

ANALISI DI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO DELL'ISOLA DI PANAREA (ISOLE EOLIE) ESTRATTI CON DIFFERENTI METODOLOGIE

Massimo FABRIS (*), Marco ANZIDEI (**), Paolo BALDI (***)

(*) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – DAUR – Università di Padova, e-mail: massimo.fabris@unipd.it

(**) INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, e-mail: anzidei@ingv.it

(***) Dipartimento di Fisica – Settore Geofisica, Università di Bologna, e-mail: p.baldi@unibo.it

Riassunto

Le metodologie di rilievo come la fotogrammetria digitale aerea, il *laser scanning* aereo e rilievi batimetrici RTK *multibeam* possono essere integrate per ottenere la ricostruzione morfologica dettagliata di aree interessate da fenomeni geofisici, sia per le porzioni sub-aeree che per quelle sottomarine. Una problematica importante è costituita dalla difficoltà di rilevare adeguatamente le aree in prossimità della linea di costa a causa dei limiti tecnici per effettuare acquisizioni batimetriche in acque basse: in questo modo vengono quindi generate lacune di dati nel passaggio tra zone sub-aeree e sottomarine. In questo lavoro vengono analizzati ed integrati tre rilievi aerofotogrammetrici (effettuati nel 1987 e 2003), due rilievi batimetrici RTK *multibeam* (realizzati nel 2002-2004) e un rilievo LIDAR (effettuato nel 2004) dell'isola di Panarea (Arcipelago delle isole Eolie), che nel novembre 2002 è stata interessata da una rilevante emissione gassosa sottomarina localizzata tra gli isolotti di Dattilo, Panarelli, Lisca Nera, Bottaro e Lisca Bianca; per questo motivo si è resa necessaria una dettagliata mappatura delle strutture sottomarine, in un quadro morfologico generale.

Abstract

The ground survey techniques as aerial digital photogrammetry, aerial laser scanning and multibeam bathymetry, can be integrated for a detailed morphological reconstruction of sub-aerial and contiguous submarine area involved in geophysical phenomena. Besides, the submarine portions along the coastline often are not adequately surveyed due to the difficulties to perform bathymetric acquisition in low depth water, producing lack of data in the digital model on the zones between sub-aerial and submarine portions. In this work, three aerial photogrammetric surveys (performed from 1987 to 2003), two multibeam bathymetry (performed on 2002-2004) and a LIDAR survey (performed on 2004) of the Panarea island (Archipelago of Aeolian islands), have been analyzed and integrated. This area, during the Etna and Stromboli volcanos eruptions of November 2002, underwent to a relevant submarine gas emission. Vents were located between the islets of Dattilo, Panarelli, Lisca Nera, Bottaro and Lisca Bianca in high fractured area which may deserve an accurate study for the hazard reduction.

Introduzione

I modelli digitali del terreno (DTM – *Digital Terrain Model*) ad alta risoluzione, che possono essere estratti con differenti metodologie, costituiscono una notevole forma di monitoraggio di aree soggette a deformazioni superficiali: frane, eruzioni vulcaniche, evoluzione di ghiacciai. L'analisi delle variazioni plano-altimetriche costituisce uno strumento che può risultare estremamente utile nella gestione dei fenomeni naturali (van Westen, Lulie Getahun, 2003; Baldi et al., 2005; Baldi et al., 2008). L'integrazione di dati ottenuti da differenti metodologie richiede che tutti i *dataset* siano

georiferiti in uno stesso sistema di riferimento. Per questo motivo è necessario utilizzare punti di riferimento comuni alle serie di dati, oppure ricorrere ad approcci basati sull'adattamento ai minimi quadrati delle superfici (*matching*). Inoltre, l'integrazione di dati sub-aerei (che spesso descrivono le linee di costa e quindi il livello zero dei mari) e rilievi batimetrici, può portare alla generazione di lacune in corrispondenza di fasce costiere sottomarine più o meno ampie a causa della difficoltà dell'acquisizione di dati in queste zone. In questo lavoro vengono integrati e confrontati tre rilievi aero-fotogrammetrici acquisiti nel 1987 e 2003, un rilievo LIDAR effettuato nel 2004 e due rilievi batimetrici RTK *multibeam* realizzati nel 2002-2004 relativi all'isola di Panarea (Arcipelago delle isole Eolie) (Romano, 1973), e alla porzione sottomarina in prossimità di alcuni degli isolotti di Dattilo, Panarelli, Lisca Nera, Bottaro, Lisca Bianca e Basiluzzo (figura 1); lo scopo è quello di fornire uno strumento di grande utilità per la descrizione morfologica completa dell'area che nel novembre 2002, in concomitanza con le eruzioni dei vulcani Etna e Stromboli, è stata interessata da una rilevante emissione gassosa associata ad un intenso campo di fratturazione, localizzata in un'area di circa 2.3 km² tra gli isolotti sopra citati (Anzidei et al., 2005; Esposito et al., 2006). L'area analizzata è caratterizzata da meccanismi geodinamici complessi provocati da fenomeni di sismicità attiva, effetti di deformazioni crostali e presenza di vulcani attivi (Lipari, Vulcano e Stromboli); l'isola di Panarea rappresenta la porzione emersa di un grande apparato sottomarino, che si eleva dal fondale del Mar Tirreno per circa 1500 m con un diametro di circa 18 km (Gabbianelli et al., 1990; Gabbianelli et al., 1993; Calanchi et al., 1995; Favalli et al., 2006).

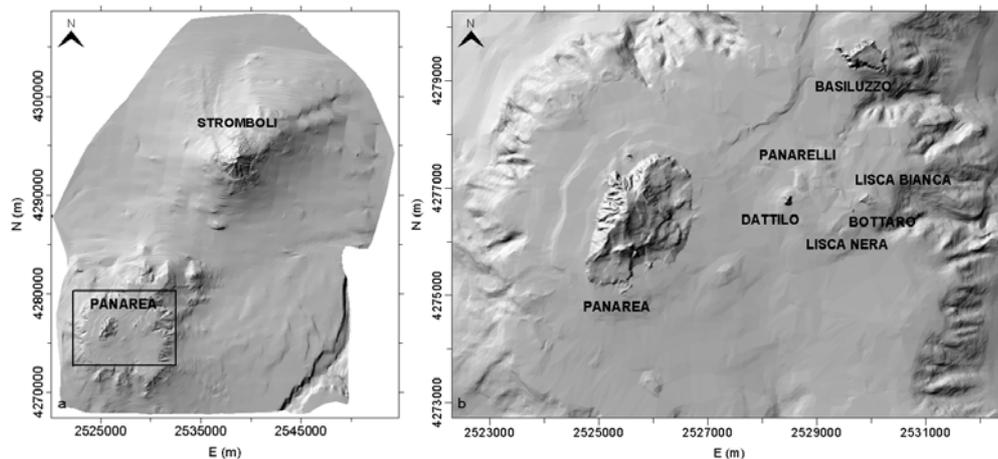


Figura 1 – a) Rappresentazione in shaded relief dei dati batimetrici e sub-aerei acquisiti nel 2002-2004 relativi alle isole di Stromboli e Panarea; b) Particolare dei dati nell'area dell'arcipelago di Panarea

Generazione del modello digitale sub-aereo

Il modello digitale dell'isola di Panarea è stato estratto da un rilievo aero-fotogrammetrico effettuato il 26 maggio 2003. Complessivamente sono state utilizzate 3 diapositive a colori in scala 1:13000, rasterizzate mediante lo scanner fotogrammetrico *Wehrli Raster Master RM2* con una risoluzione di 24 µm (1016 dpi). Prima del volo sono stati posizionati opportuni segnali le cui coordinate sono state misurate con la metodologia GPS rispetto alle stazioni semi-permanenti presenti sull'isola. Questi segnali sono stati utilizzati come punti fotografici d'appoggio (GCP – *Ground Control Points*) per effettuare l'orientamento esterno delle immagini in modo rigoroso utilizzando il software *Socet Set*© v. 5.3. Successivamente, il DTM è stato estratto automaticamente nel sistema di riferimento UTM-WGS84 con griglia di passo 2.5 m su tutta l'area. Il modello digitale degli isolotti circostanti è stato invece generato da un secondo rilievo aero-fotogrammetrico effettuato il 17 maggio 2003 in scala media del fotogramma 1:20000. L'orientamento di questo nuovo rilievo è stato ottenuto per mezzo di alcuni GCP posizionati sugli isolotti e misurati con la metodologia GPS nello stesso sistema di riferimento dei precedenti (UTM-WGS84): a questi sono stati aggiunti alcuni punti naturali situati sull'isola di Panarea e le cui coordinate sono state misurate sul modello del 26 maggio 2003, orientato in modo rigoroso. Il DTM degli isolotti è stato estratto sempre con griglia di passo 2.5 m. Il modello ottenuto automaticamente ha richiesto l'intervento manuale di *editing* nelle zone di scarsa correlazione, nelle zone urbane e boschive, mediante

l'adattamento delle curve di livello alla reale morfologia del terreno. Per controllare l'efficienza e la capacità delle operazioni di editing manuale di ottenere prodotti morfologicamente corretti, soprattutto in corrispondenza delle aree caratterizzate da versanti ripidi, è stato utilizzato un rilievo LIDAR effettuato nel 2004 su tutta l'isola. I dati *laser scanning* disponibili sono caratterizzati da una distribuzione su griglia regolare con passo di 0.5 m. Dal confronto diretto delle quote risulta che la georeferenziazione in uno stesso sistema di riferimento, seppur ottenuta posizionando l'aeromobile con la metodologia GPS e facendo riferimento alle stesse stazioni semi-permanenti presenti sull'isola, non risulta ottimale (Anzidei et al., 2007). Per migliorarla, è stato effettuato un allineamento dei due *dataset* (escludendo le aree con presenza di vegetazione ed edifici del modello LIDAR e quelle a nord-ovest dell'isola che presentano pendenze molto pronunciate) utilizzando il software *Polyworks*®. Il confronto diretto tra i due modelli, prima dell'allineamento e non considerando le aree con presenza di edifici, alberi e versanti ripidi a nord-ovest dell'isola, presenta un valore medio delle differenze di -0.33 m e deviazione standard di 0.68 m. I nuovi residui, ottenuti dopo l'allineamento, hanno fornito valori di media e deviazione standard di -0.05 m e 0.57 m rispettivamente (figura 2).

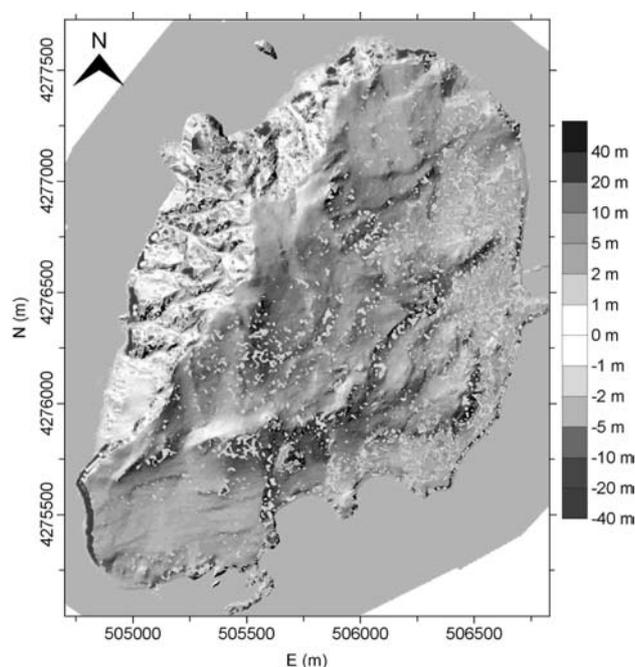


Figura 2 – Confronto tra il DTM ottenuto dal rilievo LIDAR e quello ottenuto dal rilievo aerofotogrammetrico dopo la georeferenziazione raffinata

Le differenze positive, presenti soprattutto nella zona edificata (ad est), sono relative al fatto che i punti del rilievo LIDAR modellano alberi ed edifici. Le differenze negative presenti nella zona a nord-ovest sono dovute alla maggiore capacità del rilievo LIDAR di descrivere dettagliatamente la morfologia del terreno rispetto al DTM fotogrammetrico. Infatti, non solo i dati di *laser scanning* presentano un passo di griglia ridotto rispetto ai dati fotogrammetrici (0.5 m contro 2.5 m) ma anche le condizioni geometriche di acquisizione del LIDAR risultano, in questo caso, più efficienti rispetto a quelle fotogrammetriche.

Le operazioni di *editing* manuale per la correzione del DTM fotogrammetrico permettono di migliorare il prodotto estratto automaticamente ma sono comunque vincolate alla visualizzazione stereoscopica del modello (e quindi alle condizioni di presa). Il prodotto finale è stato quindi ottenuto integrando i due modelli, utilizzando i dati LIDAR nelle zone a nord-ovest (versanti ripidi) e i dati fotogrammetrici nelle altre aree.

Generazione del modello batimetrico ed integrazione con quello sub-aereo

Il rilievo batimetrico RTK *multibeam* ad alta risoluzione è stato effettuato nel dicembre 2002 coprendo un'area di circa 9 km² attorno agli isolotti localizzati ad est dell'isola di Panarea e producendo un DTM con griglia di passo 0.5 m. L'obiettivo era quello di descrivere dettagliatamente la morfologia dell'area interessata dalle emissioni gassose (Calanchi et al., 1995), che hanno subito un incremento a partire dal mese di novembre 2002 e localizzare i centri delle emissioni stesse: dall'analisi dei dati ottenuti è stato possibile evidenziare degli allineamenti preferenziali dei centri in direzione NE-SW e NW-SE (Anzidei et al., 2005). Durante il rilievo batimetrico, la posizione dei punti è stata determinata mediante una stazione GPS operante in modalità RTK, facendo riferimento alle stesse stazioni semi-permanenti dell'isola utilizzate per la misura dei GCP dei rilievi aerofotogrammetrici, ottenendo quindi la georeferenziazione in uno

stesso sistema con il rilievo delle parti sub-aeree. Il rilievo batimetrico non copre le aree a piccola profondità lasciando quindi scoperta una fascia in corrispondenza alla linea di costa; i dati disponibili hanno raggiunto profondità minime di circa 2 m. Per migliorare il risultato è stato quindi recuperato un rilievo aero-fotogrammetrico effettuato nel 1987 (diapositive a colori) sulle cui immagini erano visibili porzioni sottomarine (grazie alla limpidezza del mare). Questo rilievo è stato orientato misurando in stereoscopia alcuni punti naturali, ben visibili e localizzati in aree stabili sul primo modello del 2003, ed utilizzati come GCP per l'orientamento delle immagini. Ottenuto il modello in stereoscopia, sono stati estratti automaticamente, e successivamente editati, alcuni DTM delle porzioni sottomarine visibili sulle immagini, con griglia di passo 1 m. In questo modo è stato possibile ottenere DTM di aree rilevate sia mediante la fotogrammetria aerea "sottomarina" che con il rilievo batimetrico. Naturalmente, a causa del passaggio del raggio ottico tra due mezzi (aria acqua), il modello batimetrico ottenuto dalla fotogrammetria risulta differire per un fattore di scala da quello RTK *multibeam*, con una conseguente distorsione del modello geometrico a causa della rifrazione (Anzidei et al., 2007). Dopo aver effettuato la correzione, integrando i DTM e la batimetria con i dati relativi a fasce poco profonde in vicinanza degli isolotti di Panarelli, Dattilo e Lisca Nera che, a causa delle condizioni geometriche di acquisizione, non erano state rilevate con le misure batimetriche, è stato ottenuto il modello 3D ad alta risoluzione dell'area interessata dalle emissioni gassose. Allo scopo di ottenere la descrizione completa della morfologia sub-aerea e sottomarina delle porzioni circostanti l'isola di Panarea e, nel contempo, riempire le lacune di dati presenti nel rilievo batimetrico RTK *multibeam* ad alta risoluzione, è stato utilizzato un rilievo batimetrico effettuato nel 2004 e disponibile con griglia regolare di passo 10 m nel sistema cartografico Gauss-Boaga. I dati sono stati quindi trasformati nel sistema UTM-WGS84 ed integrati con quelli ad alta risoluzione, interpolando piccole fasce nelle zone di passaggio tra i due *dataset* (figura 3). Dalla figura 3 si nota come i dati batimetrici a scarsa risoluzione siano caratterizzati anche da scarsa precisione: dal confronto tra la figura 1 e la figura 3 risulta che i dati batimetrici RTK *multibeam* ad alta risoluzione nell'area tra gli isolotti di Dattilo, Panarelli, Lisca Nera, Bottaro e Lisca Bianca permettono una descrizione morfologica dettagliata, fondamentale per la localizzazione dei centri delle emissioni gassose.

Interpretazioni morfologiche

L'integrazione dei DTM permette di osservare la complessa morfologia dell'area, in particolare quella del settore compreso tra gli isolotti minori. Questi costituiscono i resti di un complesso di domi parzialmente emersi (Romano, 1973; Gabbianelli et al., 1990; Calanchi et al., 1999; Calanchi et al., 2002; Lucchi et al., 2007; Esposito et al., 2006), il cui fondale mostra strutture lineari e sub-circolari. In particolare nel settore nord-occidentale esistono tre rilevanti strutture longitudinali, lunghe oltre un Km (figura 3): la struttura A, orientata NE-SW, con una parete verticale alta 10-20 m; la struttura B, rettilinea, lunga circa 600 m in direzione NNE-SSW; la struttura C, diretta E-W, che corrisponde ad una scarpata verticale alta circa 10 m, che delimita verso Nord una depressione ellittica orientata N-S. Tutte convergono verso il settore NE di Panarea, in direzione della Calcara (1, figura 3), area interessata da un idrotermalismo attivo. Il settore sud-occidentale presenta invece alcune depressioni con forme da ellittica a circolare, del diametro fino ad alcune decine di metri. L'area delimitata dagli isolotti, è ascrivibile ad un alto strutturale che taglia l'edificio vulcanico a circa 130 m di profondità (Chiocci, Romagnoli, 2004). Questa presenta 5 unità morfologiche principali, orientate NE-SW e NW-SE (Esposito et al., 2006). Dove il fondale è coperto da sedimenti, coesistono centinaia di forme depresse da circolari a ferro di cavallo, grandi da pochi decimetri fino ad alcune decine di metri, simili a quelle che si sono formate in corrispondenza dei principali centri esalativi nel dicembre 2002 (2, figura 3, Esposito et al., 2006). Nei settori dove affiorano le lave dacitiche-andesitiche, si individuano strutture circolari profonde anche alcuni metri, riconducibili a condotti di eruzioni gassose (*gas pipes*) come si osservano in altre aree vulcaniche emerse e

sommerse (Hawaii) (Cas, Wright, 1987). I dati analizzati suggeriscono che il fondale racchiuso tra gli isolotti è stato interessato nel passato da manifestazioni freatiche simili, ma anche di maggiore energia di quelle del 2002.

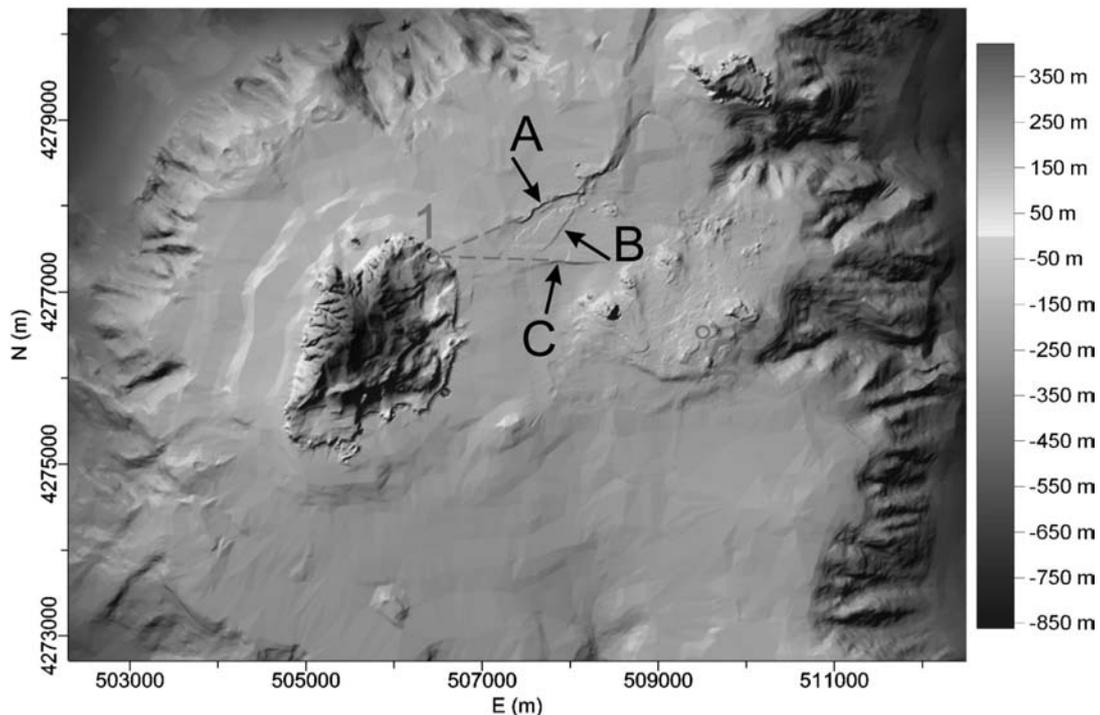


Figura 3 – Integrazione dei due rilievi batimetrici e dei tre fotogrammetrici con la batimetria ottenuta dalla fotogrammetria per le aree circostanti l'isola di Panarea. Localizzazione delle strutture A, B, C, della Calcara (1) e del principale centro di emissione gassosa sottomarina che si è formato durante la crisi del 2002-2003 (2)

Lo stato di fratturazione, l'alterazione idrotermale e la mineralizzazione delle lave del *bedrock* del fondale, così come la presenza delle centinaia di strutture crateriche distribuite sul fondale, indicano che il sistema geotermico-idrotermale è presente da lungo tempo e tuttora attivo.

Conclusioni

Nel lavoro sono stati integrati dati relativi al rilievo dell'isola di Panarea e degli isolotti Dattilo, Panarelli, Lisca Nera, Bottaro, Lisca Bianca e Basiluzzo (Arcipelago delle isole Eolie) acquisiti mediante differenti metodologie. Il DTM ottenuto dal rilievo LIDAR dell'isola di Panarea è stato confrontato con il DTM fotogrammetrico prima e dopo l'applicazione di una procedura di georeferenziazione in uno stesso sistema di riferimento dei due *dataset*. E' stato possibile quindi evidenziare piccoli errori di georeferenziazione tra i due modelli e riportare il rilievo LIDAR nello stesso sistema dei dati fotogrammetrici e batimetrici. La mappa dei residui finale ha fornito differenze più consistenti nelle zone nord-ovest dell'isola dove, a causa della presenza di versanti con pendenze molto elevate, la fotogrammetria digitale aerea ha prodotto dati poco rappresentativi della reale morfologia; il rilievo LIDAR invece, effettuato con opportune condizioni geometriche di acquisizione, è risultato più efficiente. Dove non sono presenti queste problematiche, il confronto con i dati LIDAR ha permesso di verificare l'efficienza delle operazioni di *editing* manuale per la correzione dei DTM fotogrammetrici automatici. Dal rilievo aero-fotogrammetrico effettuato nel 1987 è stato possibile estrarre ed editare anche un DTM di limitate porzioni sottomarine (a profondità massime di 5÷6 m sotto il livello del mare) grazie alla limpidezza dell'acqua, ed ottenere un modello anche nell'area di passaggio tra la parte sottomarina e quella sub-aerea: i dati prodotti sono stati confrontati con il rilievo batimetrico delle porzioni comuni e corretti per tener conto degli effetti di rifrazione. Questo, assieme ad un rilievo batimetrico effettuato nel 2002-2004, ha

permesso di completare il modello digitale dell'area, ottenendo una descrizione morfologica dettagliata sia delle porzioni emerse che sottomarine in aree di grande interesse per la presenza di rilevanti emissioni gassose; infatti i dati ottenuti sono indispensabili per contribuire alla comprensione dei meccanismi fisici connessi all'attività vulcanica, attraverso un monitoraggio sistematico con tecniche geodetiche batimetriche, fotogrammetriche e GPS, di supporto alle analisi strutturali e vulcanologiche, in particolare per scopi di protezione civile.

Rigraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il sig. Giovanni Bortoluzzi del CNR-ISMAR che ha messo a disposizione parte dei dati batimetrici.

Bibliografia

- Anzidei M., Esposito A., Bortoluzzi G., De Giosa F. (2005), "The high resolution bathymetric map of the exhalative area of Panarea (Aeolian Islands, Italy)", *Annals of Geophysics*, 48, 6: 899-921
- Anzidei M., Baldi P., Fabris M. (2007), "Integrazione di dati fotogrammetrici, LIDAR e batimetrici nell'Arcipelago delle isole Eolie", *Bollettino della SIFET*, 1: 13-26
- Baldi P., Fabris M., Marsella M., Monticelli R. (2005), "Monitoring the morphological evolution of the Sciara del Fuoco during the 2002-2003 Stromboli eruption using multi-temporal photogrammetry", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59: 199-211
- Baldi P., Coltelli M., Fabris M., Marsella M., Tommasi P. (2008), "High precision photogrammetry for monitoring the evolution of the NW flank of Stromboli volcano during and after the 2002-2003 eruption" *Bull. of Volc.*, 70: 703-715
- Calanchi N., Capaccioni B., Martini M., Tassi F., Valentini L. (1995), "Submarine gas-emission from Panarea Island Aeolian Archipelago: distribution of inorganic and organic compounds and inferences about source conditions", *Acta Vulcanologica*, 7, 1: 43-48
- Calanchi N., Tranne C. A., Lucchi F., Rossi P. L., Villa I. M. (1999), "Explanatory notes to the geological map 1:10.000 of Panarea and Basiluzzo islands Aeolian arc. Italy", *Acta Vulcanologica*, 11, 2: 223-243
- Calanchi N., Peccerillo A., Tranne C. A., Lucchini F., Rossi P. L., Kempton P., Barbieri M., Wu T. W. (2002), "Petrology and geochemistry of volcanic rocks from the island of Panarea: implications for mantle evolution beneath the Aeolian island arc (southern Tyrrhenian sea)", *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 115: 367-395
- Cas R. A. F., Wright J. V. (1987), "Volcanic Succession", *Allen & Unwin*, London
- Chiocci F. L., Romagnoli C. (2004), "Terrazzi deposizionali sommersi nelle Isole Eolie", *Mem Descr Carta Geol It*, 58: 81-114
- Esposito A., Giordano G., Anzidei M. (2006), "The 2002-2003 submarine gas eruption at Panarea volcano (Aeolian islands, Italy): volcanology of the seafloor and implication for the hazard scenario", *Marine Geology*, 227: 119-134
- Favalli M., Kartson D., Mazzuoli R., Pareschi M. T., Ventura G. (2006), "Volcanic geomorphology and tectonics of the Aeolian archipelago (Southern Italy) based on integrated DEM data", *Bulletin of Volcanology*, 68: 157-170
- Gabbianelli G., Gillot P. Y., Lanzafame G., Romagnoli C., Rossi P. L. (1990), "Tectonic and volcanic evolution of Panarea (Aeolian Island, Italy)", *Marine Geology*, 92: 312-326
- Gabbianelli G., Romagnoli C., Rossi P. L., Calanchi N. (1993), "Marine Geology of Panarea-Stromboli area, Aeolian Archipelago, Southeastern Tyrrhenian Sea", *Acta Vulcanologica*, 3: 11-20
- Lucchi F., Tranne C.A., Calanchi N. and Rossi P.L. 2007., Late Quaternary deformation history of the volcanic edifice of Panarea, Aeolian Arc, Italy. *Bull. Volcanol.* 69, 239-257.
- Italiano F., Nuccio P. M. (1991), "Geochemical investigations of submarine volcanic exhalations of the east Panarea, Aeolian Islands, Italy", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 46: 125-141
- Romano R. (1973), "Le isole di Panarea e Basiluzzo", *Rivista Mineraria Siciliana*, 139-141: 49-86
- van Westen C. J., Lulie Getahun F. (2003), "Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models", *Geomorphology*, 54: 77-89