sicily)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **58**: 49-64.
- DUQUETTE A., MCCLINTOCK J.B., AMSLER C.D., PÉREZ-HUERTA A., MILAZZO M. & HALL-SPENCER, J.M. (2017) - *Effects of ocean acidification on the shells of four Mediterranean gastropod species near a CO₂ seep*. Mar. Pollut. Bull., **124**(2): 917-928.
- ESPOSITO A., GIORDANO G. & ANZIDEI M. (2006) - *The 2002-2003 submarine gas eruption at Panarea volcano (Aeolian Islands, Italy): Volcanology of the seafloor and implications for the hazard scenario*. Mar. Geol., **227**: 119-134.
- ESPOSITO V., ANDALORÒ F., CANESE S., BORTOLUZZI G., BO M., DI BELLA M., ITALIANO F., SABATINO G., BATTAGLIA P., CONSOLI P., GIORDANO P., SPAGNOLI F., LA CONO V., YAKIMOV M.M., SCOTTI G. & ROMEO T. (2018) - *Exceptional discovery of a shallow-water hydrothermal site in the SW area of Basiluzzo islet (Aeolian archipelago, South Tyrrhenian Sea): An environment to preserve*. PLoS ONE, **13**(1): 1-27.
- GABBIANELLI G., GILLOT P.Y., LANZAFAME G., ROMAGNOLI C. & ROSSI P.L. (1990) - *Tectonic and volcanic evolution of Panarea (Aeolian Island, Italy)*. Mar. Geol., **92**: 313-326.
- GABBIANELLI G., ROMAGNOLI C., ROSSI P.L. & CALANCHI N. (1993) - *Marine geology of Panarea-Stromboli area Aeolian Archipelago, Southeastern Tyrrhenian sea*. Acta Vulcanol., **3**: 11-20.
- GAMBERI F., MARANI P.M. & SAVELLI C. (1997) - *Tectonic volcanic and hydrothermal features of submarine portion of Aeolian arc (Tyrrhenian Sea)*. Mar. Geol., **140**: 167-181.
- GUGLIANDOLO C., ITALIANO F. & MAUGERI T.L. (2006) - *The submarine hydrothermal system of Panarea (Southern Italy): biogeochemical processes at the thermal fluids-sea bottom interface*. Ann. Geophys., **49**: 783-792.
- GUGLIANDOLO C., LENTINI V., BUNK B., OVERMANN J., ITALIANO F. & MAUGERI T.L. (2015) - *Changes in prokaryotic community composition accompanying a pronounced temperature shift of a shallow marine thermal brine pool (Panarea Island, Italy)*. Extremophiles, **19**(3): 547-559.
- GULINI K., WEBER M., DE BEER D., SCHNEIDER M., MOLARI M., LOTT C., BODNAR W., MASCART T., DE TROCH M. & VANREUSEL A. (2017) - *Response of Posidonia oceanica seagrass and its epibiont communities to ocean acidification*. PLoS ONE, **12**(8): e0181531.
- INGUAGGIATO S. & ITALIANO F. (1998) - *Helium and carbon isotopes in submarine gases from the Aeolian arc (Southern Italy)*. Proceeding of the 9th International Symposium on Water-Rock Interaction-WRI9, 30 March-3 April 1998, Taupo, New Zealand, Aerehart and Hulston Rotterdam, 727-730.
- IPCC (2014) - *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland: 151 pp.
- ITALIANO F. & NUCCIO P.M. (1991) - *Geochemical investigations of submarine volcanic exhalations to the east of Panarea, Aeolian Islands, Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **46**: 125-141.
- MAUGERI T.L., GUGLIANDOLO C., CACCAMO D. & STACKEBRANDT E. (2002) - *Three novel halotolerant and thermophilic Geobacillus strains from shallow marine vents*. Syst. Appl. Microbiol., **25**(3): 450-455.
- MILAZZO M., CATTANO C., ALONZO S.H., FOGGO A., GRISTINA M., RODOLFO-METALPA R., SINOPOLI M., SPATAFORA D., STIVER K.A. & HALL-SPENCER J.M. (2016) - *Ocean acidification affects fish spawning but not paternity at CO₂ seeps*. Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci., **283**, pii: 20161021.
- MIRASOLE A., GILLANDERS B.M., REIS-SANTOS P., GRASSA F., CAPASSO G., SCOPELLITI G., MAZZOLA A. & VIZZINI S. (2017) - *The influence of high pCO₂ on otolith shape, chemical and carbon isotope composition of six coastal fish species in a Mediterranean shallow CO₂ vent*. Mar. Biol., **164**: 191.
- PETTTT L.R., SMART C.W., HART M.B., MILAZZO M. & HALL-SPENCER J.M. (2015) - *Seaweed fails to prevent ocean acidification impact on foraminifera along a shallow-water CO₂ gradient*. Ecol. Evol.: 1-10.
- SACCOROTTI G., GALLUZZO D., LA ROCCA M., DEL PEZZO E. & PATANÈ D. (2003) - *Monitoraggio dell'attività sismica a Panarea*. INGV-GNV General Assembly, Rome, 9-11, June.
- SAVELLI C., MARANI M. & GAMBERI F. (1999) - *Geochemistry of metalliferous, hydrothermal deposits in the Aeolian arc (Tyrrhenian Sea)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **88**: 305-323.
- SEDWICK P. & STUBEN D. (1996) - *Chemistry of shallow submarine warm springs in an arc-volcanic setting: Vulcano Island, Aeolian Archipelago, Italy*. Mar. Chem., **53**: 147-161.
- STORIA GEOFISICA AMBIENTALE (1996) - *Fenomeni vulcanici nell'arcipelago delle Eolie dall'antichità al XX secolo. Studio di fattibilità RPT*. **156**, 96. Bologna, Italia.
- SUGGETT D.J., HALL-SPENCER J.M., RODOLFO-METALPA R., BOATMAN T.G., PAYTON R., TYE PETTAY D., JOHNSON V.R., WARNER M.E. & LAWSON T. (2012) - *Sea anemones may thrive in a high CO₂ world*. Glob. Chang. Biol., **18**: 3015-3025.
- VIZZINI S., DI LEONARDO R., COSTA V., TRAMATI C.D., LUZZU F. & MAZZOLA A. (2013) - *Trace element bias in the use of CO₂ vents as analogues for low pH environments: Implications for contamination levels in acidified oceans*. Estuar. Coast. Shelf Sci., **134**: 19-30.
- VIZZINI S., MARTÍNEZ-CREGO B., ANDOLINA C., MASSA-GALLUCCI A., CONNELL S.D. & GAMBI M.C. (2017) - *Ocean acidification as a driver of community simplification via the collapse of higher-order and rise of lower-order consumers*. Sci. Rep., **7**: 1-10.
- VIZZINI S., TOMASELLO A., DI MAIDA G., PIRROTTA M., MAZZOLA A. & CALVO S. (2010) - *Effect of explosive shallow hydrothermal vents on $\delta^{13}C$ and growth performance in the seagrass Posidonia oceanica*. J. Ecol., **98**: 1284-1291.

Evidenze sismostratigrafiche di fenomeni da espulsione di fluidi, superficiali e profondi, nell'*offshore* tra Sciacca e Agrigento (Sicilia meridionale)

Seismic-stratigraphic evidences of surficial and buried fluid flow phenomena in the Sciacca - Agrigento offshore (Southern Sicily)

MANCUSO M.R.(*), CATALANO R.(**)

RIASSUNTO - In questa nota, viene segnalata la presenza di strutture da iniezione, indotte dalla risalita di fluidi presenti nel sottosuolo di fenomeni di fluidificazione di sedimenti poco consolidati all'interno delle successioni sedimentarie, riconducibili alle associazioni di sistemi deposizionali di stazionamento alto e trasgressive della Sequenza Depositionale Quaternaria, stadio isotopico 5e (Pleistocene superiore-Olocene). All'interno delle associazioni formatesi in ambiente deltizio e litorale, l'apporto di sostanza organica dai fiumi e la rapida degradazione batterica di questa, potrebbero avere permesso la formazione di gas biogenici, che impregnano i depositi a vari livelli.

La combinazione di sovrappressioni indotte dalla rapida deposizione e l'impregnazione di gas avrebbe favorito l'insorgere di processi di liquefazione e fuoriuscita di fluidi, specie se in presenza di eventi sismici, compatibili con quelli registrati nella zona.

La compartimentalizzazione dei fenomeni identificati sarebbe stata legata al progressivo annegamento della piattaforma continentale, con il conseguente brusco spostamento verso terra degli ambienti deltizi. In più, la formazione di sezioni condensate sulla piattaforma avrebbe indotto la formazione di barriere di permeabilità, che sigillerebbero le strutture da iniezione e ne determinerebbero l'abbandono.

Un ulteriore meccanismo di controllo potrebbe inoltre essere ricercato nel sistema di circolazione delle acque di fondo, che, nei settori di piattaforma esterna più prossimi al ciglio, dove le correnti MAW (Modified Atlantic Water) e LIW (Levantine Intermediate Water) si incontrano e incrementano la loro energia e turbolenza, controllando altresì variabilità e distribuzione delle forme di fondo.

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, Sicilia meridionale, Pleistocene, Olocene, stratigrafia sismica, *pockmark*, diapiro di fango

ABSTRACT - In this paper, we discuss the various processes controlling the occurrence and the expression of gas seepage and shallow gas observable within the Transgressive and the

Highstand subaqueous deltas, pertaining to the Last Depositional Sequence, Late Pleistocene to Holocene in age, of the Southern Sicily continental margin, in the outer shelf to slope sectors of the Sciacca and Agrigento offshore. Here, different types of gas-escape related features have been documented. Separate, but genetically-linked, features are described on a grid of high-resolution seismic record: wide areas of acoustical turbidity, due to anomalous shallow gas concentrations, within the laterally extensive Holocene mud wedge; pockmarks and buried pockmarks occur singly or in organised arrays, associated with areas of steeper seabed gradient; and, at least, buried mud-diapirs, with an irregular shape.

The gas seepage-related features are spatially associated with the depocenters of the subaqueous deltas and this relationship suggests a correlation between flood deposition of terrigenous organic matter and shallow gas formation. Moreover, the interaction between shore-parallel southeastward-flowing bottom currents-hugging shelf currents and basin morphology may interact with the development of pockmarks over time, including elongation in the direction of current flow.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, Southern Sicily, Pleistocene, Holocene, seismic stratigraphy, pockmark, mud lumps

1. - INTRODUZIONE

La formazione di strutture da iniezione, indotte dalla risalita di fluidi presenti nel sottosuolo ed i fenomeni di fluidificazione di sedimenti poco consolidati, sono fenomeni geologici ben conosciuti, sia in ambiente continentale sia in ambiente marino, che deformano o cancellano la stratificazione originaria delle successioni sedimentarie (ALLEN, 1982; HOVLAND & JUDD, 1988; MILKOV, 2000).

(*)Istituto per l'Ambiente Marino e Costiero (IAMC - CNR), USS di Mazara del Vallo, Via L. Vaccara, 61, 91026 - Mazara del Vallo (Tp)

(**)Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Via Archirafi 22, 90123, Palermo

Nel settore centrale del Mar Mediterraneo, le ricerche di cartografia geologica marina, i rilievi batimetrici ed i rilievi sismici ad alta risoluzione, le riprese video sottomarine ed i campionamenti delle successioni sedimentarie e della colonna d'acqua hanno mostrato come tali fenomeni siano estremamente diffusi e pervasivi: nel Mar Adriatico (GELETTI *et alii*, 2008); nel Mar Tirreno meridionale (ROVERE *et alii*, 2014); lungo la scarpata orientale della Sardegna (DALLA VALLE & GAMBERI, 2011); nel Canale di Sicilia (MINISINI *et alii*, 2007; TAVIANI *et alii*, 2013); nell'area del Plateau di Malta (HOLLAND *et alii*, 2003, SAVINI *et alii*, 2009; MICALLEF *et alii*, 2011).

In questa nota, viene segnalata la presenza di tali fenomeni in una limitata porzione del margine continentale della Sicilia meridionale, nei settori *off-shore* tra Sciacca ed Agrigento, dove sono state individuate due estese aree caratterizzate da impregnazioni gassose, strutture da iniezione isolate (*pockmark*), sciami di *pockmark* elongati sepolti e strutture domiformi (*mud-diapirs*), anch'esse sepolte. Lo studio è stato eseguito su una maglia di profili di sismica ad altissima risoluzione, interpretati secondo i metodi di analisi della Stratigrafia sismica (PAYTON, 1977).

La segnalazione di questi fenomeni, all'interno delle unità sismiche appartenenti alle associazioni di sistemi deposizionali trasgressive e di stazionamento alto dell'Ultima Sequenza Deposizionale Quaternaria, stadio isotopico 5e, formatasi durante gli ultimi 80 ka fino all'Attuale, suggerisce la possibilità di una interazione tra i processi di variazione del livello marino relativo, retrogradazione delle facies litorali e costiere, e variazioni della pressione idrostatica sui meccanismi di espulsione dei gas e dei fluidi, contenuti nelle successioni sedimentarie poco consolidate. Vengono inoltre considerati l'assetto strutturale e le condizioni oceanografiche.

2. - INQUADRAMENTO REGIONALE ASSETTO STRUTTURALE E STRATIGRAFICO

L'area studiata (fig. 1) è ubicata nella porzione centrale del margine continentale della Sicilia meridionale, nei settori di piattaforma esterna e di scarpata superiore dell'*off-shore* tra Sciacca ed Agrigento, tra Capo San Marco e Licata e si estende tra le batimetriche dei -30 m e dei -200 metri di profondità.

Questa zona è l'espressione morfologica del prolungamento verso mare dell'elemento esterno del Sistema Embricato di Gela (*Gela Thrust System* in CATALANO *et alii*, 1996; CATALANO *et alii*, 1998), che degrada bruscamente verso l'attuale Bacino di Gela (*Gela Foredeep Basin* in CATALANO *et alii*, 1996; CATALANO *et alii*, 2013).

Verso sud, il Bacino di Gela è confinato dalle strutture estensionali della zona di rift del Canale di Sicilia, che comprende i bacini di Pantelleria, Malta e Linosa.

Come indicato dalle serie storiche e strumentali del Catalogo Parametrico dei Terremoti italiani (ROVIDA *et alii*, 2016), la sismicità dell'area è relativamente bassa, se comparata a quella di altre aree del Mediterraneo. Tuttavia, come sottolineato da MINISINI *et alii* (2007), gli eventi sismici registrati nell'area a partire dagli anni '70 del secolo scorso (due eventi sismici fino a 4,2 M), se estrapolati per intervalli temporali più lunghi (ovvero l'intervallo temporale fino alla fase di risalita successiva all'Ultimo Massimo Glaciale), mostrerebbe una frequenza di eventi significativa (60 eventi sismici ogni 1.000 anni, che corrisponderebbero a circa 2.000 eventi nell'intervallo post glaciale).

In quest'area sismicamente attiva, la sequenza sedimentaria del Pleistocene superiore-Olocene (Q.5.e in CATALANO *et alii*, 1998), ha registrato il ciclo glacio-eustatico degli ultimi 100 ka e la sua modulazione in cicli di 20 ka.

La sua architettura stratigrafica si compone di depositi di regressione forzata, depositi progredienti di stazionamento basso, depositi trasgressivi e di risalita (CATALANO *et alii*, 1998; MANCUSO *et alii*, 2011), appartenenti alle associazioni di sistemi deposizionali contemporanei del *Falling Stage* (FSST, 80 ka – 30 kyr b.P.), del *Lowstand* (LST, 30 ka – 18 ka b.P.), del *Transgressive* (TST, 15 ka – 6 ka b.P.) e dell'attuale *Highstand Systems Tract* (HST, 6 ka – 0 ka b.P.).

2.1. - MORFOLOGIA MARINA E CONDIZIONI OCEANOGRAFICHE

La piattaforma continentale della Sicilia meridionale (fig. 1), estesa fino a circa 16 km, è suddivisibile in due zone morfodinamiche: una di piattaforma interna, che si estende dalla costa sino all'isobata dei -50 m, ed una zona esterna, delimitata verso mare dal ciglio della piattaforma.

Significative rotture di pendio, che delimitano verso terra piccoli terrazzi d'abrasione marina, si individuano tra i -95 m/-110 m, e tra i -60 m/-80 m.

Il ciglio della piattaforma è ubicato a profondità variabili tra -90 m e -201 m. La sua continuità è interrotta da numerose indentazioni e condotti erosivi, ampi fino a 2 km e profondi sino ad un centinaio di metri, che alimentano i sistemi torbidi della scarpata inferiore. Profondità del ciglio e presenza delle indentazioni sembrano essere controllate dalla ancora attiva deformazione del Sistema Embricato di Gela.

La scarpata continentale, dai -100 m fino ai -500 m di profondità, mostra una notevole acclività (dai 5° agli 8°), con terrazzamenti e bacini pensili, interrotta da numerosi condotti erosivi e da scarpate di frana sottomarina, *mud flow* e frane rotazionali. Solchi erosivi (*moat*), strutture sedimentarie deposizionali ed erosive, quali *elongated-plastered drift* e *furrow*, sono stati individuate tra il ciglio della piattaforma e l'isobata dei -400 m.

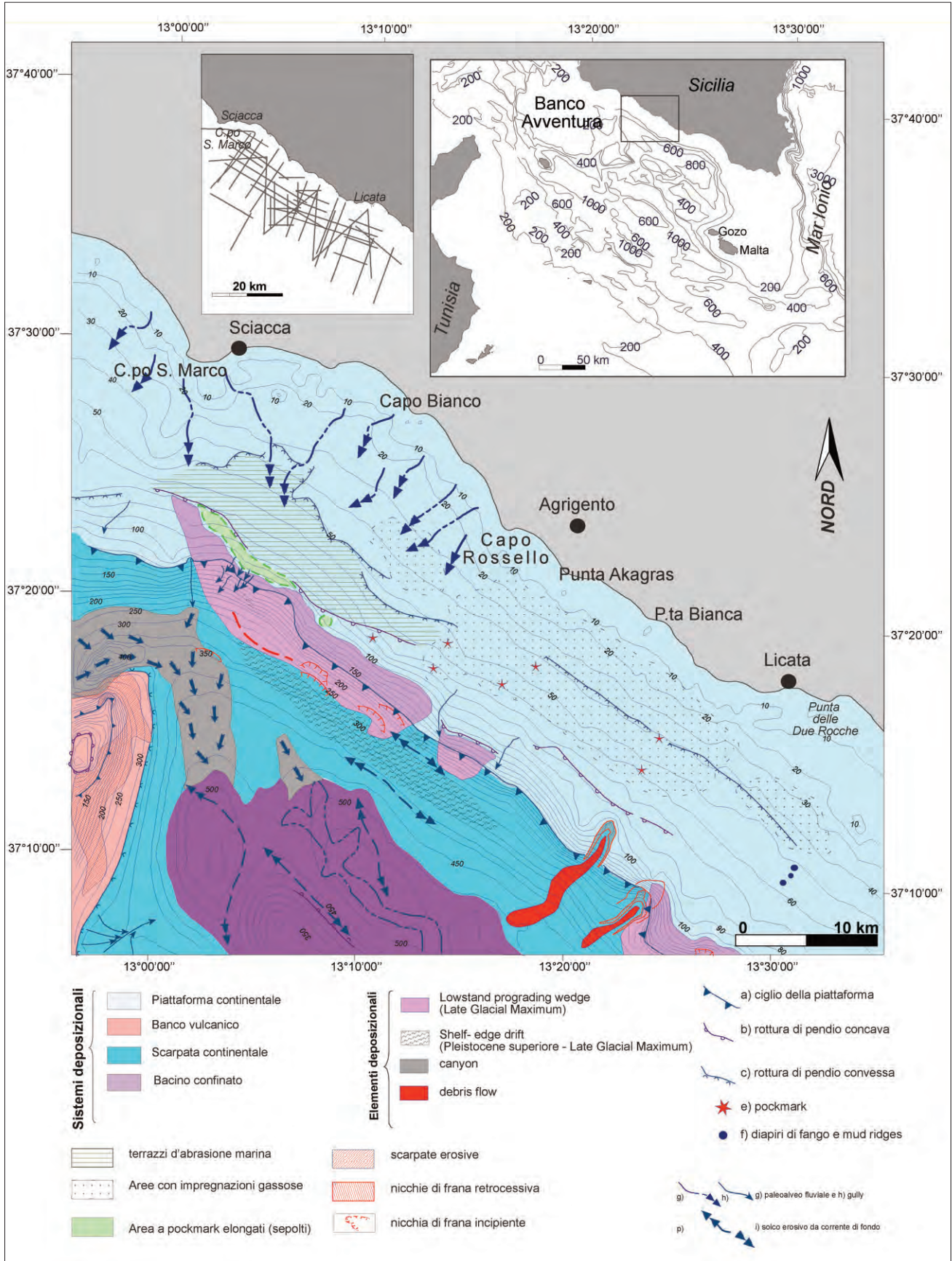


Fig. 1 – Schema morfologico dell'area di studio. Nei riquadri in alto, sono evidenziati il *grid* dei dati sismici utilizzati (in alto a sinistra) e l'ubicazione geografica (in alto a destra). La batimetria utilizzata deriva dal *database* GEBCO_2014.
 – Morphological map of study area. On the top left, the index map of the data set, on the right, the geographic location of the study area. Bathymetry from GEBCO_2014 database.

Questo paesaggio sottomarino è attualmente modellato dalle correnti oceanografiche, innescate dal sistema di circolazione anti-estuarino del Mar Mediterraneo, caratterizzato dall'afflusso, verso est di acque superficiali a minore salinità di origine atlantica (*Modified Atlantic Water* - MAW, presenti nei primi 200 m della colonna d'acqua) e del concomitante *outflow*, in direzione opposta delle profonde e dense acque levantine (*Levantine Intermediate Waters* - LIW, ROBINSON *et alii*, 1999).

2.2. - DATI E METODOLOGIE D'ANALISI

I dati presentati sono stati raccolti in differenti campagne oceanografiche (1992, 1994, 1996) organizzate dall'Istituto di ricerca per l'Ambiente Marino Costiero, in collaborazione con l'allora Dipartimento di Geologia e Geodesia dell'Università di Palermo (ora Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare), con le strumentazioni convenzionali disponibili sulla N/O Urania del C.N.R. e durante le campagne sperimentali, condotte stagionalmente dal 1994 fino ad oggi, nell'ambito del "Programma Nazionale di Raccolta dei Dati Alieutici" e del Programma Internazionale "Medit's".

Si tratta di un *set* multivariato di dati, che comprende profili *chirp* Sub-bottom 16 kHz, profili Sparker 1000 J e Sub-bottom a 3.5 kHz, registrati analogicamente a varie scale. Il posizionamento nave è stato effettuato con il sistema GPS in dotazione della N/O Urania ed il *datum* utilizzato è il WGS '84.

I dati raccolti tra il 1994 ed il 1996 nell'ambito del "Programma Nazionale di Raccolta dei Dati Alieutici" sono stati acquisiti, a bordo di imbarcazioni d'altura per la pesca commerciale con il sistema di posizionamento GPS, riferiti all'ellissoide WGS84.

L'applicazione dei paradigmi della Stratigrafia Sismica (PAYTON, 1977) ha permesso di ricostruire le relazioni geometriche e temporali delle unità sismiche, consentendo di ricostruire all'interno di uno schema cronostratigrafico, i vari sistemi deposizionali, definendone estensione areale ed evoluzione temporale

2.3. - DEFORMAZIONI DEI SEDIMENTI AD OPERA DI FENOMENI DI INIEZIONE E DEGASSAMENTO ENTRO I SISTEMI TRASGRESSIVI E DI STAZIONAMENTO ALTO

Nell'area studiata, nell'*offshore* della Sicilia meridionale, tra Capo San Marco e Licata, all'interno delle successioni sedimentarie, riconducibili alle associazioni di sistemi deposizionali di stazionamento alto e trasgressive della Sequenza Deposizionale Q.5.e (fig. 2), sono state riconosciute strutture verticali da iniezione (*pockmark*), sia nell'immediato sottofondo marino sia sepolte.

Le prime (fig. 3) appaiono come depressioni circolari isolate, di forma ad "U" o a "V" in sezione trasversale, localizzate tra i -40 m ed i -70 m di profondità.

La loro immagine sismica è un rilievo invertito, che interrompe la continuità dei riflettori, che sembrano uncinati verso il basso. Si tratta di strutture isolate di dimensioni discrete, con un diametro variabile tra i 77 m ed i 120 m, ed una profondità compresa tra i -5 m ed i -15 m, rispetto ai fondali circostanti. I fianchi delle depressioni non superano un'inclinazione di 3°.

Poiché si individuano a fondo mare, sono confinate ai riflettori più superficiali, non sono drappeggiate da sedimenti, né associate a strutture sepolte, è probabile che siano da interpretare come strutture attive in tempi recenti, sebbene non si abbiano evidenze sismostratigrafiche di degassamento attivo.

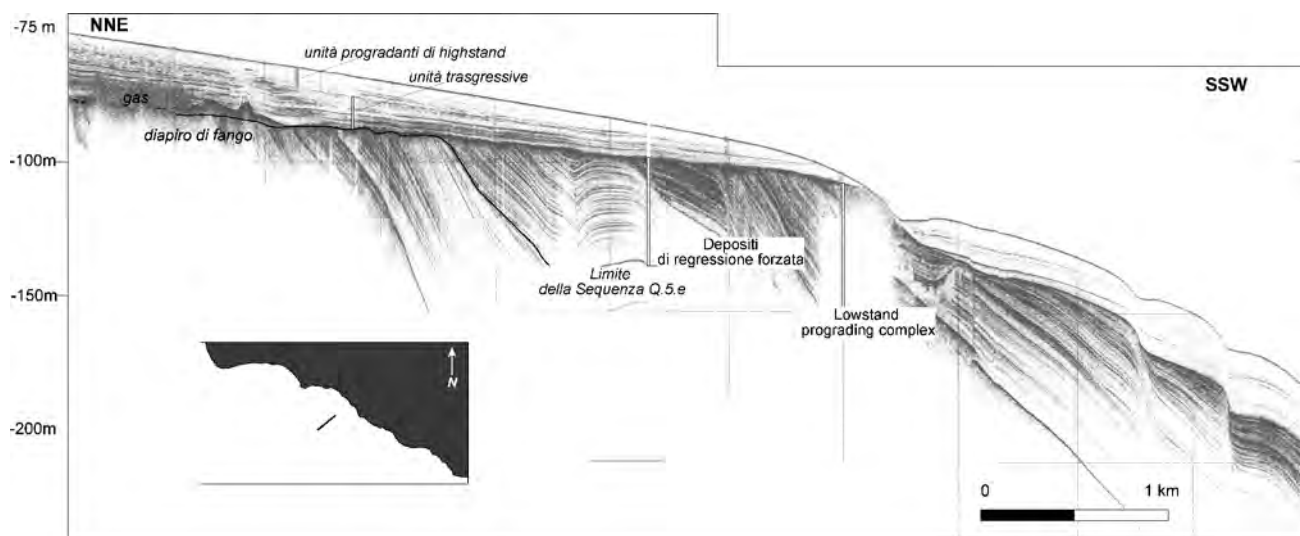


Fig. 2 – Profilo *chirp*, che mostra l'organizzazione della Sequenza Deposizionale Q.5.e (Pleistocene superiore – Olocene).
– *chirp sonar profile showing the stratigraphic organization of the Q.5.e Depositional Sequence (late Pleistocene to Holocene, in age).*

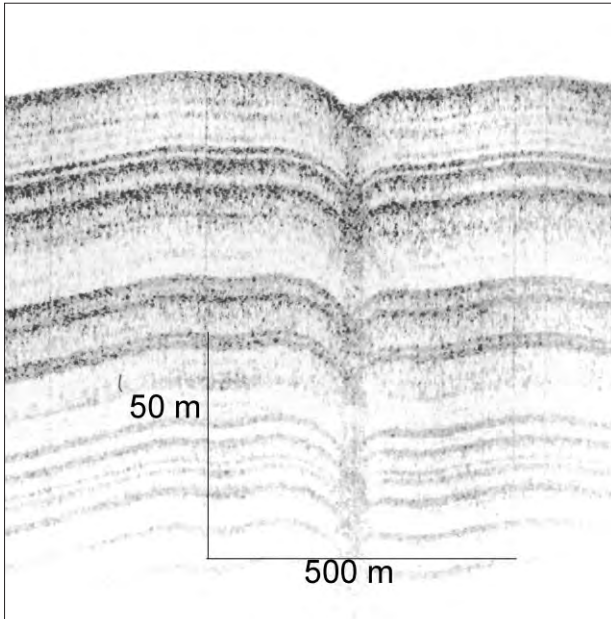


Fig. 3 – Immagine sismica di un *pockmark*, individuato a largo di Punta Bianca, a circa -60 m di profondità.
– Seismic image of a low profile *pockmark*, located at -60 m of water depth, off Punta Bianca.

Sono di norma localizzate a valle dei depositi con impregnazioni gassose.

Gli sciami di *pockmark* sepolti (fig. 4), presenti all'interno delle unità sismiche del TST, mostrano peculiarità più interessanti.

Sono strutture di forma più articolata, elongate, con diametri, che possono raggiungere i 150 m e profondità massime di 25 m. Sono stati individuati all'interno delle unità sismiche del TST, caratterizzate da forme esterne a cuneo, delimitate alla base da superfici di erosione (*ravinement surface*) e al tetto da superfici di *toplap*, in corrispondenza di un substrato deformato e fagliato, troncato superiormente dal limite di sequenza Q.5.e. La presenza di geometrie sigmoidali dei riflettori sottilmente stra-

tificati, l'esistenza di aree di torbidità acustica e la distribuzione areale parallela a costa, fa interpretare tali unità sismiche come delta subacquei, in accordo con CATTANEO *et alii* (2003), caratterizzati dalla presenza di sedimenti sottili, ricchi di materia organica.

Gli sciami di *pockmark* sepolti sono stati riconosciuti tra i -80 m ed i -130 m di profondità (rispetto al fondo mare), laddove le coperture dei depositi di *highstand* sono più sottili, a monte delle rientranze del ciglio della piattaforma.

La direzione delle linee di fuga è generalmente obliqua e la propagazione avviene attraverso l'intero spessore dell'unità, per terminare bruscamente in corrispondenza dei *pockmark*. Lo spostamento verso terra dei depocentri delle unità deltizie, indotto dal progressivo sollevamento del livello del mare, e la formazione di sezioni condensate sulla piattaforma esterna, segnano la fase di abbandono dei *pockmark*.

L'obliquità delle linee di migrazione dei fluidi potrebbe essere correlata alla presenza di correnti di fondo dominanti, che deflettevano, all'atto dell'espulsione, i pennacchi di gas all'interno della colonna d'acqua in direzione SE.

All'interno dello stesso TST, a largo di Capo Akragas, non sono stati identificati *pockmark* elongati sepolti, ma strutture domiformi (fig. 1), con diametro compreso tra 450 m e 780 m, con una altezza variabile tra i 25 m ed i 38 m, interpretate come diapiri di fango o *mud ridge*, il cui sviluppo - probabilmente concomitante con le strutture su descritte - deforma intensamente i depositi del TST.

3. - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I dati sismostratigrafici disponibili sulla piattaforma continentale dell'*offshore* della Sicilia meridionale, compreso tra Capo San Marco e Licata, hanno mostrato come all'interno delle successioni

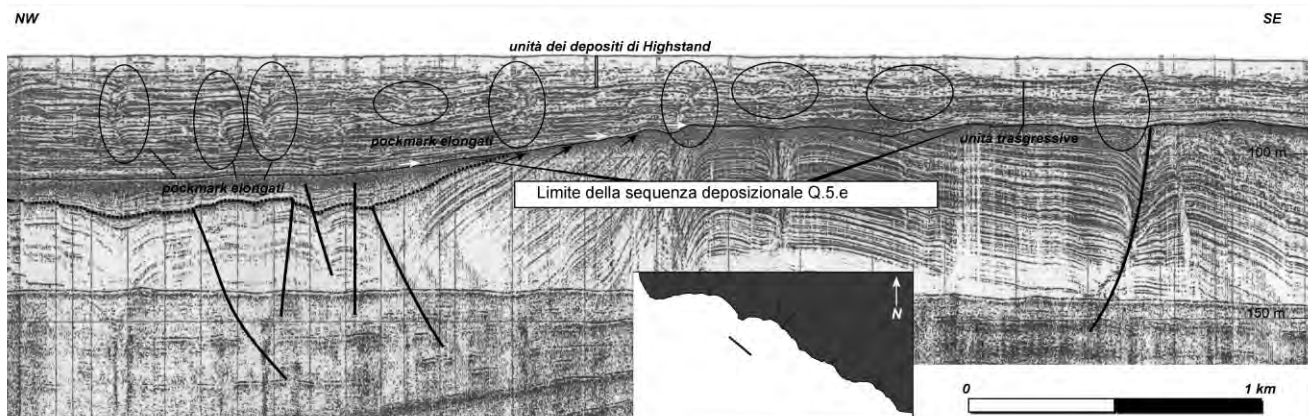


Fig. 4 – Immagine sismica degli sciami di *pockmark* sepolti, individuati a circa -80 m di profondità, nel settore di piattaforma esterna a largo di Capo San Marco e Capo Bianco.
– Seismic image of a swarm of elongated buried *pockmark*, located at -80 m of water depth, in the outer shelf sectors off Capo San Marco and Capo Bianco.

sedimentarie, riconducibili alle associazioni di sistemi deposizionali di stazionamento alto e trasgressive della Sequenza Deposizionale Q.5.e, siano presenti strutture da iniezione superficiali e sepolte, aree con impregnazioni gassose e strutture domiformi, interpretate come diapiri di fango.

All'interno delle associazioni trasgressive e di stazionamento alto, formatesi in ambiente deltizio e litorale, l'apporto di sostanza organica dai fiumi e la rapida degradazione batterica di questa, hanno permesso la formazione di gas biogenici, che impregnano i depositi a vari livelli.

La combinazione di sovrappressioni indotte dalla rapida deposizione e l'impregnazione di gas può avere favorito l'innescò di processi di liquefazione e fuoriuscita di fluidi, specie se in presenza di eventi sismici, compatibili con quelli registrati nella zona.

La compartimentalizzazione dei fenomeni identificati è legata al progressivo annegamento della piattaforma continentale, con il conseguente brusco spostamento verso terra degli ambienti deltizi. La formazione di sezioni condensate sulla piattaforma indurrebbe la formazione di barriere di permeabilità, sigillando le strutture da iniezione e determinandone l'abbandono.

Un ulteriore meccanismo di controllo può inoltre essere ricercato nel sistema di circolazione delle acque di fondo, che, nei settori di piattaforma esterna più prossimi al ciglio, dove MAW e LIW si incontrano, incrementano la loro energia e turbolenza, controllando altresì variabilità e distribuzione delle forme di fondo.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN J.R.L. (1982) – *Sedimentary structures: Their character and physical basis*. Elsevier, New York, 663 pp.
- CATALANO R., DI STEFANO E., INFUSO S., SULLI A., VAIL P. R. & VITALE F.P. (1998) – *Sequences and systems tracts calibrated by high-resolution bio-chronostratigraphy: the Central Mediterranean Plio-Pleistocene record*. In: DE GRACIANSKY (Ed.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM Special Publication, **60**: 155-177.
- CATALANO R., DI STEFANO P., SULLI A. & VITALE F.P. (1996) – *Paleogeography and structure of the Central Mediterranean: Sicily and its offshore area*. Tectonophysics, **260**: 291-323.
- CATALANO R., VALENTI V., ALBANESE C., ACCAINO F., SULLI A., TINIVELLA U., GASPARO MORTICELLI M., ZANNOLA C. & GIUSTINIANI M. (2013) – *Sicily's fold-thrust belt and slab roll – back: the SIRIPRO seismic crustal transect*. Journ. Geol. Soc., **170**: 451-464.
- CATTANEO A., CORREGGIARI A., LANGONE L. & TRINCARDI F. (2003) - *The late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: sediment pathways and supply fluctuations*. Mar. Geol., **193**(1): 61-91.
- DALLA VALLE G. & GAMBERI F. (2011) - *Pockmark and seafloor instability in the Olbia continental slope (northeastern Sardinian margin, Tyrrhenian Sea)*. Mar. Geophys. Res., **32**: 193-205.
- GELETTI R., DEL BEN A., BUSETTI M., RAMELLA R. & VOLPI V. (2008) - *Gas seeps linked to salt structures in the Central Adriatic Sea*. Basin Research, **20**(4): 473-487.
- HOLLAND C.W., ETIOPE G., MILKOV A.V., MICHELOZZI E. & FAVALI P. (2003) - *Mud volcanoes discovered offshore Sicily*. Mar. Geol., **199**: 1-6.
- HOVLAND M. & JUDD A. G. (1988) - *Seabed Pockmarks and Seepages*. Graham and Trotman, London, 293 pp.
- MANCUSO M., AGATE M., FALLO L., VACCARO F. & CATALANO R. (2011) - *Stratigraphic and morphological evidences of the last cycle of relative sea-level changes, some examples from the Late Pleistocene to Holocene sedimentary succession in the Sicilian offshore*. In: BRUGNOLI E., CAVARETTA G., MAZZOLA S., TRINCARDI F., RAVAIOLI M. & SANTOLERI R. (2011): *Marine Research at CNR*, Volume DTA/06 - 2011, 721-740.
- MICALLEF A, BERNDT C. & DEBONO G. (2011) - *Fluid flow systems of the Malta Plateau, Central Mediterranean Sea*. Mar. Geol., **284**(1-4): 74-85.
- MILKOV A. V. (2000) - *Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates*. Mar. Geol., **167**: 29-22.
- MINISINI D., TRINCARDI F., ASIOLI A., CANU M. & FOGLINI F. (2007) - *Morphologic variability of mass-transport deposits on the eastern slope of Gela Basin (Sicily Channel)*. Basin Research, **19**: 217-240.
- PAYTON C.E. (Ed.) (1977) - *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, OK: American Association of PETROLEUM GEOLOGISTS, **26**: 1-516.
- ROBINSON A.R., SELLSCHOPP J., WARN-VARNAS A., LESLIE W.G., LOZANO C.J., HALEY JR P.J., ... & LERMUSIAUX P.F. J. (1999) - *The Atlantic ionian stream*. Journal of Marine Systems, **20**(1-4), 129-156.
- ROVERE M., GAMBERI F., MERCORELLA A., RASHED H., GALLERANI A., LEIDI E., MARANI M., FUNARI V. & PINI G.A. (2014) - *Venting and seepage systems associated with mud volcanoes and mud diapirs in the southern Tyrrhenian Sea*. Mar. Geol., **347**: 153-171.
- ROVIDA A., LOCATI M., CAMASSI R., LOLLI B. & GASPERINI P. (2016) - *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>.
- SAVINI A., MALINVERNO E., ETIOPE G., TESSAROLO C. & CORSELLI C. (2009) - *Shallow seep-related feature along the Malta Plateau (Sicily Channel - Mediterranean Sea): Morphologies and geoenvironmental control on their distribution*. Mar. Pet. Geol., **26**: 1831-1848.
- TAVIANI M., ANGELETTI L., FOGLINI F., FROGLIA C. & TRINCARDI F. (2013) - *The Gela Basin pockmark field in the Strait of Sicily (Mediterranean Sea): chemosymbiotic faunal and carbonate signatures of postglacial to modern cold seepage*. Biogeosciences, **10**: 4653-4671.

Le emissioni fluide nei mari italiani

Fluid emissions in Italian Seas

D'ANGELO S.(*), BATTAGLINI L.(*), FIORENTINO A.(*),

RIASSUNTO - Le emissioni fluide si inquadrano nel contesto della geologia dei mari italiani, caratterizzata da una tettonica attiva. Le segnalazioni riportate in questo volume provengono da diverse parti d'Italia, ognuna con le proprie peculiarità. Vi sono casi di origine tettonica, vulcano-tettonica, idrotermale e biogenica, analoghi a quelli che possono essere ricavati dalla Carta Geologica d'Italia. Le emissioni associate a vulcani prevalgono nel Mar Tirreno, mentre quelle di origine biogenica (*pockmark*, vulcani di fango e rilievi carbonatici) sono assai diffuse nel Mar Adriatico. Numerose emanazioni associate a strutture vulcaniche danno origine a depositi di minerali dello zolfo, in particolare nell'area del Tirreno sud-orientale.

Le emissioni sono frequentemente associate a lineamenti tettonici che rappresentano vie preferenziali di risalita. L'impregnazione di gas combinata con le sovrappressioni, che si possono sviluppare nei depositi, può favorire processi di instabilità.

Questo volume vuole rappresentare un primo passo verso la costituzione di un inventario sistematico delle emissioni fluide individuate nei mari italiani, auspicando che in futuro sia possibile ottenere un database integrato, attendibile e armonizzato a scala nazionale.

PAROLE CHIAVE: pockmarks, Carta Geologica d'Italia, fondale marino, emissione fluida, struttura vulcano-tettonica

ABSTRACT - Submarine fluid emissions are framed within the tectonically active setting of Italian seas geology. Events reported in this volume occur in different areas of Italy, each of them characterized by its own peculiarities. Study cases, as well as occurrences derived from the Geological Map of Italy, report emissions associated to tectonics, volcano-tectonics, hydrothermalism and biogenic activity. Emissions associated to volcanism are more common in the Tyrrhenian

Sea, whereas emissions of biogenic origin (pockmarks, mud volcanoes and carbonate mounds) are widespread in the Adriatic Sea. Several emissions associated to volcanic structures originate sulfide and sulfate minerals, especially in the south-eastern Tyrrhenian area.

Fluid emissions frequently occur in correspondence of tectonic elements, which constitute preferential ways of outflow. Gas saturation together with over-pressures, which can develop within deposits, might foster instability processes.

This volume is addressed at promoting a systematic inventory of fluid emissions in Italian seas, aiming at the realization of a nationwide comprehensive, reliable and harmonized database.

KEYWORDS: fluid emission, pockmark, Geological Map of Italy, volcano-tectonic structure, ocean floors

1. - INTRODUZIONE

Gli eventi presentati in questo volume (Tav. 1) si inquadrano nel contesto dei mari italiani e più in generale del Mar Mediterraneo, il cui assetto e attività strutturale sono collegati agli eventi determinati dalla collisione delle placche europea e africana. Il sollevamento della catena appenninica, l'iniziale oceanizzazione del Mar Tirreno, il riempimento dell'avanfossa ad est della catena, il colmamento dell'Adriatico, le interazioni tra il Canale di Sicilia - plateau dell'avampese africano - e il Mar Ionio hanno prodotto diffuse testimonianze del fenomeno della espulsione di fluidi dalle formazioni

(*)Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia, ISPRA, Roma

geologiche, sotto forma di manifestazioni idrotermali legate al vulcanismo, di risalita di fluidi in corrispondenza di lineamenti tettonici o di gas prodotti dalla degradazione batterica di materiale organico.

Non sempre il rilevamento degli Autori di questo volume è stato focalizzato sul fenomeno delle emanazioni fluide; tuttavia, i dati raccolti ne hanno consentito una sufficiente caratterizzazione. I casi direttamente indicati come di origine tettonica e vulcano-tettonica sono quelli relativi alle aree di: Mar Tirreno (LORETO), Calabria tirrenica (bacino di Paola, Capo Vaticano; LORETO), Calabria ionica (CERAMICOLA *et alii*), Canale di Otranto (GELETTI *et alii*), Mar Adriatico settentrionale (GORDINI & DONDA), Golfo di Trieste (BUNETTI *et alii*), Adriatico centrale (GELETTI *et alii*), Lazio meridionale (Tor Caldara; MANCINELLA *et alii*).

Al vulcanismo, in particolare all'attività idrotermale, sono riferiti i casi delle isole: Zannone (INGRASSIA *et alii*), Ventotene (LORETO), Panarea (SPAGNOLI *et alii*), Eolie (VIZZINI *et alii*), Ischia (GAMBI *et alii*).

Non mancano inoltre i casi in cui le emissioni fluide sono riferite all'apporto massiccio di sedimenti e alla rapida degradazione batterica della sostanza organica in essi contenuta in paleo-ambienti delizi, relativi a fasi di basso stazionamento del livello del mare: Caprera (LORETO), Sicilia meridionale (MANCUSO & CATALANO). Infine, è riportata la risorgiva carsica sottomarina dell'area di Taranto (VALENZANO *et alii*).

2. - SEGNALAZIONI DI EMISSIONI FLUIDE RACCOLTE DAL SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA

Un discreto numero di segnalazioni della presenza di gas (rilevate prevalentemente attraverso indagini sismiche) sono contenute nelle Note Illustrative dei fogli della Carta Geologica d'Italia, anche se solo in alcuni casi esse presentano manifestazioni superficiali che hanno potuto essere cartografate. In molti casi sono state cartografate zone di instabilità gravitativa la cui origine viene attribuita alla presenza di emanazioni fluide.

Alle emissioni associate a strutture vulcaniche presenti nel Mar Tirreno si aggiungono segnalazioni di gas di probabile origine biogenica in molte altre aree, dalla Liguria alla Sicilia, dalla Sardegna ai mari Ionio e Adriatico. Queste ultime sono state individuate con una certa continuità lungo le coste adriatiche, interessate dalla deposizione di consistenti apporti sedimentari di origine fluviale, in particolare provenienti dal Po. Esse sono segnalate infatti anche in tutti i Fogli della Carta Geologica dei Mari Italiani alla scala 1:250.000 relativi all'Adriatico (TRINCARDI *et alii*, 2010a,b,c,d).

Per quanto riguarda le emissioni che sono state cartografate, vengono brevemente riportate di seguito le loro descrizioni presenti nelle Note Illustrative dei relativi fogli.

2.1. - FOGLI CASTELLAMMARE DEL GOLFO E PARTINICO

Foglio n. 593 "Castellammare del Golfo" (CATALANO *et alii*, 2011) e Foglio n. 594 "Partinico" (CATALANO *et alii*, 2013).

Nel settore di piattaforma interna, antistante le foci del fiume Freddo e del fiume Nocella, viene cartografato un deposito deformato da strutture di tipo *migrating waves* (*sensu* MITCHUM *et alii*, 1977), associate a corpi lenticolari, con base erosiva, acusticamente trasparenti, che sono da ricondurre al ripetersi periodico di intensi fenomeni di destabilizzazione della piattaforma continentale, favoriti dagli alti tassi degli apporti sedimentari, dal ripetersi periodico di shock sismici e dalla presenza di gas biogenico.

2.2. - FOGLIO AGROPOLI

Foglio n. 502 "Agropoli" (MARTELLI *et alii*, in stampa e *online*).

L'interpretazione di dati *chirp* ha evidenziato la presenza di ampie sacche di gas, con dimensioni talora chilometriche, che tagliano l'intera successione stratigrafica fino a fondo mare. La presenza di tali sacche di gas nel sottofondo marino è stata riscontrata lungo tutta la piattaforma interna tra la foce del fiume Solofrone e fino a nord dell'abitato di Agropoli, a profondità comprese tra -10 m e -50 m. L'espressione dei gas al fondo mare è rappresentata da strutture a *pockmark*, che sono state identificate sui sonogrammi *sidescan sonar* e formano un campo di forma subcircolare in pianta, localizzato intorno ai -20 m di profondità. Il campo a *pockmark*, tuttavia, presenta un'estensione molto più localizzata e ridotta, se paragonato all'ampia area di diffusione nel sottofondo delle sacche di *shallow gas*, che è stata riportata sulla carta.

2.3 - FOGLIO FIUMICINO

Foglio n. 386 "Fiumicino" (Servizio Geologico d'Italia, in prep.).

Le registrazioni di sismica ad altissima risoluzione hanno evidenziato nel cuneo sedimentario di alto stazionamento, che ha spessori che vanno da pochi metri in piattaforma esterna-ciglio ad almeno 6 m sulla scarpata di prodelta, la presenza di gas nei sedimenti nelle aree di piattaforma intermedia. Questa unità è stata attribuita alla prima fase di progradazione del delta, protrattasi per un lungo periodo (circa 3.500 anni), ma con tassi di sedimentazione relativamente bassi, in quanto debolmente sostenuta dall'apporto fluviale, invece impegnato nel colmamento delle lagune costiere (BELLOTTI *et alii*, 1994). Manifestazioni gassose analoghe sono state studiate nell'area emersa immediatamente retrostante da BIGI *et alii* (2014).

2.4. - FOGLIO PESCARA

Foglio n. 351 “Pescara” (ORI & RUSCIADELLI, 2015).

La carta mostra depositi di scarpata di prodelta che dalle indagini sismiche risultano organizzati in un clinoforme progradazionale subacqueo con rottura di pendenza (ciglio deposizionale) tra 25 e 30 m di profondità e spessore fino a 25 m (CATTANEO *et alii*, 2003). I depositi sono caratterizzati da diffuse impregnazioni di gas che raggiungono la profondità minima (pochi metri) sotto il fondo, in corrispondenza della rottura di pendenza del clinoforme. Analisi geochimiche dei campioni prelevati in quest’area dimostrano che il gas che impregna i sedimenti superficiali è biogenico e dovuto al decadimento di abbondante materia organica portata dai fiumi e accumulata all’interno del clinoforme (ORANGE *et alii*, 2005).

2.5. - FOGLI ANCONA, PESCARA E VIESTE/BARI

Foglio n. NK 33-1/2 “Ancona” (TRINCARDI *et alii*, 2010b), Foglio n. NK 33-5 “Pescara” (TRINCARDI *et alii*, 2010c) e Foglio n. NK 33-8/9 “Vieste/Bari” (TRINCARDI *et alii*, 2010d), della Carta Geologica dei mari italiani alla scala 1:250.000.

Sono segnalate molteplici evidenze di strutture da sfuggita di fluidi: *pockmark*, vulcani di fango e rilievi carbonatici (*mud-carbonate mound*, associati a fuoriuscite di metano). Alcuni rilievi batimetrici *multibeam* suggeriscono che queste strutture possano essere allineate, forse in relazione alla presenza di faglie sepolte o a sistemi di fratture collegati all’attività diapirica delle evaporiti (GELETTI *et alii*, 2008). Un profilo parallelo all’asse della Depressione Medio Adriatica documenta la presenza di un deposito di frana accumulato alla base del deposito di stazionamento basso. I depositi di stazionamento basso sono interessati da *pockmark* legati alla sfuggita di gas da unità profonde e altre strutture dovute a sfuggita di fluidi dal tetto della frana. I depositi di alto stazionamento del livello del mare (*HST*) in Adriatico sono organizzati in un clinoforme che occupa una ristretta fascia parallela alla costa (CATTANEO *et alii*, 2007). All’interno di questo tipo di depositi si possono sviluppare sovrappressioni, tipicamente lungo una fascia ristretta dove è massimo il tasso di deposizione (WOLINSKI & PRATSON, 2007). Inoltre, il notevole apporto di sostanza organica dai fiumi e il rapido decadimento di questa portano alla formazione di gas biogenico che impregna i depositi fino a pochi metri sotto il fondo. La combinazione di sovrappressioni, associate in aree sismicamente attive all’attività di terremoti (HOVLAND & JUDD, 1988), e impregnazione di gas, può favorire processi di instabilità all’interno del clinoforme.

Per la realizzazione della fornitura relativa alle emissioni fluide nell’ambito del Progetto EMODnet Geology, i dati ricavati dalla Carta Geologica d’Italia sono stati integrati con altre se-

gnalazioni individuate in letteratura. In particolare, la rassegna a scala globale delle pubblicazioni in materia effettuata da FLEISCHER *et alii* (2001), corredata da un’ampia bibliografia, ha consentito di incrementare le emissioni individuate nel Mar Adriatico.

3. - SEGNALAZIONI DI EMISSIONI GAS- SOSE ASSOCIATE ALLE STRUTTURE VULCANICHE

Nel volume Atlas of Italian submarine volcanic structures, dedicato ai vulcani sottomarini italiani (D’ANGELO *et alii*, 2019), elaborato nell’ambito delle attività connesse al Progetto EMODnet Geology, vengono indicate, tra l’altro, le strutture interessate da emissione di fluidi di origine vulcanica, individuate in una vasta bibliografia che arricchisce il volume, alla quale si consiglia di riferirsi.

In questo volume PENSA *et alii* (2019, *cum bibl.*) raccolgono le segnalazioni di molti Autori sulle attività idrotermali di diversi seamount vulcanici tirrenici. Sul Ventotene Ridge, lungo la scarpata ad andamento NE-SO, sono stati identificati *pockmark* e un’ampia depressione. Il Gortani Seamount, costituito da *pillow lava* e abbondanti sedimenti carbonatici, presenta un cemento di natura idrotermale nelle fessure delle rocce che lo compongono. Sul Vavilov l’attività idrotermale è testimoniata da campioni con recenti precipitati di manganese. Un campagna oceanografica a nord di Ustica nel 1996 ha segnalato la presenza di CO₂ e CH₄ nella colonna d’acqua; il rilascio di questi gas è stato messo in relazione con strutture tettoniche secondarie a direzione NE-SO. Attività idrotermale ($\delta^3\text{He}$) è stata riscontrata sul Marsili, anche grazie a indagini magnetiche e gravimetriche. Anomalie del $\delta^3\text{He}$ sono state riscontrate anche nei seamount Glabro, Alcione, Eolo, Enarete e Sisifo. Nei Lametini è presente una debole attività idrotermale, anche se l’assenza di He suggerisce che questi vulcani siano estinti. Un campo attivo di fumarole viene segnalato sul Seamount Empedocle, nell’area nord-est del Banco Graham, nello Stretto di Sicilia.

Infine, anche se non direttamente associato ai seamount elencati nel volume, viene menzionata la presenza del campo di emissione idrotermale denominato Banco della Montagna (Tav. 2) (PASSARO *et alii*, 2016). Si tratta di una struttura sub-circolare debolmente rilevata (fino a 67 m sotto il livello del mare), di circa 7 km di diametro, ubicata nel Golfo di Napoli tra il Vesuvio e i Campi Flegrei. L’area è caratterizzata da diffuse emissioni, *mound*, coni e *pockmark*, il cui allineamento suggerisce un controllo tettonico. Il biossido di carbonio è il componente gassoso principale, accompagnato da concentrazioni significative di H₂S, CH₄ and H₂.

Il volume contiene anche un contributo di MONECKE *et alii* (2019) i quali presentano in maggior dettaglio alcuni tra i maggiori centri di attività

idrotermale sottomarina localizzati nell'arco vulcanico delle Isole Eolie (Panarea e Vulcano) e nel bacino di retro-arco (Marsili e Palinuro), di seguito sintetizzati.

I sistemi idrotermali sommersi dell'arco vulcanico delle Eolie (Tav. 3) sono caratterizzati dalla bassa profondità dei centri di emissione e dalla composizione dei depositi minerali loro associati, molto ricchi in solfati.

3.1. - ISOLA DI PANAREA

Circa 3 km a est di Panarea, fra gli isolotti Dattilo, Panarelli, Lisca Bianca, Bottaro e Lisca Nera, è presente un campo di attività idrotermale, con venute di CO₂, e in subordine SO₂, HCl e HF e acque termali a profondità che vanno dai 5 ai 35 metri, segnalato già in epoca storica, con flussi medi di circa 16 tonnellate al giorno. Le emissioni danno luogo a comunità di batteri estremofili. Nel 2002 si è verificata una violenta emanazione di gas alla superficie del mare fra le località Lisca Bianca, Bottaro e Lisca Nera, avvenuta alla fine di una prolungata attività sismo-tettonica che ha interessato tutta l'Italia meridionale.

Alcuni Autori mettono in relazione l'attività idrotermale con i sistemi di faglie NE-SO e NO-SE (PENSA *et alii*, 2019).

3.2. - ISOLA DI VULCANO

Fumarole marine a bassa temperatura (~100°C) si trovano fra Vulcano (nella Baia di Levante) e Vulcanello, dove hanno creato una fascia, sterile di vegetazione, parallela all'istmo che collega le due isole. A nord della baia è presente una fascia di emissione di acqua termale denominata Acque Calde, a circa 2 m di profondità lungo la spiaggia sommersa. Le analisi geochimiche hanno mostrato una composizione dei gas ad alto contenuto di CO₂ (~3.6 tonnellate al giorno) e concentrazioni misurabili di H₂S e CH₄, ma povera di CO e priva di SO₂. Queste emanazioni danno vita a diverse comunità di microbi termofili ed ipertermofili.

Le fumarole presenti lungo la parte settentrionale della caldera La Fossa hanno mostrato un aumento delle temperature di emissione negli ultimi anni (PENSA *et alii*, 2019).

3.3. - SEAMOUNT MARSILI

Un campo di emissione di fluidi a bassa temperatura, del diametro di circa 150 metri e a una profondità fra i 497 e i 511 metri, è stato identificato nell'area sommitale dell'edificio vulcanico del Marsili. Il campo è caratterizzato da guglie e cumuli, friabili al tocco, costituiti da ossidi di Fe-Mn, spesso con aperture circondate da colonie batteriche giallastre; segnale questo che l'attività idrotermale è ancora presente, con venute di fluidi a temperatura superiore a quella delle acque circo-

stanti. Dati della colonna d'acqua suggeriscono diversi siti di rilascio di acqua termale. Il campo idrotermale è ospitato dalle lave massive e dalle *pillow lava* che costituiscono il vulcano; i fluidi probabilmente fuoriescono attraverso le fratture e i contatti fra le formazioni vulcaniche.

3.4. - SEAMOUNT PALINURO

Sulla vetta occidentale dell'edificio vulcanico sono stati rinvenuti, tramite dragaggio, dei solfuri massivi. Le temperature dei sedimenti, misurate subito dopo il prelievo di 33 campioni, vanno dai 26,8° ai 58° C, a fronte di una temperatura dell'acqua sul fondo di 13,2°C. Inoltre la conduttività termica, misurata su un totale di 23 siti, ha permesso di costruire una carta del gradiente termico, che consente di valutare l'ampiezza del campo idrotermale del seamount. Il campo idrotermale, benché ancora attivo, è sepolto da una coltre di sedimenti pelitici che va dai 5 ai 10 metri, ad eccezione di alcune manifestazioni sul fondo, quali bolle di gas, colonie di tubiformi e una lieve decolorazione dei sedimenti in alcune zone.

4. - COMMENTI CONCLUSIVI

La rassegna presentata in questo volume vuole essere un primo passo verso la costituzione di un inventario sistematico delle emissioni fluide individuate nei mari italiani, da inserire in un *database* che possa essere di facile accesso e consultazione. L'auspicio è che in futuro sia possibile individuare, catalogare, classificare e standardizzare tutte le segnalazioni in modo da ottenere un *database* integrato, attendibile e armonizzato a scala nazionale.

BIBLIOGRAFIA

- BELLOTTI P., CHIOCCI F.L., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P. (1994) - *Sequence stratigraphy and depositional setting of the Tiber Delta; integration of high-resolution seismics, well logs, and archeological data*. Journal of Sedimentary Research, 64(3b), 416-432.
- BIGI S., BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., D'AMBROGI C., DOGLIONI C., FERRANTE V., LOMBARDI S., MILLI S., ORLANDO L., RUGGIERO L., TARTARELLO M.C. & SACCO P. (2014) - *Mantle-derived CO₂ migration along active faults within an extensional basin margin (Fiunicino, Rome, Italy)*. Tectonophysics, 637, 137-149.
- CATALANO R., AGATE M., BASILONE L., DI MAGGIO C., MANCUSO M. & SULLI A. (2011) *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio n. 593 "Castellammare del Golfo"*, 239. Servizio Geologico d'Italia - ISPRA. SystemCart srl.
- CATALANO R., BASILONE L., DI MAGGIO C., MORTICELLI M. G., AGATE M. & AVELLONE G. (2013) *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio n. 594-585 "Partinico-Mondello"*, 270. Servizio Geologico d'Italia - ISPRA. System Cart srl.
- CATTANEO A., CORREGGIARI A., LANGONE L. & TRINCARDI

- F. (2003) - *The late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: sediment pathways and supply fluctuations*. *Marine Geology*, 193(1-2), 61-91.
- CATTANEO A., TRINCARDI F., ASIOLI A. & CORREGGIARI, A. (2007) - *The Western Adriatic shelf clinoform: energy-limited bottomset*. *Continental Shelf Research*, 27(3-4), 506-525.
- D'ANGELO S., FIORENTINO A., GIORDANO G., PENSA A., PINTON A. & VITA L. (Eds) (2019) - *Atlas of Italian submarine volcanic structures*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **104**: pp. 186, D.R.E.Am Italia, Firenze.
- FLEISCHER P., ORSI T.H., RICHARDSON M. & ANDERSON A.L. (2001) - *Distribution of free gas in marine sediments: A global overview*. *Geo-Marine Letters*, **21**, 103-122, 10.1007/s003670100072.
- GELETTI R., DEL BEN A., Busetti M., RAMELLA R. & VOLPI V. (2008) - *Gas seeps linked to salt structures in Central Adriatic Sea*. *Basin Res.*, **20**(4), 473-487.
- HOVLAND M. & JUDD A.G. (1988) - *Seabed Pockmarks and Seepages*. 293 pp., Graham & Trotman, London.
- MARTELLI L., NARDI G., CAMMAROSANO A., CAVUOTO G., AIELLO G., D'ARGENIO B. & MARSELLA E. (in stampa). *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio n. 502 "Agropoli"*. Servizio Geologico d'Italia - ISPRA.
(http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/502_Agropoli.pdf) accesso 02072019.
- MITCHUM JR R.M., VAIL P.R. & SANGREE J.B. (1977) - *Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation*. 117-133.
- MONECKE T., PETERSEN S., AUGUSTIN N. & HANNINGTON M. (2019) - *Seafloor hydrothermal systems and associated mineral deposits of the Tyrrhenian Sea*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **104**, 41-74.
- ORANGE D.L., GARCÍA-GARCÍA A., MCCONNELL D., LORENSON T., FORTIER G., TRINCARDI F. & CAN E. (2005) - *High-resolution surveys for geohazards and shallow gas: NW Adriatic (Italy) and Iskenderun Bay (Turkey)*. *Marine Geophysical Researches*, **26**(2-4), 247-266.
- ORI G.G. & RUSCIADELLI G. (2015) - *Note illustrative del F. 351 "Pescara" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000*, 118. Serv. Geol. d'It., ISPRA, A.T.I. - S.EL.CA. srl - SystemCart srl.
- PASSARO S., TAMBURRINO S., VALLEFUOCO M., TASSI F., VASELLI O., GIANNINI L., CHIODINI G., CALIRO S., SACCHI M., RIZZO A.L. & VENTURA G. (2016) - *Seafloor doming driven by degassing processes unveils sprouting volcanism in coastal areas*. *Scientific Reports*, **6**, 22448.
- PENSA A., PINTON A., VITA L., BONAMICO A., DE BENEDETTI A.A. & GIORDANO G. (2019) - *Atlas of Italian Submarine Volcanic Structures*. In: D'ANGELO S., FIORENTINO A., GIORDANO G., PENSA A., PINTON A. & VITA L. (Eds): *Atlas of Italian submarine volcanic structures*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **104**, 77-184.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (in prep.) - *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio n. 386 "Fiumicino"*.
- TRINCARDI F., ARGNANI A. & CORREGGIARI A. (2010a) - *Note illustrative del F. NL 33-7 "Venezia" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:250.000*, 151. Serv. Geol. d'It., ISPRA, S.EL.CA. srl., Firenze.
- TRINCARDI F., ARGNANI A. & CORREGGIARI A. (2010b) - *Note illustrative del F. NK 33-1/2 "Ancona" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:250.000*, 143. Serv. Geol. d'It., ISPRA, S.EL.CA. srl., Firenze.
- TRINCARDI F., ARGNANI A. & CORREGGIARI A. (2010c) - *Note illustrative del F. NK 33-5 "Pescara" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:250.000*, 167. Serv. Geol. d'It., ISPRA, S.EL.CA. srl, Firenze
- TRINCARDI F., ARGNANI A. & CORREGGIARI A. (2010d) - *Note illustrative del F. NK 33-6 e NK 33-8/9 "Vieste e Bari" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:250.000*, 194. Serv. Geol. d'It., ISPRA, S.EL.CA. srl, Firenze.
- WOLINSKY M.A. & PRATSON, L.F. (2007) - *Overpressure and slope stability in prograding clinoforms: Implications for marine morphodynamics*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **112**(F4).

INDICE

INDEX

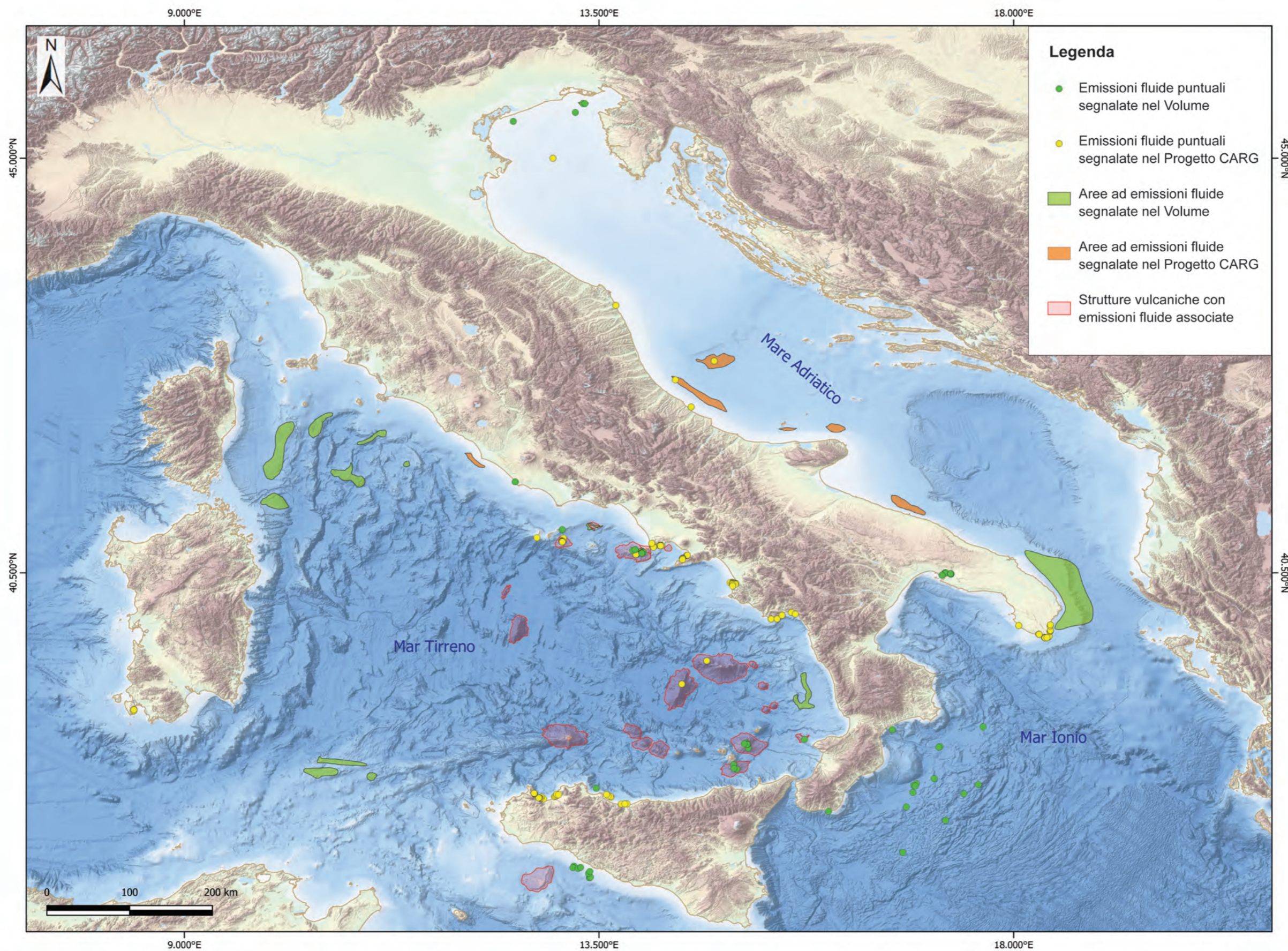
| | |
|--|--------|
| Presentazione/ <i>Presentation</i> | pag. 3 |
| Premessa/ <i>Foreword</i> | » 5 |
| D'ANGELO, BATTAGLINI L. & FIORENTINO A. - <i>Raccolta sistematica e archiviazione di dati sulle emissioni fluide sommerse</i> | » 7 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 7 |
| 2. - STUDI RECENTI SUL FENOMENO DELLE EMANAZIONI FLUIDE NEL MEDITERRANEO..... | » 8 |
| 3. - INFORMAZIONI DERIVANTI DAL PROGETTO CARG..... | » 8 |
| 4. - EMANAZIONI FLUIDE COME EVENTI GEOLOGICI..... | » 9 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 10 |
| BUSETTI M., BABICH A. & DEL BEN A. - <i>Evidenze geofisiche di emissioni di fluidi nel Golfo di Trieste (Nord Adriatico)</i> | » 11 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 11 |
| 2. - DESCRIZIONE DEI SITI..... | » 12 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 15 |
| GORDINI E. & DONDA F. - <i>Emissioni gassose di metano in Adriatico Settentrionale: quale ruolo nei processi di cementazione dei sedimenti marini?</i> | » 17 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 17 |
| 2. - CASO STUDIO 1 - CAMPIONAMENTO E ANALISI CHIMICHE SUI GAS..... | » 21 |
| 3. - CASO STUDIO 2 - AFFIORAMENTO BARDELLI..... | » 21 |
| 4. - CASO STUDIO 3 - AFFIORAMENTO D'ANCONA..... | » 22 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 23 |
| GELETTI R., DEL BEN A., BUSETTI M. & VOLPI V. - <i>Evidenze di gas-seepage associate a strutture tettoniche profonde in Mare Adriatico Centrale</i> | » 25 |
| 1. - GAS-SEEPAGE ASSOCIATO A STRUTTURE TETTONICHE PROFONDE..... | » 25 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 28 |
| MANCINELLA D., MANTERO D. & TESTARDI M. - <i>Emissioni gassose sottomarine nel tratto costiero prospiciente Tor Caldara (Lazio meridionale)</i> | » 29 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 29 |
| 2. - L'AREA DI TOR CALDARA: BREVE INQUADRAMENTO GENERALE..... | » 29 |
| 3. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE..... | » 30 |
| 4. - LE EMISSIONI GASSOSE SOTTOMARINE DI TOR CALDARA..... | » 31 |
| 5. - CONCLUSIONI..... | » 32 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 33 |
| LORETO M.F. - <i>Evidenze morfologiche di campi di pockmark e fuoriuscite di fluidi sui fondali del Mar Tirreno</i> | » 35 |
| 1. - CAMPO DI POCKMARK TYR0001, TIRRENO SETTENTRIONALE..... | » 36 |
| 2. - CAMPO DI POCKMARK TYR0002, TIRRENO SETTENTRIONALE..... | » 37 |
| 3. - CAMPO DI POCKMARK TYR0003, TIRRENO SETTENTRIONALE..... | » 38 |
| 4. - CAMPO DI POCKMARK TYR0004, TIRRENO SETTENTRIONALE..... | » 39 |
| 5. - CAMPO DI POCKMARK TYR0005, TIRRENO SETTENTRIONALE..... | » 40 |
| 6. - CAMPO DI POCKMARK TYR0006, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE..... | » 41 |
| 7. - CAMPO DI POCKMARK TYR0007, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE..... | » 42 |
| 8. - CAMPO DI POCKMARK TYR0008, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE..... | » 43 |
| 9. - FLUID VENTING E POCKMARK TYR0009, NEI SEDIMENTI PLIO-QUATERNARI DEL BACINO DI PAOLA, CALABRIA OCCIDENTALE (TIRRENO SE)..... | » 43 |
| 10. - FUGA DI FLUIDI AL TETTO DI UN SEAMOUNT DI ORIGINE VULCANICA IN PROSSIMITÀ DELLA COSTA CALABRA, TIRRENO SUD-OCCIDENTALE - TYR0010..... | » 45 |
| 11. - POCKMARK FIELD IDENTIFICATO IN PROSSIMITÀ DEL CANYON CAPRERA A LARGO DELLA SARDEGNA, TIRRENO SETTENTRIONALE - TYR0011..... | » 45 |
| 12. - POCKMARK E STRUTTURE DA FLUID ESCAPE AL LARGO DELLA SICILIA SETTENTRIONALE, TIRRENO MERIDIONALE - TYR0012..... | » 47 |
| 13. - POCKMARK FIELD TYR0013 NELL'AREA DEL RIDGE VULCANICO DI VENTOTENE, TIRRENO CENTRALE..... | » 48 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 50 |
| INGRASSIA M., BEAUBIEN S., BOSMAN A., CHIOCCI F.L., CONTE A.M., DI BELLA L., FREZZA V., GRAZIANI S., ITALIANO F., MACELLONI L., MARTORELLI E. & SPOSATO A. - <i>Il sistema idrotermale sottomarino a largo dell'Isola di Zannone (Arcipelago Pontino occidentale, Mar Tirreno)</i> | » 51 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 52 |
| 2. - ARCIPELAGO PONTINO..... | » 52 |
| 3. - ZANNONE GLANT POCKMARK (ZGP)..... | » 52 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 54 |

| | |
|--|-------|
| GAMBI M.C., GAGLIOTI M. & TEIXIDO N. - <i>I sistemi di emissione di CO₂ dell'isola d'Ischia (Mar Tirreno)</i> | » 55 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 55 |
| 2. - IL CASTELLO ARAGONESE..... | » 56 |
| 3. - LA VULLATURA..... | » 56 |
| 4. - LE CHIANE DEL LUME..... | » 59 |
| 5. - LA GROTTA DEL MAGO..... | » 59 |
| 6. - LA SECCA DELLA MADONNINA..... | » 62 |
| 7. - MARINA DI LACCO AMENO..... | » 62 |
| 8. - SPIAGGIA DI CHIAIA (FORIO)..... | » 62 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 63 |
| VALENZANO E., D'ONGHIA M., DE GIOSA F. & DEMONTE P. - <i>Morfologia delle sorgenti sottomarine dell'area di Taranto (Mar Ionio)</i> | » 65 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 65 |
| 2. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO..... | » 66 |
| 2.1. - DATI DISPONIBILI..... | » 66 |
| 3. - RISULTATI..... | » 66 |
| 3.1. - MAR GRANDE..... | » 66 |
| 3.2. - MAR PICCOLO, PRIMO SENO..... | » 68 |
| 3.3. - MAR PICCOLO, SECONDO SENO..... | » 68 |
| 4. - CONCLUSIONI..... | » 69 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 69 |
| GELETTI R., DEL BEN A., COLIZZA E., LUCCHI R.G., CANDONI O. & MOCNIK A. - <i>Vulcani di fango e strutture coralline associate a evidenze gassose in Canale d'Otranto (Adriatico Meridionale)</i> | » 71 |
| 1. - EVIDENZE MORFOLOGICHE E RELAZIONI CON ACCUMULI GASSOSI PROFONDI..... | » 71 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 75 |
| CERAMICOLA S., PRAEG D., COVA A., LOHER M., BOHRMANN G. & MASCLE J. - <i>Mud volcanoes and seafloor fluid seepage on the Calabrian accretionary prism (Ionian Sea)</i> | » 77 |
| 1. - INTRODUCTION..... | » 78 |
| 2. - PREVIOUS STUDIES..... | » 78 |
| 3. - CALABRIAN ACCRETIONARY PRISM..... | » 78 |
| 4. - NEW INTERPRETATIONS..... | » 78 |
| 5. - DATA COLLECTION..... | » 79 |
| 6. - DISCUSSION..... | » 80 |
| REFERENCES..... | » 80 |
| SPAGNOLI F., ANDALORO F., CANESE S., CAPACCIONI B., ESPOSITO V., GIORDANO P., ROMEO T. & BORTOLUZZI G. - <i>Nuove recenti conoscenze sul sistema idrotermale del complesso vulcanico dell'Isola di Panarea (Arcipelago delle Eolie, Mar Tirreno Meridionale)</i> | » 85 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 86 |
| 2. - NUOVE EVIDENZE DALL'AREA IDROTERMALE SOTTOMARINA TRA LE ISOLE DI PANAREA E BASILUZZO..... | » 87 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 89 |
| VIZZINI S., ANDOLINA C., CARUSO C., CORBO A., GUGLIANDOLO C., LAZZARO G., LONGO M., ITALIANO F. & MAZZOLA A. - <i>Isole Eolie: i campi di emissioni vulcaniche sottomarine di CO₂ a Vulcano e Panarea</i> | » 91 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 91 |
| 2. - VULCANO..... | » 92 |
| 3. - PANAREA..... | » 93 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 94 |
| MANCUSO M.R. & CATALANO R. - <i>Evidenze sismostratigrafiche di fenomeni da espulsione di fluidi, superficiali e profondi, nell'offshore tra Sciacca e Agrigento (Sicilia meridionale)</i> | » 97 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 97 |
| 2. - INQUADRAMENTO REGIONALE ASSETTO STRUTTURALE E STRATIGRAFICO..... | » 98 |
| 2.1. - MORFOLOGIA MARINA E CONDIZIONI OCEANOGRAFICHE..... | » 98 |
| 2.2. - DATI E METODOLOGIE D'ANALISI..... | » 100 |
| 2.3. - DEFORMAZIONI DEI SEDIMENTI AD OPERA DI FENOMENI DI INIEZIONE E DEGASSAMENTO ENTRO I SISTEMI TRASGRESSIVI E DI STAZIONAMENTO ALTO..... | » 100 |
| 3. - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE..... | » 101 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 102 |
| D'ANGELO, BATTAGLINI L. & FIORENTINO A. - <i>Le emissioni fluide nei mari italiani</i> | » 103 |
| 1. - INTRODUZIONE..... | » 103 |
| 2. - SEGNALAZIONI DI EMISSIONI FLUIDE RACCOLTE DAL SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA..... | » 104 |
| 3. - SEGNALAZIONI DI EMISSIONI GASSOSE ASSOCIATE ALLE STRUTTURE VULCANICHE..... | » 105 |
| 4. - COMMENTI CONCLUSIVI..... | » 106 |
| BIBLIOGRAFIA..... | » 106 |

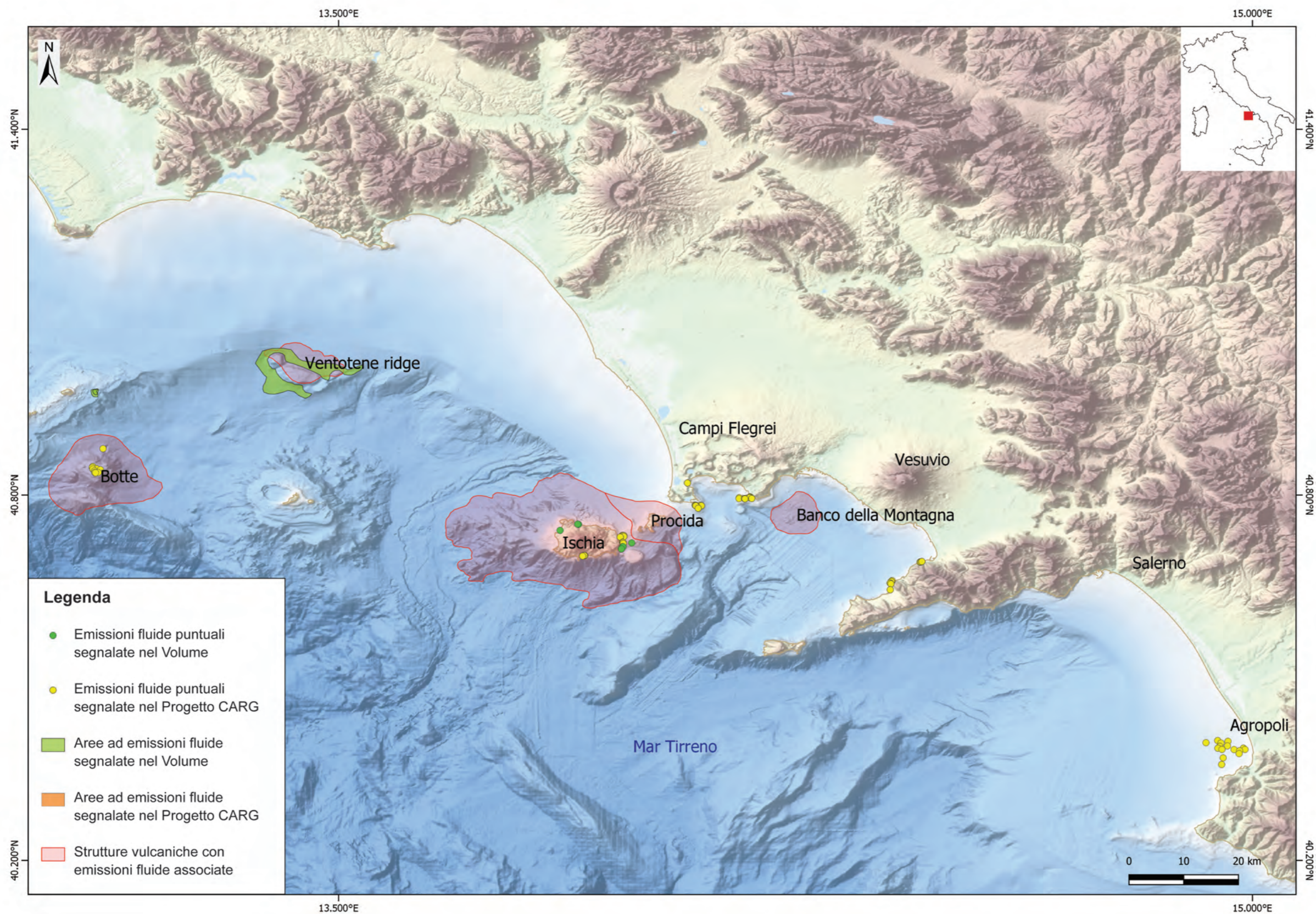
Finito di stampare nel mese di marzo 2020 da:



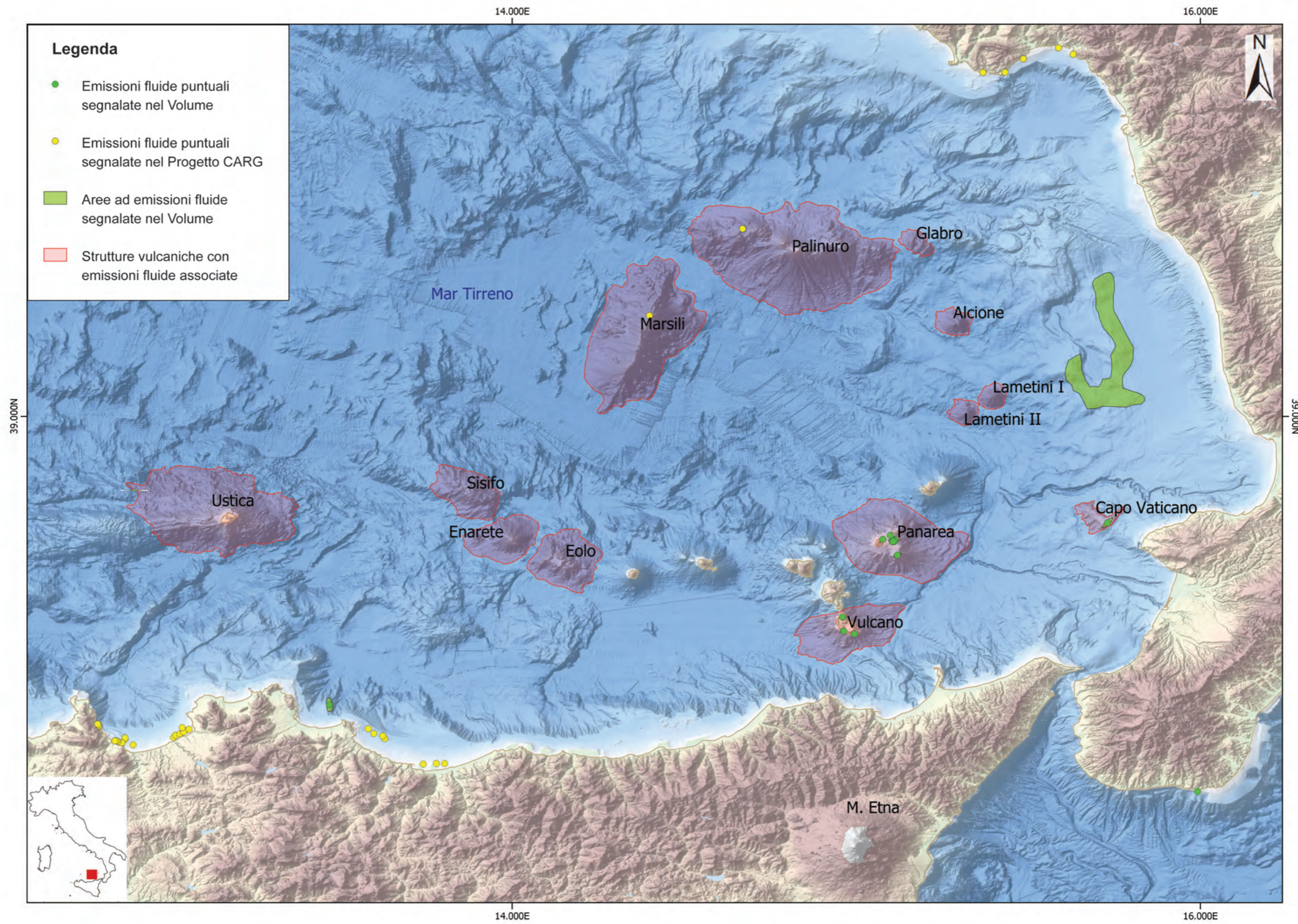
Tav. 1 - Rappresentazione delle emissioni fluide riportate in questo volume.
- Representation of fluid emissions cited in this volume.



Tav. 2 - Rappresentazione delle emissioni fluide nell'area antistante la costa della Campania, con l'ubicazione del campo di emissione idrotermale denominato Banco della Montagna.
 - Representation of fluid emissions offshore the Campania coast where the location of the hydrothermal field named Banco della Montagna is reported.



Tav. 3 - Rappresentazione delle emissioni fluide nell'area dell'arco vulcanico delle Isole Eolie.
- Representation of fluid emissions in the area of the Aeolian Islands volcanic arc.



ISBN 978-88-9311-077-8



9 788893 110778

€ 10,00 + IVA