



Progetto MARINE HAZARD

OR1.1 Report sullo stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sull'esplorazione, lo sfruttamento e la conservazione dei depositi di origine idrotermale (GSI)

Deliverable report

Attività 1.1.1 – Stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sull'esplorazione e sfruttamento dei depositi di origine idrotermale (GSI)

A cura di (Per il CNR): Salvatore Passaro (1), Stella Tamburrino (1), Mattia Vallefuoco (1), Marco Sacchi (1), Massimo Contiero (1), Michele Iavarone (1), Emmagiovanna D'Acunzo (2), Mauro Caccavale (1,4), Antimo Guarino (1), Daniela Salvagio Manta (3), Enza Maria Quinci (3) Mario Sprovieri (3)

- 1) Ismar (Istituto di Scienze Marine) CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), Calata Porta di Massa – Interno Porto, 80133 Napoli
- 2) Ismar (Istituto di Scienze Marine) CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), Area della Ricerca di Roma 2 - Tor Vergata, Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma
- 3) IAS (Istituto per lo studio degli impatti Antropici e Sostenibilità in ambiente marino), CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), via del Mare n. 3 - 91021 Torretta Granitola (TP)
- 4) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione Osservatorio Vesuviano (OV), Via Diocleziano 328, 80125, Napoli, Italy



Sommario

Premessa	4
1.1 Descrizione dei fenomeni di idrotermalismo a scala di bacino Mediterraneo	5
1.1.1 Introduzione	5
1.1.2 Arco vulcanico ellenico.	6
1.1.2 Esempi di vents dell'Arco Ellenico	7
1.1.3 Vents nel Mar Tirreno SE	10
1.1.4 Palinuro Seamount.....	11
1.1.5 Marsili Seamount	12
1.1.6 Arco Eoliano	14
1.1.7 Ulteriori centri di emissione	15
1.2 Tipologie di deep sea mining	17
Depositi costituiti da solfuri	17
Noduli polimetallici.....	17
Croste di cobalto	18
1.3 Stato dell'arte della conoscenza sulle venute di fluidi nel Mar Tirreno	20
2. Sfruttamento dei Giacimenti idrotermali: stato dell'arte a livello internazionale.....	21
2.1 Breve Descrizione dei Progetti realizzati a livello internazionale.....	21
2.1.1 Progetto Bluenodules	21
2.1.2 Progetto Miningimpact.....	21
2.1.4 Progetto Blue mining	24
2.1.5 NTNU Oceans pilot programme on deep-sea mining.....	25
2.1.6 Progetto SAGRES (Copernicus).....	25
2.1.7 Progetto SPC-EU Deep Sea Minerals.....	26
2.2 Strutture internazionali che si occupano di giacimenti minerari sottomarini	28
Seabed Authority (ISA)	28
NTNU Research Institute (Norvegia)	28
SOTON Research Institute (Inghilterra)	29
2H Offshore (Inghilterra)	29
IHG (Olanda).....	29
MARIN Research Institute (Olanda)	30
TNO Research Institute (Olanda).....	30



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero per la Coesione Territoriale

Uniresearch (Olanda)	30
Dredging International Industry (Belgio)	30
SEA Europe Service Supplier (Belgio)	31
BGR Research Institute (Germania)	31
GEOMAR Research Institute (Germania)	31
Ramboll-IMS Industry (Germania)	32
MHWirth (Germania)	32
Trans-Tasman Resources Ltd (Nuova Zelanda)	32
Chatham Rock Phosphate Ltd (Nuova Zelanda)	33
National Institute of Ocean Technology (Chennai, India)	33
2.3 Le comunità biologiche dei GSI: varietà e distribuzione	34
3. Valutazioni di potenziali giacimenti sottomarini in aree di GSI	39
3.1 Potenziale interesse economico	39
3.2 Approccio tecnico utilizzato per l'estrazione dei minerali a livello internazionale.	41
4. Valutazione delle pericolosità derivante da potenziale estrazione:	44
4.1 Hazard sismico in aree di GSI con focus sul Mar Tirreno	44
4.2 Hazard vulcanico in aree di GSI	48
4.3 Hazard bio-geochimico in aree di GSI (con focus sul Mar Tirreno)	49
4.4 Instabilità dei versanti in aree di vents idrotermali: studi esistenti (con focus sul Mar Tirreno) (CNR, Resp. Salvatore Passaro)	52
4.4.1 Studi di collassi laterali sui fianchi dei vulcani nel Mar Tirreno	52
4.4.2 Esempi di eventi di collasso delle aree idrotermali del SE Tirrenico	53
5 Aspetti legali e convenzioni a livello internazionale/nazionale	57
5.1 Implicazioni restrittive in ZEE	57
5.2 Ulteriore dettaglio su aspetti normativi di riferimento (il caso Italia)	58
Conclusioni	60
Riferimenti bibliografici	62



Premessa

Il presente report (OR1.1 Stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sull'esplorazione, lo sfruttamento e la conservazione dei depositi di origine idrotermale) è stato sviluppato nell'ambito dell'Obiettivo Realizzativo 1 (OR1) del progetto PON Marine Hazard (PON "R&C" 2007-2013 - Avviso D.D. 713/Ric. del 29 ottobre 2010 - TITOL O III - Progetto PON03PE_00203_1) e costituisce un deliverables al progetto stesso per l'attività "Stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sull'esplorazione, lo sfruttamento e la conservazione dei depositi di origine idrotermale (GSI)" (mese 6).

Tale report rappresenta il completamento delle attività di confronto multidisciplinare svolte attraverso meeting, riunioni e conference dedicate, fondamentale per mettere a fattor comune le conoscenze sullo stato dell'arte e per definire i mezzi adeguati per il rilevamento, la cartografia, la mappatura e la caratterizzazione geochimica dei rilievi, l'indagine delle caratteristiche sedimentologiche dei di studio del Progetto.

Obiettivi specifici di questo report sono:

- a. La presentazione dello stato dell'arte della conoscenza in ambito internazionale sulle aree di venute di fluidi, lo stato dell'arte della conoscenza dei depositi ad esse associati (in termini chimico-fisico, mineralogico e della potenziale ricaduta economica del deep sea mining)
- b. L'individuazione (localizzazione) delle aree con presenza di sorgenti di immissione di contaminanti naturali da sistemi sottomarini attivi connessi a strutture vulcaniche e tettoniche su aree con presenza di idrotermalismo del basso Tirreno, arco Eoliano e Canale di Sicilia;
- c. La presentazione dello stato dell'arte della letteratura sulle comunità microbiche e definizione delle forme vitali associate ai diversi sistemi idrotermali in funzione delle condizioni chimico-fisiche, della pressione idrostatica, delle relazioni con l'attività vulcanica. La definizione della tipologia di elementi chimici e specie gassose immessi nelle acque marine e loro possibili relazioni con i sistemi di alimentazione profonda



1.1 Descrizione dei fenomeni di idrotermalismo a scala di bacino Mediterraneo

1.1.1 Introduzione

Le varie fenomenologie connesse alla formazione, migrazione ed espulsione di fluidi possono ricondursi ad alcune categorie principali, in particolare: 1) sistemi controllati dalla compattazione dei sedimenti; 2) Sistemi vulcanici; 3) sistemi associati a giacimenti di idrocarburi; 4) sistemi freatici. Verso la fine degli anni '70 lo studio dei fondali oceanici, con l'impulso prodotto dall'utilizzo di sottomarini, ha permesso la scoperta dell'esistenza di risalite di fluidi idrotermali ("hot vents") caratterizzati dalla strutturazione di camini costituiti principalmente da solfuri e dalla presenza di una peculiare ed abbondante fauna chemiosintetica.

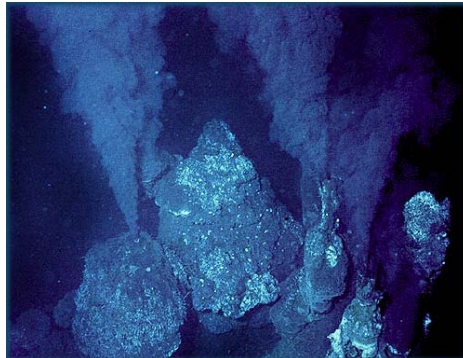


Fig.1 Vents idrotermali tipo black smokers da camini (dorsale del Pacifico)

Le sorgenti idrotermali in genere si formano in ambiente marino profondo, ed in particolare lungo le dorsali medio-oceaniche come la dorsale del Pacifico orientale e la dorsale Medio Atlantica, ma sono comuni anche negli archi vulcanici e nei bacini di retro-arco. La presenza di aree sottomarine di potenziale interesse industriale per lo sviluppo di attività estrattive è strettamente legata all'attività vulcanica responsabile della formazione di sistemi idrotermali che, attraverso uno scambio acqua-roccia ad alte temperature, è in grado di rimuovere selettivamente alcuni elementi chimici arricchendoli nelle fasi solide con precipitati ricchi di solfuri, in grado poi di concrezionarsi in depositi massivi ricchi di elementi come Ag, Cu, Co, Zn, Fe.

In alcuni aree di vent idrotermale si formano strutture a forma di camino (Fig.1) pressoché cilindriche, alte fino a 60 m, in seguito alla precipitazione di minerali (anidrite e solfuri di rame, ferro e zinco) per la ridotta solubilità in acqua causata dallo shock termico in corrispondenza dell'area di emissione (da 3-400 °C iniziali a temperature < 10° C dei fondali di mare profondo). L'alta pressione delle profondità oceaniche, così come la variazione di salinità, espande significativamente il delta termico nel quale l'acqua rimane in fase liquida, col risultato che questa

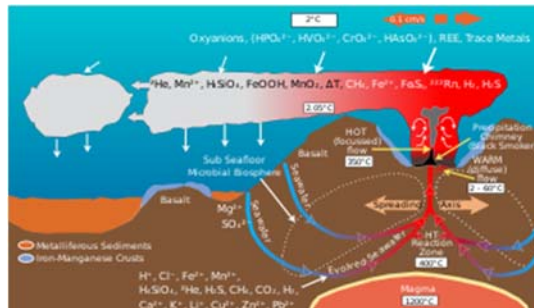


Fig2. Setting chimico-fisico degli ambienti idrotermali

si comporta come un fluido supercritico. Le strutture a camino dette black smokers emettono materiali a temperature prossime ai 300°C caratterizzate da un alto tasso di zolfo o di solfuri. I white smokers si riferiscono, invece, a camini con emissioni a temperature più basse (circa 60°C) con contenuti più elevati di Ba, Ca e Si. Le aree di vents del Mediterraneo si sono sviluppate a profondità molto ridotte rispetto alle dorsali medio-oceaniche (Lupton et al., 2011 e riferimenti contenuti), col risultato della formazione di hot-vents con ambienti peculiari e condizioni di temperatura-pressione molto diverse dalle dorsali, che hanno prodotto condizioni differenziate in modo sito-specifiche. Questi ambienti geologici producono settings chimico-fisici e sedimentari peculiari (Fig. 2). Nel Mediterraneo le aree particolarmente ricche di vents idrotermali sono l'Arco Ellenico, il Mar Tirreno (in particolare l'area SE) ed il canale di Sicilia

1.1.2 Arco vulcanico ellenico.

L'Arco Ellenico è una struttura tettonica lunga circa 1.000 km che va dalle Isole Ionie, situate a nord-ovest della Grecia, all'Isola di Rodi da cui ha poi origine l'Arco di Cipro (Fig.3). È formato da tre distinti elementi: uno più esterno a sud composto dal susseguirsi di 3 fosse oceaniche (Hellenic, Pliny e Strabo), uno intermedio formato da un arco insulare non-vulcanico (es., l'Isola di Creta) ed uno a nord formato da un arco di isole vulcaniche. L'arco insulare non vulcanico sorge immediatamente a nord delle fosse ed è formato dalle Isole Ionie, da Creta, da Rodi e da altre isole minori. Ha origine dal sollevamento di parte del Forearc Basin dovuto alla cinematica compressiva in atto lungo il trench. La natura non vulcanica di questo arco insulare risiede nel fatto che, avvenendo la subduzione sotto la Microplacca Egea con un basso angolo di inclinazione, non viene favorita la parziale fusione del mantello nelle immediate vicinanze delle fosse e quindi la risalita del magma in superficie.

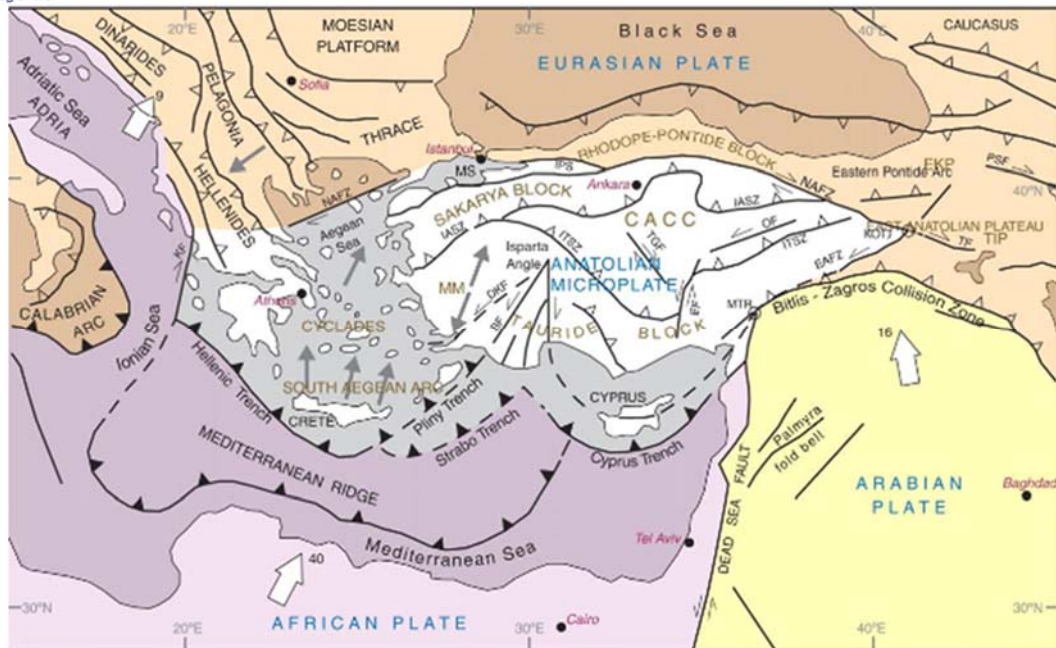


Fig.3 Geologia dell'area orientale del Mar Mediterraneo

Da Creta a Rodi la fossa si divide in due rami (Pliny e Strabo) paralleli tra loro e interconnessi da strutture di tipo trascorrente. Il limite di placca, ovvero l'espressione superficiale dell'area di subduzione della Placca Africana sotto l'Egeo; si trova in corrispondenza del Mediterranean Ridge, ovvero il complesso sedimentario di accrezione (Forearc Basin) formato da elementi di natura vulcanica provenienti dall'Arco e da porzioni di Placca Africana implicate nel processo di subduzione (cuneo di accrezione). Nell'area vulcanica si concentrano centri di emissione di fluidi, in particolare a Kos, Kolumbo Vulcano (connesso al complesso di Santorini), l'Arcipelago di Santorini e Milos. I campi idrotermali sottomarini nel Mar Egeo centrale sono collegati all'arco vulcanico ellenico e imprimono la loro influenza idrotermale sui sedimenti marini locali.

1.1.2 Esempi di vents dell'Arco Ellenico

L'idrotermalismo dell'isola di Milos (Robinson et al.,1997; Thiermann et al.,1997; Stüben and Glasby, 1999; Morri et al., 1999; Dando et al., 2000, Ugur et al., 2003; Aliani et al., 2004, De Biasi et al., 2004; Price et al., 2013; Yücel et al., 2013; Megalovasilis, 2014; Gilhooly et al., 2014; Kleint et al., 2015; Godelitsas et al., 2015; Houghton et al., 2019; Durán-Toro et al., 2019; Lu et al.,2020; Voudouris et al.,2021; Khimasia et al., 2021) è caratterizzato da un'estrema variabilità spaziale in termini di tassi di risalita e proprietà chimico-fisiche. I fluidi differiscono per pH, temperatura, contenuto di gas e di elementi metallici, intensità del flusso di gas e acqua, mentre il substrato roccioso è variabile in termini di spessore e chimica dei sedimenti marini e dei depositi minerali. La variabilità risulta estrema, spesso anche per due eventi molto vicini.



Nell'isola di Kos i fluidi idrotermali sono presenti anche in acque poco profonde e risultano caratterizzati dall'abbondanza di Fe, Mn, Cu, Pb, Cd, Ca, Ba, Sr, Li, Al e Si con significativa variabilità temporale e spaziale (Dando et al, 1998; Zouzias & Seymour, 2008; Megalovasilis, 2014 and 2020; Megalovasilis & Godelitsas, 2015; Gagliano et al, 2019), con valori del flusso massimo misurato in 22 L / h. (Bros Thermi). Flussi più bassi mostrano valori più bassi di Ph (fino a 5,50) Le particelle idrotermali provenienti dalle bocche sottomarine studiate sono dominate dalla presenza di Fe, Ca, Si e Al e fortemente arricchite in Mn, Cu, Pb e Ba.

Sul Vulcano Kolumbo, le esplorazioni ROV nella parte settentrionale del fondo hanno rivelato un ampio campo di vent idrotermale a "flusso diffuso" detto Kolumbo Hydrothermal Field (KHF), a circa 500 m di profondità (Fig.4). Gli oligoelementi solitamente associati all'attività idrotermale ad alta temperatura, come Co, Se e Mo, sono presenti in concentrazioni molto basse, mentre le concentrazioni medie di Fe (16,6% in peso) nei campioni ricchi di solfuro-solfato sono nella media, riflettendo l'abbondanza di pirite nella maggior parte dei campioni. Tuttavia, i campioni di Kolumbo sono impoveriti in Si e Al, mentre le concentrazioni medie e massime di Tl e Sb sono tra le più alte riportate dai moderni sistemi idrotermali dei fondali marini (Brewer, 2013; Carey et al., 2013; Kiliyas et al., 2013; Bourbouli et al., 2015;Christopoulou et al., 2016; Bakalis et al., 2017; Christakis et al., 2018; Mandalakis et al., 2019; Nomikou et al., 2019; Rizzo et al., 2019; Bravakos et al., 2021).

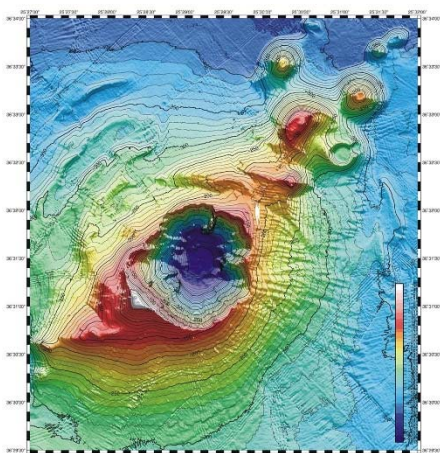


Fig.4 Carta batimetrica (a sinistra) e una delle aree di vent idrotermale (a destra) del Vulcano sottomarino Kolumbo (Grecia)

Nell'Arcipelago di Santorini (Fig. 5), infine, la deposizione di ossido di ferro si è verificata ad una velocità eccezionalmente elevata. È stato anche riscontrato che la deposizione nella parte centrale della baia di Santorini procedeva all'interno di specifiche zone verticali nella colonna d'acqua, e che la deposizione era mediata da processi batteriologici che differivano in intensità a seconda della loro posizione specifica nella Baia interna dell'Arcipelago (Di Paola, 1974; Varnavas& Cronan, 1988 and 2005; Cronan et al., 1995; Mitrousis, 2009; Kiliyas, 2013; Nomikou,



UNIONE EUROPEA

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero per la Coesione Territoriale

2019). Moltissimi altri episodi sono riportati per l'Arco Egeo, ma ancora scarsamente esplorati dal punto di vista delle venute di fluidi attive o dei depositi ad esse associati.

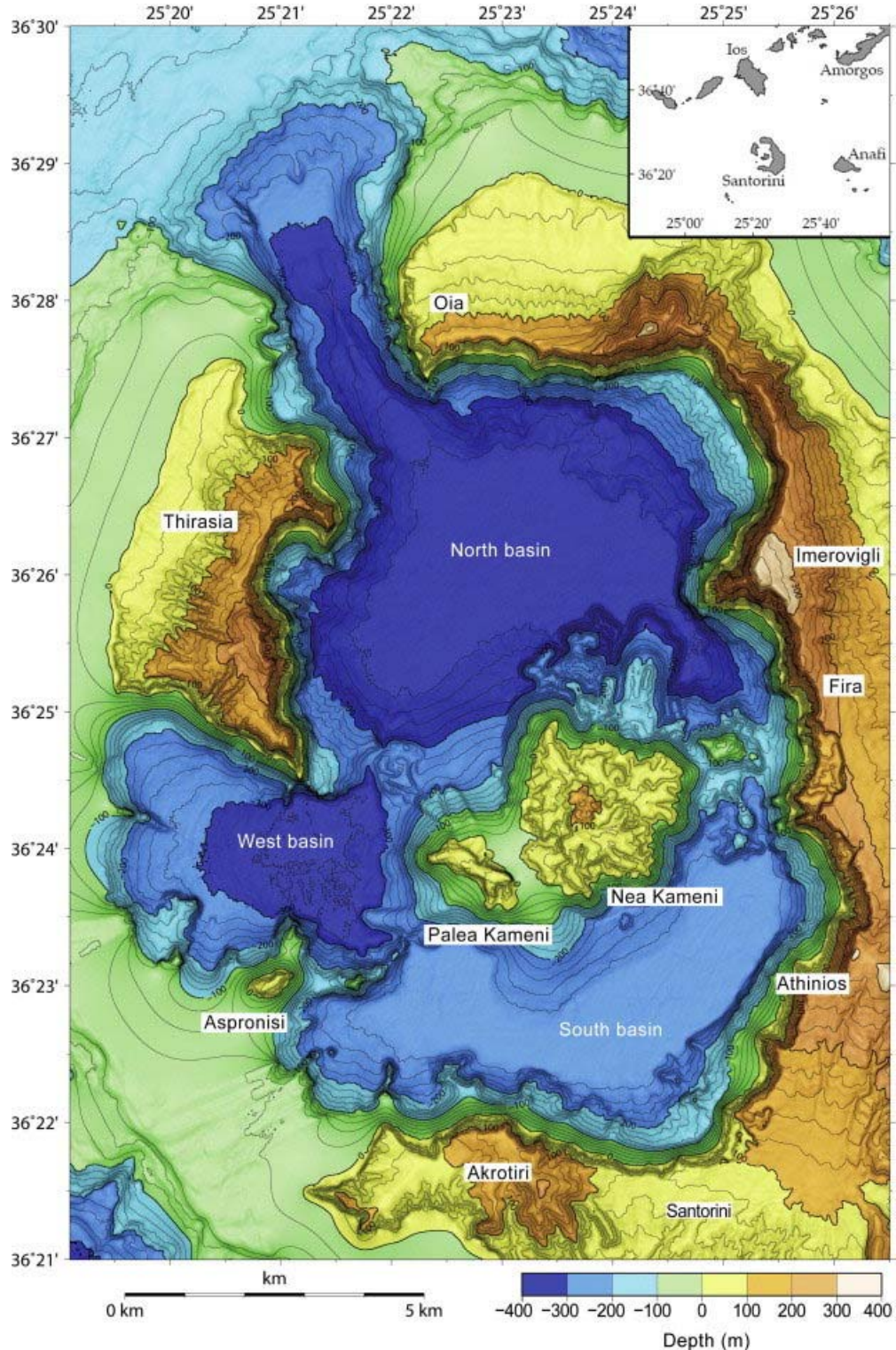


Fig. 5 Carta topografica e batimetrica della caldera di Santorini (Nomiku et al., 2014)

1.1.3 Vents nel Mar Tirreno SE

Il Mediterraneo occidentale si è formato in un contesto di convergenza delle placche NW-SE tra le placche africana ed eurasiatica, con un importante contributo dalla dinamica delle placche nel mantello. L'interazione tra la convergenza delle placche e i meccanismi guidati dal mantello ha prodotto domini compressivi ed estensivi che sono migrati nello spazio e nel tempo durante il Cenozoico (Fig. 6).

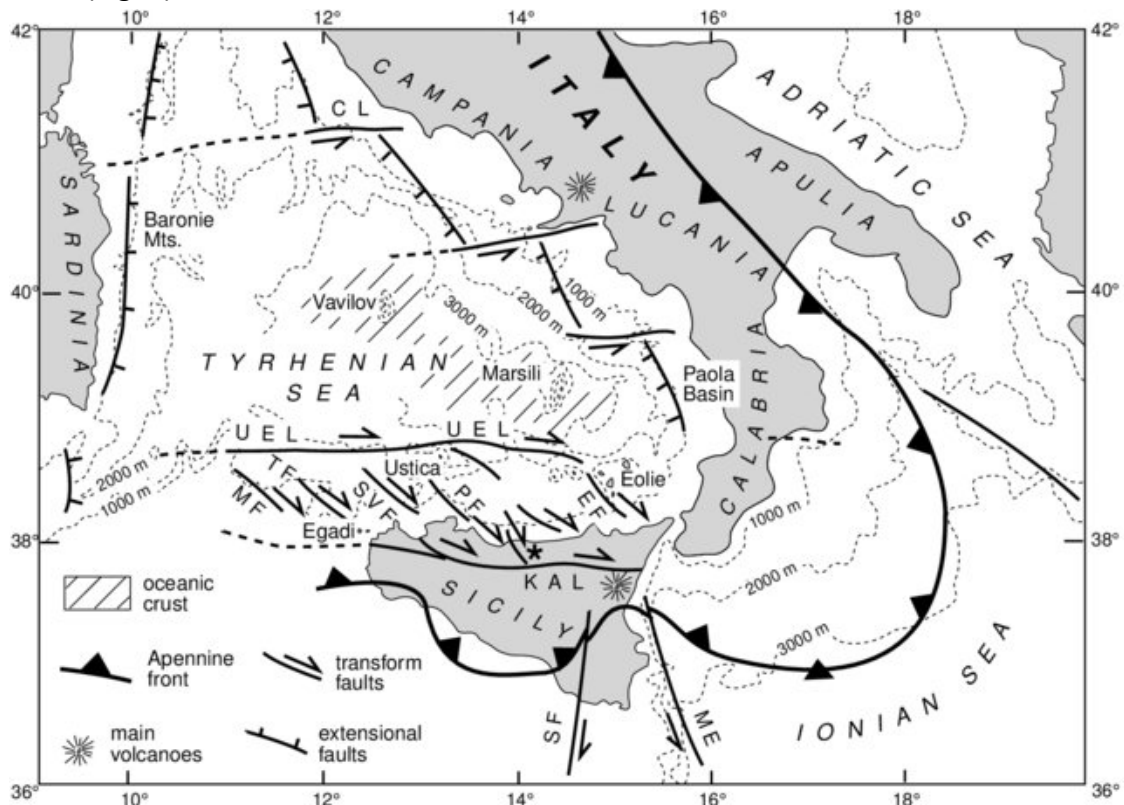


Fig. 6 Schema tettono-strutturale semplificato del Mar Tirreno (Gueguen et al., 2002)

I bacini liguri e tirrenico si sono aperti per arretramento dello slab, determinando lo sfaldamento della litosfera. Le disgregazioni liguri e tirreniche sono state seguite dal magmatismo locale. Il settore meridionale del mar Tirreno e il Canale di Sicilia sono caratterizzati dalla presenza di numerosi seamounts (Sisifo, Enarete, Eolo, Lametini, Alcione, Palinuro, Marsili e Glauco) e da isole vulcaniche (Alicudi, Filicudi, Salina, Lipari, Vulcano, Panarea e Stromboli nel Tirreno, Linosa e Pantelleria nel Canale di Sicilia) la cui formazione ha avuto inizio circa un milione di anni fa per la parte sommersa e circa 400 mila anni fa con lo sviluppo della parte emersa degli edifici vulcanici. Il rapporto isotopico dell'elio, in particolare, ha mostrato valori ascrivibili alla presenza di plumes di origine idrotermale per molti vulcani sottomarini (Marsili, Palinuro, Enarete, Eolo, Sisifo, e Secca del Capo), mentre presumibilmente un'attività idrotermale significativa e conseguenti potenziali giacimenti sono noti sul Seamount Vavilov (Lupton et al., 2011). Siti di



mineralizzazione idrotermale sono stati documentati sui seamounts Marsili, Palinuro, Lametini, Eolo ed Enarete, mentre siti a bassa temperatura ($< 60^{\circ}\text{C}$) sono stati rilevati sul Palinuro (Dekov e Savelli, 2004)

1.1.4 Palinuro Seamount

Il Palinuro è una catena vulcanica con allineamento preferenziale $\text{N}100^{\circ}\text{E}$ allungata per circa 90-100 km (Fig. 7), situata a 70 km W dalla costa Lucano-Calabra. Lungo la cresta principale del complesso vulcanico sono distinti e ben visibili diversi edifici vulcanici, raggruppabili in tre settori che differiscono da un punto di vista morfo-vulcanico. Nel primo settore (occidentale), le morfologie sono di tipo "anfiteatro", e sono probabilmente connesse al collasso gravitazionale di elementi vulcanici attualmente interpretabili come allo stadio calderico, situati a profondità variabile fra -1600m e -1200m. Al margine della caldera meno profonda è visibile un orlo calderico tranciato dalla presenza di un cono disseccato da faglie, interpretabile come un elemento di ringiovanimento nel quadro del collasso calderico della morfostruttura. Nel secondo (settore centrale) sono visibili forme coniche o tronco-coniche, interpretate come morfologie vulcaniche sottoposte all'azione abrasiva connessa all'ultimo stazionamento basso relativo del livello del mare (-120 m, 19.000 anni).

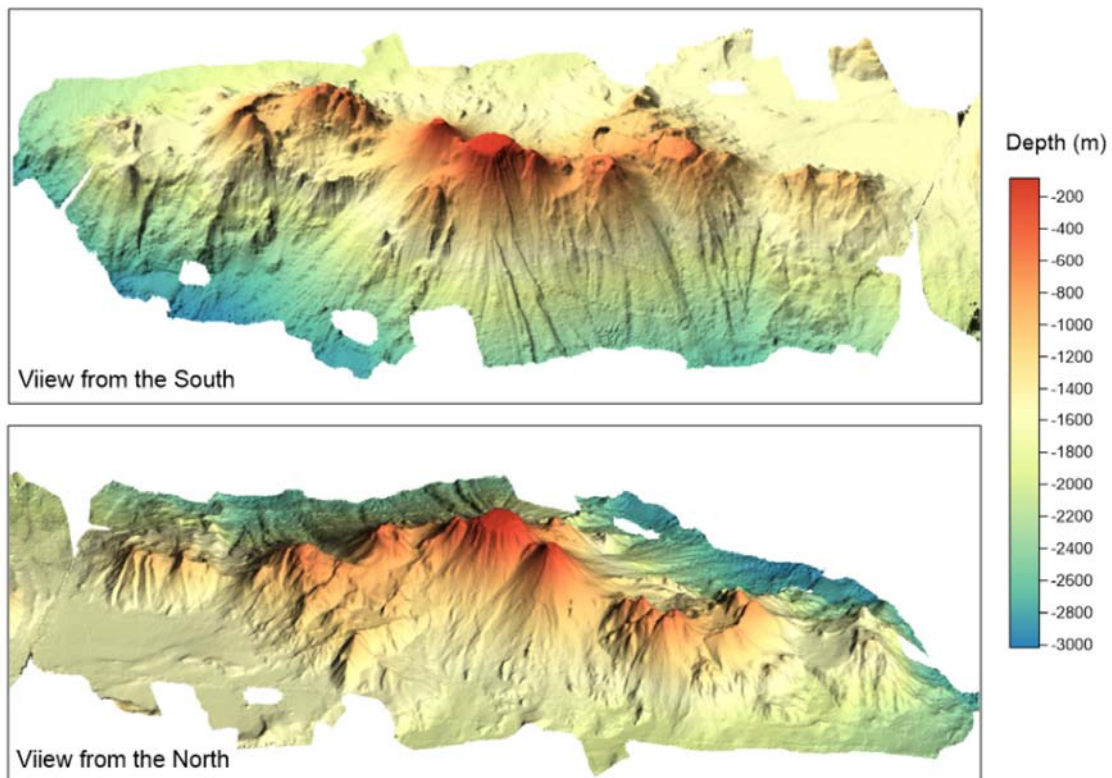


Fig.7 Modello Digitale del Terreno (DTM) del seamount Palinuro (Gallotti et al., 2020)



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministro per la Coesione Territoriale

Il settore centrale risulta essere il meno profondo del complesso vulcanico, e raggiunge la profondità di -84m. Nel margine orientale di questo settore è presente, alla profondità di circa -500m, un cono di origine vulcanica caratterizzato dalla presenza di un cratere, profondo circa 50m, non obliterato da sedimenti, aspetto peculiare che ne suggerisce una attività probabilmente recente.

Il settore orientale si rivela più complesso e articolato, ed è caratterizzato dalla presenza di morfostrutture, probabilmente faglie ad andamento preferenziale N-S o N10°E, che ne dissecano la morfologia. Tali andamenti preferenziali sono presenti anche sul vulcano sottomarino Glabro, situato ad E della catena del Palinuro. Vents idrotermali attivi o fossili sono stati largamente documentati su tutta la catena del Palinuro (Kidd and Armannson, 1979, Minniti and Bonavia, 1984; Minniti et al., 1986; Stuben, 1994; Eckhardt et al., 1997; Maugeri et al., 2010; Peters et al., 2011; Lupton et al., 2011; Milano et al., 2012; Ligi et al., 2014; Caratori Tontini et al., 2014; Petersen et al., 2014; Taviani et al., 2014; Cocchi et al., 2017; Szitkar et al., 2015; Safipour et al., 2017), grazie a campionature del fondo (minerali e croste di rame, noduli e croste di ferro e manganese, altri noduli ricchi in cobalto), ma anche dalla geochimica della colonna d'acqua (rapporto isotopico He_3/He_4), geofisica (demagnetizzazione di rocce alterate dall'idrotermalismo) e OBS (attività sismica dovuta ad idrotermalismo attivo rilevata da forme d'onda di eventi sismici registrati con Ocean Bottom Seismometers; si veda Soloviev et al., 1990).

1.1.5 Marsili Seamount

Il Seamount Marsili (Savelli, 1992; Stuben, 1994; Eckhardt et al., 1997; Marani et al., 1999; Dekov & Savelli, 2004; D'Alessandro et al., 2009; Lupton et al., 2011; Ventura et al., 2013; Italiano et al., 2014; Ligi et al., 2014; Monna et al., 2014; Caratori Tontini et al., 2014; Zimmermann et al., 2014) rappresenta il ridge assiale del bacino di retroarco Marsili e si trova in un'area complessa caratterizzata da vulcanismo attivo e deformazione compressiva ed estensionale.

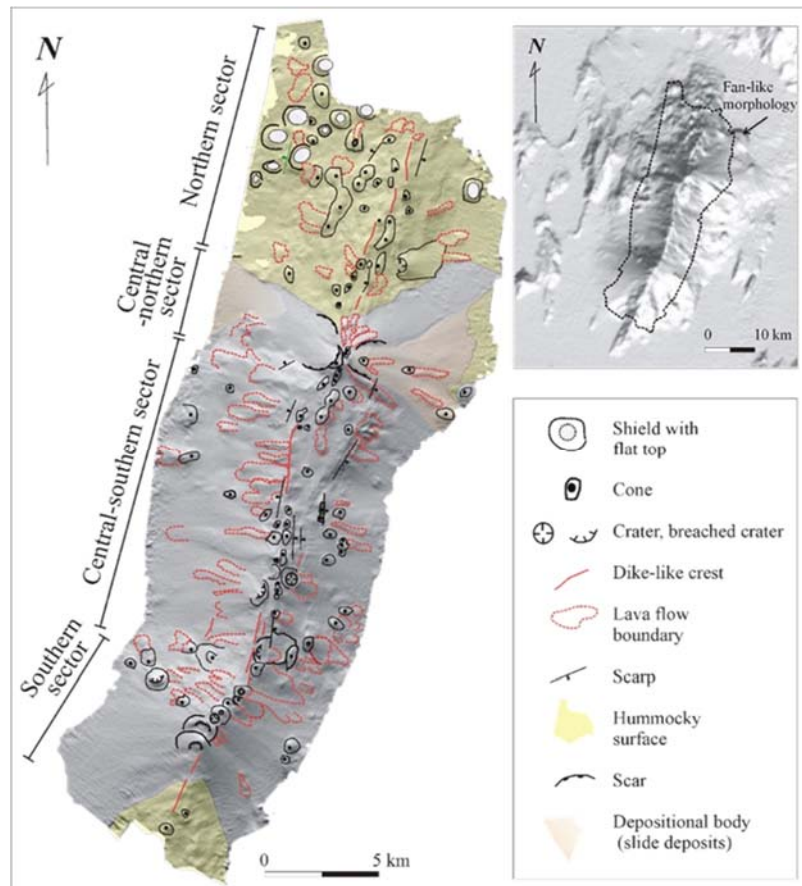


Fig. 8 Sketch map of the geomorphologic features of the Marsili Seamount (Ventura et al., 2013)

Il vulcano Marsili mostra un andamento complessivamente sigmoidale lungo la sua direzione preferenziale di allungamento (N-N10°E). Sia il lato orientale che quello occidentale mostrano pendenze medie molto elevate (15°-35° circa; n Fig. 8). Il lato occidentale del Marsili rivela la presenza di canali e canyon con sezioni arrotondate. Il settore settentrionale differisce morfologicamente dal resto del Seamount, in quanto sembra separato da valli scavate da flussi lavici o gravitazionali dal settore della cresta meridionale. Il Marsili ha una storia eruttiva molto lunga che è iniziata tra 0.7 e 1 milione di anni fa (Ma), di cui naturalmente si conosce ancora poco vista la scarsa quantità di campionature disponibili. Nel corso della sua lunga attività ed in base ai dati di datazione disponibili, il periodo eruttivo più attivo è collocabile soprattutto fra 0.78 e 0.1 Ma durante il quale il Marsili ha dato luogo ad eruzioni prevalentemente effusive e, in misura minore, esplosive a bassa energia. Le sue rocce hanno un'affinità calcalcalina (da bassa ad alta in potassio) e variano in composizione da basalti a trachiti.

Il Marsili Seamount è stato interpretato come la dorsale la cui formazione è connessa alla messa in posto del bacino di retroarco oceanico (<2 Ma) Marsili, che è associata alla subduzione dello slab ionico sotto l'Arco Calabro. L'analisi quantitativa dei dati batimetrici ad alta risoluzione mostra che è allungato in direzione N19° ed è composto da 4 settori e 11 segmenti principali. L'attività di tipo centrale viene alimentata da un serbatoio a forma di sill sovrappressurizzato, che



caratterizza il settore centrale, mentre il vulcanismo fissurale e l'ascesa passiva del magma si verificano ai bordi. I coni indicativi di velocità di versamento elevate si concentrano nei settori assiali, mentre gli scudi a sommità piatta associati a velocità inferiori si trovano all'estremità settentrionale. Lungo l'asse, la migrazione laterale del magma dovuta ad un approfondimento locale dello spessore elastico-fragile della crosta si è verificata dal settore centrale verso la punta settentrionale. La diffusione nel bacino di retroarco del Marsili è cessata a 1 Ma e il monte Marsili sviluppato per ascesa passiva del magma lungo fratture pre-esistenti. I dati magnetici e di gravità suggeriscono la presenza di settori smagnetizzati dovuti all'alterazione idrotermale nel settore centrale del Seamount, mentre le analisi geochimiche della colonna d'acqua e sismicità locale sono coerenti con la presenza di fenomenologie idrotermali attive dal top del seamount stesso (D'Alessandro et al., 2009; Lupton et al., 2011).

1.1.6 Arco Eoliano

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. L'attività vulcanica, ancora oggi in corso in alcune delle isole e nei fondali marini circostanti, ha prodotto anche vents idrotermali in particolare a Vulcano e Panarea. La caratterizzazione geochimica dei gas emessi ha rivelato la presenza dominante di CO₂ con la naturale conseguenza dell'abbassamento dei valori di pH.

L'Isola di Vulcano è caratterizzata dalla presenza di numerose fumarole solforose che possono raggiungere i 400-550 °C, e presenta uno dei campi di emissioni vulcaniche sottomarine di CO₂ più attivi e studiati (Bubron et al., 1990; Sedwick & Stuben 1996; Capaccioni et al., 2001; Boatta et al., 2013; Vizzini et al., 2013 and 2017). 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, elementi in tracce come Ba, Fe, As, Cd sono stati rinvenuti nei sedimenti anche a distanze notevoli dalla sorgente primaria.

L'Isola di Panarea 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, famosa per la presenza di vents idrotermali (Italiano & Nuccio, 1991; Inguaggiato & Italiano, 1998; Caracausi et al., 2005; Capaccioni et al., 2005; Esposito et al., 2006; Gugliandolo et al., 2006). A largo della costa orientale, è presente un campo di emissioni idrotermali sottomarine a profondità di circa 10-15 m. 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. Le emissioni (prevalentemente CO₂ vulcanica) hanno un flusso di circa 106-107 litri al giorno, con temperatura tra 48 e 54°C e valori di pH intorno a 4.7-5.4. Immagini ROV (Remotely Operated Vehicle) hanno consentita la scoperta e localizzazione di un sistema idrotermale situato a sud-ovest dell'Isolotto di Basiluzzo a circa 70-80 m di profondità, denominato "smoking land" (Fig. 9), caratterizzato dalla 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.

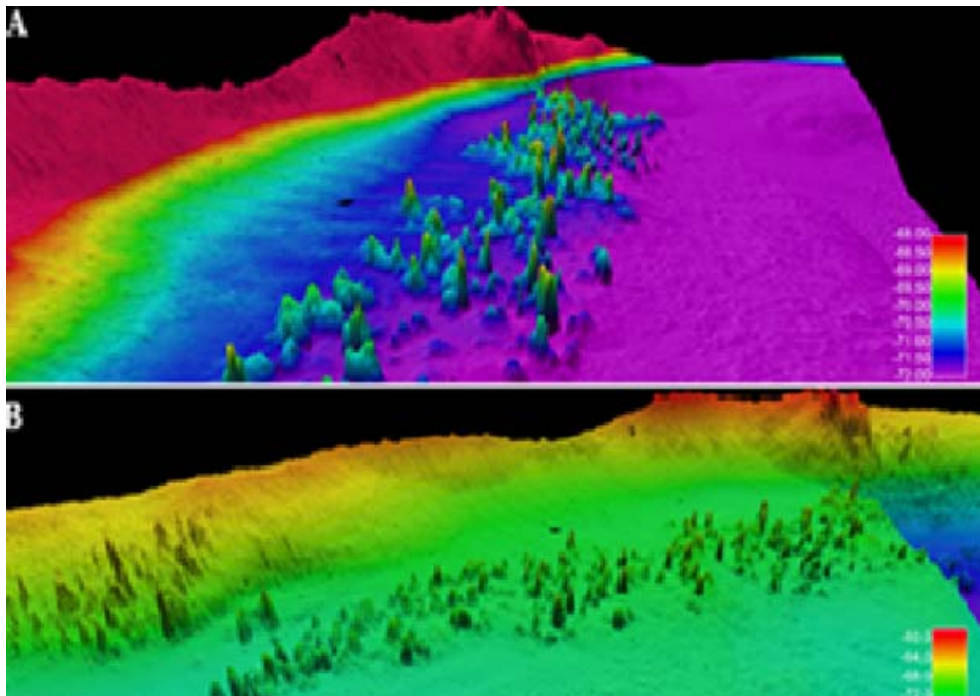


Fig. 9 DTM dell'area di degassamento denominata "smoking land" (Panarea; da Esposito et al., 2018)

1.1.7 Ulteriori centri di emissione

Ulteriori centri di emissione legati ad ambienti vulcanici sono segnalate in letteratura, per i cui riferimenti bibliografici si rimanda a studi di raccolta specifici (D'Angelo et al., 2019, e riferimenti contenuti; Pensa et al., 2019; D'Angelo et al., 2020). In particolare si segnalano strutture tipo pockmarks con emissioni attive nei pressi di Ventotene, sedimenti idrotermali campionati sul Gortani e sul Vavilov Seamount (dove l'attività idrotermale è testimoniata da campioni con recenti precipitati di manganese). Flussi attivi di CO₂ e CH₄ nella colonna d'acqua; correlati a specifiche strutture tettoniche NE-SO, sono state documentate ad Ustica, mentre fumarole attive sono riportate nel Golfo di Napoli e in particolare sul Banco della Montagna



(Passaro et al., 2016; Fig. 10) e nell'area di piattaforma appartenente al complesso vulcanico Somma-Vesuvio (Passaro et al., 2014; Paoletti et al., 2016). Fumarole attive sono state segnalate sul Seamount Emedocle, nell'area NE del Banco Graham (Stretto di Sicilia). Infine, numerosi centri di emissione sono presenti intorno all'Isola d'Ischia, nel Golfo di Pozzuoli (legate al degassamento dell'interno della caldera dei Campi Flegrei), nei fondali delle Isole Pontine e nell'offshore della Sardegna occidentale.

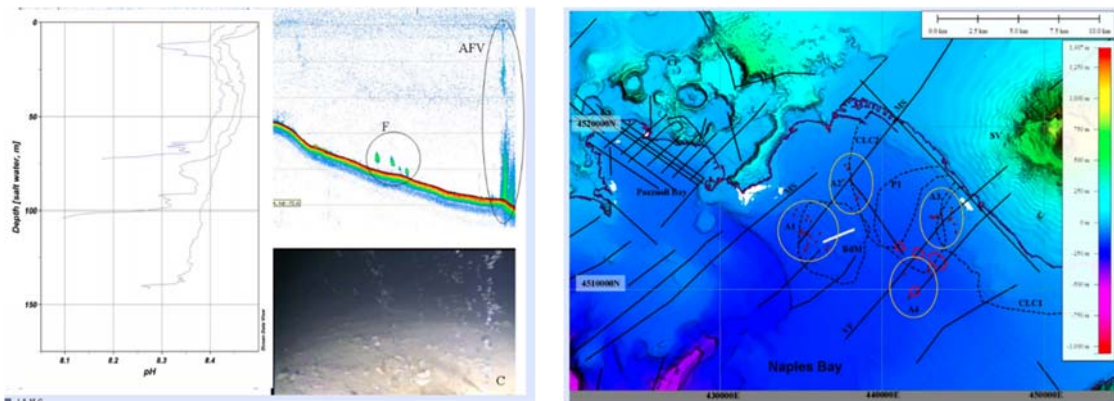


Fig.10 Aree di degassamento (CO_2 di origine vulcanica) attive nel Golfo di Napoli (Passaro et al., 2014)



1.2 Tipologie di deep sea mining

Le risorse minerarie correlate ai vents idrotermali rientrano in quattro categorie, ovvero:

- 1) depositi costituiti da solfuri creati in sistemi di vents idrotermali attivi ad alta temperatura lungo le dorsali oceaniche, centri di emissione di retroarco e archi vulcanici, dalla miscelazione di fluidi idrotermali ricchi di minerali con acqua di mare di fondo
- 2) noduli polimetallici che si formano sul fondo marino dell'oceano aperto (spesso indicati come noduli di manganese)
- 3) altre croste polimetalliche che possono formarsi nel mare profondo sui seamounts (spesso denominate croste di cobalto).
- 4) depositi simili in siti di vents idrotermali inattivi, dove le venute di fluidi sono cessate ma rimangono i depositi minerali che, benché parzialmente rielaborati nel tempo, rientrano sostanzialmente in una delle categorie precedenti sia in termini di proprietà chimico-mineralogiche sia degli ambienti di formazione.

Depositi costituiti da solfuri

Questi depositi sono generati in sistemi di vents idrotermali attivi ad alta temperatura lungo le dorsali oceaniche, centri di emissione di retroarco e archi vulcanici, dalla miscelazione di fluidi idrotermali ricchi di minerali con acqua di mare di fondo. Le prove di depositi minerali idrotermali furono notate per la prima volta nel 1948 durante la spedizione oceanografica svedese Albatross nel Mar Rosso. Questo è stato seguito da scoperte di fanghi metalliferi e salamoie nel 1963-66 nel sistema Rift del Mar Rosso. Questi fanghi metalliferi contenevano grandi quantità di rame, zinco, piombo, ferro, argento e oro. Queste scoperte hanno portato ad altre ricerche simili per le stesse risorse in altre parti degli oceani del mondo che hanno portato alla scoperta di diversi siti idrotermali lungo l'East Pacific Rise System, Galapagos Ridge, Juan de Fuca e Gorda Ridges negli anni '70.

Noduli polimetallici

I noduli polimetallici, chiamati anche noduli di manganese, sono concrezioni minerali formate da strati concentrici di idrossidi di ferro e manganese. La composizione minerale dei minerali contenenti manganese è legata al tipo di formazione: i noduli sedimentari, che hanno un contenuto di Mn^{2+} inferiore a quello diagenetico, sono dominati da Fe-vernadite, Mn-feroxyhyte e asbolane-buserite mentre i noduli diagenetici sono dominati da buserite I, birnessite, todorokite e asbolane-buserite. Le tipologie di accrescimento, ovvero diagenetica e idrogenetica, riflettono condizioni altalenanti di saturazione o meno dell'ossigeno, potenzialmente correlabili a periodi di clima interglaciale e glaciale. È stato stimato che gli strati suboxico-diagenetici di tipo 2 costituiscono circa il 50-60% dell'inventario chimico dei noduli dalla zona di Clarion Clipperton



(denominata CCZ, è una delle più ricche del mondo; Fig. 11) mentre gli strati ossico-idrogenici di tipo 1 comprendono circa il 35-40%. La parte rimanente (5-10%) dei noduli è costituita da particelle di sedimenti incorporate che si verificano lungo fessure e pori.

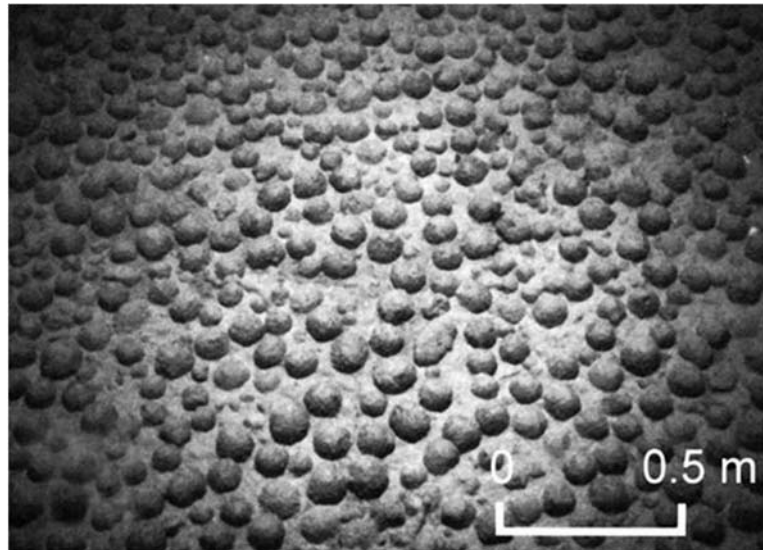


Fig.11 Noduli polimetallici sui fondali della Clarion Coppertone Zone (Oceano Pacifico)

La composizione chimica dei noduli varia a seconda del tipo di minerali di manganese e delle dimensioni e delle caratteristiche del loro nucleo. Quelli di maggiore interesse economico contengono manganese (27–30% in peso), nichel (1,25–1,5% in peso), rame (1–1,4% in peso) e cobalto (0,2–0,25% in peso). Altri componenti includono ferro (6% in peso), silicio (5% in peso) e alluminio (3% in peso), con quantità minori di calcio, sodio, magnesio, potassio, titanio e bario, insieme a idrogeno e ossigeno.

Croste di cobalto

Si tratta di croste polimetalliche che spesso si formano sui seamounts (spesso denominate croste di cobalto; Fig. 12). Le croste formano pavimentazioni del fondo mare spesse fino a 25 centimetri e ricoprono superfici di diversi km quadrati. Secondo una stima, circa 6,35 milioni di chilometri quadrati, o l'1,7% del fondale oceanico è ricoperto da croste ricche di cobalto, il che si traduce in circa 1 miliardo di tonnellate di cobalto (Fig. 13). Le croste non si formano nelle aree in cui i sedimenti coprono la superficie della roccia. Sono state rinvenute nel range di profondità compreso fra circa 400 e 4.000 metri, in contrasto con i 4.000-5.500 metri in cui si rinvengono i noduli di manganese. Le croste generalmente crescono al ritmo di 1-6 millimetri per milione di anni, uno dei processi di formazione naturali più lenti sulla terra. Oltre al cobalto, le croste sono un'importante fonte potenziale



Fig. 12 Croste di cobalto campionate su Seamounts dell'Oceano Pacifico

per molti altri elementi metallici e delle terre rare come titanio, cerio, nichel, platino, manganese, fosforo, tallio, tellurio, zirconio, tungsteno, bismuto e molibdeno. Le croste sono composte dai minerali vernadite (ossido di manganese) e feroxyhyte (ossido di ferro). Si possono trovare quantità moderate di carbonato-fluorapatite in croste spesse, mentre la maggior parte delle croste contiene piccole quantità di quarzo e feldspato.

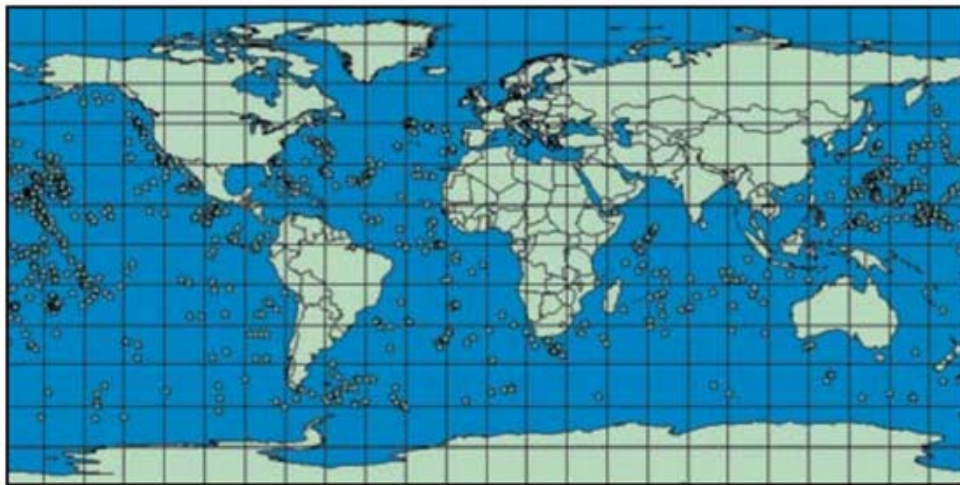


Fig.13 Distribuzione su scala globale dei giacimenti di croste polimetalliche (database ISA; <https://isa.org.jm/>)



1.3 Stato dell'arte della conoscenza sulle venute di fluidi nel Mar Tirreno

Negli ultimi anni le emissioni idrotermali sottomarine hanno acquisito una crescente importanza, tanto che numerosi Enti di Ricerca se ne occupano con interesse. Essi sono ecosistemi che rivestono un ruolo importante nel ricircolo dei nutrienti. Attraverso queste fratture, energia e minerali vengono infatti trasferiti in mare direttamente dal mantello terrestre. Sono ambienti che potrebbero sembrare ostili per le condizioni estreme presenti come ad esempio le elevate temperature raggiunte dall'acqua e il massivo rilascio di CO₂ associato ad un decremento del pH. Sono proprio queste caratteristiche particolari a rendere le emissioni idrotermali un sistema unico sulla Terra.

Le attività di questo task hanno permesso di fare il punto sullo stato delle conoscenze relative alle venute dei fluidi nel Mar Tirreno. Va sottolineato che la conoscenza sui fluidi provenienti dai sistemi idrotermali è limitata dalla scarsità dei dati a disposizione (spesso solo dati provenienti da campionamenti molto limitati).

Fin dalle prime fasi dei lavori, ci si è trovati di fronte al problema di gestire uno stato di conoscenze e dati disponibili estremamente differente per i diversi sistemi idrotermali; mentre per alcuni (come ad esempio il sistema idrotermale delle Isole Eolie) le conoscenze, i dati e le analisi erano decisamente avanzate, per altri, non si avevano a disposizione che pochi campionamenti di acque lungo la colonna d'acqua, effettuati in sporadiche campagne oceanografiche.

In base alle informazioni bibliografiche, sono stati considerati attualmente 4 sistemi idrotermali sottomarini:

Panarea;

Palinuro;

Marsili;

Isola Ferdinandea;

Per ognuno di questi sistemi si stanno raccogliendo dati e informazioni sulla tipologia dei gas, delle acque e dei sedimenti. Si sta procedendo a stilare delle tabelle contenenti i dati raccolti per ogni sistema idrotermale. Queste tabelle verranno ulteriormente popolate dai dati provenienti dalle analisi effettuate sui campioni prelevati nelle future campagne oceanografiche sui siti prescelti.



2. Sfruttamento dei Giacimenti idrotermali: stato dell'arte a livello internazionale

2.1 Breve Descrizione dei Progetti realizzati a livello internazionale

In questa sezione vengono presentati alcuni dei progetti attivi e/o eseguiti a livello internazionale. I maggiori progetti sono stati finanziati da JPI Oceans, EC (H2020), ma anche progetti finanziati a livello nazionale (Norwegian University of Science and Technology – NTNU) e da accordi intercontinentali (come il Deep Sea Minerals Project, una collaborazione tra la Comunità del Pacifico e l'Unione Europea). Il budget finanziato è quantificabile in più di 50 M€ negli ultimi 10 anni.

2.1.1 Progetto Bluenodules

Progetto	Blue Nodules
Sito Web	https://blue-nodules.eu/
Start date:	1 Feb 2016
End date:	31 Jan 2020
Duration:	48 Months
EC Funding:	8 M€

Descrizione: L'obiettivo principale del progetto Blue Nodules era lo sviluppo di un innovativo sistema di estrazione di acque profonde altamente automatizzato e tecnologicamente sostenibile per la raccolta di noduli polimetallici dal fondo del mare.

Altri obiettivi chiave di Blue Nodules: Realizzare ed utilizzare i prototipi di progetto (denominati Apollo I e II) in un business-case minerario per i noduli polimetallici. Tale prototipo doveva essere realizzato in modo da risultare utilizzabile industrialmente fino al range di profondità da 3.000 a 6.000 metri. Il progetto prevedeva l'ottimizzazione estrattiva con la definizione di processi in situ (separazione e dimensionamento dei sedimenti) e processo a bordo (disidratazione e condizionamento) dei sedimenti contenenti i noduli. Infine, realizzare protocolli di estrazione in condizioni di sicurezza per minimizzare l'impatto ambientale in conformità con le politiche e i regolamenti vigenti in materia.

2.1.2 Progetto Miningimpact

Progetto	Miningimpact
Sito Web	http://jpi-oceans.eu/miningimpact
Start date:	January 2015
End date:	December 2017
Duration:	36 Months
EC Funding:	€ 13,200,000



Il progetto JPI Oceans "MiningImpact" mirava a valutare gli impatti a lungo termine dell'estrazione di noduli polimetallici sull'ambiente di acque profonde. Il fulcro del progetto sono state tre campagne di ricerca marina condotte nel 2015 sulla RV Sonne su diverse aree oggetto di potenziale licenza per deep sea mining, ovvero:

- due aree di particolare interesse ambientale (APEI) nella zona di Clarion-Clipperton (CCZ)
- Un esperimento di impatto bentonico (DISCOL) nel Bacino del Perù.

Obiettivi

- Analizzare congiuntamente le conseguenze ecologiche a lungo termine dell'estrazione di noduli polimetallici in acque profonde per fornire la base di conoscenza e informare lo sviluppo del regime di regolamentazione internazionale delle attività minerarie in acque profonde
- Prevedere le conseguenze ecologiche, biogeochimiche e idrodinamiche di un impatto minerario.
- Testare una serie di moderni metodi di valutazione rapida e tecniche di monitoraggio per definire lo stato dell'ecosistema.
- Comunicare i risultati alle parti interessate e ai responsabili politici.
- Condurre uno studio di riferimento comparativo in diversi ambienti di acque profonde (ad esempio stati trofici e montagne sottomarine)

Le principali tematiche affrontate da "MiningImpact" sono state:

- Come si è evoluto l'ecosistema delle profondità marine (biodiversità delle specie, struttura della comunità, funzionamento biogeochimico) in varie aree disturbate nella CCZ e DISCOL diversi decenni dopo l'impatto?
- Le API e i seamounts possono svolgere il loro ruolo previsto come aree di conservazione per le specie associate ai noduli?
- Quanto è grande l'impronta spaziale e temporale prevista delle operazioni minerarie in acque profonde?
- Qual è la connettività a lungo raggio delle specie nella CCZ e in che modo è influenzata dall'estrazione mineraria?

Principali risultati scientifici del progetto.

Gli ecosistemi dei noduli supportano una fauna altamente diversificata di specie sessili e mobili. Le comunità faunistiche e i parametri ambientali mostrano un'elevata variabilità anche su scala spaziale molto locale. Le comunità di fauna bentonica differiscono in modo significativo tra seamounts e habitat di noduli. La perdita dell'integrità del fondo marino dovuta alla rimozione di noduli e sedimenti riduce generalmente la densità di popolazione e le funzioni dell'ecosistema. I processi di remineralizzazione biogeochimica e la produttività della comunità bentonica sono entrambi influenzati dalla rimozione dei noduli. Gli impatti delle perturbazioni sugli ecosistemi nodulari durano per molti decenni, influenzando numerosi comparti e funzioni dell'ecosistema.



2.1.3 Progetto Miningimpact2

Progetto	Miningimpact2
Sito Web	http://jpi-oceans.eu/miningimpact-2
Start date:	August 2018
End date:	February 2022
Duration:	44 Months
EC Funding:	€ 9,700,000

Il progetto MiningImpact2 riunisce 32 partner provenienti da 10 paesi diversi e condurrà un monitoraggio scientifico indipendente dell'impatto di un test industriale per raccogliere noduli di manganese nella zona di Clarion Clipperton. MiningImpact2 segue i risultati della prima azione pilota supportata da JPI Oceans che si è conclusa alla fine di dicembre 2017. Mentre il progetto iniziale ha studiato i disturbi sperimentali e piuttosto piccoli del fondo marino su scale temporali decennali, il nuovo progetto istituirà un programma di monitoraggio completo per garantire un'indagine scientifica indipendente sugli impatti ambientali di un sistema di raccolta di noduli polimetallici da parte del contraente belga DEME-GSR. I noduli polimetallici sono composti principalmente da manganese e ossidi di ferro, ma contengono anche metalli economicamente preziosi, come Ni, Cu, Co, Li e elementi delle terre rare.

Il test del collettore DEME-GSR intende raccogliere i noduli in aree di 0,1 km² di fondale marino nelle aree contrattuali belga e tedesca della zona di Clarion Clipperton nell'Oceano Pacifico equatoriale orientale. Nell'arco di MiningImpact2, i ricercatori stanno pianificando due crociere (nel 2019 e nel 2021) nelle aree di test al fine di limitare le dinamiche spaziali e temporali del plume sedimentario creato dal test minerario e l'impatto sull'ambiente abissale.

Il progetto studierà ulteriormente la connettività regionale delle specie nelle profondità marine e la loro resilienza agli impatti e gli effetti integrati sulle funzioni dell'ecosistema, come la rete alimentare bentonica e i processi biogeochimici. In questo contesto, gli obiettivi chiave del progetto sono:

- Sviluppare e testare concetti e strategie di monitoraggio per le operazioni di estrazione in acque profonde
- Sviluppare procedure di standardizzazione per il monitoraggio e la definizioni per gli indicatori di un buono stato ambientale
- Studiare potenziali misure di mitigazione, come piani di gestione spaziale delle operazioni minerarie e mezzi per facilitare il ripristino dell'ecosistema
- Sviluppare valide metodologie per valutare i rischi ambientali e stimare benefici, costi e rischi
- Esplorare come le incertezze nella conoscenza degli impatti possano essere implementate in quadri normativi appropriati



MiningImpact sarà in grado di colmare ulteriormente le lacune di conoscenza esistenti e ridurre le incertezze sugli impatti ambientali dell'estrazione in acque profonde di noduli polimetallici. Il progetto lavorerà specificamente per le raccomandazioni politiche e ha contattato l'Autorità internazionale dei fondali marini per diventare un partner del progetto. Contribuirà inoltre alla preparazione delle valutazioni di impatto ambientale (VIA) per i futuri test di estrazione pilota in acque profonde europee richiesti dall'ISA e ai progetti di sviluppo tecnologico di Horizon2020 Blue Atlantis e Blue Nodules.

2.1.4 Progetto Blue mining

Progetto	Bluemining
Sito Web	https://cordis.europa.eu/project/id/604500/reporting
Start date:	1 February 2014
End date:	31 January 2018
Duration:	48 Months
EC Funding:	€ 9 999 999

L'obiettivo generale di Blue Mining è fornire soluzioni rivoluzionarie per una catena del valore sostenibile dell'estrazione in acque profonde. Ciò significa sviluppare le capacità tecniche per scoprire, valutare ed estrarre in modo adeguato ed economico depositi minerali di acque profonde fino a 6.000 m di profondità, poiché questa è la gamma richiesta in cui si trovano preziose risorse minerali del fondo marino. Il controllo su queste tre capacità è la chiave per l'accesso alle materie prime, per diminuire la dipendenza dell'UE dalle importazioni di risorse e per rafforzare il settore minerario europeo e i suoi fornitori di tecnologia.

Il Blue Mining Exploitation Plan è stato preparato per fornire un resoconto olistico delle azioni di sfruttamento e, parallelamente, le azioni di disseminazione necessarie per diffondere ulteriormente la conoscenza generata nel progetto sull'estrazione in acque profonde.

Blue Mining definisce le attività di sviluppo richieste e che porteranno ad un approfondimento completo e qualificato al sistema minerario marittimo. Un altro elemento centrale del piano è una valutazione per la creazione di un gruppo europeo per l'innovazione (o partenariato pubblico-privato) sull'esplorazione e lo sfruttamento delle risorse minerarie di acque profonde comprendente aziende rilevanti, istituti di ricerca, organizzazioni governative e utenti finali.



2.1.5 NTNU Oceans pilot programme on deep-sea mining

Norwegian University of Science and Technology – NTNU

Nuove soluzioni per la valutazione, l'esplorazione e l'estrazione di minerali marini sotto la responsabilità sociale per l'ambiente e il patrimonio internazionale dell'umanità. Attivazione di sottoprogetti specifici ognuno dei quali con budget e almeno un dottorando.

Sotto-progetti attivi:

- Autonomous exploration
- Environmental aspects of deep sea mining
- Geophysical Exploration
- Motor drives for seafloor mining
- Resource geology
- Vertical transportation
- Ethical aspects of deep sea mining
- Naval engineering

Sotto-progetti completati:

- Deep sea mining systems
- Detection of seafloor minerals based on spectral signatures
- History of subsea mining - legal aspects
- Mineral and ore characterization
- Platform development
- Resource assessment
- Ethics and social responsibility

2.1.6 Progetto SAGRES (Copernicus)

Il progetto SAGRES è un approccio innovativo sviluppato da ISQ ISQ, azienda portoghese fondata nel 1965 che impiega attualmente circa 1400 dipendenti ed è presente in 16 paesi. ISQ offre oltre 250 servizi di ingegneria specializzata ed è coinvolta in oltre 400 progetti internazionali di ricerca e sviluppo relativi a settori di attività quali aeronautico e aerospaziale, automobilistico, edile e infrastrutture, energia, petrolio e gas. Il progetto è incentrato sulla concezione e convalida di un algoritmo che supporta le attività decisionali di prospezione ed esplorazione (P&E) relative alle risorse di minerali di acque profonde (DSM) basate su informazioni satellitari e dati di sito, compresi i dati CMEMS. La fusione e l'analisi di questi dati possono essere utilizzate come vettori di approssimazione della mineralizzazione al fine di migliorare la posizione, la delineazione e la classificazione delle potenziali aree target P&E correlate alla presenza di risorse DSM come noduli di manganese, croste ferromanganesifere ricche di cobalto e depositi di solfuri massivi.



Utilizzando questo approccio, il progetto SAGRES prevede di aumentare i tassi di successo della scoperta di P&E, ottimizzare i tempi delle campagne, ridurre l'incertezza e i costi e di fornire informazioni di base relative all'impatto ambientale di questa attività. I risultati preliminari sono molto promettenti e mostrano, per le diverse aree considerate nell'Oceano Atlantico settentrionale, una significativa capacità di previsione dell' algoritmo. Nel caso di croste ferromanganesifere ricche di cobalto, i risultati dell'algoritmo mostrano il 77% di certezza nella sua capacità di previsione. La distribuzione dei punti previsti dall'algoritmo è in buon accordo con l'intervallo di profondità considerato appropriato per la presenza economicamente sostenibile di croste ferromanganesifere ricche di cobalto. L'approccio in corso del progetto SAGRES può quindi contribuire a missioni di esplorazione oceanica più intelligenti.

2.1.7 Progetto SPC-EU Deep Sea Minerals

Il Deep Sea Minerals Project è una collaborazione tra la Comunità del Pacifico (SPC) e l'Unione Europea (UE). Avviato nel 2011. Il progetto DSM da 4,4 milioni di euro aiuta i paesi delle isole del Pacifico a migliorare la governance e la gestione delle loro risorse minerarie di acque profonde in conformità con il diritto internazionale, con particolare attenzione alla protezione dell'ambiente marino, garantendo accordi finanziari equi per Paesi delle isole del Pacifico e i loro abitanti. Il progetto DSM comprende 15 paesi membri delle isole del Pacifico: Isole Cook, Stati federati di Micronesia, Fiji, Kiribati, Isole Marshall, Nauru, Niue, Palau, Papua Nuova Guinea, Samoa, Isole Salomone, Timor Est, Tonga, Tuvalu e Vanuatu.

Il progetto sta anche lavorando per incoraggiare e supportare il processo decisionale partecipativo nella governance e nella gestione delle risorse minerarie di acque profonde nazionali. Nonostante l'interesse commerciale in rapida crescita per i minerali di acque profonde, molte nazioni del Pacifico non dispongono dei sistemi legali necessari per garantire la gestione responsabile di queste importanti risorse naturali. In risposta a questa urgente necessità, i paesi delle isole del Pacifico hanno richiesto lo sviluppo di un progetto regionale per aiutare i governi a sviluppare i quadri nazionali e la capacità tecnica necessaria per rafforzare la gestione delle loro risorse.

Principali risultati:

- Sviluppo del quadro legislativo e regolamentare regionale

Nell'agosto 2012 il progetto ha lanciato un quadro legislativo e regolamentare regionale (RLRF) per aiutare i paesi a sviluppare i quadri nazionali necessari per migliorare la gestione delle loro risorse minerali marine.

- Formulazione della politica, della legislazione e dei regolamenti nazionali



I singoli paesi saranno incoraggiati a utilizzare il RLRf per armonizzare la legislazione in tutta la regione. Le principali attività comprenderanno:

1. Workshop nazionali delle parti interessate per facilitare lo sviluppo della politica, della legislazione e dei regolamenti nazionali;
 2. Supporto ai Comitati Minerali Nazionali Offshore (NOMC);
 3. Sviluppo di politiche minerarie marine, concentrandosi su quei paesi con i bisogni più immediati;
 4. Formulazione della legislazione nazionale sui minerali offshore;
 5. Rivedere le politiche e la legislazione nazionali da sottoporre al gabinetto per la promulgazione.
- Sviluppo delle capacità nazionali

Il progetto aiuterà i paesi a costruire la capacità necessaria tra i professionisti e i tecnici nazionali nelle aree dei minerali marini, dello sviluppo delle politiche, dei regimi fiscali e del monitoraggio ambientale.

- Gestione e monitoraggio efficaci delle operazioni di esplorazione e estrazione in mare aperto

Il progetto aiuterà i paesi a sviluppare sistemi di monitoraggio per le operazioni minerarie in acque profonde.



2.2 Strutture internazionali che si occupano di giacimenti minerari sottomarini

In questa sezione vengono presentate le principali strutture internazionali che si occupano direttamente di GSI e giacimenti minerari sottomarini o che vedono il loro coinvolgimento nei progetti internazionali di sea mining.

Seabed Authority (ISA)

<https://isa.org.im/>

L'International Seabed Authority (ISA) è un'organizzazione internazionale autonoma istituita dalla Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (UNCLOS) del 1982 e dall'accordo del 1994 relativa all'attuazione della Parte XI della Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (Accordo del 1994). L'ISA è l'organizzazione attraverso la quale gli Stati parti dell'UNCLOS organizzano e controllano tutte le attività relative alle risorse minerarie nell'Area a beneficio dell'umanità nel suo insieme. In tal modo, ISA ha il mandato di garantire l'efficace protezione dell'ambiente marino dagli effetti dannosi che possono derivare dalle attività legate ai fondali marini. Composta da 167 Stati membri e dall'Unione europea, l'Autorità internazionale dei fondali marini è incaricata, ai sensi della Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare, di organizzare, regolare e controllare tutte le attività legate ai minerali nell'area dei fondali marini internazionali a beneficio dell'umanità. In tal senso, ISA ha il dovere di garantire l'efficace protezione dell'ambiente marino dagli effetti dannosi che possono derivare dalle attività legate ai fondali marini.

NTNU Research Institute (Norvegia)

[NTNU: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU:](#)

La NTNU è la principale università tecnica della Norvegia. Il Dipartimento di Marin Technology (IMT) e il Dipartimento di Geologia e Ingegneria delle Risorse Minerarie (IGB) fanno parte della Facoltà di Ingegneria, Scienza e Tecnologia presso NTNU. L'IMT comprende attività marine legate alle più grandi industrie norvegesi, vale a dire petrolio e gas, tecnologia della pesca, acquacoltura, ingegneria navale e industrie associate. IGB offre istruzione e ricerca in geologia e geologia dei minerali, geologia mineraria e ingegneristica.



SOTON Research Institute (Inghilterra)

[School of Ocean and Earth Science | University of Southampton:](#)

L'Università di Southampton ha una reputazione consolidata per i suoi eccezionali corsi di ricerca e laurea in scienze oceaniche e della Terra. Gli studenti di Ocean and Earth Science risiedono presso il prestigioso National Oceanography Centre di Southampton (NOCS). NOCS è la collaborazione integrata tra la parte con sede a Southampton del National Oceanography Center del Natural Environment Research Council e l'Università di Southampton's Ocean and Earth Science. Il Centro ospita uno dei più grandi gruppi al mondo di scienziati e ingegneri dediti alla ricerca, all'insegnamento e allo sviluppo tecnologico nelle scienze oceaniche e della Terra. Il Centro è completamente attrezzato con strumentazione moderna e strutture di laboratorio ed è anche la base operativa per la flotta britannica di navi per la ricerca in acque profonde e attrezzature associate come Autosub, un veicolo subacqueo autonomo in grado di immergersi a una profondità di 6 chilometri.

2H Offshore (Inghilterra)

[Global Offshore Engineering & Riser Design - 2H Offshore:](#)

Società di consulenza ingegneristica specializzata con particolare esperienza nell'analisi strutturale e nella gestione dell'integrità di sistemi di *riser* per acque profonde ed ambienti estremi, con capacità di supportare progetti dal concept design, ingegneria dettagliata e costruzione, fino a consegna e installazione. 2H offshore ha una presenza globale, con uffici a Londra, Houston, Kuala Lumpur, Pechino, Aberdeen, Perth e Rio.

IHG (Olanda)

[Integrated maritime solutions - Royal IHC:](#)

IHC Mining fornisce soluzioni integrate per il mercato minerario onshore, nearshore e in acque profonde. Offre servizi di consulenza e studi approfonditi per determinare la fattibilità tecnica ed economica complessiva del progetto. Progetta, costruisce e fornisce navi minerarie innovative e attrezzature avanzate che vanno da draghe minerarie e cingolati, sistemi di trasporto dei liquami e impianti di separazione dei minerali fino ai sistemi di controllo e automazione degli impianti.



MARIN Research Institute (Olanda)

[404 page | MARIN:](#)

L'Istituto di ricerca marittima olandese, è diventato un fornitore di servizi affidabile, indipendente e innovativo per il settore marittimo e un contribuente al benessere della società. Prendiamo l'iniziativa per associare la nostra esperienza a varie aree di applicazione per ampliare la nostra capacità di risolvere i problemi. Mantenendo la nostra posizione di leadership nella ricerca e sviluppo idrodinamico e nautico, mettiamo a disposizione il nostro know-how e l'esperienza accumulati per lo sviluppo di concetti, supporto alla progettazione, supporto alle operazioni e sviluppo di strumenti. Questo impegno per l'innovazione tecnologica di alta qualità ti consente di affrontare le sfide che il tuo settore deve affrontare oggi.

TNO Research Institute (Olanda)

[TNO - innovation for life | TNO:](#)

Il TNO è una delle principali organizzazioni di ricerca a contratto in Europa. Con uno staff di circa 3500 dipendenti e un fatturato annuo di 580 milioni di euro, TNO è coinvolto in molti progetti internazionali, comprese le collaborazioni finanziate dall'UE. Il progetto Blue Mining fa parte delle attività di TNO nell'ambito del tema Energia e sarà alimentato dal dipartimento Maritime & Offshore situato a Delft, Paesi Bassi.

Uniresearch (Olanda)

[Homepage - Uniresearch:](#)

Società di consulenza indipendente specializzata nell'avvio e nella gestione di innovazioni tecnologiche.

Dredging International Industry (Belgio)

[DEME | DEME Group \(deme-group.com\):](#)

Il gruppo belga di dragaggio, ingegneria idraulica e ambientale DEME si è guadagnato una posizione di rilievo sul mercato mondiale in poche discipline idrauliche altamente specializzate e complesse. Avendo iniziato con operazioni di dragaggio e bonifica, il gruppo si è diversificato in progetti idraulici in mare, servizi alle compagnie petrolifere e del gas, installazione di parchi



eolici offshore, raccolta offshore di inerti e minerali, attività ambientali come bonifica del suolo e riciclaggio dei fanghi e ripristino di aree dismesse e bonifica dei relitti. Il suo know-how e la sua esperienza multidisciplinare, le sinergie di progetto e la struttura aziendale integrata hanno permesso a DEME di crescere fino a diventare un fornitore di soluzioni globali. Il Gruppo possiede una delle flotte più moderne, tecnologiche e versatili per le attività di dragaggio e di ingegneria idraulica.

SEA Europe Service Supplier (Belgio)

[Sea Europe - The Shipyards' & Maritime Equipment Association of Europe:](#)

La European Ships and Maritime Equipment Association è l'associazione dell'industria europea della tecnologia marittima. SEA Europe promuove e supporta le imprese europee che sono coinvolte nella costruzione, costruzione, manutenzione e riparazione di tutti i tipi di navi e altre strutture marittime rilevanti, compresa la catena di fornitura completa di sistemi, attrezzature e servizi.

BGR Research Institute (Germania)

[BGR - Homepage \(bund.de\):](#)

L'Istituto federale di geoscienze e risorse naturali (BGR) è l'autorità geoscientifica centrale che fornisce consulenza al governo federale tedesco in tutte le questioni geo-rilevanti. Fornisce consulenza al Ministero Federale dell'Economia e dell'Energia (BMWi) sull'estrazione in acque profonde e rappresenta la Germania presso l'Autorità internazionale dei fondali marini (ISA). Il BGR svolge ricerche di esplorazione per i noduli di manganese nel Pacifico nord-orientale equatoriale, dopo aver firmato un contratto di esplorazione di 15 anni con l'ISA nel luglio 2006. Inoltre, è attualmente in corso una domanda per l'esplorazione dei solfuri massicci del fondo marino nell'Oceano Indiano.

GEOMAR Research Institute (Germania)

[GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung Kiel - GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel:](#)

Il GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research è una delle principali istituzioni mondiali nel campo delle scienze marine. La missione di GEOMAR è indagare i processi fisici, chimici, biologici



e geologici negli oceani globali e la loro interazione con il fondo marino e l'atmosfera. Il Centro sta colmando il divario tra scienza di base e applicata in una serie di aree di ricerca. Attualmente, GEOMAR ha uno staff di circa 850, inclusi circa 400 scienziati. L'infrastruttura all'avanguardia di GEOMAR comprende quattro navi da ricerca, tre veicoli subacquei azionati a distanza e un veicolo subacqueo autonomo con una profondità fino a 6000 metri, l'unico sommergibile da ricerca con equipaggio in Germania (capacità di immersione di 400 m). come un gran numero di strumenti e tecnologie specializzati per la ricerca oceanica e in acque profonde.

Ramboll-IMS Industry (Germania)

[Aus IMS Ingenieurgesellschaft mbH wird Ramboll - Ramboll:](#)

La Ramboll-IMS Industry fornisce servizi di ingegneria e consulenza nei settori delle tecnologie offshore e dell'ingegneria idraulica, civile e ambientale dal suo ufficio di Amburgo. Ramboll ha un team interdisciplinare di 55 dipendenti altamente specializzati (di cui 11 ingegneri e tecnici donne) che stanno portando avanti e rafforzando ulteriormente un know-how sviluppato in oltre 40 anni. Ramboll ha fatto parte di molti progetti complessi e stimolanti come la progettazione di diverse stazioni antartiche, lo sviluppo di strutture in acque profonde.

MHWirth (Germania)

[Home - MHWirth:](#)

MHWirth è un fornitore globale leader di soluzioni e servizi di perforazione.

Trans-Tasman Resources Ltd (Nuova Zelanda)

[Trans-Tasman Resources - Offshore Iron Ore | TTR \(ttrl.co.nz\):](#)

La Trans-Tasman Resources Limited (TTR) è una società con sede e gestita in Nuova Zelanda fondata nel 2007 per esplorare i depositi di sabbia minerale al largo della Nuova Zelanda. Nel 2016 il progetto più avanzato della società è rappresentato dal progetto di esplorazione e raccolta di sabbie ferrose dal South Taranaki Bight (STB) situato da 22 km a 36 km al largo di Patea. La Società ha anche un permesso di prospezione concesso che copre potenziali depositi di sabbia minerale pesante di alta qualità (> 10% HM) al largo della costa occidentale dell'Isola del Sud contenenti ilmenite, zirconio, rutilo, granato e oro.



Chatham Rock Phosphate Ltd (Nuova Zelanda)

[The Project Overview — Chatham Rock Phosphate:](#)

La Chatham Rock Phosphate Ltd detiene un permesso minerario su un'area al largo della costa della Nuova Zelanda con significativi depositi sul fondo marino di fosfatie altri minerali potenzialmente preziosi.

National Institute of Ocean Technology (Chennai, India)

[National Institute of Ocean Technology \(niot.res.in\):](http://niot.res.in)

NIOT ha lavorato a un concetto minerario, in cui un prototipo di macchina mineraria cingolata raccoglie, frantuma e trasporta i noduli alla nave madre utilizzando una pompa volumetrica attraverso un sistema di riser flessibile. Si prevede che più macchine minerarie copriranno il campo minerario durante le operazioni minerarie commerciali su larga scala. In questa prospettiva, il sistema minerario integrato è in fase di sviluppo per l'estrazione in acque profonde di noduli polimetallici. Il gruppo Deep Sea Technologies è coinvolto nello sviluppo di veicoli sottomarini con e senza pilota insieme a tecnologie alleate come il sistema di homing e docking, sensor fusion, ecc. Per l'esplorazione e lo sfruttamento di risorse minerali oceaniche profonde come noduli di manganese poli-metallici, idrati di gas, solfuri idrotermali ecc. e altre applicazioni oceanografiche, polari e industriali.



2.3 Le comunità biologiche dei GSI: varietà e distribuzione

Le sorgenti idrotermali sono considerate tra gli ambienti più inospitali del pianeta Terra. Negli ultimi anni gli scienziati di tutto il mondo sono riusciti a dimostrare che gli ambienti idrotermali sottomarini sono altamente produttivi, ospitando comunità complesse alimentate dalle sostanze chimiche sparse nelle acque circostanti. Mentre le sorgenti idrotermali profonde o “deep” sono sostenute esclusivamente dalla produzione primaria chemiosintetica, quelle di acque poco profonde o “shallow” sono caratterizzate dal connubio tra l’energia solare e quella dei fluidi geotermici, favorendo la produzione primaria sia foto- che chemiosintetica (Sorokin, Sorokin and Zakuskina 1998). Le spedizioni oceanografiche volte al monitoraggio dei fondali marini, hanno messo in evidenza che il Mar Mediterraneo presenta numerosi complessi idrotermali sia shallow (fino 212 m) che deep (oltre i 212 m), che rappresentano una vera e propria fonte in termini di biodiversità, mineraria e biotecnologica. Dal momento che questi ambienti sono abitati da micro e macroorganismi che si sono adattati a vivere a tali condizioni estreme (basse concentrazioni di pH, elevate temperature, emissioni di particolari gas, basse concentrazioni di ossigeno) la ricerca su questi organismi in grado di produrre particolari bioprodotto, sta assumendo un interesse crescente nella comunità scientifica mondiale, incentrando gli sforzi sulle biotecnologie blu. Ad oggi, ciò che sappiamo, è che questi ambienti possono essere usati come laboratori naturali dove studiare gli effetti della acidificazione degli oceani (Hall-Spencer et al., 2008) e che l’abbassamento del pH può indurre importanti cambiamenti nella struttura e nella funzione degli ecosistemi marini (Mirasole et al., 2017). Studi condotti in prossimità ed in corrispondenza delle emissioni di CO₂ vulcaniche, dove l’acqua di mare è naturalmente acidificata, hanno riportato come gli effetti sulla flora e fauna marina siano molteplici. Per alcuni gruppi sono state riportate diminuzioni di densità fino al raggiungimento della completa scomparsa, come descritto per alghe coralline e spugne (Fabricius et al., 2011; Goodwin et al., 2014), mentre fanerogame e alghe non-calcaree sembrano essere positivamente influenzate con aumenti di produttività (Koch et al., 2013) dovuti all’aumento della concentrazione del DIC (Carbonio Disciolto Inorganico). Recentemente, è stata riportata anche una semplificazione della struttura degli assemblaggi ittici (Mirasole et al., 2021). I monitoraggi condotti sulle poco profonde e temperate sorgenti idrotermali situate intorno alle coste dell’isola d’Ischia (Italia) hanno messo in evidenza come vi sia una elevata complessità dell’habitat di Posidonia oceanica (cioè un aumento della densità dei germogli), ma di contro una minore abbondanza di specie calcaree epifite (ad es. Alghe coralline), rispetto ai siti controllo (Mirasole et al., 2021). Per quanto riguarda le specie ittiche, il numero totale di individui era maggiore vicino ai camini rispetto ai siti controllo, mentre non sono state riscontrate differenze per la ricchezza e la composizione delle specie. Nel complesso, l’erbivoro Sarpa salpa si distingue tra le specie che contribuiscono maggiormente alla differenze tra i camini e siti di controllo, mostrando abbondanze maggiori in condizioni di acidificazione sia ad Ischia che



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



in uno studio precedente condotto nell'isola di Vulcano (Mirasole et al., 2020). I risultati così ottenuti indicano che i popolamenti ittici necto-bentonici associati all'ecosistema mediterraneo di P. oceanica possono far fronte agli scenari di emissione di CO₂ previsti per la fine di questo secolo (Mirasole et al., 2021). Gli organismi marini possono produrre una grande varietà di bioprodotti, conferendo numerosi vantaggi alla salute umana. Tali molecole, ormai da tempo utilizzate in campo medico come antiossidanti, antimicrobici, agenti antitumorali e nelle applicazioni biotecnologiche, attirano sempre un crescente interesse nel settore delle biotecnologie (Martins et al., 2014). Ad oggi, i ricercatori della Stazione Zoologica delle sedi di Messina e Napoli stanno collaborando attivamente sullo studio di batteri eterotrofi aerobi multiresistenti ad una vasta gamma di antibiotici (inibitori sintesi proteica, inibitori acidi nucleici, inibitori sintesi peptidoglicano), isolati da tre siti idrotermali shallow, rispettivamente Hot Vent, Cold Vent e Cratere Bottaro (Panarea). Lo scopo è quello di associare questa multiresistenza antimicrobica ad una produzione da parte di altri organismi che vivono in questo ambiente oppure ad una strategia adattativa di questi microrganismi a seguito di un evento antropico (Arcadi et al., not published). L'isola di Panarea, è il sito dell'arco Eolico più studiato degli ultimi 20 anni, a causa dell'attività di degassamento del novembre 2002. Negli anni, le attività di monitoraggio ambientale in questi siti ha dimostrato che il sistema è in continua evoluzione (Spagnoli et al., 2020), anche nel corso delle stagioni. Un'area di recente scoperta, situata a nord-est degli isolotti di Dattilo, Bottaro, Lisca Bianca, Lisca Nera e Panarelle, è caratterizzata da depressioni circolari, in parte attive e in parte inattive, che hanno portato all'evidenza di circa 200 camini (1-4 m di altezza; circa 4 m in media di diametro di base), denominata Smoking Land. In quest'ultima area, 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) (Spagnoli et al., 2020). La Baia di Levante a Vulcano, altro sito dell'arco eolico, oltre ad essere stato negli anni considerato un laboratorio naturale per lo studio dell'acidificazione degli oceani (Vizzini et al., 2013), è uno dei siti più caldi del Mediterraneo, riportando, a pochi metri dalla superficie temperatura di poco superiore ai 100°C. Difatti quest'area è soggetta alla continua ricerca di microrganismi termofili, ipertermofili e acidofili (Norris et al., 2020) e loro bioprodotti (Suleiman et al., 2019; Antranikias et al., 2017; Placido et al., 2015).

Il Palinuro Seamount, che presenta la vetta a -84 m di profondità, rappresenta l'edificio vulcanico più esteso d'Europa (circa 90km), ma il suo primato sta anche nel pregio dei minerali presenti nei sedimenti come ad esempio cadmio, argento, piombo e rame in aree di idrotermalismo attivo (Fig. 14). Le caratteristiche geomorfologiche sono state ben descritte nel corso degli ultimi anni dal CNR da Cocchi et al., 2017, attraverso l'analisi delle stratificazioni ottenute dai carotaggi che ne hanno permesso di definire la struttura e conformazione dell'intero edificio. Scarsi e datati sono invece i dati sulla biodiversità, risalente a più di dieci anni fa agli studi fatti da Dando et al., 2010 e rivisti da Taviani et al., 2014.



Fig 14: sorgente idrotermale profonda Palinuro Seamount, Mar Tirreno; acquisita da ROV Hercules durante la C/O Nautilus

Recentemente Lodolo et al., 2019 hanno riportato la presenza di una serie di edifici vulcanici nella zona sud occidentale della Sicilia, lungo due lineamenti di tendenza N-S che costituiscono la zona di faglia di Capo Granitola-Sciaccà a scala litosferica. I ricercatori durante questo studio riportano dati batimetrici e misure magnetiche, insieme a profili sismici ad alta risoluzione, che rivelano la presenza di altri sei edifici vulcanici situati molto vicino alle coste siciliane, uno dei quali dista solo 7 km. L'area dello Stretto di Sicilia è ben nota per essere sede di un diffuso vulcanismo la cui attività, iniziata circa 8 milioni di anni fa, perdura nel tempo, testimoniata anche dalla presenza di attività idrotermale, che spinge le sue manifestazioni fino alla terraferma con l'esempio delle terme di Sciaccà. A partire dal Pleistocene svariate eruzioni hanno costruito gli edifici delle isole di Pantelleria e Linosa, mentre le eruzioni storiche sono riportate tra Sciaccà e l'Isola di Pantelleria (vulcano Isola Ferdinanda, 1831) e a Nord di Pantelleria (Vulcano Forstner, 1891). Svariate altri centri vulcanici antichi sommersi (seamounts) sono stati individuati anche se poco studiati.

Le analisi geologiche preliminari condotte sui camini del Banco Graham nel corso del progetto Osservatorio Regionale della Biodiversità della Sicilia, hanno permesso di definire la natura delle deposizioni rossastre di cui sono costituiti. In particolare, la diffrattometria a raggi X per polveri, ha evidenziato che si tratta di deposizioni amorfe; le analisi in microscopia elettronica a dispersione di lunghezza d'onda hanno permesso di definire la composizione chimica: 95% di Ferro e Ossigeno. Si tratta molto probabilmente di ossi-idrossidi di Ferro (Goethite amorfa) (Fig. 15). Questo tipo di deposizioni sono caratteristiche di attività idrotermale a bassa temperatura



ed a bassa concentrazione di Manganese. Ciò suggerisce un'attività idrotermale in corso anche se non direttamente percettibile.

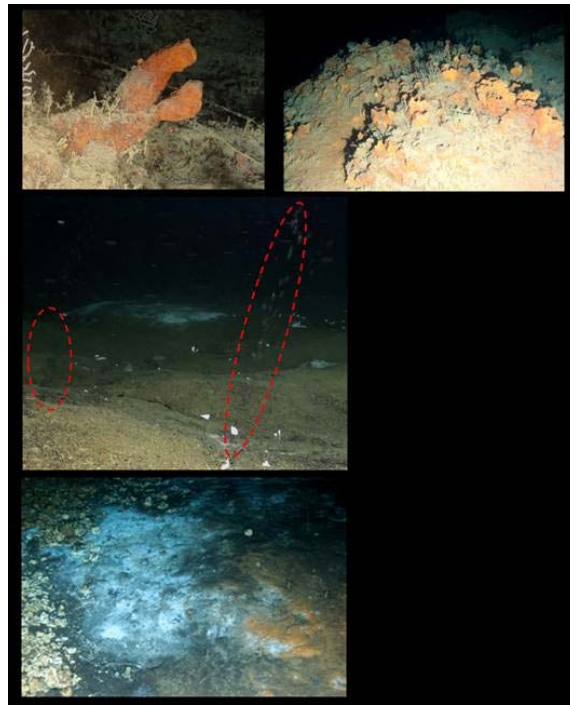


Figura 15: Idrotermalismo. In alto: camini idrotermali (a sinistra) sviluppati su superfici (a destra), di estensione notevole, costituite da mineralizzazioni di colore rossastro . Al centro: campi di bolle di gas, probabilmente di metano. In basso: deposizioni di colore biancastro vicino ai camini idrotermali.

Le indagini sulle comunità microbiche associate a Nematoda, un gruppo di organismi appartenenti alla meiofauna bentonica, di notevole rilevanza ecologica, possono aiutare a migliorare la nostra comprensione generale di questi ecosistemi. La meiofauna bentonica associata ai siti idrotermali è rappresentata principalmente da copepodi e nematodi, in particolare la famiglia Onchalaimidae, segnalato più volte in prossimità dei punti di emissione su diversi condotti idrotermali poco profondi (Dando et al., 1995; Thiermann et al., 1995; Zeppilli e Danovaro, 2009). Recenti studi, condotti da Zeppilli et al., 2018 hanno dimostrato che i nematodi si adattano bene a tali condizioni estreme e ciò potrebbe portare alla conclusione che tali organismi siano i più rappresentativi dell'intera fauna delle sorgenti idrotermali. Successivamente Donnarumma et al., 2019 hanno studiato i popolamenti bentonici sotto lo stress termico delle emissioni idrotermali (circa 37°C) in ambiente shallow compreso tra 9 e 14 m di profondità. Mettendo a paragone un sito di emissione, con un sito controllo (condizioni normali dell'acqua di mare), è risultato che solo poche specie bentoniche resistenti, come il gasteropode *Tritia cuvierii* e il polichete *Capitella capitata*, sono in grado di adattarsi a temperature relativamente calde dell'acqua di mare (37°C) confermando il ruolo di *C. capitata*



come opportunista in ambienti estremi come la Secca delle Fumose. In definitiva, studi condotti sulla biodiversità della macrofauna bento-necto-pelagica e studi di ecologia in ambienti idrotermali sono stati chiaramente preferiti in siti con emissioni idrotermali temperati (a bassa temperatura), come quelle attorno all'Isola di Ischia, ed alcuni siti attorno all'Isola di Panarea. I dati ottenuti fin qui suggeriscono che i sistemi idrotermali temperati sono estremamente peculiari rappresentando delle rarità in ambito geologico su scala planetaria. Da questi siti risulta inoltre interessante lo studio dei meccanismi di produzione del metano di cui si conosce ben poco.

Per i siti più caldi, invece si rimanda ad un approccio prettamente microbiologico e molecolare per lo studio e la struttura della comunità microbica, andando ad evidenziarne la biodiversità microbica e i metabolismi che insistono in questi ambienti.

Sono ancora numerosi i siti idrotermali poco studiati in Mediterraneo e in futuro nuove spedizioni oceanografiche in lungo e in largo per l'intero bacino potrebbero portare alla scoperta di altri siti grazie all'investigazione per mezzo di veicoli di monitoraggio sofisticati e ad altissima risoluzione.



3. Valutazioni di potenziali giacimenti sottomarini in aree di GSI

3.1 Potenziale interesse economico

La grande variabilità dei prezzi dei minerali rende il (più che) potenziale mercato del deep-sea mining particolarmente appetibile. Ad esempio, il prezzo del cobalto è esploso nel 1978 a seguito di conflitti civili nelle aree minerarie dello Zaire (oggi Repubblica Democratica del Congo), che all'epoca ne era il maggior produttore mondiale. Nel 2005, Repubblica Democratica del Congo, Zambia e Canada hanno fornito più della metà della produzione mondiale di Co (circa 53.500 Tonnellate). I giacimenti che hanno maggiormente suscitato interessi sui mercati sono i noduli di ferromanganese e, in misura ancor maggiore, le croste di cobalto. Oltre all'elevato contenuto di cobalto rispetto ai noduli abissali di manganese, infatti, lo sfruttamento delle croste è considerato vantaggioso perché le croste di alta qualità sono reperibili anche all'interno delle ZEE e in acque meno profonde (Fig. 16). Le attuali stime di area di queste risorse vanno da 38 milioni di km² per i noduli di ferromanganese, 3,2 milioni di km² per i solfuri massivi (attivi e inattivi combinati) e 1,7 milioni di km² per le croste polimetalliche sui seamounts (Petersen et al.2016).

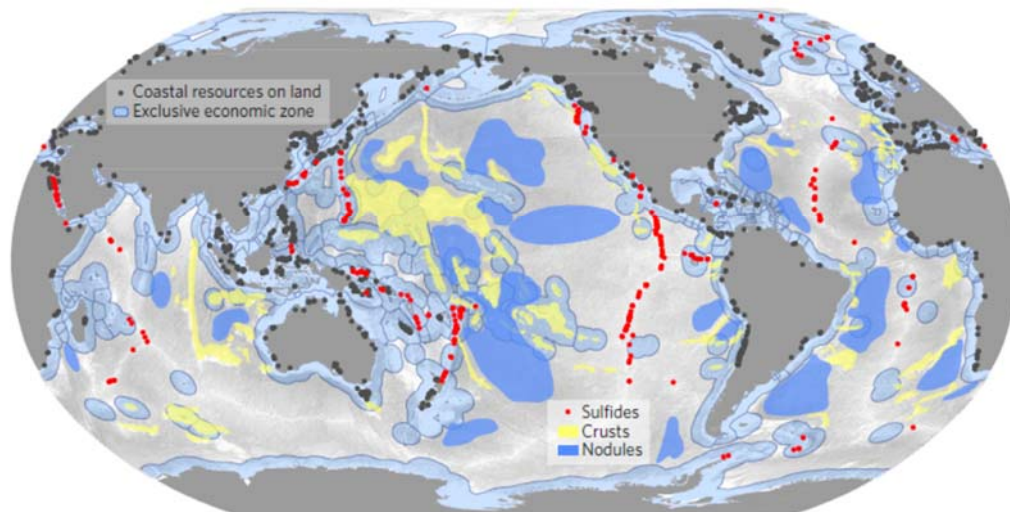


Fig.16 Distribuzione dei giacimenti marini da venute di fluidi su scala globale (da Barbier et al., 2014; World Mineral Deposits Database, 2014; Hannington et al., 2017)

Negli ultimi anni c'è stato un forte aumento del prezzo del cobalto, che ora si attesta intorno ai 54,5 \$ / kg. Se la domanda continua ad aumentare, o se viene percepito un problema di fornitura, il prezzo può aumentare ulteriormente in periodi relativamente brevi. Dal 2001 c'è stato un aumento costante della domanda sia di rame che di cobalto (da 38.000 tonnellate del 2001 a 53.500 tonnellate nel 2005; fonte ISA). Nonostante le incertezze economiche e tecnologiche,



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



molte aziende hanno espresso interesse per l'estrazione di croste. Diverse circostanze in evoluzione possono cambiare l'ambiente economico e promuovere l'estrazione mineraria negli oceani, come nuovi meccanismi di priorità sulle politiche di utilizzo dei suoli, problemi legati alla reperibilità di acqua dolce e preoccupazioni ambientali legate allo sfruttamento minerario in aree emerse. Le ultime stime hanno prodotto un calcolo medio di 970 \$ circa come valore di mercato (per tonnellata) delle croste di manganese (Fig. 17).

Value of metals in one metric tonne of cobalt-rich crust			
	Mean price of metal (2007 \$US/kg)	Mean Content in Crusts (ppm)	Value per Metric Ton of Ore (\$US)
Cobalt	54.56	6,899.00	376.41
Titanium	14.66	120,350.00	176.36
Cerium	88.00	1,605.00	141.20
Zirconium	150.00	618.00	92.70
Nickel	26.72	4,125 .00	110.22
Platinum	54,481.00	0.50	27.24
Molybdenum	56.76	445.00	25.26
Tellurium	242.00	60.00	14.52
Copper	6.90	896.00	6.18
Total	--	--	\$970.09

Kg is kilogramme; ppm is parts per million, which equals grams per tonne.

Fig.17 Valore economico di mercato medio dei metalli contenuti in una tonnellata di croste di cobalto (ISA)



3.2 Approccio tecnico utilizzato per l'estrazione dei minerali a livello internazionale.

Le tecnologie per l'estrazione mineraria di profondità sono diverse ed in fase di sviluppo. Ad oggi, l'estrazione avviene dopo una prima fase di esplorazione del fondale in cui veicoli sottomarini a comando remoto o autonomo (ROV, AUV) percorrono in lungo e in largo le aree identificate come potenzialmente ricche di minerali, raccogliendo informazioni di vario tipo (Fig.18).

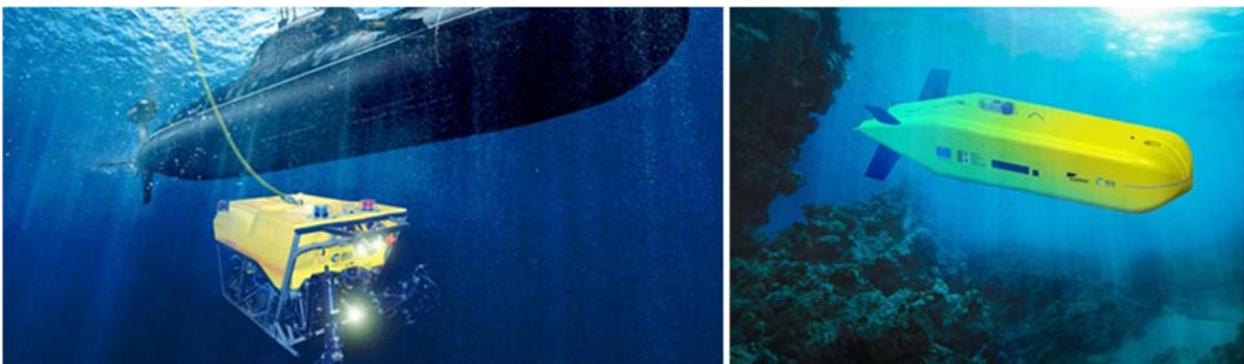


Fig. 18 Immersioni ROV (A destra) e AUV (a sinistra) vengono utilizzate come primo elemento di conferma dei giacimenti a fondo mare

Una volta identificato il luogo di estrazione, viene installata una stazione galleggiante o una nave che faccia da base operativa. A quel punto, grazie a veicoli e strutture simili a draghe, dal fondale marino vengono recuperati i sedimenti che vengono fatti risalire alla base o alla nave di supporto, dove avviene la descrizione e la conservazione dei campioni da analizzare (Fig. 19).

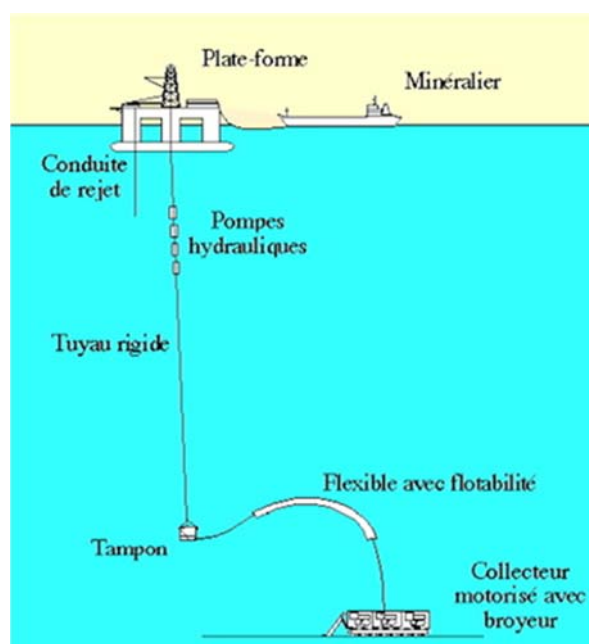


Fig. 19 Schema di raccolta sedimenti dal fondale marino



Un esempio concreto è rappresentato dai risultati ottenuti durante il progetto Bluenodules nel quale è stata sviluppata la progettazione dell'intera catena logistica ed affrontato simultaneamente il complesso problema dell'impatto ambientale derivante. Al centro delle operazioni c'è il mezzo di raccolta sottomarino Apollo II (Fig. 20) utilizzato per la raccolta dei noduli fino a 6 km di profondità. Il campionatore del fondale marino è collegato alla nave di supporto con un tubo adibito al trasporto verticale e con un cavo ombelicale, contenente i collegamenti e l'alimentazione elettrica. A bordo della nave, i noduli vengono disidratati, successivamente un'altra nave prende quindi il minerale per la lavorazione a terra per l'estrazione dei metalli.



Fig. 20 Apollo II

Un altro esempio di progetto di ricerca finalizzato alla valutazione, esplorazione e estrazione di minerali marini è MiningImpact2 durante il quale è stato sviluppato il prototipo 'collettore DEME-GSR' (Patania II) capace di operare sino a 4.5 km di profondità (Fig. 21). Attualmente si sta testando il sistema di raccolta dei noduli che è costituito da una testa a cui sono collegati i sensori che monitorano la fase di prelievo. La prossima missione vedrà un test di integrazione della testa con un tubo aspirante per portare i noduli in superficie.

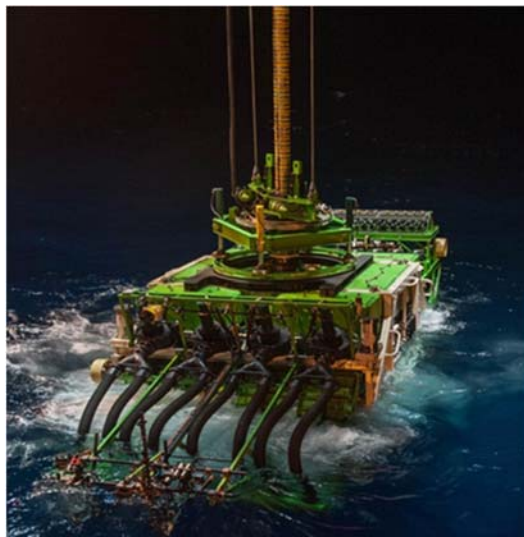


Fig. 21 - Patania II



4. Valutazione delle pericolosità derivante da potenziale estrazione:

4.1 Hazard sismico in aree di GSI con focus sul Mar Tirreno

L'Italia si colloca in un'area geologicamente giovane e molto attiva dal punto di vista tettonico. I terremoti e le eruzioni vulcaniche, sono processi geologici normali in questo contesto, ma possono diventare fenomeni pericolosi per i potenziali effetti che hanno sulla popolazione e sulle opere civili. È importante sottolineare che le aree marine che circondano l'Italia, sono anch'esse sede di processi geologici che possono presentare una potenziale minaccia per la popolazione. La valutazione del rischio legata alla probabilità che un evento naturale si possa verificare, in un dato intervallo di tempo e con una certa intensità, è proporzionale a fattori come la vulnerabilità e gli elementi esposti (es. popolazione). Per tali motivi dunque, è opportuno avere una buona conoscenza del contesto vulcano-tettonico nel quale l'evento si origina e delle modalità con le quali i suoi potenziali effetti si propagano nello spazio e nel tempo.

In quest'ottica, lo studio dell'assetto geodinamico delle aree marine dove è stata riscontrata attività sismica e vulcanica può contribuire significativamente alla formulazione di alcuni scenari di pericolosità sismica e vulcanica, utili alla valutazione dei rischi associati.

Il punto di partenza per una valutazione dei potenziali impatti ambientali provocati dallo sfruttamento di campi idrotermali- geotermici in mare, è l'identificazione del contesto naturale di riferimento ("punto zero"), cioè l'osservazione dello stato dei luoghi prima dell'intervento antropico. Nello sfruttamento di risorse a mare, sono di primaria importanza le possibili ricadute su idrosfera e atmosfera, oltre ai non meno importanti effetti legati a rischio vulcanico, sismicità indotta e rumore.

In questo modo si può capire in quale misura l'attività antropica potrebbe arrecare modificazioni che danneggino l'ecosistema costituito e, di conseguenza, pianificare un piano di contenimento e mitigazione dei rischi connessi.

Il ventennio 1960-80 ha rappresentato un periodo d'oro per la ricerca scientifica marina. Lo studio di queste aree mai investigate, considerato avveniristico per l'epoca, ha permesso di ricostruire il meccanismo di formazione dei sistemi idrotermali e soprattutto il legame di questi con i margini tettonici attivi. Per la prima volta si ha la chiara visione secondo cui i fondali oceanici sono delle vere e proprie sorgenti attive, dove si formano nuove risorse minerarie. Le risorse minerarie celate sotto gli oceani e associate alle zone neovulcaniche sono quantificabili in circa 3×10^7 tonnellate (Rame e Zinco), valori comparabili a depositi terrestri (1.9×10^7 tonnellate) (M. Hannington).

Nel tirreno meridionale, a circa 3000 metri di profondità, si ergono due tra le più imponenti strutture vulcaniche del mondo: il seamount Marsili e il complesso vulcanico del Palinuro

L'edificio del Marsili è lungo circa 70 km e largo 30 km. (Fig.22).

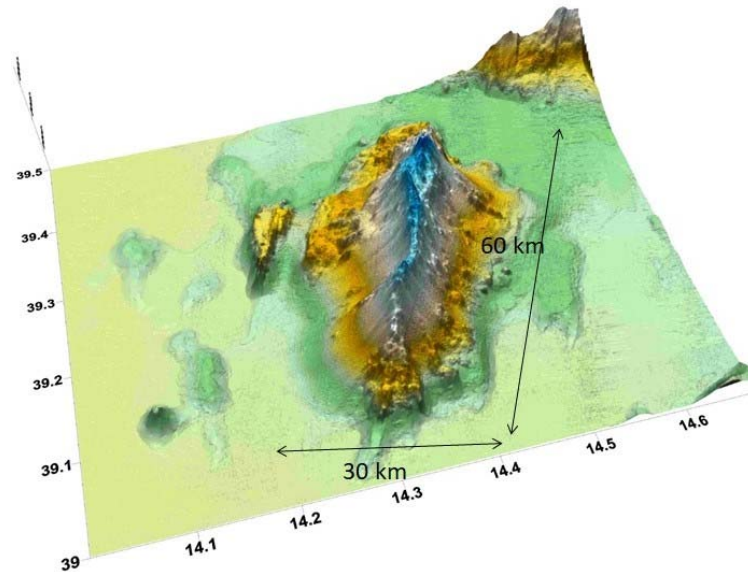


Fig. 22 – Batimetria 3D del seamount Marsili

La catena vulcanica Palinuro è costituita da più edifici vulcanici e coni secondari che creano una struttura complessa di quasi 90 km di lunghezza (Fig.23).

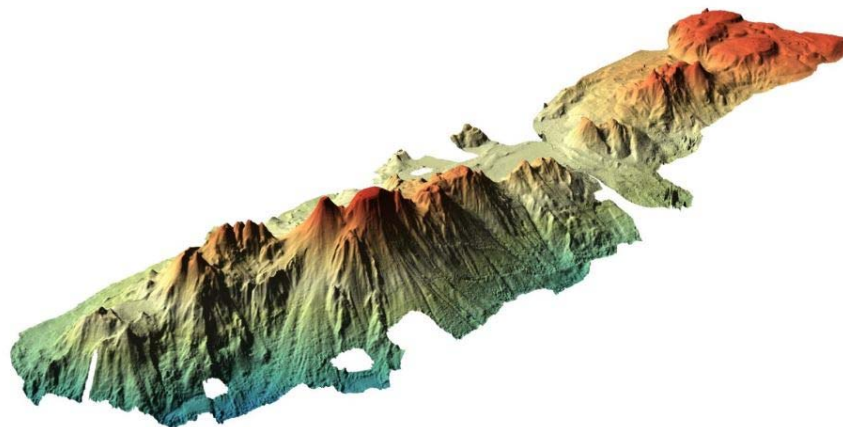


Fig. 23 – Modello 3D della batimetria del Palinuro e settore orientale (da Cocchi et al., 2017)

I due vulcani sottomarini presi in considerazione sono aree interessate da un idrotermalismo molto sviluppato. Lo stesso si verifica in altre strutture più piccole disseminate lungo l'arco delle Isole Eolie. La cresta del Marsili è caratterizzata da una vasta prateria di camini idrotermali, per la maggior parte estinti. Alcuni studi di un team di ricercatori INGV sul tremore del vulcano hanno evidenziato la presenza di sorgenti idrotermali ancora attive (Fig. 24).

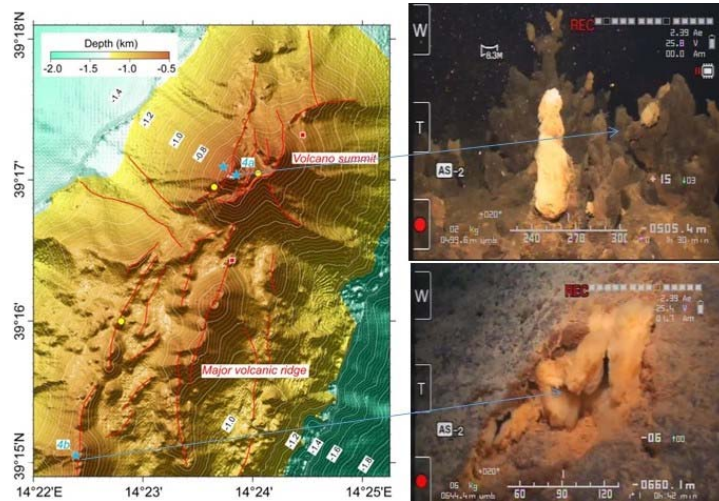


Fig. 24 – Particolare della cresta del Marsili e riprese ROV dei prodotti idrotermali (Ligi et al., 2014)

Il Palinuro è forse il vulcano più “ricco” del panorama italiano. A 600 metri di profondità è localizzato uno sviluppato deposito idrotermale a Barite e Pirite prevalente.

Scoperto agli inizi degli negli anni Ottanta grazie alle prime investigazioni del fondali marini finanziate dalla società petrolifera di bandiera, il deposito idrotermale del Palinuro è caratterizzato dalla presenza di metalli preziosi come Rame, Bario, Argento, Piombo (1.6% Cu, 2.8 % Zn, 1.9% Pb, 0.39 ppm Au, e 130 ppm Ag) in percentuali economicamente rilevanti.

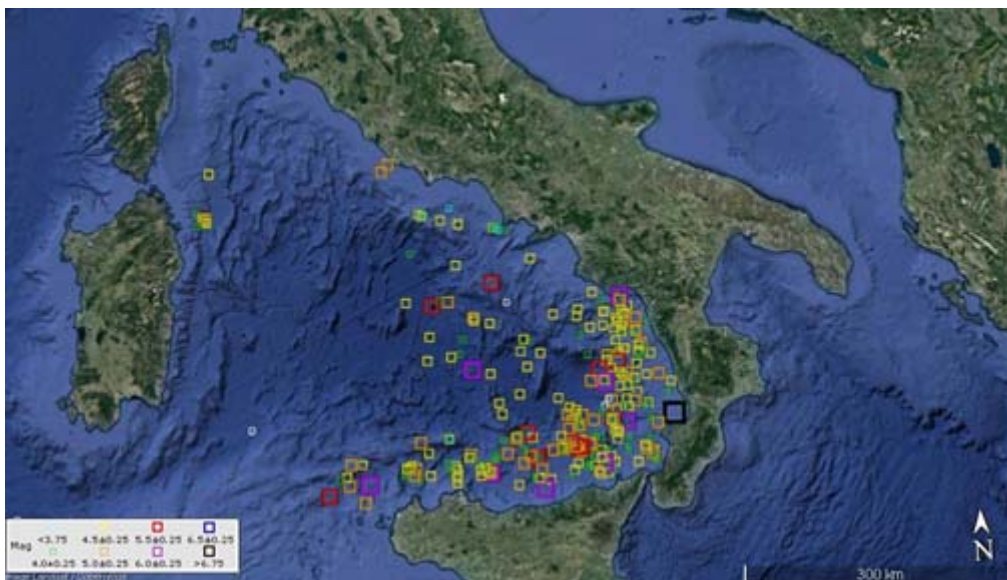


Fig.25 Terremoti storici dal 1000 al 2019 (CPTI – DBMI 15) INGV, nel basso Tirreno.

Al fine di fornire una valutazione della sismicità di fondo caratteristica della parte sottomarina del basso Tirreno, si è svolta una ricerca sul Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI)- Database Macrosismico Italiano dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), si mostrano i terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 dal 1000 al 2019 insieme ai dati macrosismici



e strumentali, nella zona del basso Tirreno. Sono stati estrapolati 295 eventi sottomarini, con una Magnitudo (Mw) compresa tra 2.8 e 6.9 con una media di 4.4 Mw. La profondità varia tra 1 km e 500 km, con una media approssimativa di 175 km. L'area a maggior intensità (Magnitudo), come si evince dalla mappa allegata, risulta essere localizzata presso l'arco calabro, in corrispondenza dello slab ionico in subduzione (Fig. 25).



4.2 Hazard vulcanico in aree di GSI

Trattandosi di vulcani sottomarini va premesso che la conoscenza su questi è limitata dalla scarsità dei dati a disposizione (spesso solo dati geofisici rilevati in remoto, con campionamenti molto limitati). Ci si trova di fronte al problema di gestire uno stato di conoscenze e dati disponibili estremamente differente per i diversi apparati a volte insufficiente a formulare una valutazione completa della pericolosità vulcanica ad essi associata.

Mentre per alcuni apparati le conoscenze delle parti sommerse sono decisamente avanzate, per altri, non si hanno a disposizione che poche immagini morfobatimetriche.

In base alla raccolta bibliografica effettuata si sta provvedendo ad elencare le tipologie di hazard possibili e le entità degli eventi che le genereranno.

Attualmente si sta procedendo alla gestione dello stato di conoscenze, alla definizione degli scenari di pericolosità e ad una qualificazione dell'hazard.

Per la definizione delle pericolosità vulcaniche, in questi tasks verranno elencati in generale possibili scenari e le relative problematiche legate alle diverse fenomenologie di potenziali eventi.

Tipologie di eventi potenziali:

- Attività eruttiva sottomarina;
- Emissioni violente e massive di fluidi;
- Gas –hazard
- Instabilità gravitativa sottomarina potenzialmente tsunamigenica;

Verrà stilata una scheda per ogni seamount, e per ognuno di essi verranno elencati gli hazard possibili, classificati in relazione alle dimensioni degli eventi che potranno generarli.



4.3 Hazard bio-geochimico in aree di GSI (con focus sul Mar Tirreno)

Un elemento caratterizzante le sorgenti idrotermali, siano esse *deep* o *shallow*, è la composizione gassosa delle loro emissioni, con una marcata prevalenza di CO₂ che può essere identificato come gas principale dei fluidi idrotermali.

L'emissione di CO₂ dal fondo determina notevoli alterazioni chimico-fisiche dell'ambiente circostante. La conseguenza più diretta ed evidente del rilascio di CO₂ è l'abbassamento dei valori di pH nelle aree prossime ai *vents* (*effetto acidificazione*) con ripercussioni non solo nei sedimenti, nella colonna d'acqua e nell'interfaccia acqua-sedimento, ma potenzialmente anche nelle matrici biologiche. I numerosi studi condotti negli ultimi anni nelle sorgenti idrotermali *shallow*, mostrano come in questi ambienti gli organismi marini si distribuiscano in due principali categorie sulla base della loro risposta alle emissioni idrotermali: i *winners* (vincenti), ovvero organismi che riescono a trarre vantaggio dall'incremento di CO₂ (soprattutto alghe e fanerogame marine); i *losers* (perdenti), organismi che manifestano una risposta di stress in presenza delle emissioni idrotermali (Connell et al., 2013; Fabricius et al., 2011). Tra questi ultimi spicca la componente degli organismi calcarei che, proprio a causa della riduzione del pH tipica di questi ambienti, tendono a diminuire in abbondanza e nei casi più estremi a scomparire del tutto dall'ambiente acidificato. Ciò determina una semplificazione delle comunità di tali ambienti non solo in termini di biodiversità (Kroeker et al., 2013) ma anche di funzionalità (Vizzini et al., 2017). Dal punto di vista bio-geochimico, fluidi e gas rilasciati dalle sorgenti idrotermali possono avere effetti diretti ed indiretti su diverse matrici ambientali e possono alterare gli equilibri biologici ed ecologici degli ecosistemi.

La particolare conformazione geografica dei fondali del Mar Tirreno dovuta alla sua complessa e particolare evoluzione geologica e geodinamica, ha fatto di questo mare il regno delle emissioni idrotermali. Qui sono presenti quasi la metà delle emissioni idrotermali note nel bacino del Mar Mediterraneo, come anche il più grande *seamount* d'Europa, il Marsili. I vulcani del Mar Tirreno si sono formati principalmente tramite eruzioni effusive di lava; tuttavia, recentemente sono stati individuati depositi vulcanici di tipo esplosivo, formati qualche migliaio di anni fa a diverse centinaia di metri sotto il mare. L'insieme dei dati disponibili ad oggi dimostrano che il fondale del Mar Tirreno è in continua evoluzione. A tal proposito, il recente studio di Sabbarese et al., (2020) ha dimostrato come vi sia stato negli ultimi anni un periodo di disordine del suolo, caratterizzato da un notevole sollevamento nel Tirreno Centrale (Campi Flegrei) e un aumento generale dei fluidi vulcano-idrotermali. La lunga serie di dati acquisita da Sabbarese et al., (2020) nell'intervallo temporale 2011-2017, ha evidenziato come questa crisi abbia influenzato anche l'attività del Radon (²²²Rn). Il ²²²Rn è un elemento radioattivo utilizzato come tracciante di attività vulcanica e sismica (Briestenský et al., 2014). Sabbarese et al., (2020) riportano due interessanti considerazioni: (1) l'estensione dell'area interessata dai disordini in corso risulta essere molto più ampia rispetto all'area di sismicità e all'area di intensa attività idrotermale di Pisciarelli e Solfatara; (2) la



confermata potenzialità del ^{222}Rn come indicatore dell'evoluzione di una crisi indotta dai vulcani. I segnali del ^{222}Rn mostrano, infatti, un andamento molto simile a quello dei più classici parametri geofisici e geochimici.

Negli ultimi anni è notevolmente cresciuto l'interesse della comunità scientifica verso lo studio dell'emissione di particolari sostanze (es. CO_2 , CH_4 , idrocarburi, Hg, Co, Ni, Pb, Cu, Fe, Rn) come tracciante di fenomeni endogeni naturali (attività sismica e/o vulcanica). Un caso particolare è costituito dai metalli, il cui rilascio impone particolare attenzione per le possibili conseguenze sulla salute ambientale e dell'uomo. Infatti i metalli, a differenza di altre sostanze, non possono essere biotrasformati e pertanto tendono ad accumularsi nei sedimenti delle aree di emissione e delle zone limitrofe, penetrando anche nelle matrici biologiche attraverso fenomeni trofici (Andaloro et al., 2012). In questo senso, l'eccezionale evento di degassamento avvenuto nei pressi dell'isola di Panarea nel Novembre 2002, ha segnato l'inizio del rilascio in colonna d'acqua di oligoelementi di particolare interesse ecotossicologico (Na, K, Mg, Ca, Cl, Br, SO_4^{2-} , HCO_3^-), oltre ad un significativo input di metalli quali ad esempio Hg, Cd, Pb e As (Renzi et al., 2011). La presenza significativa di queste sostanze è stata riscontrata anche nei sedimenti e in organismi bentonici di notevole interesse biologico ed ecologico nel contesto ambientale indagato. In particolare, la presenza a distanza di 10 mesi dall'evento di degassamento di Cd e As in un produttore primario (*Cystoseira compressa*) e in una specie ittica sedentaria carnivora (*Serranus cabrilla*), ha evidenziato come tali contaminazioni siano dipendenti dall'elemento e dalla specie presi in considerazione (Renzi et al., 2011). È importante qui evidenziare come i valori dei contaminanti misurati nei tessuti di *S. cabrilla* fossero notevolmente superiori ai limiti di rischio proposti dalla direttiva 2001/22/CE per il consumo umano (Renzi et al., 2011).

Uno scenario peculiare si verifica anche nella Baia di Levante nell'isola di Vulcano, dove le alte concentrazioni di CO_2 emesse (circa 97-99%) sono associate a basse concentrazioni di gas tossici come H_2S (<2.2%) che diminuiscono rapidamente a brevi distanze dal vent primario (Boatta et al., 2013). Nella Baia di Levante, le acque sotterranee ricche di ferro e altri metalli in tracce si miselano con la colonna d'acqua sovrastante (Aiuppa et al., 2000) influenzando anche i sedimenti con variazioni su breve scala spaziale (Vizzini et al., 2013). La contaminazione rappresenta quindi il risultato non solo dell'immissione di fluidi ricchi in metalli ma anche del gradiente di pH e Eh presente nella baia che influenza la solubilità dei metalli stessi. Ad esempio, il ferro è mantenuto in uno stato solubile nelle aree prossime al vent primario, con conseguenti alte concentrazioni nelle acque superficiali (Boatta et al., 2013) e corrispondenti basse concentrazioni nei sedimenti (Vizzini et al., 2013). Incrementando le distanze dal vent, l'aumento di pH ed Eh può favorire la precipitazione del Fe portando quindi ad un aumento della contaminazione dei sedimenti. In particolare, nella Baia di Levante la contaminazione dei sedimenti da parte di metalli in tracce come bario, ferro, arsenico e cadmio è stata descritta in un'area compresa tra circa 150-350 metri dalla



sorgente primaria dove proprio i valori di pH ed Eh aumentano (Vizzini *et al.*, 2013). Questa contaminazione è stata riscontrata anche nella fanerogama marina *Cymodocea nodosa* e negli epifiti ad essa associati nella Baia di Levante (Vizzini *et al.*, 2013). Le fanerogame, infatti, possono assimilare i metalli in tracce sia dalla colonna d'acqua attraverso le foglie sia dal sedimento e dall'acqua interstiziale utilizzando le radici (Ferrat *et al.*, 2003), con possibili ripercussioni negative a livello dell'intera catena trofica.

Un altro scenario altrettanto interessante è quello che si verifica nelle sorgenti idrotermali *deep*, in cui elevate pressioni e alte temperature possono dare origine a diversi composti inclusi idrocarburi a basso peso molecolare (Konn *et al.*, 2009). Solo nei sistemi idrotermali *deep* è noto che il Fe^{2+} viene ossidato dall'acqua, formando ossigeno che porta di conseguenza alla formazione di magnetite (Fe_3O_4), che in natura funge da catalizzatore e porta alla riduzione dell'acqua ad H_2 . Pertanto, la riduzione della CO_2 H_2 -dipendente, porta alla generazione di idrocarburi (C2-C11), metano e idrocarburi aromatici utilizzando Fe_3O_4 come catalizzatore (Preiner *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2017). Per quanto riguarda gli alcani a catena lunga e gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), questi possono essere generati attraverso processi termogenici (Simoneit 2018; McCollom *et al.*, 1999; Konn *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2012). Come è stato osservato nello studio di Wang *et al.* (2020) la presenza degli idrocarburi svolge un ruolo di primaria importanza nella configurazione microbica di questi ambienti, in quanto descrive lo *shift* metabolico di alcuni organismi chemioautotrofi in grado di passare dall'ossidazione dello Zolfo al comportamento mixotrofo attraverso la capacità di degradare gli idrocarburi stessi.

Malgrado gli sforzi scientifici, tecnologici ed economici profusi, la conoscenza geologica del Mar Mediterraneo risulta ancora oggi frammentaria a causa della limitata quantità di dati disponibili. Numerose ricerche sono infatti necessarie per risolvere l'affascinante puzzle geologico e vulcanico del Mar Mediterraneo e per definire i possibili scenari di *hazard* potenzialmente legati ad eruzioni vulcaniche sottomarine.

Concludendo, è evidente che questi ambienti necessitano di programmi di monitoraggio estesi nel tempo per valutare la loro continua evoluzione e le alterazioni biologiche ed ecologiche che da essa possono derivare.



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca



Ministero
dello Sviluppo Economico



Ministero per la Coesione Territoriale

4.4 Instabilità dei versanti in aree di vents idrotermali: studi esistenti (con focus sul Mar Tirreno) (CNR, Resp. Salvatore Passaro)

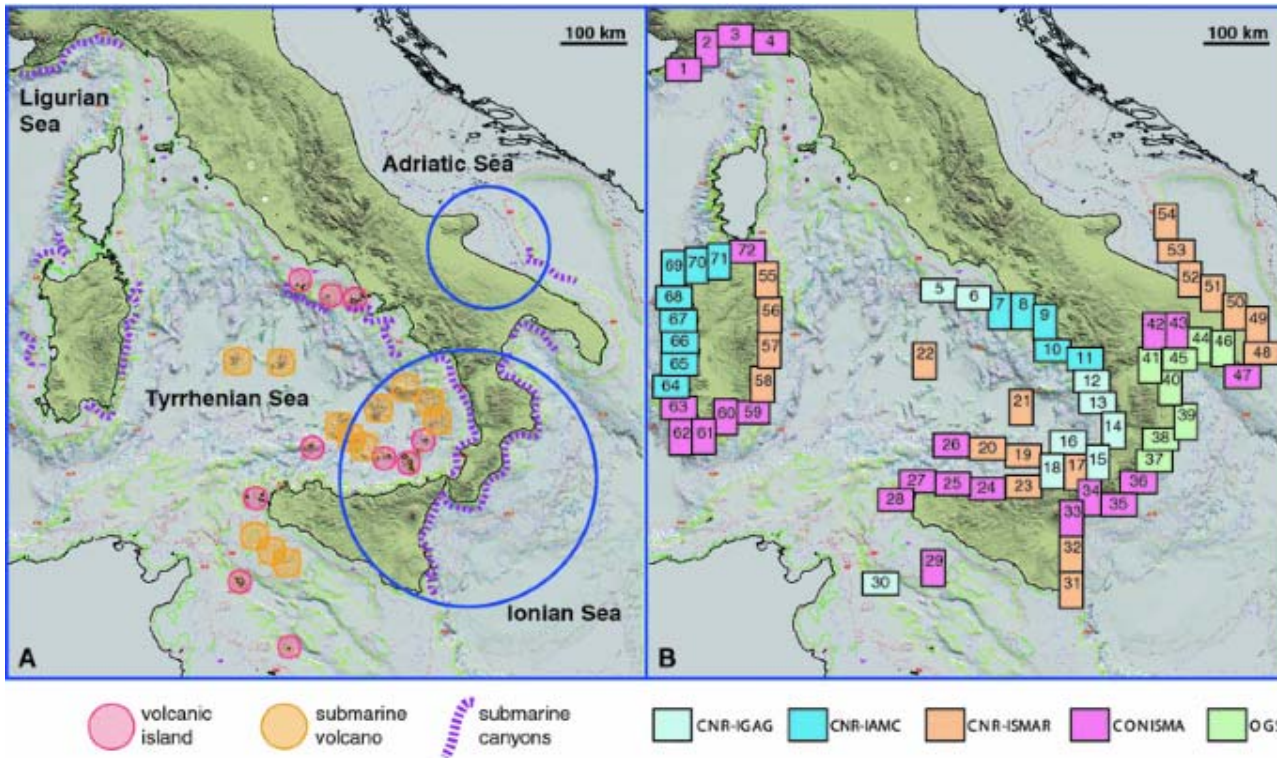


Fig.26 Aree marine studiate nell'ambito del progetto MAGIC

4.4.1 Studi di collassi laterali sui fianchi dei vulcani nel Mar Tirreno

I movimenti gravitativi sottomarini sono stati ampiamente studiati in letteratura, spesso con un focus sulla valutazione del potenziale tsunamigenico correlato, che si ottiene principalmente mediante metodi numerici (Tinti et al.1997; Gallotti et al.2020). In particolare, l'instabilità dei fianchi colpisce comunemente i vulcani sottomarini e insulari, a causa dell'eccessivo aumento del pendio e del carico potenziato dall'attività eruttiva, dello scuotimento sismico, dell'idrotermalismo, della variabilità laterale e verticale dei prodotti e dell'effetto correlato sulla pressione dai fluidi interstiziali. La mappatura multibeam del fondo marino ad alta risoluzione ha notevolmente migliorato la nostra conoscenza sulla distribuzione, il meccanismo e la frequenza dei rischi da collasso gravitazionale, sia per i principali eventi catastrofici (es. grandi frane sottomarine e costiere e tsunami) sia per eventi più piccoli ma più frequenti (es. cedimento retrogressivo su piccola scala lungo i fianchi dei canyon). Il progetto MAGIC (e.g., Chiocci e Ridente, 2011; Fig. 26) ha definito la presenza, la distribuzione e le caratteristiche geomorfologiche che possono essere indicative di contesti stratigrafici o morfostrutturali potenzialmente pericolosi, consentendo una valutazione del rischio geografico su scala regionale che può rappresentare il primo passo per affrontare ulteriori indagini finalizzate alle valutazioni sito-specifico del rischio.



La ricostruzione di eventi di instabilità gravitazionali preistorici e storici e la costruzione di scenari di potenziali eventi futuri richiedono analisi specifiche delle caratteristiche geologiche e morfologiche del sito in esame, informazioni non sempre disponibili per le aree di acque profonde.

Diversi vulcani mostrano evidenze morfologiche di crolli di fianchi e settori, nonché di cedimenti a più piccola scala legati ai processi di instabilità gravitazionale e alla dinamica dei vulcani (McGuire, 1996; Voight e Elsworth, 1997; Thouret, 2010). Diversi fattori sono responsabili del meccanismo di indebolimento degli edifici vulcanici e della conseguente instabilità dei fianchi. I fattori endogeni includono il sollevamento o il ritiro magmatico di bacini superficiali, processi idrotermali, vulcano-tettonica e terremoti, mentre i fattori esogeni sono legati al disfacimento erosivo degli edifici. Per quanto riguarda i vulcani onshore, l'instabilità delle isole vulcaniche può produrre devastanti colate detritiche, lahar e smottamenti, oltre a potenziali inneschi di tsunami in grado di percorrere centinaia di chilometri in tempi brevi. Sulle isole vulcaniche, lo tsunami innescato da una frana più recente si è verificato nel dicembre 2018 uccidendo 437 persone nello stretto della Sonda a seguito dell'esplosione e del crollo del settore dell'Anak Krakatoa, Indonesia (Muhari et al., 2019; Putra et al., 2020). Nel Mar Tirreno (Italia), l'evento più recente è avvenuto nel dicembre 2002 all'isola di Stromboli, e ha coinvolto i settori sottomarino del vulcano con un runup massimo di 8 m lungo la costa dello Stromboli (Maramai et al., 2005).

4.4.2 Esempi di eventi di collasso delle aree idrotermali del SE Tirrenico

La catena vulcanica di Palinuro (PVC), lunga circa 90-100 km, è composta da 15 vulcani allineati EW con estensione in altezza fino a 3200 m dal fondale marino circostante (Cocchi et al., 2017). La presenza di caldere (a ovest), sistemi di fratture e canyon fornisce prove di fenomeni di instabilità (Passaro et al., 2010 e 2011). Inoltre, il PVC è influenzato dall'attività idrotermale che può indebolire le rocce vulcaniche (ad esempio Caratori Tontini et al., 2009 e 2014; Sztikar et al., 2015) e da terremoti crostali e più profondi con magnitudo fino a 5. È stata rilevata anche una sismicità più bassa possibilmente correlata all'attività idrotermale (Soloviev et al., 1990).

L'analisi geomorfologica della catena vulcanica e i dati di un profilo sismico multicanale rivelano grandi volumi di materiale caotico sepolto che suggeriscono lo scivolamento della massa gravitazionale dai fianchi del vulcano. Gallotti et al. (2020) hanno effettuato un'analisi di stabilità dei fianchi di Palinuro per determinare i settori potenzialmente soggetti a scivolamento in caso di terremoti vulcanici di bassa profondità. Le frane sono state simulate adottando un approccio basato su scenari. Il modelling degli tsunami indotti da questi movimenti di massa e la loro propagazione attraverso il Mar Tirreno ha suggerito che i terremoti superficiali ($M \sim 4,6-4,8$) sono in grado di destabilizzare i fianchi della catena vulcanica generando cedimenti dei pendii. Volumi di scorrimento dell'ordine di $1,5 \text{ km}^3$ e $2,4 \text{ km}^3$ possono indurre onde alte rispettivamente 1,5 e 6 m lungo la costa peri-tirrenica.

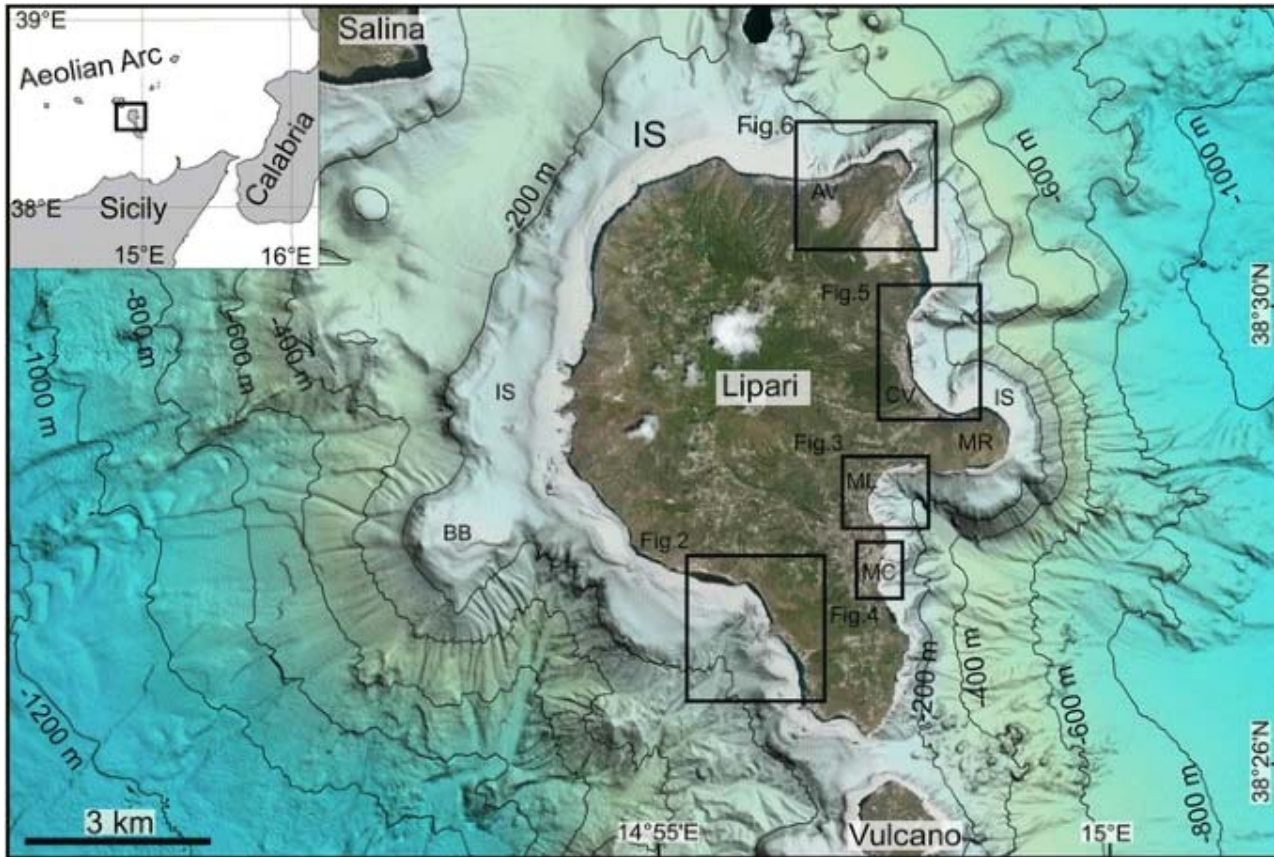


Fig.27 DTM terra-mare dell'Isola di Lipari (Arco Eoliano; Casalbore et al., 2017)

La complessità della stabilità dei fianchi dei vulcani è testimoniata da alcuni casi –studio come l'Isola di Lipari. Anzidei et al. (2017) hanno dimostrato come l'effetto dei movimenti verticali e dell'azione erosiva-deposizionale dovuta alle variazioni del livello del mare possa innescare delle instabilità, mentre Casalbore et al., (2016) hanno mostrato che i processi erosivi retrogressivi delle teste dei canyon sottomarini possono minacciare la stabilità dei fianchi (Fig. 27). Queste strutture sono in grado di innescare potenziali scivolamenti sottomarini e tsunami di ampiezza limitata, rappresentando un significativo pericolo naturale per la popolazione locale. Oltre a crolli di settore su larga scala che si verificano su scala temporale di migliaia di anni, le frane di medie dimensioni possono costituire un grave pericolo a causa della loro maggiore frequenza (cioè, da alcune centinaia fino a poche decine di anni), come ad esempio evidenziato a Stromboli nell'arcipelago delle Eolie (Chiocci et al., 2008). Questi eventi possono mobilitare volumi di alcuni milioni di metri cubi, essendo in grado di generare tsunami locali ma gravi quando si verificano in acque poco profonde, come dimostrato dalle recenti frane tsunamigeniche del 2002 che hanno colpito le coste di Stromboli con onde alte fino a 10 m (Maramai et al. 2005). Gli stessi autori sottolineano che almeno 5 eventi di maremoto simili sono stati segnalati nel secolo scorso a Stromboli, i cui effetti sono stati registrati anche nelle isole vicine.



Uno degli eventi più famosi di instabilità dei fianchi dei vulcani nel Mar Tirreno riguarda il versante meridionale dell'Isola Di Ischia (Fig. 28). In quest'area si è riscontrata l'evidenza di un deposito tipo debris avalanche (colata di blocchi), esteso per circa 40 km e riguardante una volume di materiale valutato in circa 1.5 km³ (Chiocci e de Alteriis, 2006). Tra le varie ipotesi sulla sua origine la più plausibile è quella di un unico evento di collasso che ha lasciato una nicchia di distacco dalla forma di ferro di cavallo lungo il fianco subaereo del Monte Epomeo (787 m s.l.m., il rilievo più alto dell'isola). Il crollo ha interessato anche il fianco sommerso dell'isola lasciando una morfologia trapezoidale lungo il versante sud. Il debris avalanche meridionale dell'Isola d'Ischia ha un volume stimato di 1,5-3 km³ ed è stato distribuito su tutta la scarpata continentale inferiore da 550 m fino a oltre 1.100 m di profondità, coprendo un'area totale di 200 km². Il collasso sarebbe avvenuto durante la colonizzazione greca dell'isola (de Alteriis et al. 2010).

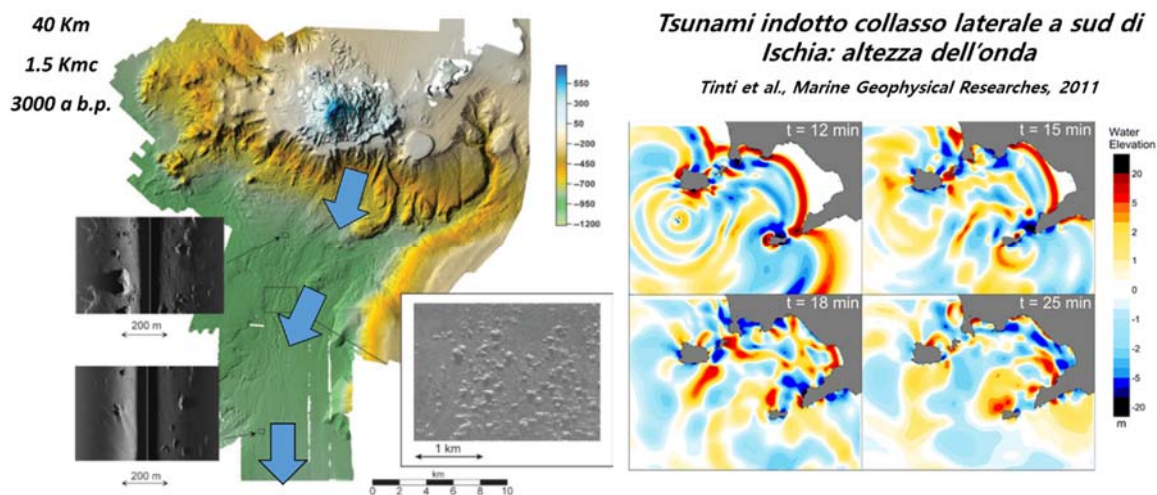


Fig. 28 DTM e area del debris avalanche meridionale dell'Isola d'Ischia.

Più recentemente ulteriori evidenze sui depositi detritici sottomarini, interpretati anche come valanghe detritiche, sono state fornite anche per l'offshore a ovest ea nord dell'isola. Sulla base di un'ampia gamma di prove geologiche il sollevamento del Monte Epomeo, insieme allo scuotimento sismico, si ritiene sia la principale causa di instabilità.

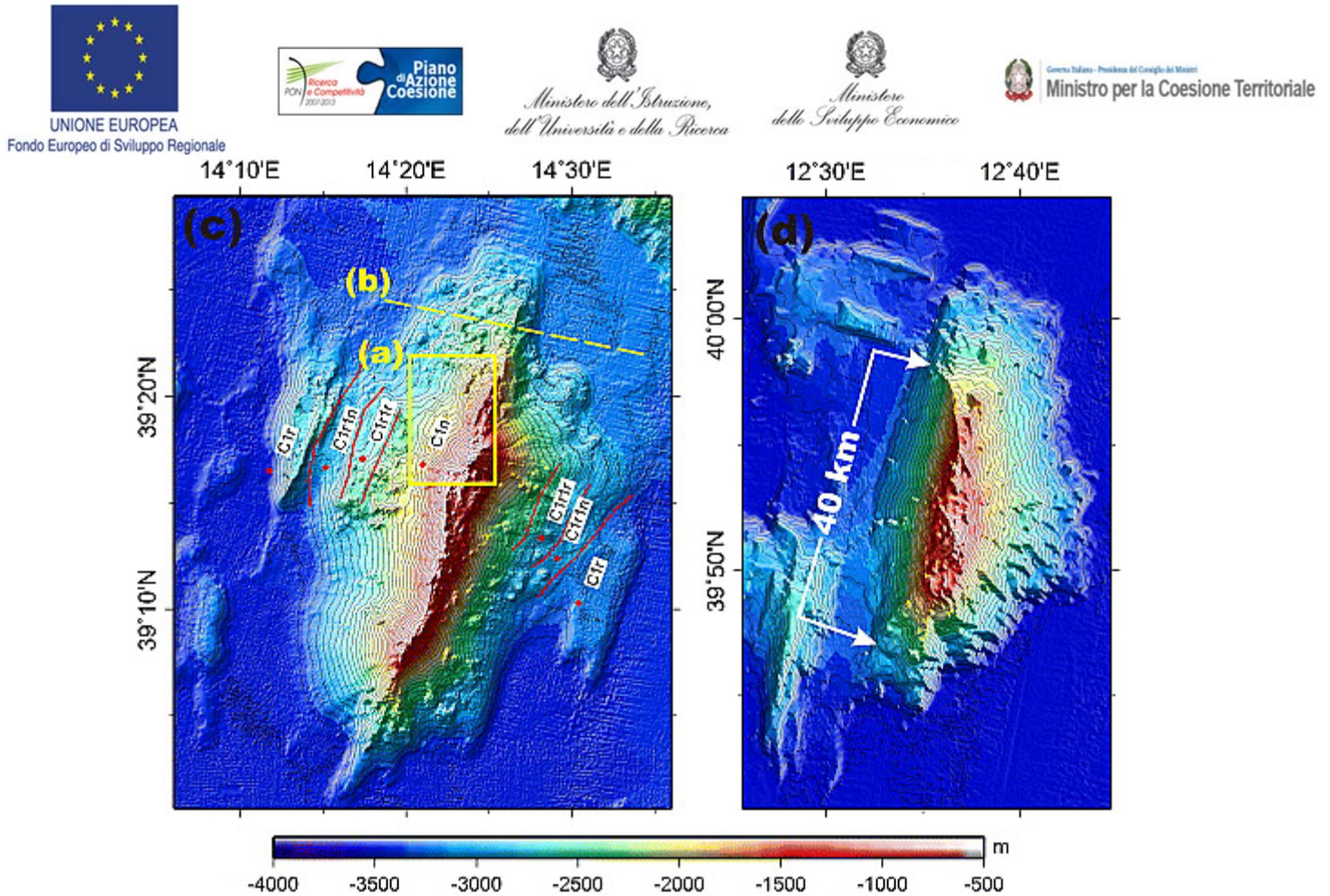


Fig. 29 DTM del Marsili Seamount (a sinistra) e del Vavilov Seamount (a destra). Per il Vavilov è riportata l'area di collasso di settore (da Caratori Tontini et al., 2010).

Infine, è stato dimostrato che il Seamount Marsili possiede una struttura interna (schematizzata attraverso l'elaborazione e l'interpretazione avanzate di dati di anomalie magnetiche residue; Caratori Tontini et al., 2010) simile a quella del Vavilov, per il quale è stato ipotizzato un enorme collasso di settore del margine occidentale dell'edificio (circa 40 km di estensione: Fig. 29). La naturale conseguenza di questo studio è la considerazione di un potenziale elemento di pericolosità che nasce dall'intrinseca instabilità delle pareti del Marsili Seamount, potenzialmente soggetta ad un evento della stessa portata del Seamount Vavilov, le cui catastrofiche conseguenze si abbatterebbero su buona parte delle coste del SE Tirrenico.



5 Aspetti legali e convenzioni a livello internazionale/nazionale

5.1 Implicazioni restrittive in ZEE

L'evoluzione dell'ordinamento giuridico legato allo sfruttamento delle risorse abiotiche in ambiente marino è attualmente in un fase delicata di revisione, soprattutto in funzione dell'evoluzione delle conoscenze sullo stato di salute dei mari, sulla resilienza dell'ambiente all'impatto antropico e al recepimento della Marine Strategy Framework Directive (MSFD - EU 56/2008) da parte di tutti gli Stati Membri della Comunità Europea che prevede lo sviluppo di azioni per il raggiungimento del Good Environmental Status e lo sviluppo di azioni di recupero di ambienti marini degradati per un oceano in salute resiliente e produttivo.

Anche numerose raccomandazioni internazionali e l'evoluzione normativa del diritto del mare portano a una gestione precauzionale delle risorse naturali e biotiche marine nell'ambito dell'applicazione di un approccio ecosistemico al loro utilizzo, alla Pianificazione dello Spazio Marittimo (MSPD) e alla necessità di proteggere l'ambiente marino al di là delle acque nazionali; ciò ha condotto negli ultimi anni l'Italia all'istituzione di una vasta Zona di Protezione Ecologica al fine di evitare attività che possano costituire fonti inquinanti. Inoltre azioni di conservazione di questi ambienti scaturiscono dalle raccomandazioni del Terzo Rapporto Nazionale sul Capitale Naturale (2019) che enfatizza il loro valore economico intrinseco e quello dei servizi ecosistemici resi. La stessa risoluzione 73/284 "United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030)" raccomanda ai Paesi una visione conservativa, recepita dalla I.S.A. (International Seabed Authority) cui aderiscono 168 Paesi (inclusa l'Italia) per il raggiungimento dei SDGs di Agenda 2030. Infine le raccomandazioni della Marine Strategy Framework Directive per il raggiungimento del GES e dei Target previsti scoraggiano fortemente attività che possano avere impatto ambientale significativo e promuovono la tutela del *Deep Sea* dal *Mining* e dalla pesca profonda, come inoltre richiesto e supportato da molti Enti di Ricerca e ONG e già recepito da alcuni Paesi come la Nuova Zelanda e la Polinesia. Come esempio rilevante per il *Palinuro Seamount*, l'Italia è impegnata con la UE a includere l'inter area all'interno del sistema Rete Natura 2000.

E' evidente che questo scenario normativo nazionale ed internazionale anche se attualmente non rappresenta una interdizione diretta al *mining* lo scoraggia fortemente sia a livello scientifico che produttivo, anzi implementa e rende urgente la necessità di sviluppare studi e ricerche rivolte alla sua caratterizzazione geochimica, biologica ed ecologica e la sua tutela.

In questi ultimi anni, ad opera degli Istituti di ricerca italiani (ISPRA, CNR, INGV, ENEA) sono stati sviluppati studi che evidenziano la rilevante importanza in termini di capitale naturale e servizi ecosistemici degli ambienti geotermali costieri e profondi, oltre che, in termini produttivi di biodiversità e produzione di energia chemiosintetica. Inoltre la diversità microbica geotermale è ancora poco conosciuta e può costituire la base di nuove applicazioni biotecnologiche. Il geotermalismo



sommerso costituisce anche un potenziale *hazard* sia in termini di trasferimento di contaminanti nella catena alimentare che di fenomeni parossistici. In tale direzione è necessario e opportuno implementare lo studio della presenza di contaminanti di origine geotermica negli organismi marini e gli effetti correlati di biomagnificazione che consente anche di sviluppare metodi innovativi di *biomonitoring* e di *bioalert* del geotermalismo.

5.2 Ulteriore dettaglio su aspetti normativi di riferimento (il caso Italia)

Nel 2011, l'Italia ha emanato il DPR 209/2011 "regolamento recante istituzione di zone di protezione Ecologica del Mediterraneo Nord-Occidentale, del mar ligure e del mar Tirreno", in cui ricade il *Palinuro Seamount*, finalizzata all'interdizione di qualsiasi attività possa avere forma di impatto sull'ecosistema marino. Inoltre, è in istruttoria l'integrazione del *Palinuro Seamount* nella rete nazionale Natura 2000. Inoltre, a seguito dell'emanazione della Legge 11 febbraio 2019, n. 12, ed in particolare dell'art. 11-ter che prevede l'adozione del Piano per la transizione energetica sostenibile delle aree idonee (PiTESAI) e la rideterminazione dei canoni previsti dall'articolo 18 del D.lgs. 25 novembre 1996 n. 625, il MiSE ha intrapreso un ampio processo di predisposizione e valutazione ambientale del citato Piano che parte dalla finalità "di individuare un quadro definito di riferimento delle aree ove è consentito lo svolgimento delle attività di prospezione, ricerca e coltivazione di idrocarburi sul territorio nazionale, volto a valorizzare la sostenibilità ambientale, sociale ed economica delle stesse" (D.L. n. 135/2018, art 11-ter convertito con modifiche dalla L. n. 12/2019). Ciò prevede in prima istanza la redazione di un Rapporto Preliminare che darà avvio alla VAS. Tale documento, sui possibili effetti ambientali significativi che possono derivare dall'attuazione del PiTESAI, è finalizzato a definire la portata e il livello di dettaglio delle informazioni che dovranno essere incluse nel Rapporto Ambientale, come previsto dalla normativa in tema di VAS (D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i). Il Rapporto Preliminare è di supporto all'impostazione delle attività di analisi e valutazione specifiche che saranno oggetto del Rapporto Ambientale, delimitandone l'ambito, stabilendone la portata e le principali linee metodologiche. Nell'ambito della stesura di questa documentazione (tuttora in corso) è stato quindi possibile mettere a sistema strati informativi più recenti relativi alla valenza ambientale e alla vincolistica relativa alle attività estrattive. In questa linea, si inserisce anche la comunicazione ufficiale del MATTM all'UE, formalizzata nel 2019, con la quale l'Italia si è impegnata ad istituire due nuovi siti NATURA 2000 (Siti di Importanza Comunitaria) per l'habitat 1170 - *rockyreef* per le aree dei monti sottomarini Palinuro e Vercelli in risposta ad una richiesta ufficiale pervenuta dall'UE per il tramite dell'EUPILOT 8348/16/ENV. Questo ulteriore ed importante elemento, con il quale l'Italia si è impegnata a istituire un'area protetta marina afferente ad un network europeo (rete NATURA 2000) prevista dalla Direttiva europea Habitat 92/43/CEE, per la Zona di protezione Ecologica già dichiarata dall'Italia per i suoi bacini occidentali (con la Legge 8 febbraio 2006, n. 61 "Istituzione di zone di protezione ecologica oltre il limite esterno del mare



UNIONE EUROPEA

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



*Ministero
dello Sviluppo Economico*



Governo Italiano - Presidenza del Consiglio dei Ministri

Ministro per la Coesione Territoriale

territoriale”), valuta come prioritaria l'importanza conservazionistica del *Palinuro Seamount*, rispetto alle attività di sfruttamento minerario.



Conclusioni

Il presente report (OR1.1 Stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sull'esplorazione, lo sfruttamento e la conservazione dei depositi di origine idrotermale) è stato sviluppato nell'ambito dell'Obiettivo Realizzativo 1 (OR1) del progetto PON Marine Hazard (PON "R&C" 2007-2013 - Avviso D.D. 713/Ric. del 29 ottobre 2010 - TITOLO III - Progetto PON03PE_00203_1) e costituisce un deliverables al progetto stesso per l'attività "Stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sull'esplorazione, lo sfruttamento e la conservazione dei depositi di origine idrotermale (GSI)" (mese 6).

Il presente report aveva il compito di fare luce sullo stato dell'arte della conoscenza a livello internazionale sugli ambienti idrotermali, in termini di esplorazione, sfruttamento e meccanismi di potenziali hazard derivanti, ed anche sulla corsa (ormai spinta) al potenziale minerario ad essi associato. Se da un lato le potenzialità dei depositi risultano profondamente esplorate (molto ormai si trova in letteratura sulle caratteristiche chimico-mineralogiche e sui potenziali giacimenti soprattutto in acque profonde internazionali), la strada per la valutazione degli hazard associati sembra ancora distante dall'essere adeguatamente compresa. Ad oggi risultano, infatti, ben esplorati in termini di ricerca, i classici elementi associati delle aree vulcaniche sottomarine. In particolare la sismicità e i collassi laterali o di settore (ma anche l'instabilità gravitativa in genere), così come gli assetti vulcano-strutturali, rappresentano le aree di ricerca meglio esplorate dei settori caratterizzati dalla presenza di vents idrotermali.

Risulta naturale, del resto, l'accesa propensione ad esplorare maggiormente gli aspetti economici della frontiera costituita dal deep sea mining per quanto riguarda le compagnie private, che evidentemente credono molto nelle potenzialità e nel futuro di questo settore. La ricerca sulle aree di vents, soprattutto applicata e certamente orientata, si traduce in una corsa che ha già prodotto sforzi notevoli in termini di finanziamenti (basti pensare alle grandi iniezioni di fondi della comunità europea) e di risultati eccellenti nel campo dei dimostratori di prelievo, così come per una robotica di livello straordinario in grado di gestire le enormi complessità di raccolta dei minerali situati nelle aree abissali, a migliaia di metri di profondità. Nonostante l'elevato numero di centri di ricerca di eccellente livello impegnati in questi progetti, ad oggi si verifica la presenza in letteratura di molte voci di allarme generalizzato sulla potenziale distruzione di alcuni degli ambienti più intriganti e affascinanti del pianeta, quali certamente sono le aree dei vents da un punto di vista sia geologico che biogeochimico. Tali allarmi sono certamente motivati e significativi, soprattutto a causa dei radicali cambiamenti potenzialmente introdotti dalle attività di estrazione, ma poco si è spinto, ad oggi sulle valutazioni quantitative dell'importanza di questi ambienti e dei rischi associati alle potenzialità estrattive del deep sea mining. A dispetto dell'incredibile numero di valutazioni quantitative sul potenziale minerario a livello globale, le analisi quantitative o di scenario correlate al reperimento delle risorse risultano piuttosto scarse, così come poche sono le valutazioni



UNIONE EUROPEA

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



*Ministero
dello Sviluppo Economico*



Governo Italiano - Presidenza del Consiglio dei Ministri

Ministro per la Coesione Territoriale

sull'equilibrio naturale di questi ambienti (ad esempio, di scambio chimico-fisico con le aree di mare profondo e la loro incidenza sulle catene trofiche). In tal senso, uno studio di dettaglio dei vents idrotermali e dei potenziali meccanismi di hazard ad essi correlati, che si proponga di fissare elementi quantitativi specifici risulta di grande interesse (anche se dalla difficile realizzazione), anche per suggerire elementi di discussione quantitativi ad una comunità ormai orientata ad aggredire, nei prossimi anni, la ricchezza prodotta dagli ambienti idrotermali. Questa nuova rotta rende urgente la necessità di sviluppare studi e ricerche rivolte alla sua caratterizzazione geochimica, biologica ed ecologica in aree di venute di fluidi.

In questi ultimi anni, ad opera degli Istituti coinvolti nell'OR1 sono stati sviluppati studi che evidenziano la rilevante importanza in termini di capitale naturale e servizi eco-sistemici degli ambienti geotermali costieri e profondi, oltre che, in termini produttivi di biodiversità e produzione di energia chemiosintetica. Inoltre la diversità microbica geotermale è ancora poco conosciuta e può costituire la base di nuove applicazioni biotecnologiche. Il geotermalismo sommerso costituisce anche un potenziale hazard sia in termini di trasferimento di contaminanti nella catena alimentare che di fenomeni parossistici. In tale direzione è necessario e opportuno implementare lo studio della presenza di contaminanti di origine geotermica negli organismi marini e gli effetti correlati di biomagnificazione che consente anche di sviluppare metodi innovativi di biomonitoring e di bioalert del geotermalismo. Sono questi gli aspetti, a nostro avviso, da esplorare in modo quantitativo e qualitativo allo scopo di indicare gli elementi essenziali per una corretta programmazione della conservazione delle aree idrotermali nei prossimi decenni.



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Riferimenti bibliografici

- Aliani, S., Meloni, R., Dando, P.R., 2004. Periodicities in sediment temperature time-series at a marine shallow water hydrothermal vent in Milos Island (Aegean Volcanic arc, Eastern Mediterranean). *Journal of Marine Systems*, 46 (1-4), pp. 109-119.
- Antranikian, G.; Suleiman, M.; Schäfers, C.; Adams, M.W.W.; Bartolucci, S.; Blamey, J.M.; Birkeland, N.-K.; Bonch-Osmolovskaya, E.; da Costa, M.S.; Cowan, D.; et al. (2017). Diversity of bacteria and archaea from two shallow marine hydrothermal vents from Vulcano Island. *Extremophiles*, 21, 733–742.
- Anzidei M., Bosman A., Carluccio R., Casalbone D., D'Ajello Caracciolo F. et al., 2017. Flooding scenarios due to land subsidence and sea-level rise: a case study for Lipari Island (Italy). *Terra Nova* 29 (1), 44-51
- Bakalis, E., Mertzimekis, T. J., Nomikou, P., & Zerbetto, F. (2017). Breathing modes of kolumbo submarine volcano (santorini, greece). *Scientific Reports*, 7 doi:10.1038/srep46515
- Barbier, E. B. et al. *Nature* 505, 475–477 (2014).
- Baubron J.C., Aallard P., Toutain J.P., 1990. Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, 344: 51-53.
- 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.
- Bourboulis, M., Katsifas, E. A., Papathanassiou, E., & Karagouni, A. D. (2015). The kolumbo submarine volcano of santorini island is a large pool of bacterial strains with antimicrobial activity. *Archives of Microbiology*, 197(4), 539-552. doi:10.1007/s00203-015-1086-3
- Bravakos, P., Mandalakis, M., Nomikou, P., Anastasiou, T. I., Kristoffersen, J. B., Stavroulaki, M., Polymenakou, P. N. (2021). Genomic adaptation of pseudomonas strains to acidity and antibiotics in hydrothermal vents at Kolumbo submarine volcano, Greece. *Scientific Reports*, 11(1) doi:10.1038/s41598-020-79359-y
- Brewer, P. G. (2013). A different ocean acidification hazard-the kolumbo submarine volcano example. *Geology*, 41(9), 1039-1040. doi:10.1130/focus092013.1
- 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.
- 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.
- 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.
- Caratori Tontini, F., Bortoluzzi, G., Carmisciano, C., Cocchi, L., De Ronde, C. E. J., Ligi, M., & Muccini, F., 2014. Near-bottom magnetic signatures of submarine hydrothermal systems at marsili and palinuro volcanoes, southern tyrrhenian sea, italy. *Economic Geology*, 109(8), 2119-2128.



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Caratori Tontini, F., Cocchi, L., Carmisciano, C., 2009. Rapid 3-d forward model of potential fields with application to the Palinuro Seamount magnetic anomaly (southern Tyrrhenian Sea, Italy). *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 114, B02103. <https://doi.org/10.1029/2008JB005907>.

Caratori Tontini, F., Cocchi, L., Muccini, F., Carmisciano, C., Marani, M., Bonatti, E., . . . Boschi, E. (2010). Potential-field modeling of collapse-prone submarine volcanoes in the southern tyrrhenian sea (italy). *Geophysical Research Letters*, 37(3) doi:10.1029/2009GL041757.

Carey, S., Nomikou, P., Bell, K. C., Lilley, M., Lupton, J., Roman, C., . . . Ballard, R. (2013). Co2 degassing from hydrothermal vents at kolumbo submarine volcano, greece, and the accumulation of acidic crater water. *Geology*, 41(9), 1035-1038. doi:10.1130/G34286.1

Casalbore, D., Bosman, A., Ridente, D., & Chiocci, F. L. (2016). Coastal and submarine landslides in the tectonically-active tyrrhenian calabrian margin (southern italy): Examples and geohazard implications. Paper presented at the Submarine Mass Movements and their consequences, 6th International Symposium, 261-269.

Chiocci, F. L., & de Alteriis, G. (2006). The ischia debris avalanche: First clear submarine evidence in the mediterranean of a volcanic island prehistorical collapse. *Terra Nova*, 18(3), 202-209. doi:10.1111/j.1365-3121.2006.00680.x

Chiocci, F.L., Ridente D., 2011. Regional-scale seafloor mapping and geohazard assessment. The experience from the Italian project MaGIC (Marine Geohazards along the Italian Coasts). *Mar Geophys Res* 32, 13–23 (2011).

Chiocci, F.L., Romagnoli, C., Tommasi, P., Bosman, A., 2008. The Stromboli 2002 tsunamigenic submarine slide: Characteristics and possible failure mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113 (10), art. no. B10102.

Christakis, C. A., Polymenakou, P. N., Mandalakis, M., Nomikou, P., Kristoffersen, J. B., Lampridou, D., . . . Magoulas, A. (2018). Microbial community differentiation between active and inactive sulfide chimneys of the kolumbo submarine volcano, hellenic volcanic arc. *Extremophiles*, 22(1), 13-27. doi:10.1007/s00792-017-0971-x

Christopoulou, M. E., Mertzimekis, T. J., Nomikou, P., Papanikolaou, D., Carey, S., & Mandalakis, M. (2016). Influence of hydrothermal venting on water column properties in the crater of the kolumbo submarine volcano, santorini volcanic field (greece). *Geo-Marine Letters*, 36(1), 15-24. doi:10.1007/s00367-015-0429-z

Cocchi, L., Passaro, S., Caratori Tontini, F., Ventura, G., 2017. Volcanism in slab tear faults is larger than in island-arcs and back-arcs. *Nature Commun* 8, 1451. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01626-w>.

Cronan, D. S., Varnavas, S., & Perissoratis, C. (1995). Hydrothermal sedimentation in the caldera of santorini, hellenic volcanic arc. *Terra Nova*, 7(2), 289-293. doi:10.1111/j.1365-3121.1995.tb00696.x

D'Angelo S., Battaglini L., Fiorentino A., 2020. Le emissioni fluide nei mari italiani Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 105, 103-107.

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, 186, D.R.E.Am Italia, Firenze.

D'Alessandro, A., D'Anna, G., Luzio, D., & Mangano, G. (2009). The INGV's new OBS/H: Analysis of the signals recorded at the marsili submarine volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 183(1-2), 17-29. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.02.008

Dando, P. R., Hughes, J. A., and Thiermann, F. (1995). Preliminary observations on biological communities at shallow hydrothermal vents in the Aegean Sea. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 87, 303–317. doi: 10.1144/GSL.SP.1995.087.01.23.



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Dando, P. R., Thomm, M., Arab, H., Brehmer, M., Hooper, L. E., Jochimsen, B., . . . Fowler, S. W. (1998). Microbiology of shallow hydrothermal sites off palaeochori bay, milos (hellenic volcanic arc). *Cahiers De Biologie Marine*, 39(3-4), 369-372.

Dando, P.R., Aliani, S., Arab, H., Bianchi, C.N., Brehmer, M., Cocito, S., Fowler, S.W., Gundersen, J., Hooper, L.E., Kölbl, R., Kuever, J., Linke, P., Makropoulos, K.C., Meloni, R., Miquel, J.-C., Morri, C., Müller, S., Robinson, C., Schlesner, H., Sievert, S., Stöhr, R., Stüben, D., Thomm, M., Varnavas, S.P., Ziebis, W., 2000. Hydrothermal studies in the Aegean sea. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25 (1), pp. 1-8.

De Alteriis, G., Insinga, D., Morabito, S., Morra, V., Chiocci, F. L., Terrasi, F., . . . Pazzanese, M. (2010). Age of submarine debris avalanches and tephrostratigraphy offshore ischia island, tyrrhenian sea, italy. *Marine Geology*, 278(1-4), 1-18. doi:10.1016/j.margeo.2010.08.004

De Biasi, A.M., Bianchi, C.N., Aliani, S., Cocito, S., Peirano, A., Dando, P.R., Morri, C., 2004. Epibenthic communities in a marine shallow area with hydrothermal vents (Milos Island, Aegean Sea). *Chemistry and Ecology*, 20 (SUPPL. 1), pp. S89-S105.

Dekov, V. M., & Savelli, C. (2004). Hydrothermal activity in the SE tyrrhenian sea: An overview of 30 years of research. *Marine Geology*, 204(1-2), 161-185. doi:10.1016/S0025-3227(03)00355-4

Di Paola, G. M. (1974). Volcanology and petrology of nisyros island (dodecanese, greece). *Bulletin Volcanologique*, 38(3), 944-987. doi:10.1007/BF02597100

Donnarumma, L., Appolloni, L., Chianese, E., Bruno, R., Baldrighi, E., Guglielmo, R., et al. (2019). Environmental and benthic community patterns of the shallow hydrothermal area of secca delle fumose (Baia, Naples, Italy). *Front. Mar. Sci.* 6:685. doi: 10.3389/fmars.2019.00685.

Durán-Toro, V.M., Price, R.E., Maas, M., Brombach, C.-C., Pichler, T., Rezwan, K., Bühring, S.I. Amorphous arsenic sulfide nanoparticles in a shallow water hydrothermal system, 2019. *Marine Chemistry*, 211, pp. 25-36.

Eckhardt, J. -, Glasby, G. P., Puchelt, H., & Berner, Z. (1997). Hydrothermal manganese crusts from enarete and palinuro seamounts in the tyrrhenian sea. *Marine Georesources and Geotechnology*, 15(2), 175-208. doi:10.1080/10641199709379943

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., 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): 1-27.

Fabricius, K.E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllehner, N., Glas, M.S., Lough, J.M., (2011). Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nat. Clim. Chang.* 1, 165–169. <https://doi.org/10.1038/nclimate1122>.

Gagliano, A. L., Calabrese, S., Daskalopoulou, K., Cabassi, J., Capecchiacci, F., Tassi, F., . . . D'Alessandro, W. (2019). Degassing and cycling of mercury at nisyros volcano (greece). *Geofluids*, 2019 doi:10.1155/2019/4783514



UNIONE EUROPEA

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Governo Italiano - Presidenza del Consiglio dei Ministri

Ministro per la Coesione Territoriale

Gallotti, G., Passaro, S., Armigliato, A., Zaniboni, F., Pagnoni, G., Wang, L., . . . Ventura, G. (2020). Potential mass movements on the palinuro volcanic chain (southern tyrrhenian sea, italy) and consequent tsunamis generation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 404 doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.107025.

Gilhooly, W.P., Fike, D.A., Druschel, G.K., Kafantaris, F.-C.A., Price, R.E., Amend, J.P., 2014. Sulfur and oxygen isotope insights into sulfur cycling in shallow-sea hydrothermal vents, Milos, Greece. *Geochemical Transactions*, 15 (1), art. no. 12, .

Godelitsas, A., Price, R.E., Pichler, T., Amend, J., Gamaletsos, P., Göttlicher, J., 2015. Amorphous As-sulfide precipitates from the shallow-water hydrothermal vents off Milos Island (Greece). *Marine Chemistry*, 177, pp. 687-696.

Goodwin, C., Rodolfo-Metalpa, R., Picton, B.E., Hall-Spencer, J.M., (2014). Effects of ocean acidification on sponge communities. *Mar. Ecol.* 35, 41–49. <https://doi.org/10.1111/maec.12093>.

Gueguen, E., Tavarnelli, E., Renda, P., & Tramutoli, M. (2002). The geodynamics of the southern tyrrhenian sea margin as revealed by integrated geological, geophysical and geodetic data. *Bollettino Della Societa Geologica Italiana*, 1(1), 77-85.

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.

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. <https://doi.org/10.1038/nature07051>

Hannington M., Petersen S., Krätschell A., 2017. Subsea mining moves closer to shore. *Nature Geoscience*, 10, DOI: 10.1038/ngeo2897

Houghton, J.L., Gilhooly, W.P., III, Kafantaris, F.-C.A., Druschel, G.K., Lu, G.-S., Amend, J.P., Godelitsas, A., Fike, D.A., 2019. Spatially and temporally variable sulfur cycling in shallow-sea hydrothermal vents, Milos, Greece. *Marine Chemistry*, 208, pp. 83-94.

Inguggiato 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, NewZealand, Arehart and Hulston Rotterdam, 727-730.

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.

Italiano, F., De Santis, A., Favali, P., Rainone, M. L., Rusi, S., & Signanini, P. (2014). The marsili volcanic seamount (southern tyrrhenian sea): A potential offshore geothermal resource. *Energies*, 7(7), 4068-4086. doi:10.3390/en7074068

Khimasia, A., Renshaw, C.E., Price, R.E., Pichler, T., 2021. Hydrothermal flux and porewater geochemistry in Paleochori Bay, Milos, Greece. *Chemical Geology*, 571, art. no. 120188, .

Kidd, R.B. & Armannson, H. 1979, "Manganese and iron micronodules from a volcanic seamount in the Tyrrhenian Sea", *Journal of the Geological Society*, vol. 136, no. 1, pp. 71-76.



UNIONE EUROPEA

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero per la Coesione Territoriale

Kiliyas, S. P., Nomikou, P., Papanikolaou, D., Polymenakou, P. N., Godelitsas, A., Argyraki, A., . . . Scoullas, M. (2013). New insights into hydrothermal vent processes in the unique shallow-submarine arc-volcano, kolumbo (santorini), greece. *Scientific Reports*, 3 doi:10.1038/srep02421

Kleint, C., Kuzmanovski, S., Powell, Z., Bühring, S.I., Sander, S.G., Koschinsky, A., 2015. Organic Cu-complexation at the shallow marine hydrothermal vent fields off the coast of Milos (Greece), Dominica (Lesser Antilles) and the Bay of Plenty (New Zealand). *Marine Chemistry*, 173, pp. 244-252.

Koch, M., Bowes, G., Ross, C., Zhang, X.-H.H., (2013). Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. *Glob. Chang. Biol.* 19, 103–132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02791.x>

Ligi, M., Cocchi, L., Bortoluzzi, G., D'Oriano, F., Muccini, F., Tontini, F.C., De Ronde, C.E.J. & Carmisciano, C. 2014. Mapping of seafloor hydrothermally altered rocks using geophysical methods: Marsili and Palinuro seamounts, southern Tyrrhenian Sea. *Economic Geology*, vol. 109, no. 8, pp. 2103-2117.

Lodolo E., Civile D., Zecchin D et al., (2019). A series of volcanic edifices discovered a few kilometers off the coast of SW Sicily. *Marine Geology*, 416. doi: 10.1016/j.margeo.2019.105999.

Lu, G.-S., LaRowe, D.E., Fike, D.A., Druschel, G.K., Gilhooly, W.P., III, Price, R.E., Amend, J.P., 2020. Bioenergetic characterization of a shallow-sea hydrothermal vent system: Milos Island, Greece. (2020) *PLoS ONE*, 15 (6), art. no. e0234175.

Lupton, J., De Ronde, C., Sprovieri, M., Baker, E. T., Bruno, P. P., Italiano, F., . . . Greene, R. (2011). Active hydrothermal discharge on the submarine aeolian arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(2) doi:10.1029/2010JB007738

Mandalakis, M., Gavriilidou, A., Polymenakou, P. N., Christakis, C. A., Nomikou, P., Medvecký, M., . . . Magoulas, A. (2019). Microbial strains isolated from CO₂-venting kolumbo submarine volcano show enhanced co-tolerance to acidity and antibiotics. *Marine Environmental Research*, 144, 102-110. doi:10.1016/j.marenvres.2019.01.002

Maramai, A., Graziani, L., Alessio, G., Burrato, P., Colini, L., Cucci, L., Nappi, R., Nardi, A., Vilardo, G., 2005. Near- and far-field survey report of the 30 December 2002 Stromboli Southern Italy tsunami. *Mar. Geol.* 215, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.11.009>.

Marani, M. P., Gamberi, F., Casoni, L., Carrara, G., Landuzzi, V., Musacchio, M., . . . Trua, T. (1999). New rock and hydrothermal samples from the southern tyrrhenian sea: The MAR-98 research cruise. *Giornale Di Geologia*, (61), 3-24.

Martins, A.; Vieira, H.; Gaspar, H.A.; Santos, S. (2014). Marketed Marine Natural Products in the Pharmaceutical and Cosmeceutical Industries: Tips for Success. *Mar. Drugs*, 12, 1066–1101.

Maugeri, T.L., Bianconi, G., Cangarella, F., Danovaro, R., Gugliandolo, C., Italiano, F., Lentini, V., Manini, E. & Nicolaus, B. 2010, "Shallow hydrothermal vents in the southern Tyrrhenian Sea", *Chemistry and Ecology*, vol. 26, no. SUPPL. 1, pp. 285-298.

McGuire, W.J., 1996. *Volcano Instability: A Review of Contemporary Themes*. vol. 110. Geological Society, London, Special Publications, pp. 1–23 1 January 1996.

Megalovasilis P.. (2020). Hydrothermal fluid particle geochemistry of submarine vents in kos island, aegean sea east mediterranean. *Geochemistry International*, 58(5), 574-597. doi:10.1134/S0016702920050067



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Megalovasilis, P., & Godelitsas, A. (2015). Hydrothermal influence on nearshore sediments of Kos island, Aegean Sea. *Geo-Marine Letters*, 35(2), 77-89. doi:10.1007/s00367-014-0393-z

Megalovasilis, P., 2014. Partition geochemistry of hydrothermal precipitates from submarine hydrothermal fields in the Hellenic Volcanic Island Arc. *Geochemistry International*, 52 (11), pp. 992-1010.

Milano, G., Passaro, S. & Sprovieri, M. 2012, "Present-day knowledge on the Palinuro Seamount (south-eastern Tyrrhenian Sea)", *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 53, no. 4, pp. 403-416.

Minniti, M. & Bonavia, F.F. 1984, "Copper-ore grade hydrothermal mineralization discovered in a seamount in the Tyrrhenian Sea (Mediterranean): Is the mineralization related to porphyry-coppers or to base metal lodes?", *Marine Geology*, vol. 59, no. 1-4, pp. 271-282.

Minniti, M., Bonavia, F.F., Dacquino, C. & Raspa, G. 1986, "Distribution of Mn, Fe, Ni, Co and Cu in young sediments on the Palinuro Seamount in the southeast Tyrrhenian Sea (Mediterranean).", *Marine Mining*, vol. 5, no. 3, pp. 277-305.

Mirasole A, Gillanders BM, 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. *Marine Biology* 164:1–15 DOI 10.1007/s00227-016-3030-8.

Mirasole A, Scopelliti G, Tramati C, Signa G, Mazzola A, Vizzini S. (2021). Evidences on alterations in skeleton composition and mineralization in a site-attached fish under naturally acidified conditions in a shallow CO₂ vent *Sci Total Environ*. Mar 20;761:143309. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143309.

Mirasole, A., Signa, G., Gianguzza, P., Bonaviri, C., Mazzola, A., Vizzini, S., (2020). Fish assemblages cope with ocean acidification in a shallow volcanic CO₂ vent benefiting from an adjacent recovery area. *Mar. Environ. Res.* 157, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104851>.

Mitrousis, A. (2009). New underwater volcanic formations west of Santorini island. Paper presented at the 9th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO - Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2009, , 2 257-264.

Monna, S., Falcone, G., Beranzoli, L., Chierici, F., Cianchini, G., De Caro, M., . . . Favali, P. (2014). Underwater geophysical monitoring for European multidisciplinary seafloor and water column observatories. *Journal of Marine Systems*, 130, 12-30. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.09.010

Morri, C., Bianchi, C.N., Cocito, S., Peirano, A., De Biase, A.M., Aliani, S., Pansini, M., Boyer, M., Ferdeghini, F., Pestarino, M., Dando, P., 1999. Biodiversity of marine sessile epifauna at an Aegean island subject to hydrothermal activity: Milos, eastern Mediterranean Sea. *Marine Biology*, 135 (4), pp. 729-739.

Muhari, A., Heidarzadeh, M., Nugroho, H.D., Kriswati, E., Supartoyo, Wijanarto, A.B., Afriyanto, B., Imamura, F., Arikawa, T., 2019. The December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami as inferred from post-tsunami field surveys and spectral analysis. *Pure Appl. Geophys.* 176, 5219–5233. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02358-2>.

Nomikou, P., Hübscher, C., & Carey, S. (2019). The Christiana–Santorini–Kolumbo volcanic field. *Elements*, 15(3), 171-176. doi:10.2138/gselements.15.3.171



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Nomikou, P., Parks, M. M., Papanikolaou, D., Pyle, D. M., Mather, T. A., Carey, S., . . . Perros, I. (2014). The emergence and growth of a submarine volcano: The kameni islands, santorini (greece). *GeoResJ*, 1-2, 8-18. doi:10.1016/j.grj.2014.02.002

Norris PR, Davis-Belmar CS, Calvo-Bado LA, Ogden TJ. (2020). Salt-tolerant Acidihalobacter and Acidithiobacillus species from Vulcano (Italy) and Milos (Greece). *Extremophiles*. Jul;24(4):593-602. doi: 10.1007/s00792-020-01178-w. Epub 2020 May 25.

Paoletti V., Passaro S., Fedi M., Marino C., Tamburrino S., Ventura G., 2016. Sub-circular conduits and dikes offshore the Somma-Vesuvius volcano revealed by magnetic and seismic data. *Geophysical Research Letters*, 43(18), 9544-9551.

Passaro S., Genovese S., Sacchi M., Barra M., Rumolo P., Tamburrino S., Mazzola S., Basilone G., Placenti F., Aronica S., Bonanno A., 2014. First hydroacoustic evidences of marine, active fluid discharges in the Naples Bay (southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285, 29–35.

Passaro S., Tamburrino S., Vallefuoco M., Tassi F., Vaselli O., Giannini L., Chiodini G., Caliro S., Sacchi M., Luca Rizzo A., Ventura G, 2016. Seafloor doming driven by degassing processes unveils sprouting volcanism in coastal areas. *Scientific Reports* 6, 22448; doi: 10.1038/srep22448.

Passaro, S., Milano, G., D'Isanto, C., Ruggieri, S., Tonielli, R., Bruno, P.P., Sprovieri, M., Marsella, E., 2010. DTM-based morphometry of the Palinuro seamount (Eastern Tyrrhenian Sea): geomorphological and volcanological implications. *Geomorphology* 115, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.041>.

Passaro, S., Milano, G., Sprovieri, M., Ruggieri, S., Marsella, E., 2011b. Quaternary still-stand landforms and relations with flank instability events of the Palinuro Bank (southeastern Tyrrhenian Sea). *Quat. Int.* 232, 228–237.

Pensa, A., Pinton, A., Vita, L., Bonamico, A., De Benedetti, A.A., Giordano, G., 2019. ATLAS of Italian submarine volcanic structures. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* 104, 77–183.

Peters, M., Strauss, H., Petersen, S., Kummer, N.- & Thomazo, C. 2011, "Hydrothermalism in the Tyrrhenian Sea: Inorganic and microbial sulfur cycling as revealed by geochemical and multiple sulfur isotope data", *Chemical Geology*, vol. 280, no. 1-2, pp. 217-231.

Petersen, S., Monecke, T., Westhues, A., Hannington, M.D., Gemmell, J.B., Sharpe, R., Peters, M., Strauss, H., Lackschewitz, K., Augustin, N., Gibson, H. & Kleeberg, R. 2014, "Drilling shallow-water massive sulfides at the Palinuro volcanic complex, Aeolian Island arc, Italy", *Economic Geology*, vol. 109, no. 8, pp. 2129-2157.

Placido A., Hai T., Ferrer M., Chernikova NT., Distaso M., Armstrong D., Yakunin FA., Toshchakov SV., Yakimov MM., Kublanov IV., Golyshina OV., Pesole G., Ceci LR., Golyshin PN. (2015). Diversity of hydrolases from hydrothermal vent sediments of the Levante Bay, Vulcano Island (Aeolian archipelago) identified by activity-based metagenomics and biochemical characterization of new esterases and an arabinopyranosidase *Appl Microbiol Biotechnol* 99:10031–10046 DOI 10.1007/s00253-015-6873-x.

Price, R.E., Savov, I., Planer-Friedrich, B., Bühring, S.I., Amend, J., Pichler, T., 2013. Processes influencing extreme as enrichment in shallow-sea hydrothermal fluids of milos island, Greece. *Chemical Geology*, 348, pp. 15-26.

Putra, P.S., Aswan, A., Maryunani, K.A., Yulianto, E., Nugroho, S.H., Setiawan, V., 2020. Postevent field survey of the 22 December 2018 Anak Krakatau Tsunami. *Pure Appl. Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02446-8>.



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Rizzo, A. L., Caracausi, A., Chavagnac, V., Nomikou, P., Polymenakou, P. N., Mandalakis, M., . . . Sonke, J. E. (2019). Geochemistry of CO₂-rich gases venting from submarine volcanism: The case of Kolumbo (Hellenic volcanic arc, Greece). *Frontiers in Earth Science*, 7 doi:10.3389/feart.2019.00060

Robinson, C., Ziebis, W., Muller, S., Eichstaedt, K., Dando, P., Linke, P., Varnavas, S., Megalovasilis, P., Panagiotaras, D., 1997. In situ investigations of shallow water hydrothermal vent systems, Palaeochori Bay, Milos, Aegean Sea. (1997) 4th Underwater Science Symposium: Proceedings, USS 1997, pp. 85-100.

Safipour, R., Hölz, S., Halbach, J., Jegen, M., Petersen, S. & Swidinsky, A. 2017, "A self-potential investigation of submarine massive sulfides: Palinuro Seamount, Tyrrhenian Sea", *Geophysics*, vol. 82, no. 6, pp. A51-A56.

Savelli, C. (1992). The rifting of the Marsili volcano, Tyrrhenian sea: Morphotectonic features observed on board the submersible "MIR 2". [Il rifting del vulcano Marsili (Mar Tirreno): aspetti morfo-tettonici osservati da bordo del sottomarino "MIR 2"] *Giornale Di Geologia*, 54(2), 215-227.

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.

Soloviev, S.L., Kuzin, I.P., Kovachev, S.A., Ferri, M., Guerra, I., Luongo, G., 1990. Microearthquakes in the Tyrrhenian Sea as revealed by joint land and sea-bottom seismographs. *Mar. Geol.* 94, 131-146.

Sorokin YI, Sorokin PY, Zakuskina OY. (1998). Microplankton and its functional activity in zones of shallow hydrotherms in the western Pacific. *Journal of Plankton Research* 20(6):1015-1031 DOI 10.1093/plankt/20.6.1015.

Spagnoli, F., Andaloro, F., Canese, S., Capaccioni, B., and Iassunto, R. A. (2020). 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. 105, 85-90.

Stuben, D. 1994, "Cruise report Poseidon 200-4 MIPAMEHR-MAST 1 - investigations on hydrothermalism in the Tyrrhenian and Aeolian Sea", *Berichte - Geologisch-Palaontologisches Institut und Museum, Christian-Albrechts Universität, Kiel*, vol. 69.

Stüben, D., Glasby, G.P., 1999. Geochemistry of shallow submarine hydrothermal fluids from Paleochori Bay, Milos, Aegean Sea. *Exploration and Mining Geology*, 8 (3-4), pp. 273-287.

Stüben, D., Sedwick, P. & Colantoni, P. 1996, "Geochemistry of submarine warm springs in the limestone cavern of Grotta Azzurra, Capo Palinuro, Italy: Evidence for mixing-zone dolomitisation", *Chemical Geology*, vol. 131, no. 1-4, pp. 113-125.

Suleiman M, Schröder C, Klippel B, Schäfers C, Krüger A, Antranikian G. (2019). Extremely thermoactive archaeal endoglucanase from a shallow marine hydrothermal vent from Vulcano Island *Appl Microbiol Biotechnol*. Feb;103(3):1267-1274. doi: 10.1007/s00253-018-9542-z. Epub 2018 Dec 13

Szitkar, F., Petersen, S., Caratori Tontini, F. & Cocchi, L. 2015, "High-resolution magnetics reveal the deep structure of a volcanic-arc-related basalt-hosted hydrothermal site (Palinuro, Tyrrhenian sea)", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 16, no. 6, pp. 1950-1961.

Taviani, M. 2014, "Marine chemosynthesis in the Mediterranean Sea" in *The Mediterranean Sea: Its History and Present Challenges*, pp. 69-83.



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero per la Coesione Territoriale

Thiermann, F., Akoumianaki, I., Hughes, J.A., Giere, O., 1997. Benthic fauna of a shallow-water gaseohydrothermal vent area in the Aegean Sea (Milos, Greece). *Marine Biology*, 128 (1), pp. 149-159.

Thiermann, F., Windoffer, R., and Giere, O. (1995). Selected meiofauna around shallow water hydrothermal vents off Milos (Greece): ecological and ultrastructural aspects. *Oceanogr. Lit. Rev.* 9:773.

Thouret, J.C., 2010. Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective. In: Goudie, e.I.A.-A.a.A.S. (Ed.), *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press, pp. 13–32.

Tinti, S., Bortolucci, E., Vannini, C., 1997. A block-based theoretical model suited to gravitational sliding. *Nat. Hazards* 16, 1–28.

Tinti, S., Chiocci, F.L., Zaniboni, F., Pagnoni, G., de Alteriis, G., 2011. Numerical simulation of the tsunami generated by a past catastrophic landslide on the volcanic island of Ischia, Italy. *Mar. Geophys. Res.* 32, 287–297.
<https://doi.org/10.1007/s11001-010-9109-6>.

Ugur, A., Miquel, J.-C., Fowler, S.W., Appleby, P., 2003. Radiometric dating of sediment cores from a hydrothermal vent zone off Milos Island in the Aegean Sea. *Science of the Total Environment*, 307 (1-3), pp. 203-214.

Varnavas, S. P., & Cronan, D. S. (1988). Arsenic, antimony and bismuth in sediments and waters from the santorini hydrothermal field, greece. *Chemical Geology*, 67(3-4), 295-305. doi:10.1016/0009-2541(88)90135-0

Varnavas, S. P., & Cronan, D. S. (2005). Submarine hydrothermal activity off santorini and milos in the central hellenic volcanic arc: A synthesis. *Chemical Geology*, 224(1-3), 40-54. doi:10.1016/j.chemgeo.2005.07.013

Ventura G , Milano G., Passaro S., Sprovieri M, 2013. The Marsili ridge (Southern Tyrrhenian Sea, Italy): An island-arc volcanic complex emplaced on a 'relict' back-arc basin. *Earth Science Reviews*, 116 (1), 85-94.

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., Martinez-Crego B., Andolina C., Massagallucci 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.

Voight, B., Elsworth, D., 1997. Failure of volcano slopes. *Geotechnique* 47, 1–31.

Voudouris, P., Kati, M., Magganas, A., Keith, M., Valsami-Jones, E., Haase, K., Klemd, R., Nestmeyer, M., 2021. Arsenian pyrite and cinnabar from active submarine nearshore vents, paleochori bay, Milos Island, Greece. *Minerals*, 11 (1), art. no. 14, pp. 1-25.

World Mineral Deposits Database (Geological Survey of Canada, 2014) - <http://geoscan.nrcan.gc.ca>

Yücel, M., Sievert, S.M., Vetriani, C., Foustoukos, D.I., Giovannelli, D., Le Bris, N., 2013. Eco-geochemical dynamics of a shallow-water hydrothermal vent system at Milos Island, Aegean Sea (Eastern Mediterranean). *Chemical Geology*, 356, pp. 11-20.

Zeppilli, D., and Danovaro, R. (2009). Meiofaunal diversity and assemblage structure in a shallow-water hydrothermal vent in the Pacific Ocean. *Aquat. Biol.* 5, 75–84. doi: 10.3354/ab00140.



UNIONE EUROPEA

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministro per la Coesione Territoriale

Zeppilli, D., Leduc, D., Fontanier, C., Fontaneto, D., Fuchs, S., Gooday, A. J., et al. (2018). Characteristics of meiofauna in extreme marine ecosystems: a review. *Mar. Biodivers.* 48, 35–71. doi: 10.1007/s12526-017-0815-z

Zimmermann, J., Lott, C., Weber, M., Ramette, A., Bright, M., Dubilier, N., & Petersen, J. M. (2014). Dual symbiosis with co-occurring sulfur-oxidizing symbionts in vestimentiferan tubeworms from a mediterranean hydrothermal vent. *Environmental Microbiology*, 16(12), 3638-3656. doi:10.1111/1462-2920.12427

Zouzias, D., & Seymour, K. S. (2008). Consanguineous geochemistry of the kos plateau and tilos D and E pumices, aegean volcanic arc, hellas. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie, Abhandlungen*, 184(3), 231-241. doi:10.1127/0077-7757/2008/0093

Web References

<https://www.cambridgeconservation.org/out-of-our-depth-the-dangers-of-deep-sea-mining/>

<http://www.savethehighseas.org/>

<http://www.savethehighseas.org/about-us/>

<https://www.plymouth.ac.uk/research/marine-biology-and-ecology-research-centre/deep-sea-conservation-research>

<https://www.isa.org.im/files/files/documents/compstudy-nld.pdf>

<http://www.blueplanetheart.it/2018/02/geologia-sismicita-dellarco-ellenico-della-grecia-centrale/>

<https://isa.org.im/>