

The TELLUS Project: a satellite-based slow-moving landslides monitoring system in the urban areas of Campania Region

C. TERRANOVA, S. IULIANO, F. MATANO, S. NARDÒ, E. PISCITELLI, E. CASCONI, F. D'ARGENIO, L. GELLI, M. ALFINITO & G. LUONGO

ABSTRACT

Il Progetto TELLUS: un sistema satellitare di monitoraggio delle frane lente nelle aree urbanizzate della Regione Campania

Il Progetto TELLUS, svolto nell'ambito del Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS), ha sviluppato un primo impianto di sistema tecnologico e metodologico, dedicato al monitoraggio e controllo dei fenomeni franosi sul territorio della Regione Campania attraverso l'integrazione di tecniche e procedure avanzate di acquisizione (Telerilevamento, GPS), trattamento (GIS) e diffusione dei dati e delle informazioni a valore aggiunto (WEBGIS).

Il processamento interferometrico di immagini satellitari radar ERS 1 e ERS 2 (1992 – 2001) mediante tecnica PSinSARTM, integrato da analisi geologiche e morfologiche di dettaglio sul terreno, ha consentito di caratterizzare una parte delle frane della Regione Campania, con dati di velocità media e serie storiche dei valori di spostamento dei PS. La metodologia è stata applicata anche in casi di studio specifici, uno dei quali (Moio della Civitella) è illustrato.

Key words: *landslides, monitoring, remote sensing, radar interferometry, Campania.*

INTRODUCTION: THE TELLUS PROJECT

The complex geological setting of the Campania territory, together with an heavy and disordered development of the urban areas, even in landslide-prone or landslide-affected sectors, make the region one of the Italian areas with higher landslides costs and risks.

The TELLUS project, started in 2006 by the Ministero per l'Ambiente e la Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) in the framework of the Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS) - PON-ATAS, funded by the European Union QCS 2000-2006, used the Permanent Scatterers technique (FERRETTI *et alii*, 2001) for landslide investigations at regional scale, which has been carried out on 180 urban areas affected by landslide movements (Fig. 1), coupled with the interpretation of optical satellite images and geological and geomorphological surveys.

The PSinSARTM technique is a powerful and fully operational tool for monitoring ground deformations on a high spatial density grid of point-wise targets. PS correspond to

natural objects, such as rock outcrops, or man made objects, such as parts of buildings, roofs, antennas, terraces, roads, bridges and water pipelines. About 1100 ERS 1 and ERS 2 SAR images, dated between 1992 and 2001, have been interferometrically processed by means of PS-InSARTM technique, by the T.R.E. s.r.l., a POLIMI spin-off company, supplying LOS average velocity and time-series displacement data. The processing of Landsat, Spot and Quick-Bird images has been useful for the extraction of features related to the landslide presence and time evolution, and to give a spatial meaning to the punctual information provided by the PS. The PS analysis has been coupled with geological study characterized by the analysis of traditional *in situ* monitoring data and by detailed field surveys and mapping of tectonic and landslides morphological elements.

The PS analysis was applied both as support for landslide inventory mapping and for the monitoring of single slope movements. The integration of satellite, spatial and geological field data within a Geographical Information System permitted to better define morphological landslide features and improve accuracy of related database.

On the whole, 1.691.740 PS (998.640 PS in descending orbit and 693.110 PS in ascending orbit) have been detected, with a density of about 124 PS/km², covering the whole territory of the Campania Region (Fig. 2) and including also targets in vegetated or mountainous areas.

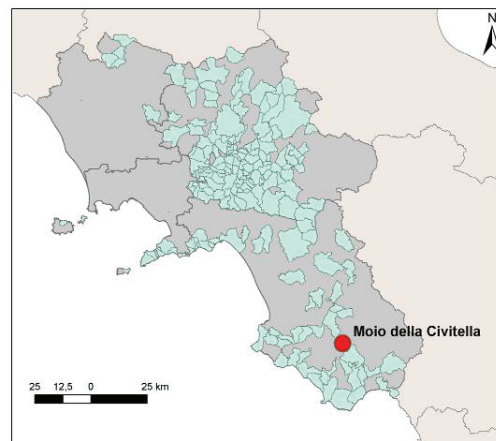


Fig. 1 – Distribution of the urban areas (showed in green) studied by TELLUS project.

(*) Unità di Supporto Locale n°6 PODiS c/o Ufficio Autorità Ambientale Regione Campania, Napoli

Lavoro eseguito nell'ambito del progetto PODiS (Progetto Operativo Difesa Suolo) con il contributo finanziario del QCS PON-ATAS 2000-2006 MATTM – Direzione Generale Difesa Suolo.

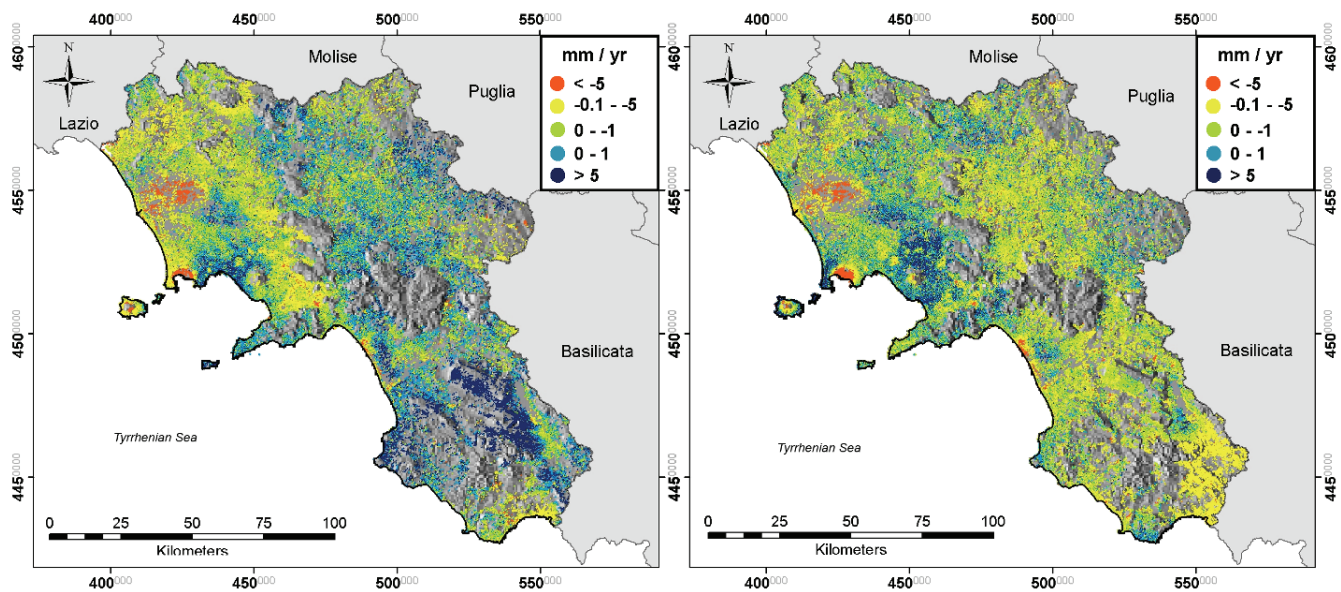


Fig. 2 - Map of PS-InSAR LOS velocity for the Campania Region in the period June 1992– January 2001: ascending orbit (left) and descending orbit (right). The underlying image is a shaded relief from a 20 m pixel Digital Terrain Model.

INTEGRATING LANDSLIDE INVENTORY AND PS-INSAR DATA

The PS technique can be successfully applied to areas affected by slow mass movements, because it is particularly difficult to detect changes in the satellite-to-ground distance over 10 cm/year with C band data (e.g. ERS1/2 and Radarsat data) due to problems induced by the intrinsic ambiguity of the interferometric phase (COLESANTI & WASOWSKI, 2006).

The deformation data are relative measures in time, since they refer to a master image, and in space as well, because they are relative to stable points of reference.

The main benefits of PS analysis relate to a better definition of boundaries of already detected mass movements or of their state of activity, and to the detection of previously unknown unstable areas. In particular, PS analysis has been used to obtain a better definition of the landslide spatial distribution and assessment of landslide state of activity of landslide inventory maps available for the Campania territory, such as IFFI (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 2008, MONTI *et alii*, 2008), GECAI (REGIONE CAMPANIA – PODIS, 2005) and SCAI (DE RISO *et alii*, 2004; DE RISO & DI NOCERA, 2005), at least where a few strong reflectors are available within the landslide body. As a matter of fact, to assess the landslide state of activity can be problematic, as many difficulties are present for detecting dormant landslides mostly covered by vegetation and characterized by topographic features not clearly related to slope instabilities.

The Campania ground deformation related to landslides has been characterized by the analysis of the PS relapsing in the landslide polygons. Within the IFFI database, 3.529 landslide bodies (about 15 % of the total) are characterised by the presence of one or more PS (Tab. 1).

Total IFFI landslides	23.430
landslides with ascending PS	2.164
landslides with descending PS	2.713
landslides with both ascending and descending PS	1.348

Tab. 1 - Comparison between IFFI and PS databases.

In particular, the PS analysis has been performed over 180 towns in the regional territory (TELLUS database), which are characterized by landslide events distributed within or at the boundaries of a built-up area. In this case a major percentage of landslides (about 30 % of the total) is characterised by PS presence (Tab. 2).

Total TELLUS landslides	2.643
landslides with ascending PS	318
landslides with descending PS	421
landslides with both ascending and descending PS	203

Tab. 2 - Comparison between TELLUS and PS databases.

With reference to the TELLUS database landslides, the relationship between PS velocities and the state of activity of the landslide, as recognized in the field, is not linear. As a matter of fact several dormant landslides present high values of PS velocity in both orbits (Fig. 3). These data, implemented in a GIS environment, have been used to integrate and update the current TELLUS landslide inventory map, which is a fundamental step in the evaluation of the related hazard. This approach allowed, where PS are available, to identify, within landslide areas, zones with different type and/or amount of deformation, to detect unknown unstable sectors in the urban areas, and to determine the landslide state of activity.

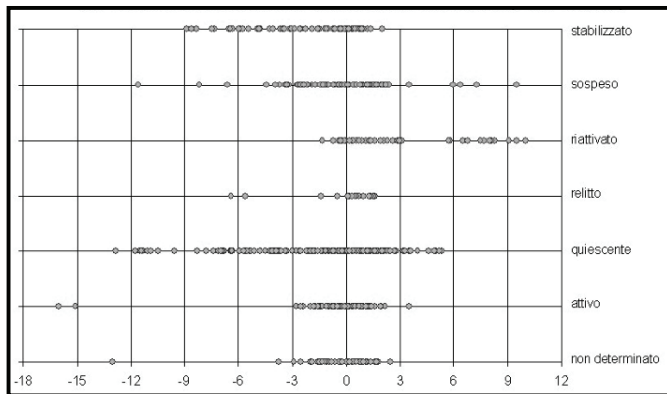


Fig. 3 - Comparison between state of activity of TELLUS landslides and velocity range (horizontal axis) of ascending PS within them.

A STUDY CASE OF THE TELLUS PROJECT: MOIO DELLA CIVITELLA CITY

Moio della Civitella city (Fig. 1) has been chosen as study case for testing the methodological approach of the TELLUS Project. As a matter of fact the city presents the highest values of PS density and velocity among the urban centers affected by landslides in Campania, and the availability of monitoring data on landslide activity.

The main factors predisposing instability at Moio della Civitella are the local stratigraphy and morphology. The stratigraphy of the urban area (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 2006) is characterised by the presence of the structurally complex Saraceno Formation, Oligocene - Aquitanian in age. The formation is mainly made up of argillites with intercalated calcarenites and silicoclastic arenites. It is characterised by intense fracturing and extremely variable bedding, and often is weathered at the outcrop. Upslope (near La Civitella hill) the Pollica Arenites formation crops out; it is made up by thin-bedded lithic and arkosic arenites and silty argillites with thick conglomerate layers. Downslope the Centola Conglomerates crop out formed by silty-sandy matrix-supported conglomerates. These units are overlain by a Quaternary thick cover consisting of heterogeneous landslide and slope debris in a silty-clayey matrix.

The slope is intensely affected by erosional and gravitational processes with several, large landslides (Fig. 4). As a matter of fact, the main slope movements derive from ancient phenomena which have involved large portions of the whole extension, 2-3 km in length, of the slopes and directly affect the urban centres. The prevailing typologies are complex landslides such as rotational slides evolving to translational slides and flows (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 2008), with multiple or superimposed phenomena. As regards state of activity, landslides are generally dormant (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 2008) with rainfall-triggered or man-triggered partial reactivations are frequent.

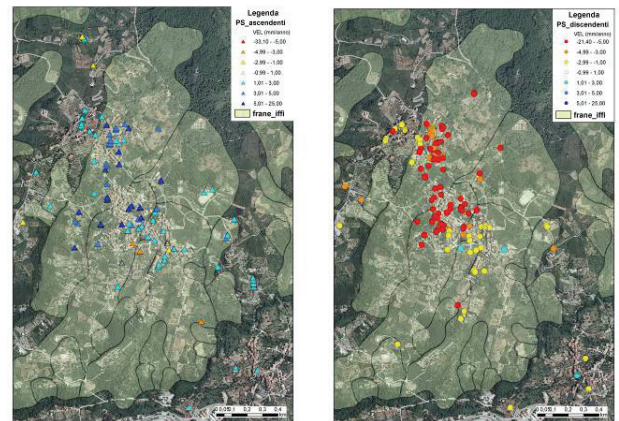


Fig. 4 - PS distribution in both descending (left) and ascending (right) orbit along the Moio della Civitella slope. On the orthophoto the IFFI landslides (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 2008, MONTI *et alii*, 2008) are also mapped.

The Moio della Civitella slope has a high PS density; their spatial distribution and velocity allow to obtain a synoptic view of the ground deformation in the whole urban area (Fig. 4). The identified PS form benchmarks of a geodetic network in the urban area of Moio della Civitella, corresponding generally to man-made objects characterized by various geometry and material, such as building roofs and terraces, lamps, walls, belfries, manholes, sewage covers, landcrappings, etc.

The PS-InSAR analysis resulted in the identification of 419 PS (belonging to both ascending and descending datasets); their average velocities in the direction of the Line of Sight (LOS) vary between + 8,9 and - 16,2 mm/year (Tab. 3).

	descending PS	ascending PS
number	259	160
minimum vel.	- 16,2 mm/anno	- 4,6 mm/anno
maximum vel.	+ 2,9 mm/anno	+ 8,9 mm/anno
mean vel.	- 2,94 mm/anno	+ 2,09 mm/anno
standard deviation	3,34	2,47

Tab. 3 - Statistic parameters of PS in Moio della Civitella area.

The frequency distribution of PS velocity values in the study area does not display a Gaussian distribution in both descending (Fig. 5) and ascending (Fig. 6) orbits. The histogram in Fig. 5 is strongly asymmetrical and presents a secondary peak in the - 4 to - 10 mm/yr range value, while histogram in Fig. 6 presents minor peaks between + 3 and + 9 mm/yr. These values and their spatial distribution are coherent for wide mass movements along slope direction (towards S-SW). The IFFI landslides have been classified (Fig. 7) on the basis of the average value of the PS which fall in their boundary. In a such way the PS technique leads to detect, in the middle portion of Moio della Civitella city, between the Moio and Pellare, a wide area characterized by ground deformation, where it is reasonable to expect slow-moving landslide phenomena.

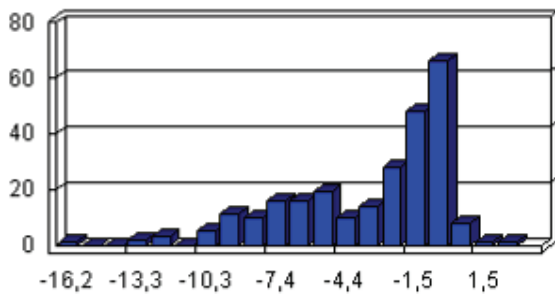


Fig. 5 - Descending PS velocity (x axis) frequency distribution in Moio Civitella area. Velocity values are expressed in mm/year.

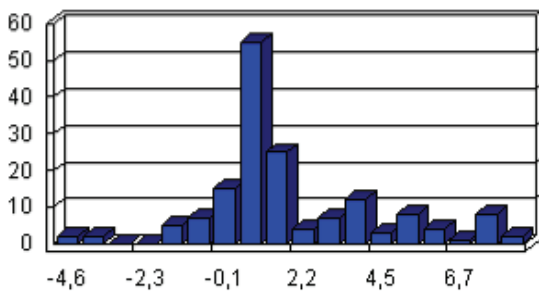


Fig. 6 - Ascending PS velocity (x axis) frequency distribution in Moio Civitella area. Velocity values are expressed in mm/year.

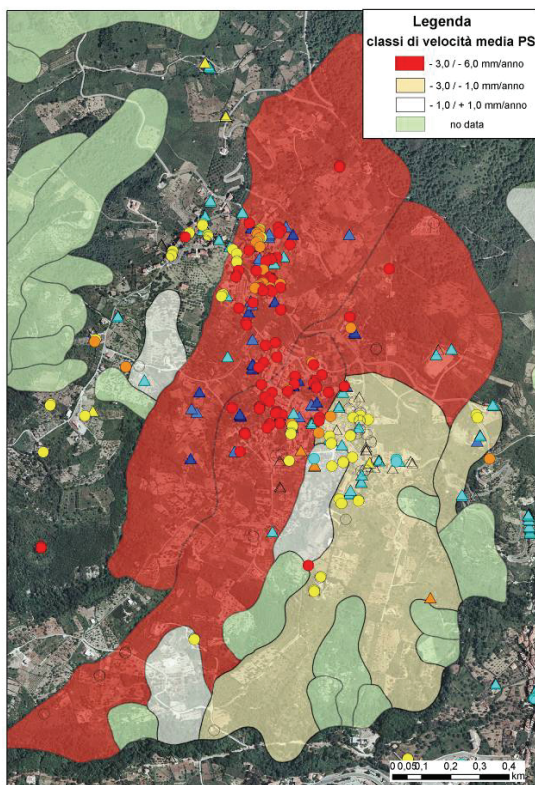


Fig. 7 - Classification of IFFI landslides on the basis of PS velocity values.

The outcomes from the PS analysis show a good agreement with the analysis of the damage to buildings (CALCATERRA *et alii*, 2008). To this aim, data on ground movements in the investigated area is already being collected through a continuous monitoring campaign (started in March 2007) consisting in inclinometer soundings and topographic network

constituted by over 100 benchmarks (CALCATERRA *et alii*, 2008) and GPS stations (started in May 2008 by PODiS) to monitor selected slope movements in the study area, and allow to compare the data deriving from the traditional monitoring system with those provided by the PS technique.

REFERENCES

- CALCATERRA D., RAMONDINI M., CALÒ F., LONGOBARDI, V., PARISE M. & GALZERANO G. (2008) - *DInSAR techniques for monitoring slow-moving landslides*. Proc. 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, 30 June - 4 July 2008, Xi'an (China).
- COLESANTI C. & WASOWSKI J. (2006) - *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry*. Engineering Geology, **88**, 173-199.
- DE RISO R. & DI NOCERA S. (2005) - *Progetto Speciale SCAI della Regione Campania*. GNDICI-CUGRI, Vol. 2, Pubbl. CNR-GNDICI n° 2864, pp. 161, Giannini Editore, Napoli, Maggio 2005.
- DE RISO R., DI NOCERA S. & PESCATORE T. (2004) - *Progetto Speciale SCAI della Regione Campania*. GNDICI-CUGRI, Vol. 1, Pubbl. CNR-GNDICI n° 2845, pp. 290, Giannini Editore, Napoli, Aprile 2004.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (2001) - *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **39**, 8-20.
- MONTI L., D'ELIA G. & TOCCACELI R. (2007) - *Analisi del dissesto da frana in Campania*. In: APAT - Rapporto sulle frane in Italia: il progetto IFFI - Metodologia, risultati e rapporti regionali, cap. 20, 509-545.
- REGIONE CAMPANIA - PODIS (2005) - *Progetto Ge.C.A.I. - Legge 445/1908 "La Geologia dei Centri Abitati Instabili ammessi a consolidamento"*. Relazione finale, 344 pp. (http://www.campania.podis.it/webgis/oms/podis/Sito_PO_DIS_file/page_0012.htm)
- SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE (2006) - *Foglio geologico n° 503 "Vallo della Lucania"*. Progetto CARG, Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000. (http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/Progetto_CARG_-_Cartografia_geologica_e_geotematica)
- SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE (2008) - *Progetto IFFI (Inventario Fenomeni Franosi in Italia)*, Cartografia on-line. APAT, Roma (http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/IFFI_-_Inventario_dei_fenomeni_franosi_in_Italia/)

Use of geostatistics in the analysis of airborne LiDAR data for a small alpine basin

S. TREVISANI (*), M. CAVALLI (*) & L. MARCHI (*)

ABSTRACT

L'utilizzo della geostatistica nell'analisi di dati LiDAR nell'ambito di un piccolo bacino alpino

I dati topografici derivati da LiDAR aereo richiedono particolare attenzione in fase di interpolazione, in particolar modo qualora vi sia la necessità di ottenere modelli digitali del terreno ad elevata risoluzione (con dimensioni delle celle raster $\leq 1 \text{ m}^2$).

Le metodologie geostatistiche permettono di valutare la qualità dei dati e massimizzarne il contenuto informativo. Inoltre, l'uso combinato di indici morfometrici e indici statistico spaziali si presenta molto utile al fine del riconoscimento e della caratterizzazione delle forme del rilievo e dei processi idro-geomorfici ad esse correlate. Nel presente caso di studio si utilizza un approccio geostatistico al fine di analizzare ed interpolare un dataset topografico derivato da un rilievo LiDAR aereo, condotto in un piccolo bacino delle Dolomiti. In particolare, i modelli digitali ottenuti vengono analizzati mediante indici idro-geomorfologici ed indici geostatistici al fine di caratterizzare e confrontare le differenti morfologie caratterizzanti l'area in esame.

Key words: *geostatistics, LiDAR, morphometry, roughness, variogram.*

INTRODUCTION

LiDAR data, despite their high spatial sampling density, need to be analyzed and interpolated carefully in order to get accurate high-resolution (cell size $\leq 1 \text{ m}^2$) digital terrain models. Geostatistical methods permit to evaluate the quality of data and maximize their informative content. Moreover, statistical and spatial continuity indexes, coupled with morphometric indexes give an important contribution to the recognition of landforms and to the characterisation of geomorphic processes (MCKEAN & ROERING, 2004; GLENN *et alii*, 2006; CAVALLI *et alii*, 2008).

A topographic dataset from an aerial LiDAR survey of a small alpine basin is analyzed and interpolated by means of geostatistical techniques. The digital terrain model (DTM) obtained is then analyzed by means of hydrogeomorphic and spatial continuity indexes in order to characterize and compare

different morphological features.

STUDY SITE AND LIDAR DATA SET

The study area is located in the upper part of a small basin in the Dolomites (eastern Italian Alps, fig.1). Two main morphological units are present in the study area: rocky outcrops, entrenched by steep couloirs, and scree slopes located at the base of the rocks. Debris cones, whose apex is located at the outlet of couloirs which cut the superjacent rock slope are a prominent feature in the scree belt.

The LiDAR data were acquired (October 2006) by means of an ALTM 3100 OPTECH, flying at an average altitude of 1000 m AGL in snow free condition. During the LIDAR survey high-resolution (0.15 m) aerial photo were also

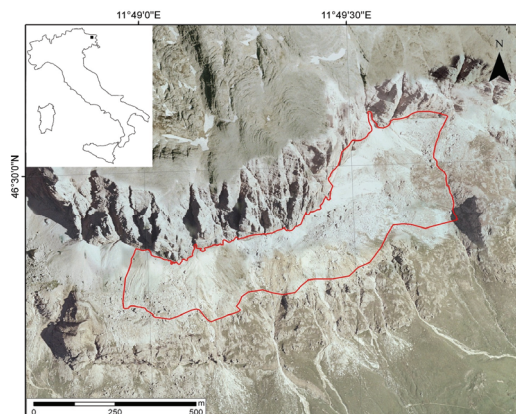


Fig. 1 – Site location and delineation of the domain of study

collected (camera Rollei H20).

The spatial sampling density of the LiDAR-derived topographic dataset is quite high: raw data have a mean density of about 5 point/m² and filtered data show a density of about 3 point/m². Despite the absence of vegetation, the rugged morphology with the presence of subvertical cliffs generates in some parts of the area a deterioration of sampling density.

The analysis of the presented study is mainly devoted to the scree slope area. Three main classes of processes influence sediment dynamics on scree slope and cones and contribute to their complex morphology: gravitational accumulation of weathered rock fragments, snow avalanches and debris-flows.

(*) CNR - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Padova.

DTM GENERATION AND ANALYSIS

The first step of a geostatistical study consists in the explorative analysis of the data set. The main targets of this phase of the analysis are the characterization of the sampling geometry, the individuation of spatial heterogeneities and trends and the analysis of spatial continuity, the last conducted by means of variograms and other spatial continuity indexes (GOOVAERTS, 1997). According to the results of this phase, important choices related to interpolation approaches are formulated.

In this case study, the data were detrended calculating a trend model by means of a local polynomial method. The resulting residuals (obtained subtracting the trend from the original data) were interpolated using a block kriging algorithm, with a local search window of 5 m and a block size of 1 m² (fig. 2).

Morpho-hydrological and spatial continuity indexes were then calculated both on the digital model of the residuals as well as on the DTM, the last derived adding the trend to the digital model of the residuals. Maps of morphometric indexes contribute to the individuation and characterization of the main landforms. As an example, figure 3 presents the map of the roughness index (standard deviation of residuals), which outlines high variability areas related to debris-flow channels and deposits and rockfall accumulations.

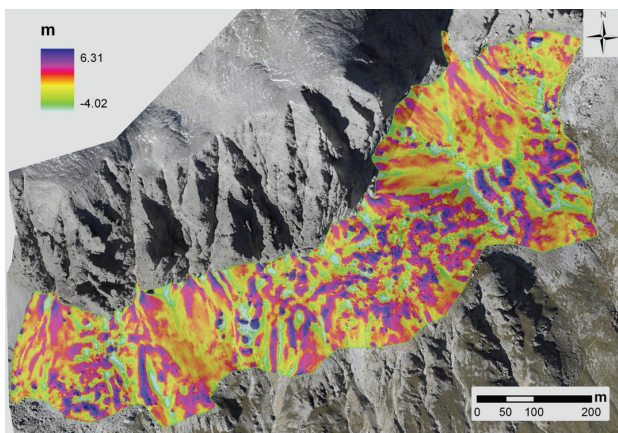


Fig. 2 – Interpolated residuals (units in m).

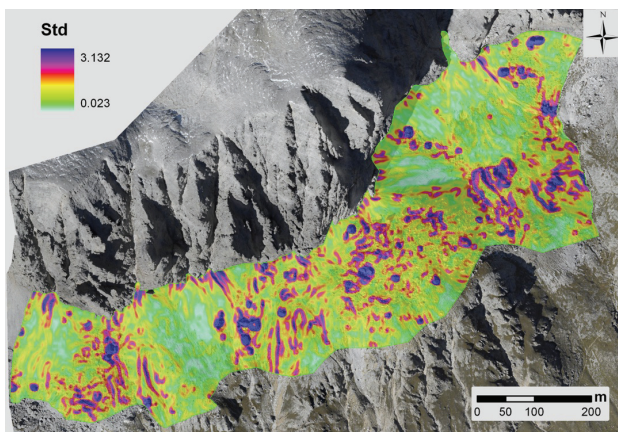


Fig. 3 – Roughness index (units in m).

The spatial variability was also investigated by means of variogram maps, which can be interpreted as “fingerprints” of local morphology, these indexes being able to describe spatial variability along different directions and for different spatial scales (fig. 4).

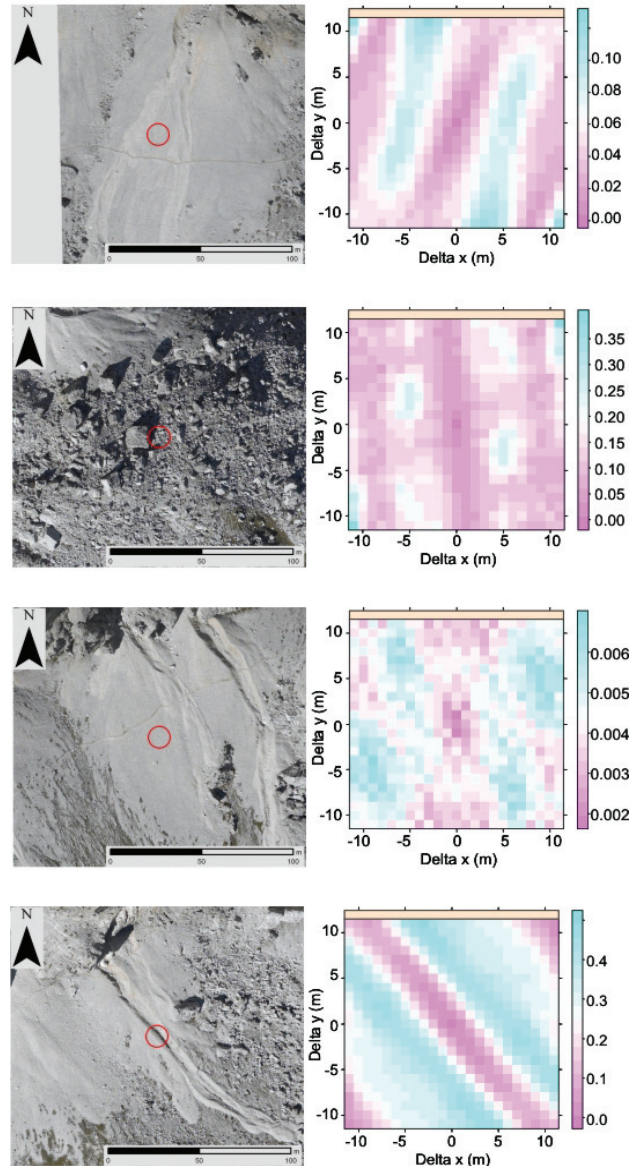


Fig. 4 – Variogram maps for different morphological features (the circle on the orthophotos individuates the area of calculation). From top to bottom: debris-flow deposits, rockfall deposits, scree slope and debris-flow channel.

CONCLUSIONS

A geostatistical approach is particularly suitable for the analysis and interpolation of LiDAR data in critical situations where, due to filtering practices, surface morphology or dense vegetation cover, there is a deterioration of LiDAR point spatial density compared to the desired spatial resolution (i.e. pixel size). A local kriging approach could improve further the quality of DTM. In particular, attention should be paid to the correct representation of spatial variability of ground surface in presence of anisotropic morphologies, as represented here by

debris-flow deposits or channels (fig. 4).

Finally, the model of residual surface coupled with morpho-hydrological and spatial continuity indexes permit to highlight terrain morphologic features of scree slopes like debris flow deposits, levees, channels and rock falls deposits. They could serve as basis for subsequent procedures of classification and pattern recognition (CARR, 1996; ASSELEN & SEIJMONSBERGEN, 2006; DRAGUT & BLASCHKE, 2006).

REFERENCES

- ASSELEN S. & SEIJMONSBERGEN A. C. (2006) – *Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using laser DTM*. *Geomorphology*, **78**, 309-320.
- CARR J. R. M. (1996) – *Spectral and textural classification of single and multiple band digital images*. *Computer & Geosciences*, **22**, 849-865.
- CAVALLI M., TAROLLI P., MARCHI L. & DALLA FONTANA G., (2008) – *The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology*. *Catena*, **73**, 249-260.
- DRAGUT L. & BLASCHKE T. (2006) – *Automated classification of landform elements using object-based image analysis*. *Geomorphology*, **81**, 330-344.
- GLENN N. F. *et alii* (2006) – *Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity*. *Geomorphology*, **73**, 131-148.
- GOOVAERTS P. (1997) – *Geostatistics for Natural Resources Evaluation - Oxford University Press, New York*, 481 pp.
- MCKEAN J. & ROERING J. (2004) – *Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry*. *Geomorphology*, **57**, 331-351.

Tecniche GIS e Sistemi di Supporto alle Decisioni per la gestione delle emergenze in aree a rischio industriale

A. TROZZI (*)(**), M. DE AMICIS(**), M. DELIGIOS (°), S. FRIGERIO(**), S. SIRONI(**) & S. STERLACCHINI (*)

ABSTRACT

Tecniche GIS e Sistemi di Supporto alle Decisioni per la gestione delle emergenze in aree a rischio industriale

Industrial risk is related to storing, employing and producing hazardous chemicals. The area called "Isola Bergamasca" (Lombardy Region, Italy) is a consortium of 24 Municipalities strongly exposed to this type of risk both for the presence of several industrial activities and the high urbanization of its territory. The aim of this work is to apply Geographic Information System and Decision Support System technology to emergency planning in the study area.

In this methodological context, real-time emergency management is the last of four steps: identification of potentially dangerous events ; inventory of goods and resources within the involved area; definition of Risk Scenarios; development of an emergency management workflow. In this approach the use of a GIS integrated with DSS represents a valuable instrument for storing, analyzing and representing geographical data and for emergency management: by using "workflow management" tools it is possible to make procedures 'automatic', so that emergency managers can describe and control the running of workflows, the availability of resources and people with the support of Information and Communication Technology devices, with the aim of optimizing time and increasing the efficiency of intervention.

Key words: Gestione delle Emergenze, Information and Communication Technology, Rischio Industriale, Sistemi Informativi Territoriali, Sistemi di Supporto alle Decisioni.

INTRODUZIONE

Con il termine rischio industriale si fa riferimento alla componente del rischio tecnologico (cioè dovuto all'attività antropica) correlato alla presenza di infrastrutture industriali in cui vengono impiegate (depositate, lavorate, prodotte o trasformate) sostanze pericolose, qualunque sia il loro quantitativo. Un insieme di particolare rilevanza di tali infrastrutture è rappresentato dalle cosiddette Aziende a Rischio di Incidente Rilevante (ARIR), ovvero quelle attività produttive che ricadono nel campo di applicazione degli art. 6

e 8 del D.Lgs. 334/99 ("Attuazione della Direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose"). La problematica del rischio industriale si distribuisce sul territorio della Regione Lombardia principalmente in corrispondenza delle aree urbanizzate. Considerando le sole ARIR, in Regione si contano 285 aziende di cui 136 soggette all'art. 6 e 149 soggette all'art. 8 (dati del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, aggiornati ad ottobre 2007).

Le 285 ARIR lombarde sono distribuite in 173 comuni, dato che mostra come la Regione Lombardia, diversamente da altre regioni in i cui poli industriali caratterizzati dalla presenza di aziende ad alto rischio sono localizzati in pochi comuni, si distingue per la sostanziale diffusa distribuzione di ARIR sul territorio, con più dell'11% dei comuni interessati dalla presenza di almeno uno di questi insediamenti.

Il rischio industriale, essendo generato da una sorgente antropica, implica, diversamente dai rischi naturali, che le potenziali sorgenti di rischio siano facilmente individuabili (coincidono con gli insediamenti produttivi), e che la magnitudo (intensità massima sviluppabile) sia teoricamente quantificabile. D'altra parte non è possibile definire un tempo di allerta e la velocità di svolgimento dell'evento incidentale può essere molto più elevata di quella di catastrofi naturali, ponendo un grave problema riguardo ai tempi di intervento.

La normativa in ambito nazionale e regionale impone di elaborare specifici Piani di Emergenza Esterna per le ARIR, nonché di estendere la pianificazione (Direttiva Grandi Rischi della Regione Lombardia) alle aziende presenti sul territorio che pur non rientrando nella normativa sono suscettibili di causare incidenti e quindi danni a persone, cose e ambiente all'esterno degli insediamenti, includendo anche i rischi di incidenti derivanti dal trasporto di sostanze pericolose. E' nell'ambito di questi Piani che vengono definite le tipologie incidentali, e in base a queste gli Scenari di Rischio che potrebbero interessare il territorio.

Come già avvenuto per il rischio idrogeologico, l'obiettivo del presente lavoro è quello di applicare la tecnologia dei Sistemi Informativi Territoriali (SIT) e dei Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS) alla Pianificazione di Emergenza degli Enti Locali, per la realizzazione del Piano Intercomunale di Emergenza dell'area della Provincia di Bergamo denominata "Isola Bergamasca", un consorzio di 24 comuni a forte vocazione industriale.

(*) CNR - Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (Sezione di Milano), Milano

(**) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano-Bicocca, Milano

(°) Globo S.r.l., Treviolo (Bg)

In questo contesto l'uso dei Sistemi Informativi Territoriali si pone come un utile strumento sia nella fase di archiviazione, gestione, analisi e rappresentazione di dati geografici, sia nella fase di gestione delle emergenze.

Durante un'emergenza, infatti, è necessario poter utilizzare le risorse disponibili e coordinare le persone, dalla cui perfetta sincronizzazione dipende l'esito degli interventi.

L'evoluzione dei SIT nell'ambito della pianificazione e nella gestione dell'emergenza ha permesso di integrare in questo strumento dei moduli per la gestione dei processi decisionali, offrendo la possibilità di "automatizzare" i processi organizzativi e consentendo al gestore del sistema di descrivere formalmente le procedure, disponendo di un sistema informatizzato mediante il quale eseguirle e monitorarne l'andamento, attraverso strumenti denominati "*workflow management*".

L'area di studio viene detta comunemente "Isola Bergamasca" ed è identificabile come la porzione della provincia di Bergamo che si estende, per circa 90 km², fra i fiumi Adda e Brembo, delimitata a Nord dal limite amministrativo delle Comunità Montane della Valle Imagna e della Valle S.Martino e a Sud dalla confluenza dei due corsi d'acqua.

L'Isola è popolata da circa 89.700 abitanti distribuiti in 24 comuni: si configura quindi come un territorio ad alta densità abitativa, in cui il tessuto urbano si trova strettamente connesso agli insediamenti industriali, generando una situazione territoriale particolarmente esposta a questo tipo di rischio.

La Provincia di Bergamo risulta interessata da 48 ARIR, di cui 19 ricadenti nell'obbligo di Notifica (art. 6) e 29 nell'obbligo di redazione del Rapporto di Sicurezza (art. 8): rispetto alla situazione regionale complessiva, Bergamo denuncia il numero più elevato di aziende a rischio di incidente rilevante dopo la Provincia di Milano. Il Piano di Emergenza Provinciale per il Rischio Industriale individua l'Isola come uno dei settori della Provincia maggiormente esposti al rischio industriale e al rischio radiazioni, dovuti in primo luogo alla presenza di 13 ARIR.

L'area risulta inoltre caratterizzata, anche se in misura minore, da altre tipologie di rischio (idrogeologico, trasporti, agricolo-forestale) che potrebbero, in diversa misura, interagire con eventi incidentali legati agli insediamenti industriali presenti sul territorio.

LA GESTIONE DELLE EMERGENZE

La gestione in tempo reale delle situazioni di emergenza rappresenta l'ultimo passo di una serie di step metodologici (Kienholz, 1994; FEMA, 2001; Sterlacchini et al., 2007) quali: identificazione e caratterizzazione degli eventi potenzialmente dannosi (Pericolosità); inventario dei beni e delle risorse presenti nell'area (individuazione degli Elementi a Rischio); definizione indicativa degli Scenari di Rischio; preparazione di Piani per la Gestione delle Emergenze (Modello di Intervento).

Lo schema di riferimento adottato per l'organizzazione dei Servizi Comunali di Protezione Civile e per la stesura dei Piani di Emergenza Comunale (PEC) risulterà conforme a quanto riportato dalla Direttiva Regionale per la Pianificazione di

Emergenza degli Enti Locali (L.R. 16/2004 – art. 7, comma 11), approvata con D.G.R. n. VIII/4732 del 16 maggio 2007. Ne consegue che i piani in oggetto prevedranno l'applicazione sequenziale di quattro passi operativi in un contesto metodologico in grado di combinare le potenzialità dei Sistemi Informativi Territoriali (per la gestione delle informazioni geografiche), dei Sistemi di Supporto alle Decisioni (per giungere ad una gestione integrata dei processi decisionali in termini di azioni, istruzioni di esecuzione, soggetti coinvolti, documenti utili a ciascuna azione, entità coinvolte, risorse disponibili) e delle più moderne tecnologie mobili (per la comunicazione).

Nell'ambito del rischio industriale l'analisi della *Pericolosità* è legata sia agli stabilimenti soggetti al D.Lgs. 334/99, sia alle altre aziende che per tipologia di sostanze impiegate e processo produttivo sono suscettibili di generare incidenti. Per le aziende ad alto rischio (art. 8 D.Lgs. 334/99) il riferimento è il Piano di Emergenza Esterno (PEE) predisposto dalla Prefettura, che deve essere integrato all'interno del Piano Comunale di Protezione Civile. Per le altre aziende e per il rischio legato al trasporto di merci pericolose la pericolosità può essere definita in base alle linee guida contenute nella "Direttiva Grandi Rischi – Linee guida per la gestione di emergenze chimico – industriali" (D.G.R. 15496 del 5/12/2003). Ai fini della determinazione della *Pericolosità*, per ogni insediamento a rischio è necessario individuare le tipologie incidentali, definite dalla normativa in base al tipo di sostanze e al processo di lavorazione operato nello stabilimento. Le informazioni relative a ciascun insediamento industriale sono contenute nel censimento effettuato nell'ambito della redazione del Piano di Emergenza Provinciale per il Rischio Industriale (Prefettura e Provincia di Bergamo, 2004) e nella banca dati AIAP (Archivio Integrato delle Attività Produttive) di ARPA Lombardia.

Nell'individuazione degli Elementi a Rischio l'attenzione si sposta sull'analisi dell'interazione dell'evento incidentale con gli elementi vulnerabili presenti sul territorio e le strutture e le risorse disponibili in ogni comune per fronteggiare le emergenze. A questo scopo sono stati raccolti i dati cartografici relativi a: aree edificate e centri urbani, insediamenti industriali, sedi istituzionali, sedi delle strutture operative (Carabinieri, Vigili del Fuoco, Polizia Locale), sedi dei centri operativi (Unità di Crisi Locale, Centro di Coordinamento Soccorsi, Centro Operativo Misto, Centro Operativo Comunale), strutture utilizzabili come aree di emergenza e funzionali (attesa, ricovero/accoglienza, ammassamento), edifici pubblici e luoghi di possibile affollamento (centri sensibili), eliporti, *life-lines* ed impianti energetici, reti tecnologiche principali (acquedotti, fognature), viabilità principale e viabilità minore. L'individuazione degli elementi vulnerabili/strategici è stata effettuata ad un livello di dettaglio comunale, come previsto dalla normativa per i piani intercomunali: i dati cartografici e alfanumerici sono stati organizzati all'interno di un *Geodatabase* realizzato, alla scala 1:2.000.

Il passo successivo consiste nell'elaborazione degli Scenari di Rischio che rappresentano l'interazione dell'evento incidentale con gli Elementi a Rischio. Sulla base delle tipologie incidentali verranno individuate le diverse "zone a rischio", ovvero le aree in cui si ipotizza che vengano superati

determinati valori soglia che determinano tre livelli di effetti dannosi a persone, strutture e ambiente e che quindi vanno distinte nella pianificazione di emergenza. Le tre zone consistono in (Fig. 1): **zona I o “di sicuro impatto”** (raggiungimento/superamento valori di soglia relativi alla fascia di elevata letalità); **zona II o “di danno”** (tra il limite di elevata letalità e quello oltre il quale non sono ipotizzabili danni gravi ed irreversibili); **zona III o “di attenzione”** (esterna alla precedente in cui sono ipotizzabili solo danni lievi o reversibili, o sensibilizzazione di persone particolarmente vulnerabili).

La creazione di uno scenario, in un contesto di Protezione Civile, consente, sia in fase preventiva (esercitazione, formazione del personale che gestirà l'emergenza, informazione alla popolazione) che in fase operativa (cioè di emergenza in atto, nel caso in cui lo scenario che si verifica presenti aspetti analoghi a quello prospettato) di elaborare uno specifico Modello di Intervento.

Scenario incidentale	Parametro di riferimento	Soglie di danno a persone e strutture				
		Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili	Danni alle strutture Effetti Domino
Incendio (Pool-Fire e Jet-Fire)	Radiazione termica stazionaria	12.5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²	12.5 kW/m ²
Flash-Fire	Radiazione termica istantanea	LFL	1/2 LFL			
UVCE/VCE	Sovrappressione di picco	0.6 bar (0.3)	0.14 bar	0.07 bar	0.03 bar	0.3 bar
Rilascio tossico	Concentrazione in atmosfera	LC ₅₀ 30 min		IDLH	LOC	
Zona di pianificazione d'emergenza		I Zona	II Zona	III Zona		

Fig. 1 – Valori di riferimento per le valutazioni degli effetti. Direttiva Regionale Grandi Rischi. D.G.R. 15486 del 5/12/2003.

Questa fase prevede l'impiego dell'applicativo **PETer** (Protezione Emergenza Territorio), software sviluppato dalla Globo S.r.l. in collaborazione con il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio e l'Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali del Consiglio Nazionale delle Ricerche per supportare la costituzione e il mantenimento di Piani di Protezione Civile, in conformità alle normative in materia di Protezione Civile (L. 225/92 e Metodo Augustus, 1996). **PETer** si configura come un'evoluzione dei Sistemi Informativi Territoriali che consente di passare da un SIT “statico” a un SIT “dinamico”: è in grado, cioè, di utilizzare dati cartografici e dati alfanumerici nell'ambito di procedure operative, attraverso moduli di *workflow management*. Questa caratteristica dell'applicativo consente il monitoraggio in tempo reale di attività, procedure e flussi di informazioni in modo da supportare con maggiore efficienza sia la pianificazione che la gestione in tempo reale dell'emergenza.

E' possibile definire l'intero *workflow procedurale* (Fig. 2): ad ogni passo della procedura si ha la possibilità di associare le istruzioni e la tempistica di esecuzione, i soggetti coinvolti, i documenti necessari, le entità (rischi, risorse, strutture) coinvolte. Le procedure operative sono descritte attraverso diagrammi di flusso, che consentono un'esecuzione guidata dei singoli passi. In tal modo è possibile collegare a ciascuno

scenario di rischio individuato sul territorio un modello di intervento basato su azioni ben definite, calibrato sull'Unità di Crisi Locale (UCL) e sulle risorse effettivamente disponibili in loco per la gestione ed il superamento della fase di emergenza.

L'obiettivo della realizzazione di un Piano di Emergenza Intercomunale è quello di delineare un modello di intervento comune per tutta l'area dell'Isola, in modo da avere il massimo coordinamento degli interventi di Protezione Civile all'interno di un territorio che condivide lo stesso tipo di rischi e in cui eventi di Protezione Civile possono coinvolgere più Amministrazioni Comunali contemporaneamente. Per questo motivo **PETer** si fonda su un modello organizzativo di tipo collaborativo, caratteristica che permette di realizzare un Sistema Informativo in un ambito più ampio di quello del singolo comune, quale il Consorzio costituito nell'area oggetto di studio.

In conclusione, la gestione di un'emergenza si configura come una operazione la cui complessità rappresenta la

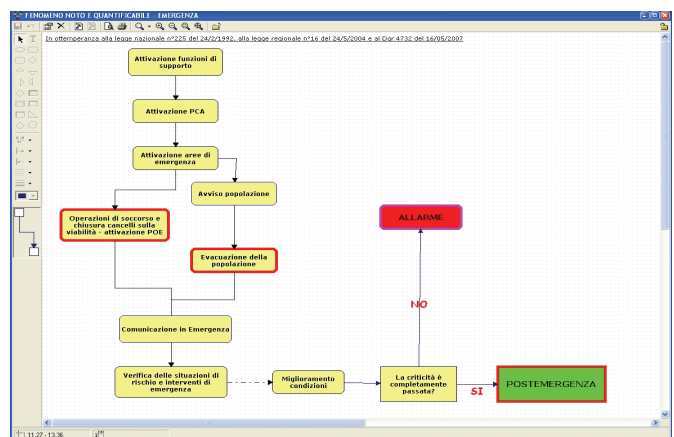


Fig. 2 – Visualizzazione di una Procedura in **PETer**

principale difficoltà che i diversi soggetti coinvolti incontrano sia nella fase pianificatoria che nella fase operativa. Tale complessità consiste nel bisogno di integrare e coordinare le azioni di molti e diversi attori, portatori di competenze e conoscenze differenziate, tutte necessarie al superamento dell'emergenza in corso.

In questo senso, l'evoluzione più recente della normativa italiana relativa alla Pianificazione di Emergenza degli Enti Locali ha consentito una modernizzazione delle metodologie di gestione delle emergenze. A questo scopo viene proposta l'implementazione di un Piano di Protezione Civile con l'impiego delle più moderne tecnologie dell'*Information and Communication Technology*, che consentono una gestione più efficiente degli eventi di Protezione Civile in termini operativi, quindi per tutti quegli aspetti che riguardano un miglior coordinamento delle risorse, delle strutture, dei soggetti coinvolti, ma soprattutto delle azioni da svolgere, mirata ad un esito positivo degli interventi.

L'obiettivo di questo approccio è quello di “automatizzare” e quindi velocizzare la risposta delle strutture coinvolte in una situazione di emergenza, conducendo ad una sensibile riduzione dei tempi di intervento da parte delle strutture e dei soggetti che devono attivarsi in caso di necessità, così come ad un aumento nell'efficienza di risposta in termini qualitativi.

REFERENCES

FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY) (2001) - Identifying Hazards and Estimating Losses. State and Local Mitigation Planning, Washington D.C., 166.

KIENHOLZ H. (1994) – Naturgefahren-Naturrisiken im Gebirge. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, **145**, 1-25.

STERLACCHINI S., FRIGERIO S., GIACOMELLI P. & BRAMBILLA M. (2007) – Landslide and Risk Analysis: a multi-disciplinary methodological approach. Natural Hazards Earth System Sciences, **7**, 657-675.

LEGISLAZIONE

VI COMMISSIONE CONSILIARE AMBIENTE E PROTEZIONE CIVILE REGIONE LOMBARDIA (2008) - PRIM 2007-2010, Programma Regionale Integrato di Mitigazione dei Rischi, Documento Tecnico-Politico. D.G.R. n. 7243 del 08/05/2008, 1- 41.

VI COMMISSIONE CONSILIARE AMBIENTE E PROTEZIONE CIVILE REGIONE LOMBARDIA (2008) - PRIM 2007-2010, Programma Regionale Integrato di Mitigazione dei Rischi, Studi Preparatori – Rischi maggiori in Lombardia . D.G.R. N. 7243 DEL 08/05/2008, 155-187.

DECRETO LEGISLATIVO N. 334 DEL 17/08/1999 - Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose. *G. Uff. Suppl. Ordin. N. 228 de 28/09/1999.*

DECRETO LEGISLATIVO. N.238 DEL 21/09/2005 - Attuazione della direttiva 2003/105/CE, che modifica la direttiva

96/82/CE, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose. *G. Uff. n. 271 del 21/11/2005, Suppl. Ordin. N. 189.*

GRUPPO DI LAVORO UNIFICATO PROVINCIA DI BERGAMO – PREFETTURA (2004) - Piano di Emergenza Provinciale, Rischio Industriale. Decreto del Prefetto di Bergamo n.171/4.3/Area III dell'8 marzo 2004; Delibera del Consiglio Provinciale n. 8 del 19 /02/2004, 1-124.

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI. DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE (2005) - D.P.C.M. 25 /02/2005. Pianificazione dell'Emergenza Esterna degli stabilimenti industriali a rischio d'incidente rilevante – Linee Guida. *G. Uff. Suppl. Ord. N. 62 del 16/03/2005.*

PROTEZIONE CIVILE PROVINCIA DI BERGAMO (2001). Piano Provinciale di Protezione Civile. Programma di previsione e prevenzione dei rischi – Relazione generale. *Delibera del Consiglio Provinciale n. 58 del 08/07/2002.*

REGIONE LOMBARDIA. Legge Regionale n. 19 del 23/11/2001. Norme in materia di attività a rischio di incidenti rilevanti. *BURL n. 48, Suppl. Ord. N. 1 del 27/11/2001.*

REGIONE LOMBARDIA (2003) - Direttiva Regionale Grandi Rischi: linee guida per la gestione delle emergenze chimico-industriali (ai sensi della l. r. 1/2000, art. 3, comma 131). *D.G.R. 15486 del 5/12/2003. BURL n. 52, Serie Ordinaria del 22/12/2003.*

REGIONE LOMBARDIA. Legge Regionale n. 16/2004, art. 7, comma 11, Allegato A. Direttiva Regionale per la Pianificazione di Emergenza degli Enti Locali. *D.G.R. n. VIII/4732 del 16/05/2007. BURL n. 30, 1° Suppl. Straord. del 24/07/2007.*

Stima della componente glaciale nel bilancio idrico. Il caso studio del bacino valtellinese del fiume Adda

F. VILLA(*), A. ROSSETTI (**), M. BRAMBILLA (**), P. GIACOMELLI (**), V. MAGGI(*) & A. CAVALLIN(*)

ABSTRACT

Stima della componente glaciale nel bilancio idrico. Il caso studio del bacino valtellinese del fiume Adda

The aim of this work is to investigate the influence of the glacier melt in the water balance. A first estimate of the amount of glacial-derived water in the upper Adda river basin was made by using and comparing different methods to quantify the glacial component in the monthly average water balance. It was estimated that glaciers released between 50 and 100*10⁶m³ of water within the upper Adda basin in the last years. Trying to distribute this value through the year, it appears that the glacial meltwater represents about 10-15% of the river flux at the Fuentes section in August.

Key words: *Adda, Fuentes, glacier melt, water balance.*

INTRODUZIONE

I ghiacciai, nella loro attuale fase di regresso, vengono spesso utilizzati come la più immediata e comprensibile evidenza degli effetti del riscaldamento globale. In particolare i ghiacciai Alpini, per i quali è disponibile una storia di monitoraggio lunga in alcuni casi quasi due secoli, sono localizzati in aree fortemente antropizzate e le loro variazioni vengono avvertite direttamente, almeno in termini qualitativi, anche dalla popolazione locale.

Il regresso dei ghiacciai Alpini, oltre che un fenomeno di studio di interesse glaciologico e meteorologico, ha delle implicazioni anche dal punto di vista del bilancio dell'acqua a livello locale (oltre che a livello mondiale, contribuendo all'aumento del livello degli oceani [MEIER *et alii*, 2007]).

Le acque di fusione glaciale alimentano nella stagione estiva i torrenti di alta montagna, quando la fusione nivale è giunta al termine, regolando così il loro regime, che è tipicamente di piena nelle ore pomeridiane e di magra nelle ore

mattutine, in accordo con l'irraggiamento solare ricevuto dalle superfici glaciali.

A livello cumulativo gli effetti si sommano sui corpi idrici primari, le cui acque vengono utilizzate a scopi energetici (centrali idroelettriche) ed a scopi irrigui. La fusione estiva dei ghiacciai rappresenta così uno stock di acqua dolce che viene rilasciata tanto più il clima è caldo e secco, ma che tende ad esaurirsi. Recenti studi [HAEBERLI *et alii*, 2007] stimano una scomparsa pressoché completa dei corpi glaciali Alpini entro i prossimi 50 anni.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di produrre una stima preliminare della componente glaciale nella portata idrica del fiume Adda, misurata alla stazione di Fuentes (SO).

L'AREA DI STUDIO

Il bacino idrografico del fiume Adda attraversa la Regione Lombardia da nord a sud per 313 km, coprendo un'area complessivamente pari a 7.979 km². Il bacino può considerarsi diviso in tre aree, differenti dal punto di vista geografico così come da quello socio-economico: la Valtellina, il Lago di Como ed un settore della Pianura Padana. In Valtellina, il fiume Adda scorre in direzione da nord-est a sud-ovest nella prima parte e da est a ovest nella seconda, attraversando la larga valle glaciale per 119 km.

L'Adda si immette nel lago di Como a Colico, dove è situata la stazione idrometrica di Fuentes, che è stata considerata in questo studio come rappresentativa dei volumi circolanti complessivi provenienti dalla Valtellina. La stazione di Fuentes presenta serie storiche complete all'idrometro a partire dai primi anni '60. Lo studio dei deflussi registrati alla stazione di Fuentes permette di comprendere le dinamiche di disponibilità delle risorse idriche del bacino dell'Adda. Il sistema può venire schematizzato come un insieme di riserve (costituite da bacini di origine naturale o artificiali) interconnesse tramite flussi, con caratteristiche differenti di distribuzione temporale delle risorse; le riserve accumulano in aree limitate grandi volumi idrici, mentre i flussi distribuiscono su tutto il bacino le risorse disponibili. Si sottolinea come la distribuzione delle risorse in tali segmenti sia fondamentale per quantificare i volumi complessivi, e la gestione nel tempo di tali deflussi influenza la disponibilità di risorsa a valle.

La Valtellina è caratterizzata da un intenso sfruttamento

(*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano-Bicocca, Milano

(**) Dipartimento di Economia, Politica Agraria, Agro-alimentare e Ambientale, Università degli Studi di Milano, Milano

Ricerca effettuata nell'ambito del Progetto RICLIC (Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and Applications), finanziato da Università degli Studi di Milano-Bicocca, Fondazione Lombardia Ambiente e Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia.

idroelettrico. Infatti, circa l'80% di corsi d'acqua e torrenti sono captati e derivati per la produzione idroelettrica [BETTINI, 2003]. Quattro grandi società (ENEL, EDISON, A2A, EDIPOWER) gestiscono la quasi totalità di canali, derivazioni, bacini e centrali presenti sul territorio. Questo complesso sistema di strutture altera notevolmente i cicli naturali ed in alcuni casi ha l'effetto di convertire i flussi idrici (derivanti da precipitazioni e scioglimento nivoglaciale) in stock di risorsa immagazzinata. La gestione dei rilasci per la produzione di energia determina la disponibilità idrica a valle, rappresentando da un lato un'ulteriore riserva di acqua da gestire in periodi di siccità, ma generando nel contempo episodi di conflitto tra gli utilizzatori a valle dei serbatoi. Alcuni di questi impianti, infatti, dispongono di un bacino artificiale che viene gestito in base alle esigenze di produzione di energia (centrali a bacino). Altre centrali sono collegate direttamente agli scarichi di questi bacini (centrali collegate), e in altri casi turbinano acqua in base a quanta è disponibile nel dato istante nel corso d'acqua (centrali ad acqua fluente). L'organizzazione "a cascata" di queste strutture permette di ottimizzare gli utilizzi idrici, al punto che i volumi effettivamente turbinati possono rappresentare quasi il triplo dei reali volumi disponibili. Nell'anno 2006 su 1,859,321,355 di metri cubi captati, i volumi turbinati sono stati pari a 4,921,396,700 mc, cioè circa 2.6 volte tanto. Nello stesso anno, il 93% dell'intero volume transitato alla sezione di Fuentes è stato convogliato almeno una volta all'interno di una turbina idroelettrica (dati forniti dal Settore lavori pubblici, pianificazione territoriale ed energia, Servizio acque ed energia, Provincia di Sondrio).

Il bacino idrico che sottende la stazione di Fuentes è condizionato inoltre da alcune captazioni di acqua dalle valli svizzere confinanti. Nell'ambito di questo lavoro il contributo derivante da tali captazioni non è stato considerato, ed è stato sottratto alle misure di portata rilevate alla stazione idrometrica.

STIMA DEL VOLUME DI ACQUA DERIVANTE DALLA FUSIONE GLACIALE

La stima della componente glaciale è stata condotta utilizzando due diversi approcci: il primo è quello di stimare il volume complessivo di ghiaccio presente nel bacino di interesse utilizzando due diversi modelli (modello di Haeberli [HAEBERLI *et alii*, 1995] ed il Volume-Area Scaling [BAHRI *et alii*, 1997]) e successivamente derivare il volume medio annuo delle acque di fusione come frazione del volume totale di ghiaccio (negli ultimi 10 anni i ghiacciai Alpini stanno perdendo circa il 2-3% del loro volume ogni anno [HAEBERLI *et alii*, 2007]).

Il secondo approccio è stato quello di stimare direttamente il volume delle acque di fusione moltiplicando il valore medio di ablazione (derivato dai dati di Bilancio di Massa pubblicati dal World Glacier Monitoring Service [IAHS *et alii*, 2003, IUGG *et alii*, 2005, ICSU *et alii*, 2007, IUGG *et alii*, 2005] e dal Servizio Glaciologico Lombardo) per la superficie glacializzata del bacino. Il valore medio di ablazione stimato

corrisponde a 1,5 m W.E. (Water Equivalent).

I valori ottenuti, come previsto, hanno una grande variabilità: dal primo approccio si stimano circa 50 Milioni di m³ di acqua di fusione prodotta annualmente nel bacino considerato, mentre il secondo approccio stima un valore circa doppio. Ovviamente non ha senso cercare un valore preciso, in quanto sia l'andamento idrico fluviale, ma soprattutto l'ablazione glaciale variano fortemente di anno in anno, essendo funzione dei parametri meteorologici.

Il problema successivo è quello di distribuire questi valori all'interno dell'anno ed è stato risolto considerando che la fusione glaciale inizi a metà Giugno e termini a fine Settembre; all'interno di questo arco temporale l'acqua di fusione è stata distribuita proporzionalmente alla percentuale di ghiaccio scoperto, stimata supponendo un andamento lineare ed una situazione di completa scopertura a fine Agosto.

In figura 1 viene mostrato l'andamento medio della portata mensile cumulata del fiume Adda alla stazione di Fuentes e vengono rappresentati due scenari di come varierebbe tale portata senza la presenza dell'apporto glaciale, che come si nota rappresenta rispettivamente il 10% e il 20% circa della portata nel mese di Agosto.

CONCLUSIONI E SVILUPPI PREVISTI

Il lavoro descritto è un primo approccio semi-quantitativo per la stima della componente glaciale nel bilancio idrico del bacino valtellinese del fiume Adda. Dalle prime stime sembra che, effettuando la valutazione alla stazione di Fuentes, nel periodo di Agosto-Settembre, circa il 10-15% della portata sia di origine glaciale.

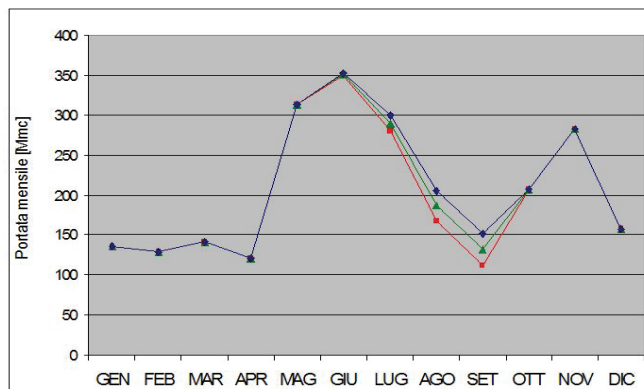


Fig. 1 – Portata media mensile del fiume Adda, misurata alla stazione di Fuentes. La linea blu rappresenta la portata misurata, mentre le linee verde e rossa rappresentano come varierebbe tale parametro senza l'apporto glaciale. Nel primo scenario (linea verde) l'apporto glaciale stimato è di $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, mentre nel secondo scenario (linea rossa) l'apporto glaciale stimato è doppio.

Questo dato verrà utilizzato come base per una valutazione economica del regresso glaciale, stimando quanto la riduzione (o la totale scomparsa) dell'acqua stoccata nei corpi glaciali andrà ad influire sull'economia dei bacini idroelettrici, che hanno una grande diffusione nell'area di studio analizzata.

Inoltre, la spazializzazione dell'apporto glaciale potrà

essere utilizzata negli studi in corso presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Milano-Bicocca sulla deposizione e sul rilascio degli inquinanti in aree di alta montagna.

REFERENCES

- BAHR D.B., MEIER M.F., PECKHAM S.D. (1997) – *The physical basis of glacier volume-area scaling*. Journal of Geophysical Research, **102** (B9), 20355-20362.
- BETTINI G., (2003) - *La risorsa acqua nelle aree montane. La Valtellina come caso esemplare*. Atti della conferenza: “La gestione dei servizi idrici nelle aree montane”, 1-28.
- HAEBERLI W., HOELZLE M., PAUL F., ZEMP M. (2007) – *Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps*. Annals of Glaciology, **46**, 150-160.
- HAEBERLI W., HOELZLE M. (1995) - *Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps*. Annals of Glaciology, **21**, 206-212.
- IAHS (ICSI), UNEP, UNESCO, WMO (2003) - *Glacier mass balance bulletin No. 7 (2000-2001)*. Published by WGMS.
- IUGG (IACS), UNEP, UNESCO, WMO (2005) - *Glacier mass balance bulletin No. 8 (2002-2003)*. Published by WGMS.
- ICSU (FAGS), IUGG (IACS), UNEP, UNESCO, WMO (2007) - *Glacier mass balance bulletin No. 9 (2004-2005)*. Published by WGMS.
- IUGG (CCS), UNEP, UNESCO (2005) - *Fluctuations of glaciers 1995-2000, Vol 8*. Published by WGMS
- MEIER M.F., DYURGEROV M.B., RICK U.K., O'NEEL S., PFEFFER W., ANDERSON R.S., ANDERSON S.P., GLAZOVSKY A.F. (2007) – *Glaciers Dominate Eustatic Sea-Level Rise in the 21st Century*. Science, **317** (5841), 1064–1067