

Analisi dell'erosione costiera nel delta del Po dal 1933 al 2008 mediante aero-fotogrammetria multi-temporale

Massimo Fabris (*), Vladimiro Achilli (*), Maurizio De Gennaro (**),
Andrea Menin (*), Antonio Zampieri (**)

(*) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica, DICEA, Università di Padova, Via Marzolo 9, 35131 Padova,
Tel. 049-8271614, Fax 049-8275582, e-mail: massimo.fabris@unipd.it

(**) UP SIT e Cartografia, Regione del Veneto, Calle Priuli 99, Cannaregio, 30121 Venezia

Riassunto

Nel lavoro vengono analizzate le variazioni planimetriche della fascia costiera del delta del Po da Porto Caleri (Rovigo) al Lido di Volano (Ferrara); lo studio è stato effettuato mediante rilievi aero-fotogrammetrici multi-temporali realizzati nel 1933, 1944, 1955, 1977, 1999 e 2008, alcuni dei quali con copertura parziale. Tale lavoro è stato realizzato nell'ambito dei progetti di ricerca RAMWASS (Risk Assessment Model of the Water-Sediment-Soil), PRIN 2008 "WEBGIS e fotogrammetria digitale multi-temporale d'archivio per il riconoscimento e l'analisi dei rischi territoriali e ambientali" ed una convenzione con la Regione Veneto ("Studio e verifica delle reti geodetiche regionali").

Abstract

In this paper planimetric deformation of the Po delta coast from Porto Caleri (Rovigo) to Lido di Volano (Ferrara) were analyzed; the study was performed by means of multi-temporal aerial-photogrammetric surveys acquired in 1933, 1944, 1955, 1977, 1999 and 2008: unfortunately, some surveys were characterized by partial coverage. The work was carried out in the field of research project RAMWASS (Risk Assessment Model of the Water-Sediment-Soil), PRIN 2008 "WEBGIS and archival multi-temporal digital photogrammetry for the recognition and analysis of environmental risks" and Veneto Region project ("Study and control of the regional geodetic networks").

Introduzione

Utilizzando rilievi aerofotogrammetrici acquisiti sulle stesse zone in tempi successivi è possibile applicare i principi della fotogrammetria digitale aerea multi-temporale: il confronto tra modelli digitali del terreno, ad alta risoluzione e precisione, ottenuti da rilievi effettuati periodicamente su aree caratterizzate da variazioni morfologiche, fornisce una stima delle deformazioni delle superfici generate valutandone aree e/o volumi coinvolti.

Le deformazioni di aree instabili possono anche essere valutate nell'arco degli ultimi 70-80 anni utilizzando immagini fotogrammetriche d'archivio con conseguenti grandi vantaggi per la ricostruzione delle variazioni morfologiche del passato (Chandler, Cooper, 1988a; Chandler, Cooper, 1988b; Chandler, Brunsten, 1995; Fabris et al., 2008).

Combinando la fotogrammetria digitale multi-temporale con quella d'archivio è possibile realizzare accurati monitoraggi di aree in deformazione. Numerose applicazioni sono state effettuate nell'ambito del monitoraggio di fenomeni franosi, aree vulcaniche e ghiacciai (Kääb et al., 1997; Kääb, 2000; Bitelli et al., 2004; Walstra et al., 2004; Baldi et al., 2005; Chandler et al., 2007; Baldi et al., 2008a; Baldi et al., 2008b; Fabris et al., 2011; Marsella et al., 2012).

Nel caso di variazioni di quota contenute, se le scale dei rilievi aero-fotogrammetrici sono molto piccole (come spesso accade con immagini d'archivio), l'errore in quota risulta piuttosto rilevante: in queste situazioni conviene separare il problema planimetrico da quello altimetrico, affrontando quest'ultimo con metodologie geodetiche che garantiscono maggiori precisioni.

In questo lavoro viene affrontata la problematica relativa allo studio delle variazioni planimetriche della linea di costa mediante l'elaborazione di rilievi aero-fotogrammetrici effettuati sull'area costiera del delta del Po nel 1933, 1944, 1955, 1977, 1999 e 2008.

Problematiche del delta del Po

Come noto, l'area del delta ha subito il fenomeno della subsidenza con valori di abbassamento medio del territorio di oltre due metri e picchi di tre metri e mezzo nel periodo dal 1940 al 1980. Le cause della subsidenza nel delta del Po sono sia di origine naturale che antropica: quelle naturali derivano dall'abbassamento del suolo causato dal costipamento degli strati litologici di un territorio "giovane" e dall'ossidazione delle torbe; le cause antropiche riguardano invece il prosciugamento delle aree umide, la bonifica dei terreni e, soprattutto, l'estrazione di acque metanifere che ha interessato il territorio con massima intensità dagli anni '40 al 1961, quando lo Stato impose la sospensione dell'attività estrattiva nel territorio deltizio.

Le conseguenze della subsidenza sono state devastanti: l'abbassamento del piano campagna ha portato la soggiacenza del territorio deltizio rispetto al livello dei fiumi e del mare mediamente a 2 metri, rendendo necessari interventi di rialzo e ringrosso delle arginature di difesa sia dai fiumi che dal mare. La subsidenza ha inoltre trascinato verso il basso i corpi arginali diminuendo e, talvolta, annullando i franchi di sicurezza. L'abbassamento disomogeneo ha quindi modificato profondamente il sistema di scolo della rete idraulica minore portando all'inversione delle pendenze e rendendo sostanzialmente inutilizzabili i manufatti. L'abbassamento della quota di fondo dei rami terminali dei fiumi ha incrementato il fenomeno della risalita del cuneo salino per decine di chilometri dalla foce rendendo inutilizzabili le derivazioni d'acqua sia a fini irrigui che idropotabili. La subsidenza ha inoltre comportato la scomparsa degli elementi morfologici litoranei propria degli ambienti umidi e lagunari e la variazione della linea di costa con perdita di vastissime aree di importanza comunitaria (SIC, ZPS, IBA) e rientranti nel Parco Regionale Veneto del Delta del Po.

Il monitoraggio costante e continuo delle variazioni plano-altimetriche nell'area deltizia appare pertanto essenziale per la progettazione e la realizzazione degli interventi funzionali alla difesa del territorio anche sulla base di dati recenti che confermano come il fenomeno della subsidenza, anche se con valori minori rispetto al passato, sia ancora in atto (Macini et al., 2006; Menin et al., 2008; Schrefler et al., 2009a; Schrefler et al., 2009b; Baldi et al., 2009).

In questo contesto si inquadra il lavoro svolto utilizzando la fotogrammetria digitale aerea multi-temporale e d'archivio (Fabris et al., 2012).

Caratteristiche dei rilievi aero-fotogrammetrici

I sei rilievi aero-fotogrammetrici considerati in questo studio sono stati utilizzati per la stima delle variazioni della linea di costa; quindi sono state considerate solo le strisciate in prossimità della fascia costiera da Porto Caleri (Rovigo) al Lido di Volano (Ferrara): sfortunatamente per alcuni rilievi la copertura risulta parziale (figura 1).

Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Rilievo effettuato nel 1933: si tratta di 10 strisciate con complessive 108 immagini. La scansione è stata effettuata con scanner fotogrammetrico a 1200 dpi e la scala media risulta di 1:20000;
- Rilievo effettuato nel 1944: volo RAF costituito da 8 strisciate e 57 fotogrammi complessivi in scala media 1:25000. Anche in questo caso la scansione è stata effettuata con risoluzione di 1200 dpi;
- Rilievo effettuato tra il 1 giugno ed il 22 luglio del 1955: volo GAI costituito da 8 strisciate e 33 fotogrammi in scala media 1:35000;

- Rilievo effettuato il 10 ottobre del 1977: volo costituito da 8 strisciate e 32 fotogrammi in scala media 1:30000;
- Rilievo effettuato il 10 settembre 1999: volo costituito da 5 strisciate e 24 fotogrammi in scala media 1:34000;
- Rilievo effettuato tra il 21 ed il 22 agosto 2008: volo costituito da 14 strisciate e 125 immagini in scala media 1:16000.

Solo i rilievi più recenti (1955, 1977, 1999 e 2008) hanno copertura stereoscopica (3D), mentre quelli meno recenti, sono stati utilizzati per la generazione del fotopiano corrispondente (2D).

Le diapositive dei voli dal 1955 al 1999 sono state rasterizzate mediante lo scanner fotogrammetrico Wehrli Raster Master RM2 con dimensione del pixel di 24 μm , ottenendo una risoluzione a terra non superiore ad 80 cm per il volo più alto.

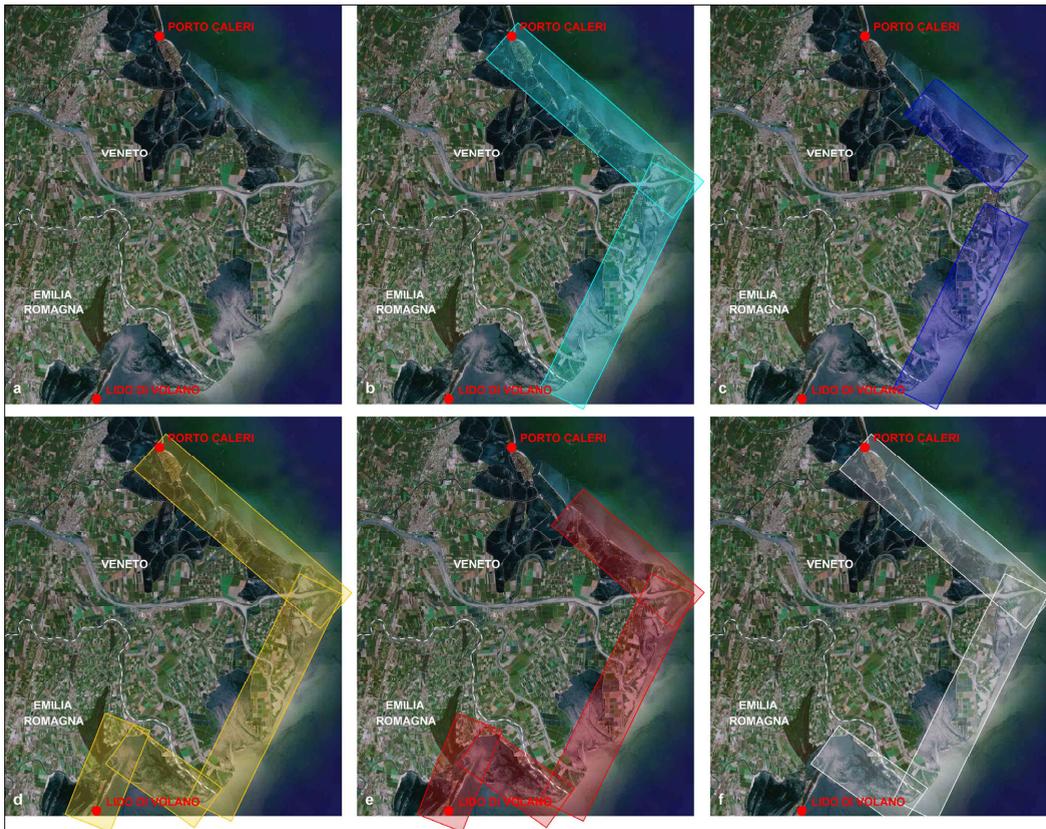


Figura 1. Copertura dei rilievi aero-fotogrammetrici utilizzati in questo studio: a) Delta del Po; b) 1933; c) 1944; d) 1955, 1977; e) 1999; f) 2008.

I punti fotografici d'appoggio

Il rilievo dei punti fotografici d'appoggio (Ground Control Points – GCP), necessario per l'orientamento delle immagini fotogrammetriche, è stato effettuato nel febbraio 2008 mediante la metodologia GPS in modalità statica: sono stati misurati punti naturali ben visibili sulle immagini, localizzati in aree presumibilmente stabili e riconosciuti durante il rilievo.

Per l'esecuzione delle misure sono stati utilizzati 3 ricevitori GPS Leica System 1200 acquisendo dati con passo di campionamento di 15 secondi e tempi di misura non inferiori a 45 minuti; come

master di riferimento sono stati considerati alcuni vertici della rete GPS della Regione Veneto, a sua volta inquadrata nelle reti nazionali ed internazionali mediante le stazioni permanenti ASI. Complessivamente sono stati misurati 40 punti naturali uniformemente distribuiti sulle strisciate e scelti in modo da avere almeno 6 punti fotografici d'appoggio per ogni strisciata (naturalmente alcuni vertici erano visibili anche su 2 strisciate). L'elaborazione dei dati GPS è stata realizzata con il software Leica Geo Office.

Generazione dei modelli fotogrammetrici ed estrazione delle ortofoto

L'orientamento esterno delle immagini fotogrammetriche dei rilievi del 1955, 1977, 1999 e 2008 è stato effettuato mediante il software Socet Set (SoftCopy Exploitation Tool Set) v. 5.4, ottenendo residui di orientamento compatibili con la scala delle immagini e la precisione dei punti d'appoggio. Per quanto riguarda invece i rilievi del 1933 e 1944, rinunciando alla tridimensionalità (in quanto la copertura stereoscopica risultava parziale), la georeferenziazione e mosaicatura delle immagini è stata effettuata mediante l'utilizzo del software ZMap per l'estrazione del fotopiano dell'area costiera.

I GCP ottenuti dal rilievo GPS erano insufficienti per l'orientamento dei rilievi meno recenti (1933 e 1944) in quanto i punti naturali, misurati nel 2008, non erano visibili sulle immagini "storiche". I punti noti sono stati quindi misurati sul modello fotogrammetrico del 1955, a sua volta orientato in modo rigoroso: sono stati scelti principalmente spigoli di edifici visibili sulla serie multi-temporale e misurate le loro coordinate sul modello fotogrammetrico del 1955 ottenendo in questo modo il trasferimento dei punti d'appoggio.

Da ciascuno dei rilievi aero-fotogrammetrici sono state prodotte le rispettive ortofoto con dimensione massima del pixel a terra di 1.5 m.

Il confronto diretto tra le ortofoto prodotte permette di ottenere una visualizzazione immediata delle aree che, maggiormente, hanno subito variazioni. Come nel caso del bacino "Bonelli Levante" dove "a causa del persistente fenomeno di subsidenza del territorio e della furiosa mareggiata del 10 novembre 1957, il bacino Bonelli Levante fu abbandonato" (Colombo, Tosini, 2009). In figura 2 l'evento viene intercettato nel confronto tra l'ortofoto del 1955 e quella del 1977.

Restituzione della linea di costa

Per i rilievi più recenti, con copertura stereoscopica, la restituzione al tratto della linea di costa è stata effettuata sulla base dell'altezza di marea: infatti, per poter confrontare tra loro restituzioni che si riferiscono a differenti periodi e valutare avanzamenti o arretramenti della linea di costa, è necessario riferirsi allo stesso valore "zero". Questo è particolarmente importante nelle zone pianeggianti come l'area del delta del Po, dove anche piccoli valori di alta marea possono coprire vaste aree: in questo caso, confrontando le restituzioni realizzate nel passaggio terra-mare, indipendentemente dall'altezza di marea, si produrrebbero variazioni scorrette in quanto riferite a "quote" diverse.

Lo studio è stato effettuato considerando il valore di altezza della marea durante l'acquisizione delle immagini: i dati, forniti dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), sono stati utilizzati per depurare le restituzioni dai differenti valori di marea.

In particolare, sono state considerate le stazioni mareografiche di Ravenna e Venezia (le più vicine all'area del delta del Po con dati d'archivio) mediando i dati disponibili.

Nel caso di bassa marea sarà sufficiente che l'operatore restituisca (in stereoscopia) la curva di livello di valore zero sul modello fotogrammetrico; nel caso di alta marea, invece, la situazione risulta più complessa: nella fattispecie, sarà necessario estrapolare il modello digitale del terreno sotto la superficie del mare ed ottenere la curva di livello di valore zero dall'elaborazione dei dati (la precisione sarà tanto più scarsa quanto maggiore sarà il valore di alta marea).

Questo studio non è stato possibile realizzarlo per i rilievi meno recenti a causa della mancanza di dati sul valore della marea e della copertura stereoscopica (Fabris et al., 2012).

Confronto tra le restituzioni vettoriali della linea di costa

La verifica della stabilità del sistema di riferimento nella trattazione multi-temporale è stata effettuata confrontando le restituzioni al tratto dei limiti dei fiumi e degli edifici e le coordinate di circa 50 punti naturali ben visibili sui vari rilievi. I risultati, con le restituzioni pressoché coincidenti, hanno confermato la stabilità del sistema di riferimento permettendo, quindi, il confronto diretto tra le linee di costa (figura 3).

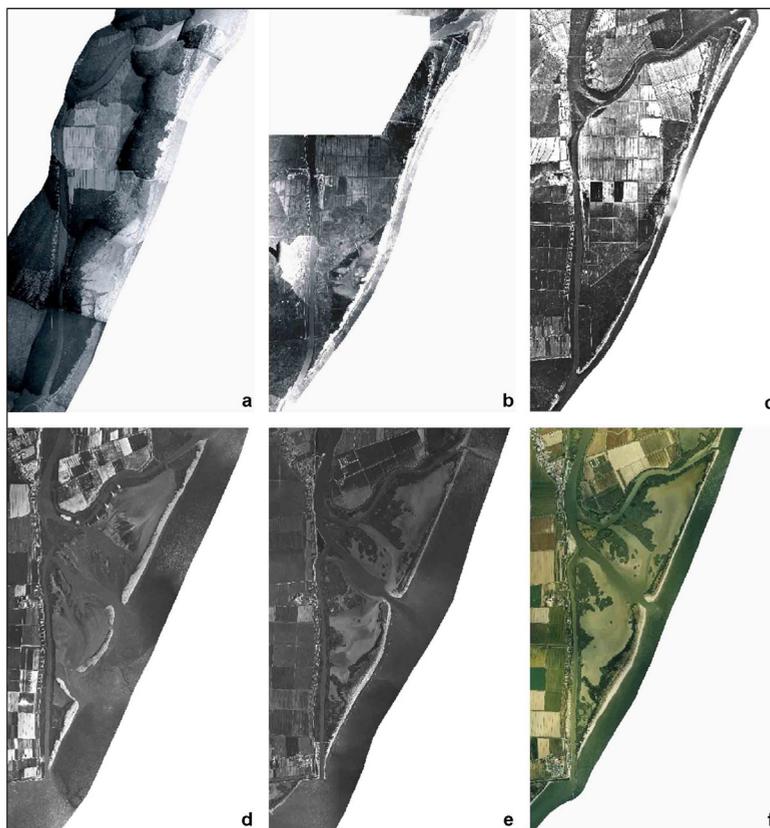


Figura 2. Ortofoto che evidenziano l'evoluzione del bacino Bonelli Levante: a) 1933; b) 1944; c) 1955; d) 1977; e) 1999; f) 2008; nel confronto 1955-1977 viene intercettato l'evento del 10 novembre 1957.

Nella figura 3 le restituzioni al tratto delle linee di costa e dei limiti dei principali corsi d'acqua dei rilievi del 1933, 1944, 1955, 1977 e 1999 sono state sovrapposte sull'ortofoto del 2008: nei dettagli A, B e C si nota come le variazioni siano piuttosto consistenti.

Nell'evoluzione multi-temporale dello studio è stato osservato un generale arretramento della linea di costa, probabilmente provocato non solo dalle dinamiche tipiche degli ecosistemi fluviali ma anche dagli interventi antropici.

L'arretramento più consistente è stato riscontrato soprattutto nel periodo 1955-1977, proprio in concomitanza con la fase più critica del fenomeno della subsidenza. Nell'ultimo periodo, invece, arretramenti e avanzamenti della linea di costa sembrano susseguirsi con più equilibrio.

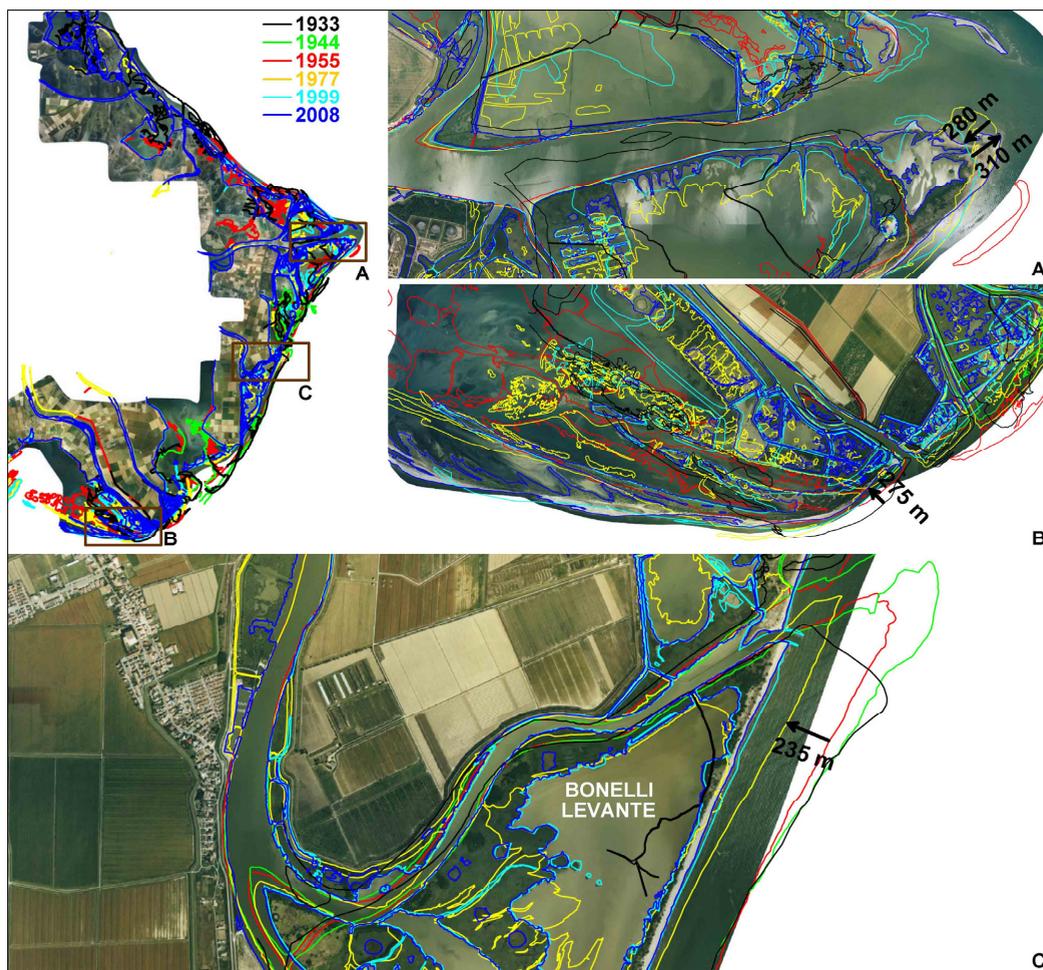


Figura 3. Restituzione al tratto delle linee di costa nei rilievi aero-fotogrammetrici del 1933, 1944, 1955, 1977 e 1999 sovrapposte sull'ortofoto del 2008.

Conclusioni

L'applicazione della fotogrammetria digitale aerea multi-temporale e d'archivio ha permesso di valutare le variazioni planimetriche della fascia costiera del delta del Po nel periodo dal 1943 al 2008.

I risultati ottenuti hanno evidenziato variazioni morfologiche contenute nel periodo 1933-1955 e più evidenti nel periodo 1955-1977, portando alla sommersione di una porzione di territorio pari a circa 30 milioni di m². Va sottolineato come gran parte della fascia costiera analizzata fosse zona lagunare e valliva; tuttavia, non mancano situazioni con edifici isolati che hanno visto la sommersione dell'area circostante. Nell'ultimo periodo (1977-2008), infine, le superfici emerse risultano paragonabili a quelle sommerse.

Tra le cause, devono essere considerate non solo le dinamiche tipiche degli ecosistemi fluviali, ma anche gli interventi antropici: l'effetto della subsidenza, provocato anche dalle estrazioni di gas che hanno avuto luogo dagli anni '40 al 1961, deve necessariamente correlarsi con le variazioni planimetriche della linea di costa e quindi con le porzioni sommerse che, maggiormente, si sono verificate dagli anni '50 agli anni '70.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto di Ricerca RAMWASS (Risk Assessment Model of the Water-Sediment-Soil (<http://web.cimne.com/ramwass/>)) e del Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale - PRIN 2008 "WEBGIS e tecniche innovative di telerilevamento per la salvaguardia da rischi territoriali e ambientali", Coordinatore Nazionale Prof. R. Santamaria, presso l'Unità di Ricerca dell'Università di Padova.

Bibliografia

- Baldi P, Fabris M, Marsella A, 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 and Remote Sensing*, 59 (4): 199-211
- Baldi P, Coltelli M, Fabris M, Marsella M, Tommasi P. (2008a), "High precision photogrammetry for monitoring the evolution of Sciara del Fuoco after the 2002-2003 Stromboli eruption", *Bulletin of Volcanology*, 70: 703-715. DOI 10.1007/s00445-007-0162-1
- Baldi P, Cenni N, Fabris M, Zanutta A. (2008b), "Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data", *Geomorphology*, 102: 435-444. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.027
- Baldi P, Casula G, Cenni N, Loddo F, Pesci A. (2009), "GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy)", *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 204-212. DOI:10.1016/j.epsl.2009.09.023
- Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A. (2004), "Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry techniques to monitor landslide bodies", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Organising Committee of the XXth International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, XXXV, B: 246-251
- Chandler JH, Cooper M. (1988a), "Monitoring the development of landslides using archival photography and analytical photogrammetry", *Land Miner Surveying Royal Institution of Chartered Surveyors*, 6: 576-584
- Chandler JH, Cooper M. (1988b), "The extraction of positional data from historical photographs and their application in geomorphology", *Photogrammetric Record*, 13 (73): 69-78
- Chandler JH, Brunnsden D. (1995), "Steady state behaviour of the Black Ven mudslide: the application of archival analytical photogrammetry to study of landform change", *Earth Surface Processes Landforms*, 20: 255-275
- Chandler JH, Lane S, Walstra J. (2007), *Quantifying Landform Change*, in: Fryer J., Mitchell H., Chandler J.H. (eds.), Applications of 3D Measurement from Images, Whittles Publishing, Dunbeath, UK: 139-170
- Colombo P, Tosini L. (2009), *Sessant'anni di bonifica nel delta del Po*, Edizione Papergraf S.p.a. ISBN: 978-88-87264-70-8
- Fabris M, Achilli V, Bragagnolo D, De Gennaro M, Mavaracchio C, Menin A, Ricceri G, Zampieri A. (2008), "Fotogrammetria d'archivio e metodologie geodetiche per la definizione delle variazioni morfologiche del delta del Po", *Atti del Convegno Nazionale SIFET "La Topografia per le Opere di Ingegneria: Metodi, Strumenti ed Applicazioni"*, Giugno 18-20, 2008, Sorrento, Italia: 80-85. ISBN: 88-901939-8-0
- Fabris M, Menin A, Achilli V. (2011), "Landslide displacement estimation by archival digital photogrammetry", *Italian Journal of Remote Sensing*, 43 (2): 23-30. DOI: 10.5721/ItJRS20114322
- Fabris M, Achilli V, Bragagnolo D, Menin A, Targa G. (2012), "Fotogrammetria digitale multi-temporale d'archivio: applicazione alla fascia costiera del delta del Po", *Atti di un incontro informale per i 70 anni del Prof. Carlo Monti*, Maggio 3, 2012, Milano, Italia, su CD-Rom. ISBN: 978-88-905917-6-1
- Kääb A, Haeberli W, Gudmundsson GH. (1997), "Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben Rock glacier, Swiss Alps", *Permafrost and Periglacial Process*, 8: 409-426

- Kääb A. (2000), "Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications", *Physics and Chemistry of the Earth*, 25 (9): 765-770
- Macini P, Mesini E, Salomoni VA, Schrefler BA. (2006), "Casing influence while measuring in situ reservoir compaction", *J. Petrol. Sci. Eng.*, 50 (1, 16): 40-54
- Marsella M, Baldi P, Coltelli M, Fabris M. (2012), "The morphological evolution of the Sciara del Fuoco since 1868: reconstructing the effusive activity at Stromboli volcano", *Bulletin of Volcanology*, 74: 231-248. DOI 10.1007/s00445-011-0516-6
- Menin A, Salomoni VA, Santagiuliana R, Simoni L, Gens A, Schrefler B. (2008), "A mechanism contributing to subsidence above gas reservoirs and its application to a case study" *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 9: 270-287. DOI: 10.1080/15502280802225234.
- Schrefler BA, Ricceri G, Achilli V, Fabris M, Laloui L. (2009a), "Actual problems in the study of soil dynamics of the Upper Adriatic sea", *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*, 9: 63-66. ISSN: 2035-8008
- Schrefler BA, Ricceri G, Achilli V, Menin A, Salomoni VA. (2009b), "Ground displacement data around the city of Ravenna do not support uplifting Venice by water injection", *Terra Nova*, 21 (2): 144-150. DOI: 10.1111/j.1365-3121.2009.00867.x
- Walstra J, Chandler JH, Dixon N, Dijkstra TA. (2004), *Extracting Landslide Movements from Historical Aerial Photographs*, in: Lacerda, W., Erlich, M., Fontoura, S.A.B., Sayao, A.S.F. (eds.), *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Taylor & Francis, London: 843-850