

# GIS ed analisi geostatistica di dati macrosismici storici in ambito urbano: il centro storico di Potenza

Maurizio LAZZARI (\*), Fabrizio T. GIZZI (\*), Maria DANESE (\*), Cinzia ZOTTA (\*)

(\*) CNR- Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali, C/da S. Loia Zona industriale Tito Scalo (PZ),  
tel. 0971/427326 fax 0971/427323, [m.lazzari@ibam.cnr.it](mailto:m.lazzari@ibam.cnr.it)

## Riassunto

Il lavoro fornisce un contributo metodologico all'analisi dei dati macrosismici storici ai fini della prevenzione sismica. A tale scopo è affrontato un caso di studio esemplificativo riguardante l'applicazione di analisi geostatistiche in ambiente GIS su dati macrosismici relativi a tre terremoti storici che hanno colpito, con intensità variabile, la città di Potenza. Oltre ai dati sugli effetti del terremoto, nel geodatabase sono stati implementati anche informazioni geologiche, geomorfologiche, geotecniche e geofisiche. Nell'insieme la ricerca sembra evidenziare un ruolo importante del fattore di amplificazione sismica, legato sia ai caratteri geologici (spessore delle coperture) che all'assetto geomorfologico del sito.

## Abstract

The paper aims to supply a methodological contribution to the analysis of historical macroseismic data in view of seismic prevention actions. To this purpose a case study is faced up. We refer to the use of geostatistical methods on macroseismic data concerning three historical seismic events that hit the Potenza hilltop town (Basilicata, southern Italy) with an intensity ranging from VI-VII to VIII-IX degree MCS. Macroseismic, geological, geomorphological, geotechnical and geophysical data have been implemented in a GIS geodatabase. On the whole, the research showed the important role played by the seismic amplification, both due either to the geological (regolite thickness) or the geomorphological features of the site.

## 1. Introduzione

Il principale obiettivo del lavoro è stato quello di sviluppare metodi di analisi geostatistica di dati macrosismici storici relativamente a scenari di danno in ambito urbano finalizzati ad una politica di prevenzione e gestione delle emergenze. In particolare, è stata presa in esame l'area campione del centro storico di Potenza ubicata nella zona assiale della catena appenninica, caratterizzata da un'elevata pericolosità sismica. Negli ultimi due secoli, infatti, la città ed in particolar modo il suo centro storico, è stato danneggiato da almeno 5 terremoti di intensità maggiore del VI grado MCS (1826, 1857, 1930, 1980, 1990). Per tre di questi eventi (1826, 1857 e 1930) sono stati implementati in ambiente GIS dati macrosismici inediti, dati geologici, geomorfologici e geognostici, applicando tecniche di statistica spaziale.

## 2. Materiali e Metodi

Il lavoro è basato su di una sistematica ricerca d'archivio di fonti documentarie relative a dati macrosismici di tre terremoti di riferimento, quelli del 1 febbraio 1826, 16 dicembre 1857 e 23 luglio 1930 che colpirono la città di Potenza rispettivamente con intensità pari a VIII, VIII-IX e VI-VII gradi MCS (Gizzi and Masini, 2007). Le fonti archivistiche consultate hanno consentito di ottenere informazioni inerenti il livello di danno, lo stato di conservazione degli edifici, gli interventi sugli edifici finalizzati alla salvaguardia della pubblica incolumità oltre che dati di

carattere amministrativo. Tutte queste informazioni sono state successivamente implementate in un *geodatabase*. In particolare, i dati macrosismici rilevati hanno permesso la ricostruzione, su di una base cartografica catastale risalente al 1875, di ‘scenari’ di danno per ciascun terremoto studiato. A tale livello informativo di base sono state collegate le tabelle contenenti i dati relativi al tipo di edificio, alla proprietà, al numero di piani, allo stato di manutenzione, alla tipologia di fonti consultate, alla descrizione qualitativa del danno ed alla sua indicizzazione in accordo ai cinque livelli di danno (D1-D5) previsti dalla scala EMS.

Nel *geodatabase* sono stati implementati anche dati geologici (stratigrafie di pozzo e dati di rilevamento), geomorfologici, geotecnici (parametri di resistenza meccanica da prove di laboratorio) e geofisici (downholes e sismica a rifrazione per la definizione delle velocità delle  $V_{S30}$ ).

Partendo dai dati relativi agli ‘scenari’ di danno, sono state applicate tecniche di analisi geostatistica spaziale al fine di evidenziare non solo la distribuzione statistico-territoriale degli effetti, ma anche le eventuali correlazioni dello stesso con la profondità del substrato e le sue caratteristiche geomeccaniche oltre che con la conformazione morfologica del sito.

La *Spatial statistical analysis* è una tecnica che utilizza metodi statistici per interrogare un dato spaziale al fine di determinarne il comportamento tipico o inaspettato rispetto ad un modello statistico (Murgante et al. 2007). Le tecniche di statistica spaziale utilizzate nel caso di studio rientrano nella *Point Pattern Analysis*, trattandosi di un dato di input puntuale. In particolare, i metodi utilizzati sono di tre tipi:

- *misure di statistica centrografica* che permettono di definire dove la distribuzione dei dati è centrata e dove invece è dispersa;
- definizione degli *indici di autocorrelazione spaziale, globale e locale* per comprendere se la distribuzione dei dati nello spazio è *random, uniform* o *clustered*;
- *tecniche di interpolazione* per generalizzare la distribuzione in base alle caratteristiche della regione di appartenenza al fine di comprenderne il comportamento a piccola scala.

## 2.1 Le misure di statistica centrografiche

Le statistiche centrografiche permettono di indagare sulle proprietà del primo ordine di una distribuzione, ovvero il suo andamento globale nella regione di riferimento. Tramite il *Mean Center Weighted* è possibile calcolare il punto rispetto al quale la distribuzione è centrata, tenendo conto di un eventuale peso. Il MCW è definito come:

$$X = \sum_{i=1}^N \frac{W_i X_i}{N}; \quad \bar{Y} = \sum_{i=1}^N \frac{W_i Y_i}{N} \quad [1]$$

in cui  $X_i$  ed  $Y_i$  sono le coordinate dell’ $i$ -esimo evento e  $W_i$  è il suo peso.

Tramite la *Standard Deviatonal Ellipse*, invece, si misurano il grado e la direzione di dispersione della distribuzione. Essa è costruita nel seguente modo:

- a. L’asse Y è ruotato in senso orario di un angolo  $\theta$ , dove:

$$\theta = \text{ARCTAN} \left\{ \frac{(\sum (X_i - \bar{X})^2 - \sum (Y_i - \bar{Y})^2) + [(\sum (X_i - \bar{X})^2 - \sum (Y_i - \bar{Y})^2)^2 + 4(\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2]^{1/2}}{2\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})} \right\}$$

con tutte le sommatorie da  $i=1$  a  $N$ , dove  $N$  è il numero dei punti.

- b. Vengono calcolate due deviazioni standard, una lungo l’asse trasformato X l’altra lungo l’asse trasformato Y:

$$S_X = \sqrt{2} \left\{ \sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X}) \cos \theta - (Y_i - \bar{Y}) \sin \theta]^2 / (N-2) \right\}^{1/2}$$

$$S_Y = \sqrt{2} \left\{ \sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X}) \sin \theta + (Y_i - \bar{Y}) \cos \theta]^2 / (N-2) \right\}^{1/2} \quad [2]$$

## 2.2 Misure di autocorrelazione globale: l'indice di Moran

L'indice di Moran (Moran, 1948) è un indicatore di autocorrelazione spaziale globale che fornisce una misura del grado di autocorrelazione della distribuzione dei dati. Esso è definito come:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j w_{ij}) \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad [3]$$

dove: N è il numero degli eventi;  $X_i$  ed  $X_j$  sono i valori assunti dall'intensità rispettivamente nel punto i e nel punto j (con  $i \neq j$ );  $\bar{X}$  è la media della variabile considerata;  $w_{ij}$  è un elemento della matrice contenente i pesi dei singoli eventi, determinati in funzione della contiguità degli eventi. I valori che l'indice I così definito può assumere appartengono all'intervallo [-1; +1]. Un valore di I compreso fra -1 e 0 è indice di autocorrelazione negativa, mentre un valore di I compreso fra 0 e 1 è indice di autocorrelazione positiva.

## 2.3 Misure di autocorrelazione locale: la funzione di Getis & Ord

La funzione di Getis & Ord (1992) nell'eventualità di una distribuzione clusterizzata, permette di individuare e localizzare i *cluster*. In particolare, questo indice misura il numero di eventi che possiedono caratteristiche omogenee e che ricadono entro una distanza  $d$  prescelta, a partire da ciascun evento della distribuzione in esame. La sua formulazione matematica è rappresentata dall'espressione:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij}(d) x_j - \bar{x}_i \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij}(d)}{S(i) \sqrt{\frac{[(N-1) \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij}^2(d) - (\sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij}(d))^2]}{(N-2)}}} \quad [4]$$

dove i simboli hanno ugual significato che nella funzione di Moran, ad eccezione di  $w_{ij}(d)$  che questa volta rappresenta un peso che varia in funzione della distanza prescelta.

## 2.4 Le tecniche di interpolazione: la densità di Kernel

La densità di Kernel permette di determinare la densità della distribuzione di un evento, considerando "una superficie mobile a tre dimensioni, che pesa gli eventi a seconda della loro distanza dal punto dal quale viene stimata l'intensità" (Gatrell et al. 1996). Nella *Kernel density* il dato di input è di tipo puntuale, mentre il dato di *output* è un grid, alle cui celle è associato l'attributo numerico che lo caratterizza (in questo caso il valore di densità). L'influenza di un punto nel suo intorno è misurato dalla *Influence Function*, modellata dalla funzione di Kernel. La somma delle influenze di tutti i punti è calcolata dalla *Density Function*, definita dalla seguente espressione:

$$\lambda(L) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau^2} k\left(\frac{L - L_i}{\tau}\right) \quad [5]$$

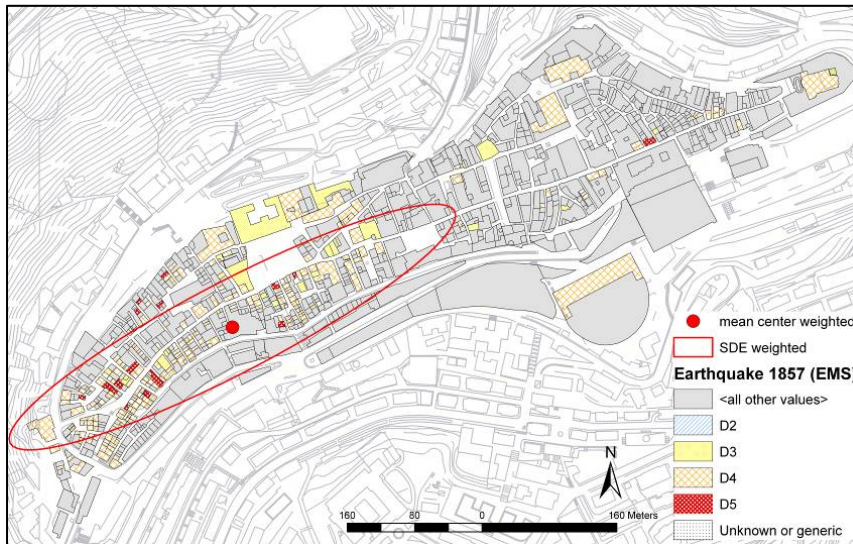
dove:  $\lambda$  è l'intensità della distribuzione dei punti misurata in L;  $L_i$  è l'evento i-esimo; k è la funzione di Kernel;  $\tau$  è la larghezza di banda.

Un primo fattore che influenza l'individuazione dei valori di densità è la larghezza di banda  $\tau$ : essa non deve essere troppo piccola, perché altrimenti si evidenzerebbe troppo il singolo fenomeno attenuando l'influenza dello stesso sugli eventi vicini, ma non deve essere neppure troppo ampia in quanto si registrerebbe un appiattimento del Kernel e quindi una perdita di informazione. Un secondo fattore importante è la dimensione di cella, poiché al variare di essa varia il numero di eventi che ricadono in ciascuna di esse.

### 3. Risultati

L'applicazione dei metodi di statistica centrografica è avvenuta dopo aver trasformato ogni poligono nel suo centroide (Fig. 1); i punti così individuati costituiscono la distribuzione su cui è stata effettuata la *Point Pattern Analysis*.

A ciascun evento è stato inoltre associato un valore di intensità che varia da zero a cinque, come la scala EMS con cui è stato classificato il livello di danno degli edifici. In particolare, per evidenziare dove la distribuzione fosse centrata è stato calcolato il *Mean Center Weighted*, dove il peso è costituito dal valore dell'intensità [1]. Inoltre, per definire il grado e la direzione della dispersione nella distribuzione, è stata calcolata la *Standard Deviation Ellipse* [2].



Il metodo ha fornito risultati significativi per il terremoto del 1857 (maggior numero di dati disponibili) dove il livello di danno è maggiormente concentrato nel settore sudoccidentale del centro storico (Fig. 1; Porta Salza-P.za Mario Pagano).

Figura 1 - Concentrazione del danno nel centro storico di Potenza rispetto al Mean Center Weighted e alla Standard Deviation Ellipse.

Per quanto concerne la Densità di Kernel, questa è stata usata non solo per confrontare l'evoluzione del livello di danno in corrispondenza dei tre terremoti studiati, ma soprattutto per comprendere come eventualmente il danno provocato dal sisma su un singolo edificio potesse influire sul danno riscontrato su altri edifici adiacenti, per esempio ubicati su versanti ed a valle di edifici crollati parzialmente o totalmente.

Pertanto, è stato associato a ciascun edificio danneggiato un valore di intensità che tenesse conto delle condizioni sopra descritte (Fig. 2), ed in particolare:

- ai fabbricati presenti nel settore centrale del centro storico è stata associata una intensità uguale ad 1, indipendentemente dal livello di danno, poiché in questa zona le pendenze e i dislivelli sono molto bassi;
- ai fabbricati presenti nel settore settentrionale esterno tra Porta Salza e Torre Guevara a ridosso di una scarpata di versante molto ripida è stata attribuita intensità pari a 1 per D=1, 2 e 3, intensità pari a 4 per D=4 ed intensità pari a 8 per D=5.

Definita l'intensità, si è scelta una giusta larghezza di banda da inserire nella funzione di Kernel [5], pari a 12m, mentre la cella del *grid* di *output* ha dimensione pari a 1m.

Al fine di verificare l'esistenza di eventuali relazioni tra gli eventi e verificare l'eventuale presenza di *cluster* sono stati utilizzati indicatori di autocorrelazione spaziale globale e locale. Per quanto concerne i primi è stato calcolato l'**Indice di Moran** [3] che, mediante il metodo *Inverse distance* e con un valore di intensità pari al corrispondente livello di danno, è risultato essere pari a  $I_{ID} = 0,136$ . Il basso valore calcolato sembrerebbe segnalare la presenza di uno scarso grado di autocorrelazione, ma, tenendo conto di quanto scaturito dalle misure di statistica centrografica, va sottolineato che l'analisi di autocorrelazione non può essere condotta includendo nell'analisi tutti gli eventi, ma bisogna fissare una banda oltre la quale gli eventi non vengono più considerati come facenti parte del cluster momentaneamente analizzato dal software. A tal fine il metodo utilizzato è stato quello del *Fixed distance band*, che ha definito una distanza di 14 m che massimizza la I di Moran (IFDB



= 0,423), restituendo di conseguenza il massimo grado di clusterizzazione. Questo valore è stato successivamente usato come parametro di input per il calcolo dell'indice di Getis e Ord [4] e della

matrice di contiguità in esso usata. Una prima verifica dell'esattezza nella lettura, offerta da questo indice, delle caratteristiche della distribuzione studiata, è il fatto che non sono presenti cluster tra i valori aventi intensità pari a 2 (Fig. 3), poiché già tramite una lettura effettuata 'ad occhio' si nota che questi risultano essere dispersi nell'area studiata (Fig. 4).

Figura 2 – Distribuzione statistica del danno calcolata con la Densità di Kernel per i tre terremoti di riferimento del 1826, 1857 e 1930.



Intensity value $X_i$ (Damage Level)	$G'$
0	-2.2472 ÷ - 1.576
1	-1.5763 ÷ - 0.905
2	-0.9055 ÷ 0.23470
3	0.23470 ÷ 2.1687
4	2.16871 ÷ 4.10273
5	4.102734 ÷ 6.036

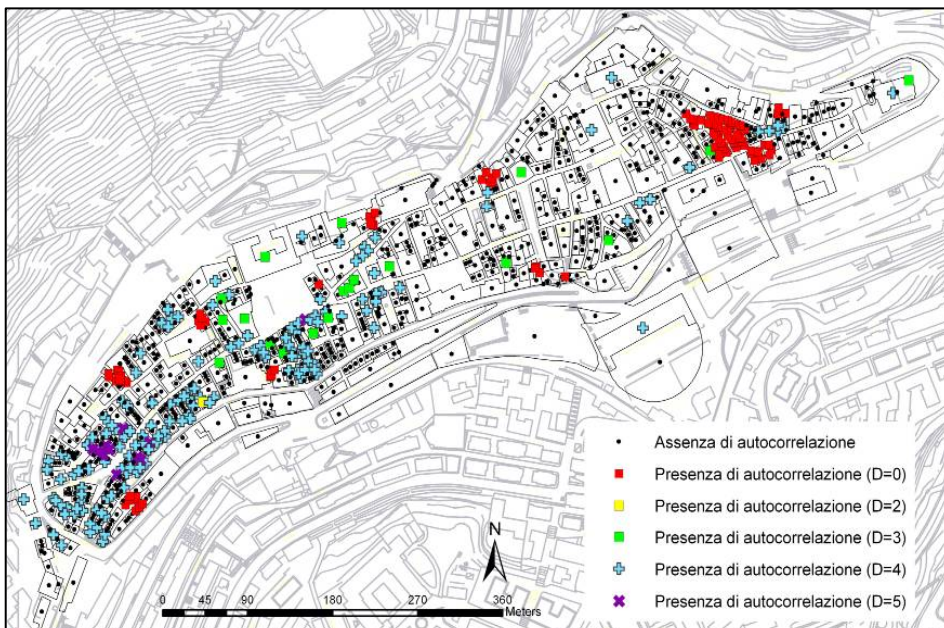
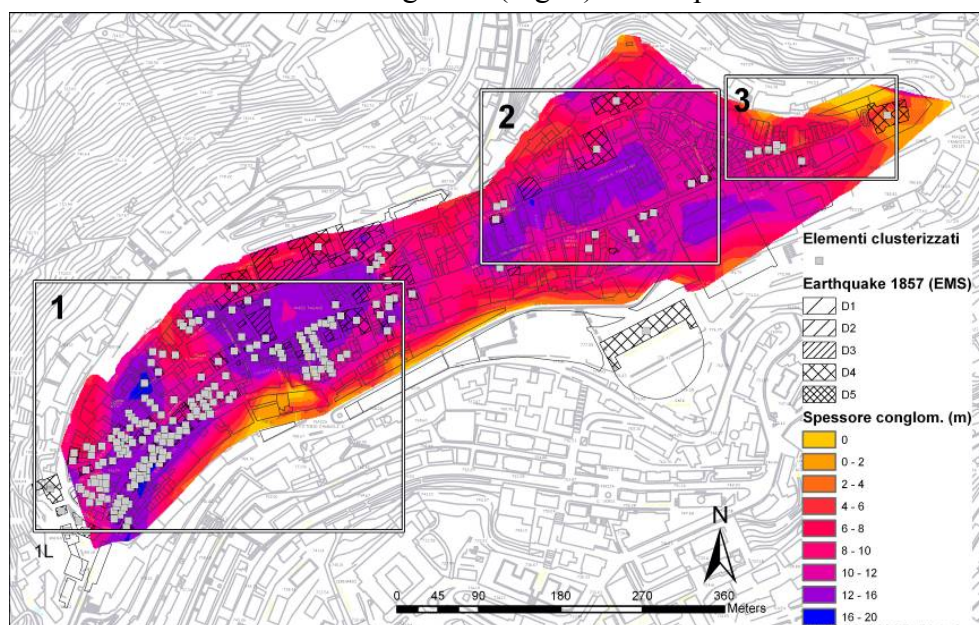


Figura 3 – Tabella di sintesi dei valori di intensità calcolati con Getis & Ord.

Figura 4 - Clusterizzazione del livello di danno secondo l'indice di Getis e Ord.

#### 4. Discussione e Conclusioni

Dal confronto tra il dato relativo al danno degli edifici, il grado di clusterizzazione offerta da Getis e Ord ed il DEM del substrato argilloso (Fig. 5) è stato possibile valutare le relazioni che intercorrono



tra il livello di danno, la componente geomorfologica e la componente geologica (intesa quest'ultima come variazione della profondità del substrato argilloso sovraconsolidato ( $V_s=600-950$  m/s), da -3 a -18m, e della presenza, al di sopra di esso, di uno strato conglomeratico saturo).

Figura 5 - Confronto tra i dati relativi al danno (terremoto del 1857), profondità del substrato rigido e distribuzione della clusterizzazione. I quadranti numerati indicano le tre diverse situazioni riscontrate.

In definitiva sono state distinte tre differenti condizioni (Fig. 5), così riassumibili:

1. Presenza simultanea di autocorrelazione (e quindi di danno) e di valori elevati nello spessore della copertura conglomeratica (14-18 m e  $V_s= 180-250$  m/s) ;
2. Elevato spessore della copertura conglomeratica e scarsa presenza di autocorrelazione positiva. Ciò è probabilmente dovuto all'influenza del fattore geomorfologico (top del rilievo ampio rispetto alla base) che riduce la possibilità di amplificazione sismica.
3. Presenza di danno elevato localizzato e valori bassi dello spessore della copertura. Qui il fattore geomorfologico (cresta allungata e stretta con versanti ripidi) sembra giocare un ruolo importante nell'amplificazione dell'accelerazione sismica orizzontale determinando alti livelli di danno sebbene concentrato.

#### Bibliografia

- Anselin, L. (1995), "Local Indicators of Spatial Association – LISA." *Geographical Analysis*, 27:93-115.
- Bailey T. C., Gatrell A. C. (1995), "Interactive spatial data analysis", Prentice Hall.
- Gatrell A. C. , Bailey T. C., Diggle P. J., Rowlingson B. S. (1995) "Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology". *Transaction of institute of British Geographer*.
- Getis, A. and Ord, J. K. (1992), "The analysis of spatial association by use of distance statistics". *Geographical Analysis*, 24: 189-206.
- Gizzi F.T. and Masini N. (2007), "Multi-temporal analysis of seismic damage patterns for Potenza (Basilicata, southern Italy)". Sottoposto a *Annals of Geophysics*.
- Moran, P. (1948), "The interpretation of statistical maps", *Journal of the Royal Statistical Society*, 10.
- Murgante B., Las Casas G., Danese M. (2007), "The use of spatial statistics to analyze the periurban belt", in Wachowicz M., Bodum L. (eds.), *Proceedings of the 10th Agile International Conference on Geographical Information Science*, Aalborg, Denmark, 8-11 May, 2007.
- O'Sullivan D., Unwin D. (2002), "Geographic Information Analysis", John Wiley & Sons.