

# SMC

SUSTAINABLE MEDITERRANEAN CONSTRUCTION  
LAND CULTURE, RESEARCH AND TECHNOLOGY

SMC - Official Magazine of SMC (Sustainable Mediterranean Construction Association) - Online edition: <http://www.sustainablemediterraneanconstruction.eu> - Autorizzazione del Tribunale di Napoli n.29 del 09/06/2011

FOCUS ON

## TRADITIONAL CONSTRUCTION VS. SUSTAINABLE ISSUES

N. SEVENTEEN

2023

**LUCIANO EDITORE**



## SMC MAGAZINE N. SEVENTEEN/2023

- 005\_ TRADITIONAL CONSTRUCTION: BIOCLIMATIC VOCATION AND RECOVERY STRATEGIES  
*Dora Francese*
- 017\_ BOARDS AND INFORMATION
- FOCUS ON TRADITIONAL CONSTRUCTION VERSUS SUSTAINABLE ISSUES
- 018\_ TRADITION AND INNOVATION IN BIOCLIMATIC TECHNOLOGIES FOR CONTROLLING OUTDOOR MICROCLIMATES IN THE MEDITERRANEAN REGION  
*Luigi Alini, Francesco Nocera, Maurizio Detommaso*
- 023\_ THE IMPACT OF MODIFYING COURTYARD WALL GEOMETRIES ON THERMAL PERFORMANCE AND NATURAL VENTILATION OF TWO-STORY BUILDING  
*Ahmed A. Freewan, Anas Khatatbeh*
- 029\_ THE PROPAGATION OF PRESSURES IN A PANEL OF STONE MATERIAL  
*Luca Buoninconti*
- 039\_ RESTORATION OF MARRAKECH ANCIENT MEDINA FONDOUKS (MOROCCO) STEPS AND PROCESSES  
Case of Fondouk El Kebbaj  
*A. Khiara, K. Rkha Chaham, S. Bensallam, M. Ibnoussina*
- 046\_ TANKING UP WITH ARCHITECTURE. The Lago do Jardim de Jericó in Valverde, Portugal  
*Stefanos Antoniadis, Luigi Stendardo*
- 051\_ THE HIDDEN INGENUITY IN THE GREEK RURAL ARCHITECTURE  
*Dimitrios Kontaxakis, Eleni Nlkopoulou, Fani Vavili*
- 057\_ ENVIRONMENTAL RETROFITTING OF A SCHOOL BUILDING STOCK. NOTES FOR A DESIGN PROCESS MODEL  
*Roberto Bosco, Savino Giacobbe, Renata Valente*
- 063\_ AT THE ROOTS OF ARCHITECTURE. THE PROJECT IN THE MEDITERRANEAN RURAL LANDSCAPE  
*Bruna Di Palma*
- 069\_ BUILD UP A MODEL FOR ASSESSING SUSTAINABLE URBAN REDEVELOPMENT PERFORMANCE  
*Mustafa Al-Alwani, Suad Al-Fatlawi*
- 073\_ PLACES THAT TEACH HOW TO LIVE IN THE AGE OF ECOLOGICAL TRANSITION  
*Rosa Maria Vitrano*
- 089\_ DEVELOPING NEW METHOD FOR MORE SUSTAINABLE TRADITIONAL STREETS  
*M. Al-Alwani, M. Chabuk*
- 093\_ ROCKFALL AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE SORRENTO-AMALFI PENINSULA  
*Paolo Budetta*
- 099\_ BUILDING PERFORMANCE SIMULATION: A COMPARISON BETWEEN TWO DESIGN PROPOSALS FOR A RESIDENTIAL BUILDING  
*Angelo Picariello, Luca Buoninconti, Dora Francese*



# ROCKFALL AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE SORRENTO-AMALFI PENINSULA

## Abstract

Based on an inventory of 721 rock landslides happened in the time span between 1899 and 2019 (120 years), the rockfall susceptibility affecting the Sorrento-Amalfi Peninsula has been evaluated. Both wide rock landslides (e.g.: Amalfi 1899, M. Catiello 2002) and small movements involving cliffs only a few hundred square meters wide, affect this area. Landslide data from different sources (IFFI Catalogue, bibliography, newspapers, websites, and on-site surveys) were processed to obtain the areal rockfall density (number of landslides/km<sup>2</sup>) of an area of about 303 km<sup>2</sup> (including Capri), divided into 33 municipal territories. Also, the linear densities (number of landslides/km) for the two main state roads crossing the region (no. 163 Amalfitana and no. 145 Sorrentina), and coastline were evaluated. Even though there were an incomplete information concerning many failures, it was possible to draw susceptibility maps, the contents of which are explained and commented below. These maps can be considered useful tools for promoting the sustainable development of the area.

**Keywords:** *Rock landslides, Rockfall susceptibility, roads, rocky coasts, Sorrento-Amalfi peninsula*

## Introduction

The Sorrento-Amalfi Peninsula (together with the Capri Island) is a heritage of exceptional landscape and cultural value, produced by the interactions between humans and environment. Limited to the Amalfi Coast, this cultural landscape has been inscribed on the UNESCO World Heritage List since 1997. Nevertheless, this is a fragile environment exposed to increasingly serious hydrogeological disasters caused by its geological layout, poorly designed building interventions and arrangements, lack of ordinary maintenance of the carried out works and - finally - current climate change. More recurrent disasters are linked to landslides, affecting all outcropping terrains, and flash floods. Consequently, in the *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* (PSAI) of the former "Destra Sele" and "Regionale Sarno" Basin Authorities, most of municipal territories have been classified in P3 and P4 classes (high and very high landslide hazard). It should be noted that this landslide hazard zonation was performed by paying less

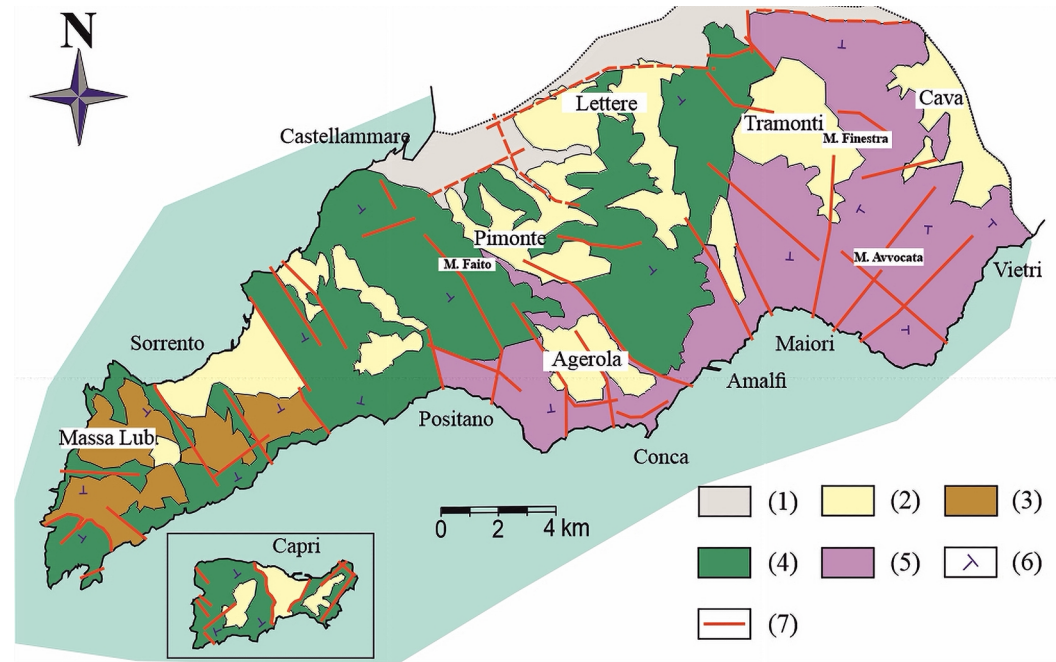


Fig.1 –Geological map of the study area. Key: (1) Detrital-alluvial deposits (upper Pleistocene); (2) pyroclastic fall deposits and Campanian Ignimbrite (upper Pleistocene–Holocene); (3) flysch deposits (Miocene); (4) limestones (Mesozoic); (5) dolomitic limestones (Mesozoic); (6) attitude of bedding planes; (7) main faults

attention to rock landslides, considering that a truly significant technical-economic commitment is required for their study. For any slope or cliff, very detailed topographical maps are needed which must be drawn making use of laser scanner and/or digital photogrammetry. Several and detailed geo-structural and geo-mechanical surveys also are needed. Considering that several small rockfalls affect densely populated areas, high costs ensue. The aim of this study is to outline the general framework of rock landslides affecting the area, placing emphasis on the rockfall susceptibility, at the scale of the individual municipal area, for the two main state roads (no. 163 Amalfitana and no. 145 Sorrentina), and the entire coastline.

As the triggering dates, mobilized volumes (magnitude) and runout distances of several movements are not known, only the susceptibility assessment has been performed, whereas a quantitative hazard assessment (probability of occurrence and intensity) is not possible. However, as the notion of susceptibility assumes that historical landslides and their causal relationships can be used to predict future ones, it follows that the areas that have suffered rockfalls in the past will do

so also in the future, since the triggering factors (topography, geology, geomorphology, land use) remain unchanged [1]. Therefore, the susceptibility maps are useful tools for territorial and urban planning.

Rock landslide data come from the IFFI (*Inventario Fenomeni Franosi in Italia*) Inventory, bibliography, chronicle reports (newspapers and websites) and on-site surveys and refer both to wide landslides (e.g.: Amalfi 1899, M. Catiello 2002) and small movements, which involved cliffs only a few hundred square meters wide, in the past. The Inventory, consisting of 721 landslides, covers a time span between 1899 and 2019 and refers to an area of approximately 303 km<sup>2</sup> (including Capri), divided into 33 municipal territories.

## Geological and geomorphological layout

The Sorrento-Amalfi Peninsula is a geological structure transversally oriented respect to the NW-SE Apennine chain and is made up of an Upper Triassic to Miocene sedimentary sequence including limestones, dolomitic-limestones, and arenaceous-clayey flysch (Fig. 1). The sequence is referred to the stratigraphic-structural unit Monti Picentini - Monti Lattari [2] and is covered by Quaternary

terrains consisting of ancient calcareous breccias, alluvial-fan deposits, pyroclastic materials, debris, beach deposits and landslide debris [3].

The structure is a rather regular monocline dipping 20-30° towards NW affected by several transverse normal faults (sometimes low-angle normal faults -LANFs), and some Miocene thrust faults, mostly between carbonate slabs [4].

The present-day orographic setting of the Peninsula is the result of a series of phases of tectonic uplift and phases of erosion [5]. A first uplift occurred between the end of the Miocene and the beginning of the Pliocene, followed by a long erosive phase leading to the formation of a large paleo-surface which was successively dissected into numerous horst and graben structures during a new tectonic phase of the Lower Pleistocene; remnants can be seen in isolated relic slabs on the peaks of the Peninsula (M. Erasmo, M. Cerasuolo and M. Comune), and in some depressions such as the plains of Agerola and Ravello. In the Middle Pleistocene a new tectonic uplift caused the rejuvenation of morphologic features and resulted in the present height of the relief. The combined action of linear erosion and karst erosion, most active during the last Glacial Wurm, considerably modelled the relief, characterized now by the presence of numerous steep slopes and cliffs [5].

#### Kinematics and triggering factors of the surveyed landslides

In the studied area, all main types of rock landslides are present such as plane, wedge and toppling failures, sometimes evolving in rock avalanches. Failures are usually located along slopes with steeply inclined bedding planes, fault scarps, road cuts and coastal cliffs. The most recurrent triggering factors are linked to the rock mass jointing, karst erosion, groundwater circulation, root wedging, daily thermal cycle (especially in the summer months), wave action (at the base of the coastal cliffs) and, finally, forest fires (causing falls of already detached blocks, temporarily held back by the vegetation).

Regarding the involved rock masses, it should be observed that the largest number of rockfalls occur in limestones and dolomitic limestones, because their high jointing degree causes a high degree of kinematic freedom.

Along the northern slope of the entire monocline (Fig.1), outcropping stratified limestones are sometimes in daylight with interbedded clayey and ductile layers. Here, large plane failures are found, particularly between Pozzano and Vico Equense [6]. Instead, along the southern slope of the Peninsula, where dolomite and calcareous-dolomitic rocks outcrop, typical morphologies such as pinnacles are present. These landforms originate for karst erosion affecting the slightly inclined stratification, intersected by sub-vertical joint systems, some of which parallel to the slope. Due to karst erosion, sometimes accompanied by thermo-clastic processes and gravity, toppling phenomena may affect these pinnacles [7].

Some wide landslides are due to the collapse of cave roofs caused by karst erosion, as in the case of the Cappuccini landslide (Amalfi 1899). Here, a failure involving several thousand cubic metres of carbonatic rocks caused a rock avalanche of about 20,000 m<sup>3</sup> [5]. A predisposing factor like the one just described have also been recognized near the Grotta del Saraceno site, on whose vault stands part of the Furore village. Here, a possible collapse also caused by changes in the viscoelastic state of rock masses surrounding the cavity, could trigger a catastrophic landslide capable of reaching the coastline [8].

Along the coastline, due to the greater height of the cliffs as well as the higher degree of jointing affecting the rock masses, the southern coastal stretch is most affected by rockfalls. Cyclic stresses caused by wave motion, particularly in the winter periods, and thermo-clastic effects varying over time, also act. In the Sorrento area, failures are mostly due to undercutting by wave motion at the base of the tuffaceous cliffs, and flowing waters in deep gorges ("cavoni") intersecting the local tuffaceous slab on which the town rises.

#### Rockfall susceptibility assessment

Despite some difficulties related to the approximation concerning data source, surveyed landslides were initially located on the regional cartography at the scale of 1:5000. Then, the obtained general framework was elaborated to assess the rockfall susceptibility at the municipal scale, for the two state roads and coastline.

#### Municipalities

The studied area is divided into 33 municipal areas, for which the rockfall density (number of landslides/km<sup>2</sup>) was evaluated (Figs. 2 and 3). Some municipalities located in the SE area of the peninsula (Maiori, Tramonti, and Vietri sul Mare) are affected by the greatest number of events, unlike those located along the northern side where the smallest number of landslides

was detected in Massa Lubrense, Sorrento, and Castellammare. Excluded Atrani (the smallest municipality in Italy with an area of just 0.12 km<sup>2</sup>), if we consider the extensions of the municipal territories, Conca dei Marini, Capri, Praiano, and Maiori have the highest rockfall densities (Fig. 3). For the whole study area, an average density of about 2.38 landslides/km<sup>2</sup> results (Tab. 1).

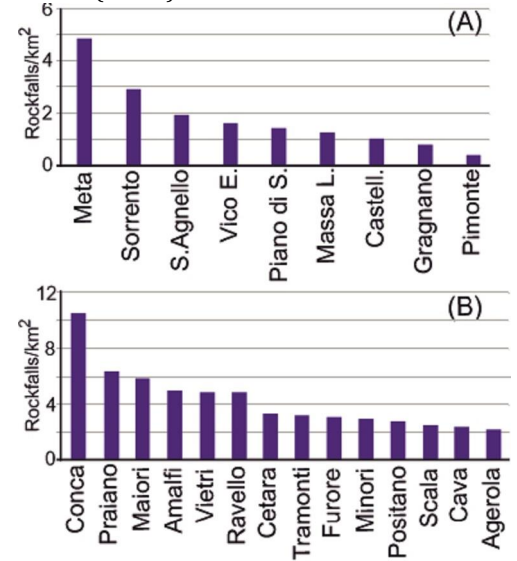


Fig.3 – Rockfall densities of the municipal territories. (A) Northern slope; (B) Southern slope.

Since there are several small rockfalls which cannot be mapped at the scale 1/5000, it was not possible to draw the isopleths, and to define the percentage of landslide areas [9]. Therefore, the number of events surveyed in polygonal areas ranging between 0.15 and 1 km<sup>2</sup> were represented by means of symbols with dimensions proportional to the number of recorded events and located in the centre of the pertinent area (Fig. 2).

Comparing this map with the geological one (Fig. 1), it is possible to observe that failures are mostly concentrated where highly fractured dolomite and dolomitic limestones crop out.

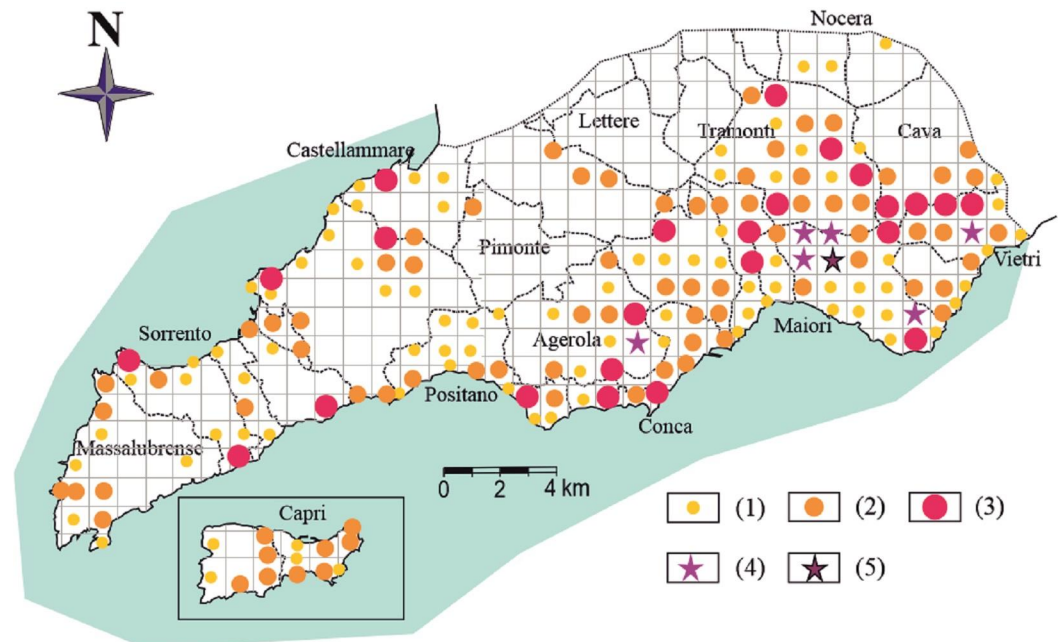


Fig.2 – Rockfalls map. Key: (1) Up to 2 rockfalls; (2) 3- 6 rockfalls; (3) 7-10 rockfalls; (4) 11-14 rockfalls; (5) greater than 14 rockfalls.

Total area Km <sup>2</sup>	Residents	Punctual events	Areal events	Total events	Density Rockfalls/Km <sup>2</sup>
303.21	453,255	635	86	721	2.38

Tab.1 – Residents, rockfalls, and mean rockfall density in the study area.

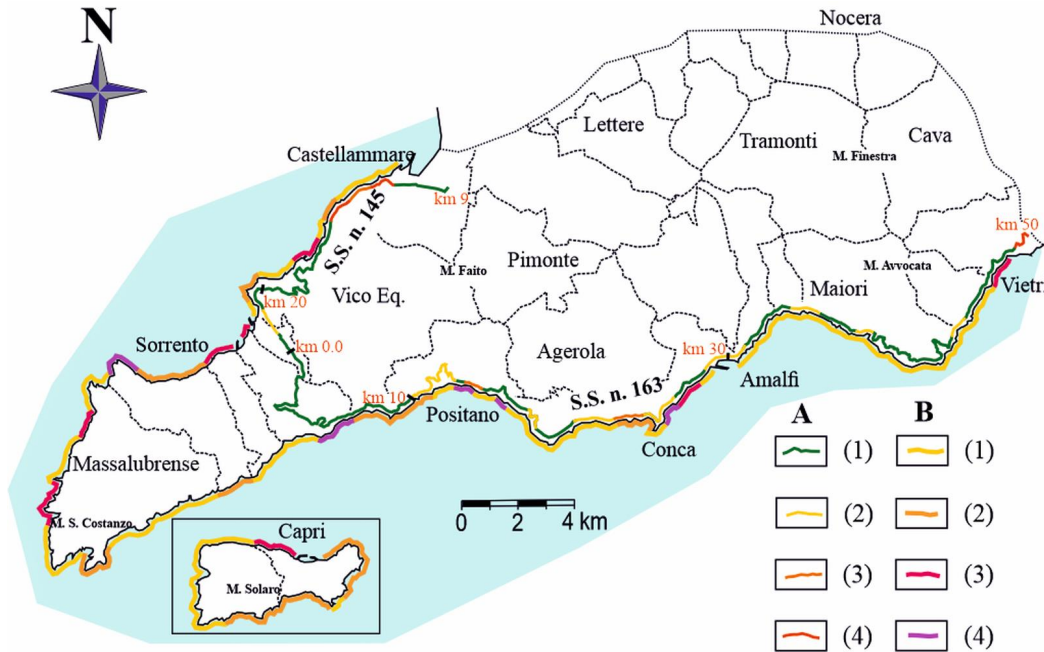


Fig.4 – Rockfall linear density map of the state roads (A) and coastline (B). Key: Up to 2 rockfalls/km (A1); 3 rockfalls/km (A2); 4 rockfalls/km (A3); greater than 4 rockfalls/km (A4); Up to 2 rockfalls/km (B1); 3 rockfalls/km (B2); 4 rockfalls/km (B3); 5-7 rockfalls/km (B4).

These are the morphologically more rugged and steep areas of the Peninsula, located at high altitudes, where the triggering factors linked to the weathering are more active.

#### State roads

Two important and busy state roads cross the Peninsula: the Sorrento and the Amalfi Roads. The first, with a length of about 14 km, links Castellammare with Vico Equense whereas, the second one extends for about 50 km from this village to Vietri sul Mare, connecting all the coastal localities of the southern slope (Fig. 4). The width of the two roads is 7.0 m, and the imposed speed limit is everywhere 50 km/h. Due to several bends affecting the roads, the available sight distances for overtaking and stopping are very narrow. This is especially for the Actual Sight Distance (ASD). As known, there are three possible interactions between vehicles and rocks: (i) moving vehicle/falling rock, (ii) moving vehicle/fallen rock and (iii) stationary vehicle/falling rock (e.g.: due to a queue of vehicles) [10]. Particularly in the second circumstance, ASD plays an important role in whether a motorist can avoid a collision (Fig. 5). Referring to the bibliography about the rockfall hazard and risk assessment along roads [11, 12], it should be noted that the road cut height, presence, or absence of rockfall barriers, traffic density, volume of the fallen rocks, and rockfall history are all important factors affecting the risk for users [10].

For the qualitative or quantitative evaluation of the latter, an important element is the rockfall susceptibility based on landslide inventories. Along the Sorrento Road, some road stretches in the Castellammare municipality are affected by a medium-high to high landslide density (i.e., number of landslides/km > 3-4) (Fig. 4). The

most critical stretch is the one located in Pozzano where slopes belonging to the old Italcementi quarries impend over the road. In the second half of the nineties, ANAS (the national company managing the road) built a tunnel bypassing this last road stretch, to avoid recurring traffic interruptions.

The Amalfi Road is characterized by long road stretches classified as medium to medium-high susceptibility especially in the municipalities of Positano, Conca dei Marini, Amalfi, and Maiori (number of landslides/km between 2 and 3). In the time span 1898-2019, near the village of Vietri sul Mare a 1 km long road stretch was affected by 5 rockfalls.

Although several collapses of small magnitude (only a few cubic meters) occur most of the time, the road disruptions for long periods of both state roads cause serious traffic problems and possible casualties. This is also due to the intense vehicular traffic throughout the year, both day and night.

In the Conca dei Marini municipality, the road stretch about 3 km long (from 23+625 to 26+670 km), is one of the most frequently affected by rockfalls [12]. Protection devices constituted by rockfall barriers, reinforced wire rope nets and mesh drapes, installed by ANAS, are present along some slopes and cuts belonging to the studied road section. These passive protections, generally installed after every new event, prevent the boulders to gain velocity or keep them from flying outward the slope impending over the road, limiting their run-out distances.

#### Coastline

The rocky coasts retreat generally is a sudden and sporadic process, due to various and

complex simultaneous causes. The basic factors controlling sea-cliff instability are well known: the force of waves as well as the strength of exposed rock masses. Additional factors are reduction in rock strength owing to weathering by sea spray, tidal action, heavy rainfalls, and material fatigue caused by cyclic loading of waves [13, 14]. Due to many variables involved, the transfer of wave energy to the cliff, which can produce instability, is a mechanism hard to quantify. Consequently, it is difficult to evaluate the role of various triggering factors and to identify, undoubtedly, the landslides triggered only by wave motion.

In recent decades, due to global warming, the progressive sea level rise caused an acceleration of erosion processes, and it is predictable that a further rise in the sea level, varying between 0.09 and 0.30 m, can be expected in 2100 [15].

The entire coastline is made up of rocky coasts with only a few pocket beaches located in the major inlets and, usually, posed at the foothill of active cliffs. Here, cliff collapses can be episodic and discontinuous in time and space and occur where rock masses are very fractured in response to single large sea storms. With reasonable approximation, about 35% of the inventoried failures were attributed to wave motion, even though effects due to the local geo-structural and geo-mechanical layouts of rock masses cannot be disregarded (Fig. 6). Due to the high population density along the coast (especially in the summer period) and sudden occurrence of failures without precursors, these landslides involve high risk conditions.

A medium to high landslide susceptibility (number of landslides/km between 3 and 7) affect long coastal stretches, particularly near headlands (P.ta del Capo and Cala di Mitigliano-P.ta San Lorenzo, in the Gulf of Naples; P.ta San Germano, Capo di Conca, P.ta Fuenti-Maria d'Albori, in the Gulf of Salerno). Similar



Fig.5 – Boulders coming from a rockfall located near a bend of the Amalfitana state road.



Fig.6 – Rockfalls affecting a coastal stretch in Conca dei Marini.

situations can be found in the Capri Island, along the coastal stretch between Bagni di Tiberio and P.ta Vivara. Near headlands, this landslide susceptibility is linked to the refraction processes generating an energy concentration of wave motion. All the remaining coastal stretches are characterized by a susceptibility ranging between 1 and 3 landslides/km (Fig. 4).

### Discussion and conclusions

The available rock landslide data allowed to plan out an inventory for the time span 1898-2019, and to assess the areal and linear landslide densities. The inventory was built by collecting data from different sources and is affected by some heterogeneity concerning available information. There are many small rockfalls having a strong impact on populations, buildings, and infrastructures. Even though about 721 failures have been inventoried, the great diffusion of small phenomena, which cannot be mapped, does not allow drawing up isopleth maps aimed at delimiting the percentage of landslide areas. Since there is a lack of data regarding locations, triggering dates, and magnitude of several movements, a more comprehensive study of the landslide hazard is not possible. Unfortunately, the municipal technical offices and ANAS, which should be institutionally responsible for data collection, collect occasional and incomplete information.

Despite these limitations, for the municipal areas, two state roads, and coastline it was possible to estimate the rock landslide susceptibility. For the whole study area, a frequency equal to about 6 landslides/year was calculated, with an average density of 2.38 landslides/km<sup>2</sup>. For Conca dei Marini, Capri, Praiano and Maiori maximum densities reach values between 11 and 6 landslides/km<sup>2</sup>. For both the state roads and rocky coastline linear densities reach maximum values of about 5 and 7 landslides/km, respectively.

These data allowed to draw susceptibility maps which assume that "the past is the key to the future", and that landslide history can be used to predict future ones [1]. Increasingly intense and recurring rainfalls, heat waves and exceptional storm surges, caused by the climate changes, could however nullify this principle. This is the future challenge to which the research will have to provide an answer, by updating or modifying the up to here used susceptibility/hazard approaches.

The study concerned a densely inhabited territory of landscape and historical value, for which the sustainable development cannot disregard the impact of landslides. This observation should be enough to solicit greater attention from the mayors (who are the main Civil Protection managers, at the municipal level), territorial protection authorities and ANAS.

### REFERENCES

- [1] Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S. et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 73, 209-263. doi

- 10.1007/s10064-013-0538-8
- [2] Bonardi, G., D'Argenio, B., & Perrone, V. (1988). Carta geologica dell'Appennino Meridionale in scala 1: 250.000. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 41, 1341.
- [3] Santo, A., Santangelo, N., Beneduce, A., & Iovane, F. (2002). Pericolosità connessa a processi alluvionali in aree pedemontane: il caso di Castellammare di Stabia in Penisola sorrentina. *Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences* 15(1), 23-37.
- [4] Budetta, P., Calcaterra, D., & Ducci, D. (1991). Caratterizzazione geomeccanica di ammassi rocciosi carbonatici tra Castellammare di Stabia e Vico Equense (Penisola Sorrentina - Campania). *Geologia Tecnica*, 3/91, 13-22.
- [5] Budetta, P., & Santo, A. (1994). Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (Southern Italy): a case study. *Engineering Geology*, 36 (3/4), 197-210.
- [6] Budetta, P., & de Riso, R. (1992). Studio delle condizioni di stabilità di alcuni versanti in roccia nell'Appennino Campano. In Atti 74° Congresso, Società Geologica Italiana, Sorrento. *Memorie della Società Geologica Italiana* 41, 917-927.
- [7] Santo, A., Del Prete, S., Di Crescenzo, G., & Rotella, M. (2007). Karst processes and slope instability: some experiences in the carbonate Apennine of Campania (Southern Italy). *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation. Geological Society, London, Special Publications*, 279, 59-72. doi 10.1144/SP279.6 0305-8719/07/\$15.00
- [8] Santo, A., Budetta, P., Forte, G., Marino, E., & Pignalosa, A. (2017). Karst collapse susceptibility assessment: a case study on the Amalfi Coast (Southern Italy). *Geomorphology* 285, 247-259.
- [9] Canuti, P., & Casagli, N. (1994). Considerazioni sulla valutazione del rischio da frana. In Atti del Convegno "Fenomeni franosi e centri abitati". Bologna 27/5/94. CNR-GNDICI, Linea 2, Pubbl. n. 846, p. 61.
- [10] Budetta P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 71 - 81. ISSN:1561-8633
- [11] Budetta, P. (2010). Rockfall-induced impact force causing a debris flow on a volcanoclastic soil slope: a case study in southern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1995 - 2006. ISSN:1561-8633
- [12] Budetta, P., De Luca, C., & Nappi, M. (2016) Quantitative rockfall risk assessment for an important road by means of the rockfall risk management (RO.MA.) method. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 75, 1377-1397.
- [13] Budetta, P., Gaietta, G., & Santo, A. (2000). A methodology for the study of the relation between coastal erosion and the mechanical strength of soils and rock masses. *Engineering Geology*, 56, 243-256.
- [14] Budetta, P. (2011). Stability of an undercut sea-cliff along a Cilento coastal stretch (Campania, Southern Italy). *Natural Hazards*, 56, 233 - 250. ISSN:0921-030X
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC (2007) Synthesis report, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007. Retrieved April 20, 2014, from [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)

### FRANE IN ROCCIA E SVILUPPO SOSTENIBILE IN PENISOLA SORRENTINO-AMALFITANA

#### Sommario

Sulla base di un inventario di 721 crolli avvenuti tra il

1899 e il 2019 (120 anni), è stata valutata la suscettibilità alle frane in roccia in Penisola Sorrentino-Amalfitana. Per la valutazione della densità di frana di un'area di circa 303 km<sup>2</sup> (compresa Capri), suddivisa in 33 territori comunali, sono stati elaborati i dati provenienti da diverse fonti (Catalogo IFFI, bibliografia, testate giornalistiche, siti web e rilievi in loco). Sono state calcolate anche le densità lineari di caduta massi che interessano le due principali strade statali (n. 163 Amalfitana e n. 145 Sorrentina) della regione, nonché dell'intera fascia costiera. In tutta l'area si rilevano sia frane molto estese (es.: Amalfi 1899, M. Catiello 2002) che fenomeni che hanno interessato pareti di poche centinaia di metri quadrati. Malgrado le informazioni riguardanti molte frane siano talora incomplete, è stato possibile allestire mappe di suscettibilità che possono fornire utili ausili per promuovere lo sviluppo sostenibile dell'area.

**Parole chiave:** Frane in roccia, suscettibilità, strade, coste rocciose, Penisola sorrentino-amalfitana.

#### Premessa

La Penisola Sorrentino-Amalfitana (insieme all'Isola di Capri) rappresenta un patrimonio di eccezionale valore paesaggistico e culturale, prodotto dalle interazioni tra uomo e ambiente. Fin dal 1997, sebbene limitatamente alla Costiera Amalfitana, questo paesaggio culturale è stato iscritto nella Lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO.

Si tratta, tuttavia, di un ambiente fragile esposto a dissesti idrogeologici sempre più gravi imputabili alla natura geologica, a interventi edilizi e di sistemazione mal progettati, alla mancanza di manutenzione ordinaria delle opere realizzate e - infine - ai cambiamenti climatici in atto.

Le calamità più ricorrenti sono legate alle frane, che interessano tutti i terreni affioranti, e ad eventi alluvionali improvvisi. Di conseguenza, nei Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PSAI) dell'ex Autorità di Bacino "Destra Sele" e "Regionale del Sarno", la maggior parte dei territori comunali sono stati classificati nelle classi P3 e P4 (pericolo di frana alto e molto alto).

Tali zonazioni della pericolosità sono state però effettuate prestando minore attenzione alle frane in roccia, dal momento che per il loro studio è richiesto un impegno tecnico-economico decisamente rilevante. Per ogni pendio o falesia, è necessario poter disporre di mappe molto dettagliate che devono essere redatte utilizzando tecniche laser scanner e/o fotogrammetria digitale. Sono inoltre necessarie numerose e dettagliate indagini geo-strutturali e geomeccaniche. Dal momento che si segnalano numerose frane di ridotte dimensioni ma che coinvolgono aree densamente popolate, ne conseguono costi elevati.

Lo scopo del presente studio è quello di delineare il quadro generale dei fenomeni franosi in roccia che interessano l'area, ponendo l'accento sulla suscettibilità, sia alla scala dei singoli territori comunali che per le due principali strade statali (n. 163 Amalfitana e n. 145 Sorrentina), nonché per l'intero perimetro costiero.

Poiché non sono note le date di innesco, i volumi mobilitati (magnitudo) e le distanze di propagazione (run-out) di numerosi eventi, è stata valutata solo la suscettibilità alla caduta massi, mentre non è possibile una quantizzazione dell'hazard, in termini di probabilità di accadimento e intensità. Tuttavia, poiché la nozione di suscettibilità presuppone che le frane storiche e le loro relazioni causali possano essere utilizzate per prevedere quelle future, ne consegue che le aree che hanno subito frane in passato lo saranno anche in futuro, poiché i fattori scatenanti (morfologia, geologia, geomorfologia, uso del suolo, ecc.) restano invariati [1]. Pertanto, le mappe di suscettibilità si possono considerare utili strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica.

I dati sulle frane provengono dall'Inventario IFFI (Inventario Fenomeni Franosi in Italia), da dati di



bibliografia, cronache (giornali e siti web) e rilievi in sito e si riferiscono sia a frane estese (es.: Amalfi 1899, M. Catiello 2002) che ad eventi che hanno coinvolto solo poche centinaia di metri quadrati. L'Inventario, costituito da circa 721 crolli, copre un arco temporale compreso tra il 1899 e il 2019 e si riferisce a un'area di circa 303 km<sup>2</sup> (compresa Capri), suddivisa in 33 territori comunali.

### **Inquadramento geologico e geomorfologico**

La Penisola sorrentino-amalfitana è una struttura geologica orientata trasversalmente rispetto alla catena appenninica ed è formata da una sequenza sedimentaria che va dal Trias superiore al Miocene comprendente calcari, calcari dolomitici e flysch arenaceo-argillosi (Fig. 1). La sequenza è riferita all'unità stratigrafico-strutturale Monti Picentini - Monti Lattari [2] ed è ricoperta da terreni quaternari costituiti da antiche brecce calcaree, depositi di conoidi, materiali piroclastici, detriti, depositi di spiaggia e detriti di frana [3].

La struttura è una monoclinale piuttosto regolare, immergente di 20-30° verso NW ed è interessata da diverse faglie normali (talora a basso angolo -LANF), e da alcuni sovrascorrimenti miocenici, per lo più tra elementi carbonatici [4].

L'attuale assetto morfologico è il risultato di una serie di fasi di sollevamento tettonico e fasi erosionali [5]. Un primo sollevamento si è verificato tra la fine del Miocene e l'inizio del Pliocene, seguito da una lunga fase erosiva che ha portato alla formazione di un'ampia paleo-superficie, successivamente suddivisa in numerosi horst e graben durante una nuova fase tettonica del Pleistocene inferiore. Residui di questi fenomeni sono visibili in alcune cime isolate della Penisola (M. Erasmo, M. Cerasuolo e M. Comune) e in depressioni quali le piane di Agerola e Ravello. Nel Pleistocene medio un nuovo sollevamento tettonico provocò il ringiovanimento della morfologia e causò l'attuale assetto del rilievo. L'azione combinata tra erosione lineare e carsica, quest'ultima più attiva durante l'ultimo periodo glaciale wurmiano, ha modellato profondamente il rilievo, attualmente caratterizzato dalla presenza di numerosi ripidi pendii e pareti subverticali [5].

### **Meccanismi e fattori d'innescamento delle frane**

Tutti i principali tipi di frane in roccia sono presenti in quest'area, con cinematismi per scivolamento piano, rottura a cuneo e ribaltamento, talora evolventi in valanghe di detrito. Le rotture sono di solito localizzate lungo scarpate di faglia, pareti subverticali con stratificazione fortemente inclinata a franapoggio, tagli stradali e falesie costiere.

I fattori d'innescamento più frequenti sono imputabili al variabile grado di fratturazione locale degli ammassi rocciosi, al carsismo, alla circolazione idrica sotterranea, all'azione divaricatrice degli apparati radicali, alle variazioni termiche giornaliere (specie nei mesi estivi), all'azione del moto ondoso (alla base delle falesie costiere) e, non ultimo, agli incendi boschivi (che causano crolli di blocchi già distaccatisi e provvisoriamente trattenuti dalla vegetazione).

Con riguardo alle litologie coinvolte, è interessante osservare che la maggior concentrazione di eventi si osserva nelle dolomie e calcari dolomitici a causa della loro maggiore fratturazione che conferisce agli ammassi un più elevato grado di libertà cinematica. Nei calcari, affioranti soprattutto lungo il versante settentrionale della monoclinale (Fig. 1), la disposizione degli strati a franapoggio, inglobanti talora intercalazioni di orizzonti argillitici a comportamento duttile, favorisce scivolamenti planari di grandi dimensioni, come nel caso delle frane ubicate tra Pozzano e Vico Equense [6]. Si osservano, poi, numerosi fenomeni di ribaltamento che interessano soprattutto le forme pinnacolari presenti in ammassi con stratificazione poco inclinata ma intersecata da sistemi di giunti subverticali, alcuni dei quali paralleli al pendio. Questi pinnacoli si originano a seguito di

carsismo che si accompagna spesso a fenomeni termoclastici e all'azione della gravità. Queste morfologie sono particolarmente diffuse lungo il versante meridionale della Penisola, in corrispondenza degli affioramenti di rocce dolomitiche e calcareo-dolomitiche [7].

Alcune frane di grandi dimensioni sono imputabili al collasso di cavità, come nel caso dell'evento dei Cappuccini di Amalfi del 1899, dove l'azione del carsismo causò l'innescamento di un rock avalanche dell'ordine di circa 20.000 m<sup>3</sup> [5]. Situazioni predisponenti analoghe, sono state riconosciute anche per la Grotta del Saraceno, sulla cui volta sorge parte dell'abitato di Furio. Qui, è stato riconosciuto che un possibile collasso, causato anche da modificazioni dello stato viscoelastico dell'ammasso circostante la cavità, potrebbe innescare una frana catastrofica in grado di raggiungere la costa [8].

Lungo il perimetro costiero della Penisola, le frane interessano maggiormente il versante meridionale sia per la notevole altezza delle falesie che per il più elevato grado di fratturazione degli ammassi. In taluni casi, tra le cause innescanti, oltre all'azione della gravità, si annoverano le sollecitazioni cicliche causate dal moto ondoso e gli effetti termoclastici, maggiormente attivi nei mesi estivi. Nella zona sorrentina, i crolli sono dovuti, per lo più, a fenomeni di scalzamento al piede causati sia dal moto ondoso, alla base delle falesie, che dalle acque incanalate, al fondo delle forre che incidono la placca tufacea ("cavoni").

### **Valutazione della suscettibilità da frana**

I fenomeni franosi censiti sono stati inizialmente ubicati, anche se con difficoltà dovute alle approssimazioni contenute nelle fonti consultate, sulla cartografia regionale in scala 1:5000. Il quadro generale così ottenuto è stato poi elaborato al fine di ottenere informazioni sulla suscettibilità sia alla scala comunale che per le due vie di comunicazione ed il perimetro costiero.

#### **Suscettibilità a scala comunale**

Per i 33 territori comunali, è stata valutata la densità di frana espressa come numero di eventi per chilometro quadrato (Fig. 2 e 3). In termini assoluti, i territori interessati dal maggior numero di eventi sono quelli dell'area sudorientale della penisola (Maiori, Tramonti, Vietri sul Mare) a differenza di quelli ubicati lungo il versante settentrionale dove si osserva un minor numero di frane (Massa Lubrense, Sorrento, Castellammare). Se però si tiene conto dell'estensione dei territori e si esclude Atrani (il Comune più piccolo d'Italia con una superficie di appena 0,12 km<sup>2</sup>), allora Conca dei Marini, Capri, Praiano e Maiori presentano maggiori densità di frana (Fig. 3). Per l'intera area di studio, risulta una densità media pari a circa 2,38 frane/km<sup>2</sup> (Tab. 1).

La presenza di un gran numero di frane di tipo puntuale, con superfici non rappresentabili alla scala 1/5000, non consente l'allestimento di una mappa delle isoplete [9] e, pertanto, non è possibile calcolare la percentuale delle aree in frana. Si è scelto, quindi, di rappresentare la numerosità delle frane, ricadenti in aree poligonali di grandezza variabili da 0,15 a circa 1 km<sup>2</sup>, mediante simboli di dimensioni proporzionali al numero di eventi censiti, ubicati nel centro dell'area di pertinenza (Fig. 2).

Il raffronto tra questa mappa e quella geologica (Fig. 1) dimostra come gli eventi franosi si concentrino maggiormente negli areali di affioramento delle dolomie e dei calcari dolomitici più fratturati. Sono queste, per altro, le aree della Penisola morfologicamente più accidentate ed acclivi, poste ad alte quote, ove i fattori d'innescamento legati alla dinamica esogena sono maggiormente attivi.

#### **Suscettibilità per le strade**

Lo studio ha riguardato le due principali vie di comunicazione della regione: le statali Sorrentina ed Amalfitana. La prima si sviluppa per circa 14 km,

dall'abitato di Castellammare a quello di Vico Equense; da questa località si origina la seconda che, con uno sviluppo di circa 50 km, collega tutte le località costiere del versante meridionale, fino a Vietri sul Mare (Fig. 4). Entrambe le strade, con una larghezza media di 7 metri, hanno un percorso tortuoso con numerose curve e ridotte distanze di visibilità per il sorpasso e l'arresto. Come noto, per la valutazione del rischio si devono analizzare tre possibili interazioni tra veicoli e massi: l'impatto tra un veicolo in movimento ed un masso in caduta; l'impatto tra un veicolo in movimento ed un masso posto sulla carreggiata; l'impatto di un masso in caduta su di un veicolo fermo sulla carreggiata, ad esempio per la presenza di una coda di veicoli [10]. Soprattutto per la seconda evenienza (Fig. 5), la visibilità per l'arresto gioca un ruolo importante ai fini della possibilità che un automobilista possa evitare l'impatto [11,12]. La notevole altezza delle scarpate prospicienti le strade, l'assenza di valli paramassi, la densità del traffico veicolare, le caratteristiche dimensionali dei crolli, e le condizioni di visibilità sono tutti fattori importanti che contribuiscono a definire un elevato rischio per gli utenti [10]. Per la stima quantitativa di quest'ultimo, un elemento importante è ancora una volta dato dalla suscettibilità, definita in base agli inventari delle frane storiche. Alcuni tratti della Sorrentina (Fig. 4), nei territori di Castellammare (località Pozzano) e Vico Equense, sono caratterizzati da densità di frane da medio-alta ad elevata (numero di frane per chilometro maggiori di 3-4). Il tratto più critico è quello sottostante le vecchie cave dell'Italcementi di Pozzano. Nella seconda metà degli anni '90, per ovviare alle frequenti interruzioni del traffico, l'ANAS ha realizzato una variante che si sviluppa quasi tutta in galleria.

La strada Amalfitana, invece, si caratterizza per la presenza di lunghi tratti classificati con suscettibilità da media a medio-alta (numero di frane per chilometro tra 2 e 3), soprattutto nei territori comunali di Positano, Conca dei Marini, Amalfi e Maiori. Nell'ultimo chilometro (tra le progressive 49 e 50), localizzato in prossimità dell'abitato di Vietri sul Mare, sono segnalati 5 eventi franosi avvenuti in 120 anni. Sebbene il più delle volte si verificano crolli di ridotte magnitudo (alcuni m<sup>3</sup> di materiale roccioso), l'interruzione per tempi lunghi di entrambe le statali comporta gravi disagi alla circolazione e possibili vittime, tenuto conto anche dell'intenso traffico veicolare presente tutto l'anno, sia diurno che notturno.

Il tratto compreso tra le progressive 23+625 e 26+670, nel territorio di Conca dei Marini, è uno dei maggiormente interessati da crolli [12], tanto che, negli anni passati, l'ANAS è intervenuta proteggendo le scarpate stradali con numerose e articolate opere di difesa passiva). Queste protezioni dovrebbero impedire che i massi acquistino velocità lungo i percorsi di caduta e limitare la probabilità di superamento della sede stradale, verso valle, dopo gli iniziali impatti e rimbalzi.

#### **Suscettibilità del perimetro costiero**

I crolli delle falesie possono essere episodici e discontinui nel tempo e nello spazio e si verificano dove gli ammassi rocciosi sono molto fratturati, in risposta a singole mareggiate. L'arretramento delle coste rocciose è generalmente un processo improvviso e sporadico, provocato da diverse e complesse cause, simultanee. I fattori principali che controllano l'instabilità sono ben noti: l'energia delle onde e le caratteristiche di resistenza meccanica degli ammassi rocciosi esposti. Ulteriori fattori sono: la riduzione della resistenza della roccia dovuta agli agenti atmosferici, allo spray marino, all'azione delle maree, alle piogge intense e alla fatica del materiale, causato dal carico ciclico delle onde [13, 14]. A causa delle molteplici variabili in gioco, il trasferimento dell'energia del moto ondoso alla falesia, che può andar soggetta ad instabilità, è un meccanismo difficilmente quantificabile. Di conseguenza, è difficile

valutare il ruolo dei vari fattori scatenanti e identificare, senza incertezze, i crolli innescati solo dal moto ondoso.

Negli ultimi decenni, il progressivo innalzamento del livello del mare, causato dal riscaldamento globale, ha provocato un'accelerazione dei processi erosivi, e si ritiene che, nel 2100, si possa prevedere un ulteriore innalzamento variabile tra 0,09 e 0,30 m [15].

L'intero perimetro costiero della Penisola è formato da coste rocciose con solo alcune pocket beach situate nelle insenature maggiori ubicate, di solito, ai piedi di scogliere attive. Con ragionevole approssimazione, circa il 35% dei crolli inventariati è attribuibile al moto ondoso, anche se non si possono escludere effetti peggiorativi dovuti agli assetti geo-strutturali e geo-meccanici locali degli ammassi rocciosi (Fig. 6). A causa dell'elevata densità di popolazione lungo la costa (soprattutto nel periodo estivo) e del verificarsi improvviso di crolli senza segni precursori, queste frane comportano condizioni di rischio elevato.

Una suscettibilità da frana medio-alta (da 3 a circa 7 frane/km) interessa lunghi tratti costieri, in particolare in prossimità di promontori (P.ta del Capo e Cala di Mitigliano-P.ta San Lorenzo, nel Golfo di Napoli; P. ta San Germano, Capo di Conca, P.ta Fuenti-Maria d'Albori, nel Golfo di Salerno). Situazioni analoghe si riscontrano anche tra i Bagni di Tiberio e P.ta Vivara, nell'isola di Capri. In prossimità dei promontori, questa propensione all'instabilità è dovuta

ai processi di rifrazione del moto ondoso che generano una concentrazione di energia alla base delle falesie. Tutti i restanti tratti costieri sono caratterizzati da una suscettibilità compresa tra 1 e 3 frane/km (Fig. 4).

#### **Discussione e conclusioni**

I dati disponibili hanno permesso di allestire un inventario per l'arco temporale 1898-2019 e di valutare le densità areale e lineare di frana. L'inventario è stato costruito raccogliendo dati da diverse fonti ed è affetto da un certo grado di eterogeneità, relativo alle informazioni disponibili. Si segnalano molti fenomeni di ridotte dimensioni che però hanno un forte impatto sulla popolazione, gli edifici e le infrastrutture. Nonostante siano stati inventariati circa 721 fenomeni, il gran numero di eventi di ridotte dimensioni, non cartografabili, non consente di elaborare mappe delle isoplete, finalizzate alla perimetrazione delle percentuali di aree in frana. L'assenza di dati precisi sulle località, le date di innesco e le volumetrie coinvolte, non consente uno studio più completo dell'hazard. Purtroppo, gli uffici tecnici comunali e l'ANAS, che dovrebbero essere istituzionalmente preposti alla raccolta dei dati, hanno a disposizione solo informazioni sporadiche e incomplete.

Nonostante queste limitazioni, per i territori comunali, le due strade statali e la costa è stato possibile stimare la densità areale e lineare di frana. Per l'intera area di

studio è stata calcolata una frequenza pari a circa 6 frane/anno, con una densità media di 2,38 frane/km<sup>2</sup>. Per Conca dei Marini, Capri, Praiano e Maiori le densità massime raggiungono valori compresi tra 11 e 6 frane/km<sup>2</sup>. Sia per le strade statali che per la costa alta i valori di densità lineare raggiungono rispettivamente valori massimi di circa 5 e 7 frane/km.

Questi dati hanno permesso di tracciare mappe di suscettibilità il cui presupposto è che "il passato è la chiave per il futuro", e che quindi la cronistoria dei crolli può essere utilizzata per prevedere quelli futuri [1]. Piogge sempre più intense e ricorrenti, ondate di calore e mareggiate eccezionali, causate dai cambiamenti climatici in atto, potrebbero però vanificare questo assunto. Questa è la sfida futura a cui la ricerca dovrà dare una risposta, aggiornando o modificando gli approcci di suscettibilità/pericolosità fino ad oggi utilizzati.

Lo studio ha riguardato un territorio densamente abitato e di elevato valore paesaggistico e storico, per il quale lo sviluppo sostenibile non può prescindere dall'impatto causato dalle frane. Basterebbe questa osservazione per sollecitare una maggiore attenzione da parte dei Sindaci (che sono i principali responsabili della Protezione Civile, a livello comunale), degli Enti di tutela del territorio e dell'ANAS.