

Analisi delle condizioni di
sismicità nelle aree di discarica
della Regione Sicilia prese in
considerazione nel
Progetto SIGLOD

Quaderni di Geofisica



135



Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile

Stefano GRESTA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

Analisi delle condizioni di sismicità nelle aree di discarica della Regione Sicilia prese in considerazione nel Progetto SIGLOD

Analysis of seismicity in the landfill sites of the Sicily region considered in the SIGLOD Project

Rodolfo Console², Andrea Mercuri³, Roberto Carluccio¹, Massimo Chiappini¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

²CGIAM (Centro di Geomorfologia Integrata per l'Area del Mediterraneo, Potenza)

³Università degli Studi di Roma "La Sapienza" (Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Dip.to di Scienze della Terra)

Analisi delle condizioni di sismicità nelle aree di discarica della Regione Sicilia prese in considerazione nel Progetto SIGLOD

Il lavoro qui presentato è stato svolto nell'ambito del Progetto PON Smart Cities denominato SIGLOD ed è stato finalizzato all'analisi delle condizioni di sismicità in tre specifici siti di discarica nella regione siciliana (Bellolampo, PA; Siculiana, AG e Cava dei Modicani, RG). Lo studio è stato condotto utilizzando dati e metodologie di analisi differenti ed in parte anche innovative: sono state dapprima individuate le principali strutture sismogenetiche presenti in Sicilia e nelle aree ad essa circostanti, quindi sono state valutate le conoscenze disponibili sulla sismicità storica del territorio indagato e sulla cinematica in atto sulle strutture sismogenetiche riconosciute. Tali informazioni sono state poi utilizzate in un algoritmo di simulazione di attività sismica, che ha consentito la realizzazione di un catalogo sismico sintetico (della durata di 100000 anni), riguardante l'intero territorio della Sicilia, che è stato successivamente analizzato con metodo statistico al fine di determinare i periodi di ritorno e la probabilità di occorrenza di grandi eventi sismici nell'area. È stata infine applicata, a tutti gli eventi presenti nel catalogo sintetico, una legge di attenuazione per la stima delle probabilità di eccedenza di dati valori di accelerazione di picco (PGA) nei siti di interesse per il progetto.

This work has been carried out in the frame of the Project PON Smart Cities called SIGLOD and was aimed at the analysis of the seismic features for three specific sites of the Sicilian region (Bellolampo, PA; Siculiana, AG and Cava dei Modicani, RG). The study has been conducted using different kinds of data and methodologies, also including innovative ideas: firstly, the main seismogenic structures existing in Sicily and in the surrounding areas have been identified; then, the available information on the historical seismicity of the considered territory and on the kinematics of the recognized seismogenic structures has been evaluated. This information has then been introduced as input to an algorithm of earthquake simulator, which allowed the compilation of a synthetic seismic catalogue lasting 100,000 years for the whole territory of Sicily. This catalogue has been statistically analysed in order to obtain the recurrence time and the occurrence probability of large earthquakes in the considered area. Lastly, an attenuation law has been applied to all the events reported in the synthetic catalogue for the estimation of the exceedance probability of given values of peak acceleration (PGA) on the sites considered in the project.

Introduzione

Il Progetto PON Smart Cities denominato SIGLOD (Sistema Intelligente di Supporto alla Gestione e alla Localizzazione delle Discariche di Rifiuti) rappresenta, a partire dal territorio della Regione Sicilia, un esempio pilota per le pubbliche amministrazioni locali distribuite sul territorio nazionale.

Il lavoro qui presentato è stato svolto nell'ambito di tale progetto ed è stato finalizzato all'analisi delle condizioni di sismicità in tre specifici siti di discarica nella regione siciliana (Bellolampo, PA; Siculiana, AG e Cava dei Modicani, RG). Si è ritenuto, infatti, che eventi sismici di notevole intensità potrebbero perturbare le normali condizioni di sicurezza di tali siti di discarica, inducendo moti franosi o fratturazioni nel sottosu-

lo e la conseguente dispersione di materiali pericolosi per l'ambiente. Lo studio è stato condotto utilizzando dati e metodologie di analisi differenti. Tra queste metodologie, quella della simulazione dei cataloghi sismici ha un carattere decisamente innovativo come applicazione sul territorio italiano.

Il lavoro contiene una parte iniziale finalizzata all'inquadramento sismotettonico della regione in esame. Dopo una breve rassegna delle principali caratteristiche geologiche della Sicilia, sono state individuate e parametrizzate geometricamente, sulla base del catalogo DISS [2010], le principali strutture sismogenetiche presenti in Sicilia e nelle aree ad essa circostanti; quindi sono state valutate le informazioni disponibili nella banca dati dell'INGV sulla sismicità storica del territorio indagato [DBMI11 - Locati et al., 2011].

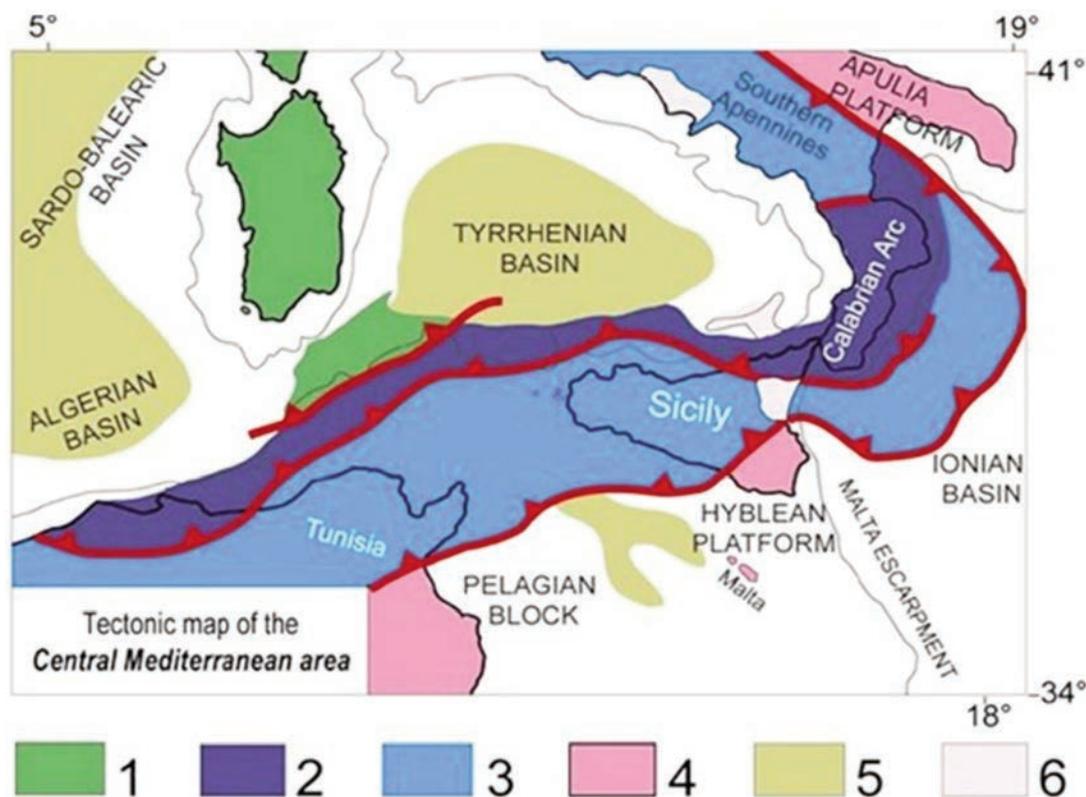


Figura 1 Schema tettonico del Mediterraneo centrale: 1) Corsica-Sardegna; 2) arco Kabilo-Peloritano-Calabro; 3) unità Appenninico-Maghrebidi e dell'avampaese deformato; 4) avampaese ed avampaese poco deformato; 5) aree in estensione; 6) vulcaniti plio-quadernarie [Catalano et al., 1996].

Figure 1 Tectonic sketch of the central Mediterranean region: 1) Corsica-Sardinia; 2) Kabil-Peloritan-Calabrian arc; 3) Apenninic-Maghrebic and deformed foreland units; 4) foreland and moderately deformed foreland; 5) extensional areas; 6) Plio-Quaternary volcanites [Catalano et al., 1996].

La quasi totale di assenza di sismicità riportata precedentemente al XVIII secolo indica come i dati storici, pur ricoprendo nel loro complesso un periodo di tempo superiore a due millenni, non siano completi, anche per eventi di intensità rilevante, se non per un intervallo di tempo limitato ai secoli più recenti. Questa circostanza, in relazione al presunto periodo di ritorno di grandi terremoti, valutato dell'ordine delle migliaia di anni, non consente di effettuare analisi statistiche attendibili basate soltanto sul catalogo storico disponibile. Appare allora necessario rivolgere l'attenzione a metodologie alternative per la valutazione della pericolosità sismica nei siti di interesse per il progetto.

Delle strutture sismogenetiche ritenute responsabili dell'attività sismica più rilevante per i siti in esame è stata valutata la cinematica in atto, utilizzando anche dati geodetici di deformazione disponibili in letteratura. Tali informazioni sono state poi utilizzate in un algoritmo di nuova concezione per la simulazione di attività sismica. Questo metodo consente la produzione di cataloghi sismici sintetici, di durata praticamente illimitata. Tali cataloghi possono essere analizzati con metodi statistici al fine di determinare i periodi di ritorno e la probabilità di occorrenza di grandi eventi sismici nell'area

indagata. Questa nuova metodologia è stata applicata all'intero territorio della Sicilia con la realizzazione di un catalogo sismico con durata di 100000 anni.

È stata infine applicata, a tutti gli eventi presenti nel catalogo sintetico, una ben nota legge di attenuazione per la stima delle probabilità di eccedenza di dati valori di accelerazione di picco (PGA) nei siti di interesse per il progetto.

1. Inquadramento geologico-strutturale

La Sicilia, situata nel settore centro-occidentale del bacino del Mediterraneo, è un segmento del sistema alpino che si sviluppa lungo il limite di placca Africa-Europa. Questo segmento di catena collega le Maghrebidi africane con l'Appennino meridionale, attraverso il cuneo di accrezione della Calabria (Fig. 1). La catena e il suo prolungamento sommerso occidentale e settentrionale si estendono dal blocco sardo attraverso la Sicilia, fino al settore ionico-pelagiano e in parte sono affioranti nel Mar Tirreno centro-meridionale.

La struttura della Sicilia consiste pertanto di un cuneo di accrezione carbonatico, principalmente costituito da unità

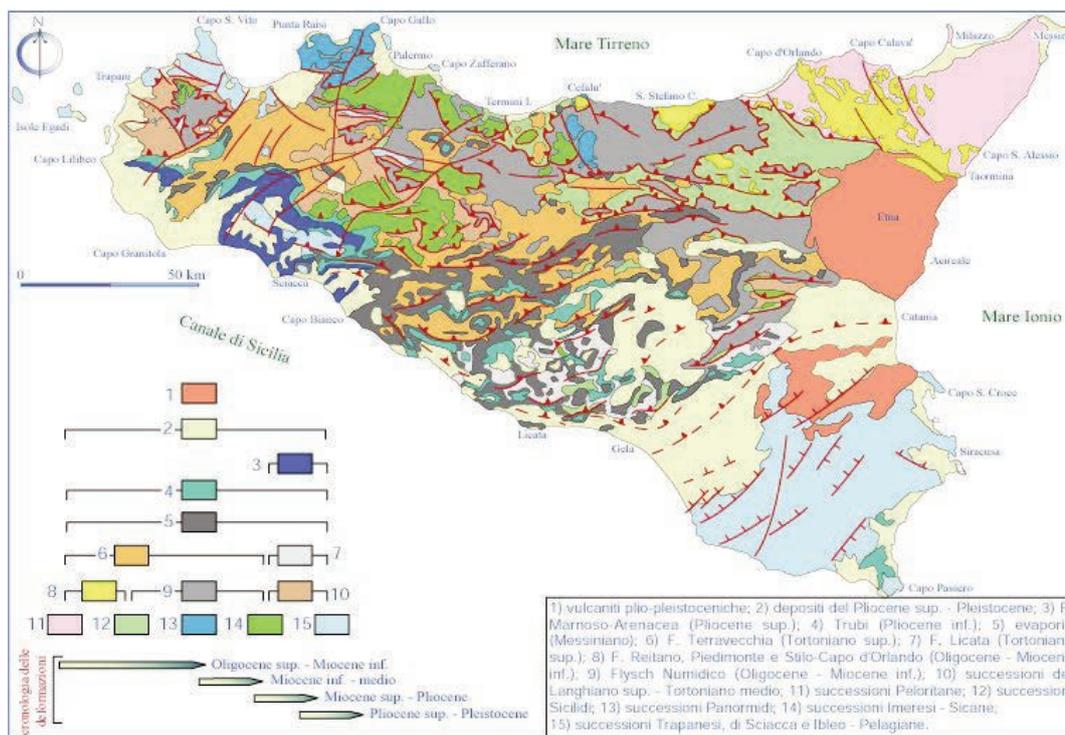


Figura 2 Schema geologico strutturale della Sicilia [Giunta et al., 2001].
Figure 2 Geo-structural sketch of Sicily [Giunta et al., 2001].

carbonatiche bacinali meso-cenozoiche, sovrapposto ad un cuneo tettonico, dello spessore di circa 8 km, di piattaforma carbonatica, a sua volta scollato rispetto a un basamento cristallino non deformato. Sia la geometria delle imbricazioni sia la deformazione interna delle unità originarie suggeriscono un'evoluzione tettonica dovuta ad una combinazione di *underplating* e rotazioni delle unità tettoniche verso l'avampese pelagiano. La cronologia della deformazione è compresa tra il Miocene inferiore e il Pleistocene inferiore-medio. Il progressivo scollamento delle unità carbonatiche bacinali meso-cenozoiche più interne e il loro trasporto sulle unità esterne è avvenuto durante il Miocene inferiore - Miocene superiore. Lo scollamento della piattaforma carbonatica dal suo basamento e il suo raddoppio, così come la reimbricazione e il raccorciamento delle sovrastanti scaglie tettoniche bacinali, si ebbero durante il Miocene superiore-Pleistocene inf.-medio. Questi eventi sembrano legati alla tettonica transpressiva accompagnata da rotazioni orarie delle unità tettoniche stesse. La ricostruzione palinspastica del cuneo tettonico suggerisce che i domini originari imerese e sicano occupavano una posizione paleogeografica più interna rispetto alla piattaforma carbonatica durante il Triassico-Giurassico. Questa ricostruzione è in accordo con il modello di una piattaforma carbonatica triassica interessata da *rifting*, collegata al cratone africano, e irregolarmente bordata da un ampio dominio bacinale [Catalano and D'Argenio, 1982; Catalano et al., 1996].

La notevole complessità dell'area in oggetto, sommariamente descritta poc'anzi, è evidenziata nella mappa geologico-strutturale della figura 2.

2. Definizione delle strutture sismogenetiche e analisi della sismicità storica

2.1 Sorgenti sismogenetiche composte e individuali

In questo studio si è fatto uso del catalogo denominato DISS (Database of Individual Seismogenic Sources), compilato attraverso l'analisi di numerosissime fonti riguardanti la sismotettonica della regione italiana [Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2010]. Tale catalogo riporta in forma sintetica e parametrica le informazioni sulle principali strutture sismogenetiche in grado di generare forti terremoti sul territorio nazionale. La figura 3 mostra lo schema delle strutture sismogenetiche riportate sul DISS che interessano la regione siciliana. Sono riportate nove sorgenti composte (fasce arancioni) e sei sorgenti individuali (rettangoli delineati in giallo), includendo il basso Tirreno e lo Stretto di Messina. Le informazioni salienti relative a queste sorgenti sono indicate rispettivamente in tabella 1 e tabella 2.

La figura 3 mette anche in risalto come le superfici delle sorgenti individuali (determinate in base ai valori di magni-

tudo dei terremoti in esse avvenuti) siano, esclusi i casi dello Stretto di Messina e degli Iblei, estremamente più piccole di quelle delle sorgenti composite su cui giacciono. Ciò induce a pensare che le magnitudo massime associate alle sorgenti composite (ultima colonna della Tab. 1), praticamente ricavate dalle magnitudo dei più recenti terremoti osservati, possano essere sottostimate.

Un rapido esame della tabella 1 rivela la grande incertezza del rateo di dislocazione (*slip rate*), che incide sulla possibilità di determinare i tempi di ricorrenza dei futuri eventi sismici (come è possibile notare anche in Tab. 2) e, da essi, la probabilità di occorrenza dei terremoti.

In tabella 2 si può inoltre notare che il tempo trascorso dall'ultimo terremoto è sempre molto più piccolo del tempo di ricorrenza, anche assumendo il valore più piccolo ipotizzabile per quest'ultimo. Questa circostanza, scartando la banale ipotesi che la sismicità sia improvvisamente aumentata in questi ultimi secoli (e in particolare nell'ultimo secolo), può

essere interpretata pensando che i tempi di ricorrenza siano sopravvalutati, oppure che molte sorgenti individuali siano ancora mancanti dal catalogo. Entrambe queste ipotesi hanno una forte rilevanza sulla stima della pericolosità sismica del territorio studiato. Si noti anche che per tutte le sei sorgenti individuali considerate, a parte quella dello Stretto di Messina, soltanto un terremoto è storicamente conosciuto per ciascuna di esse, cosa che impedisce la stima statistica del tempo di ricorrenza medio, utilizzando per la sua determinazione il calcolo della dislocazione cosismica divisa per il rateo di dislocazione su ciascuna sorgente.

I parametri riportati in tabella 1, assieme alle informazioni geometriche ricavabili dal DISS, hanno consentito la ricostruzione 3D delle sorgenti composite riportate in tabella 1. Un esempio di questa ricostruzione è mostrato in figura 4. Questa forma di parametrizzazione delle sorgenti sismiche è stata di grande utilità per l'applicazione dei simulatori di terremoti presentati nel successivo capitolo 4.

DISS code	Site	Min Depth (km)	Max Depth (km)	Strike	Dip	Rake	Slip Rate (mm/yr)	Max Magn.
ITCS014	Southern Tyrrhenian	2.0	18.0	220-280	30-55	60-120	0.1-1.4	6.2
ITCS042	Patti - Eolie	1.0	25.0	140-170	70-90	180-220	0.1-0.5	6.1
ITCS021	Marsala - Belice	3.0	10.0	250-290	40-60	85-135	0.1-0.5	5.6
ITCS006	Castelvetrano - Gela	3.0	10.0	260-320	20-40	75-125	0.1-0.5	5.5
ITCS029	Gela - Catania	3.0	10.0	226-260	20-40	80-100	0.1-0.5	6.0
ITCS035	Ragusa - Palagonia	1.0	23.0	355-15	60-90	350-30	0.1-1.0	5.6
ITCS017	Scicli - Giarratana	1.0	23.0	10-30	70-90	350-10	1.0-1.4	5.5
ITCS036	Monte Lauro	3.0	15.0	50-70	40-50	60-90	0.1-1.0	6.6
ITCS016	Aspromonte - Peloritani	2	13.0	10-30	25-40	250-280	0.9-2.0	7.0

Tabella 1 Parametri delle sorgenti composite del DISS presenti in Sicilia e nelle zone limitrofe.

Table 1 Parameters of the composite sources reported by DISS in Sicily and surrounding areas.

DISS Code	Site	Location	Length (km)	Width (km)	Slip (m)	Recurrence (yr)	Magn. Mw	Latest Earthquake
ITIS056	Southern Tyrrhenian	38.37 13.71	9.1	6.0	0.5	500-5000	5.5	6 Sep 2002
ITIS014	Belice	37.79 12.96	11.0	6.5	0.14	280-1400	5.6	15 Jan 1968
ITIS045	Patti Gulf	38.26 15.05	12.1	8.6	0.6	1200-6000	6.1	15 Apr 1978
ITIS106	Gravina di Catania	37.54 15.07	9.0	5.9	0.8	1600-8000	6.0	11 Jan 1693
ITIS074	Montelauro	37.15 15.01	24.0	11.9	1.0	1000-10000	6.6	11 Jan 1693
ITIS013	Messina Straits	38.06 15.61	40.0	20.0	1.42	710-1527	7.0	28 Dec 1908

Tabella 2 Parametri delle sorgenti individuali del DISS presenti in Sicilia e nelle zone limitrofe.

Table 2 Parameters of the individual sources reported by DISS in Sicily and surrounding areas.

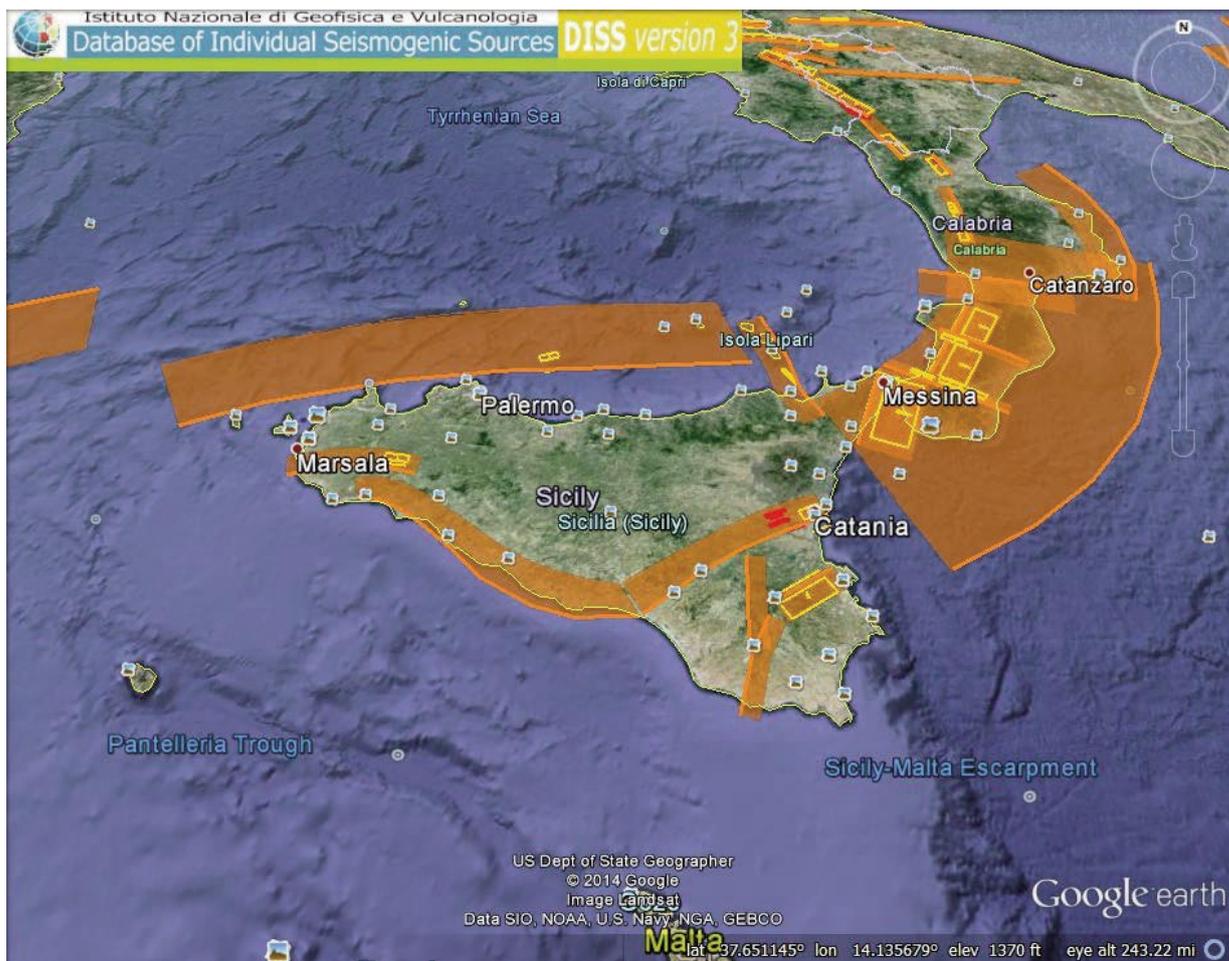


Figura 3 Strutture sismogenetiche presenti sul territorio della Sicilia riportate nel DISS (in arancione: sorgenti composite; in giallo: sorgenti individuali).
Figure 3 Seismogenic structures of the Sicilian territory reported by DISS (in orange: composite sources; in yellow: individual sources).

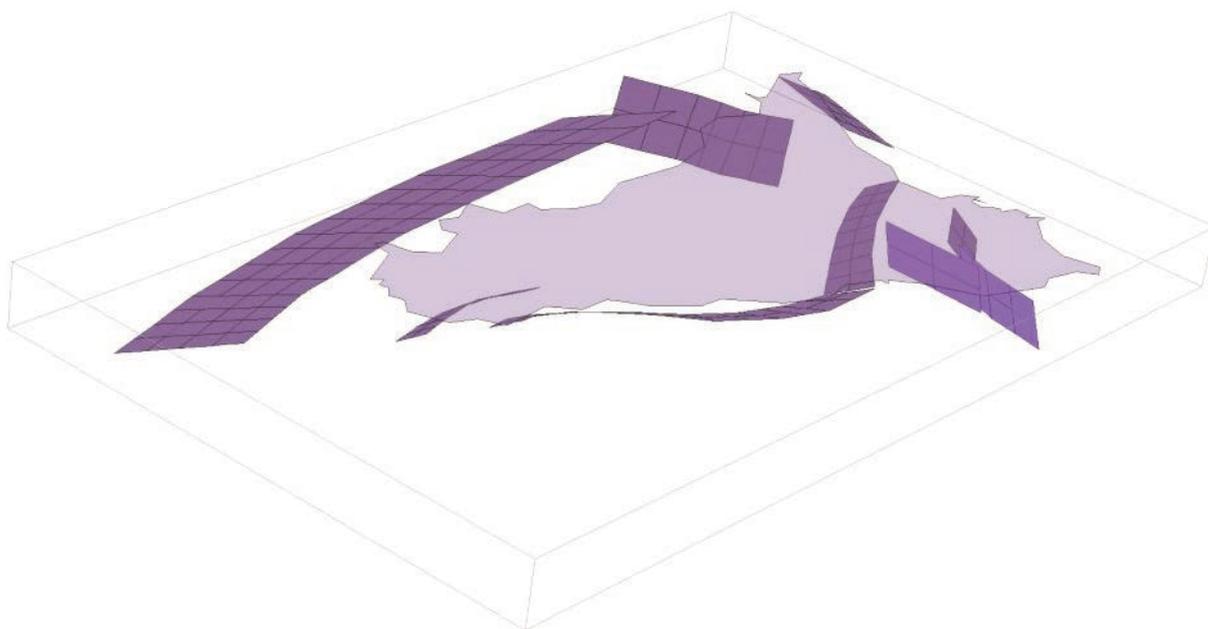


Figura 4 Ricostruzione 3D delle nove sorgenti sismiche composite, riportate nel DISS, utilizzate in questo studio.
Figure 4 3D representation of the nine composite seismic sources, as reported by DISS, considered in this study.

2.2 Sismicità storica

In questa parte riassumeremo i risultati dell'analisi delle conoscenze storiche sui terremoti realmente avvenuti nelle aree di interesse del nostro studio. In tabella 3 sono riportati i nomi e le coordinate dei siti di discarica cui è dedicato il Progetto SIGLOD. Come è possibile osservare dalla figura 5, nella quale sono riportate, con mappatura su base comunale [Molin et al., 1996], le massime intensità storicamente osservate dei terremoti avvertiti in Sicilia, il sito che ha subito il terremoto più intenso è stato quello di Cava dei Modicani (intensità Mercalli pari o superiore al X grado), seguito dal sito di Bellolampo (intensità del IX grado) e da quello di Siculiana (intensità del VII grado). Come accennato precedentemente, la brevità del periodo coperto da informazioni sismiche storiche rispetto ai tempi di ritorno attesi per gli eventi di maggiore magnitudo, non consente di escludere che i siti qui considerati vengano col-

piti in futuro da eventi di magnitudo ancora superiore a quella finora riportata. Approfondendo la nostra indagine sui siti di discarica ai quali è rivolto lo studio, riportiamo i risultati dell'analisi della sismicità storica ottenuti attraverso la banca dati dell'INGV, ovvero il Database Macrosismico Italiano (DBMI) [Locati et al., 2011].

Site location	Decimal degrees	Degrees minutes seconds
Bellolampo (PA)	38.1458°N 13.2725°E	38°08'45"N 13°16'21"E
Siculiana (AG)	37.3806°N 13.4047°E	37°22'50"N 13°24'17"E
Cava dei Modicani (RG)	36.9836°N 14.7068°E	36°59'01"N 14°42'24"E

Tabella 3 Coordinate dei siti delle discariche.
Table 3 Geographical coordinates of the landfill sites.

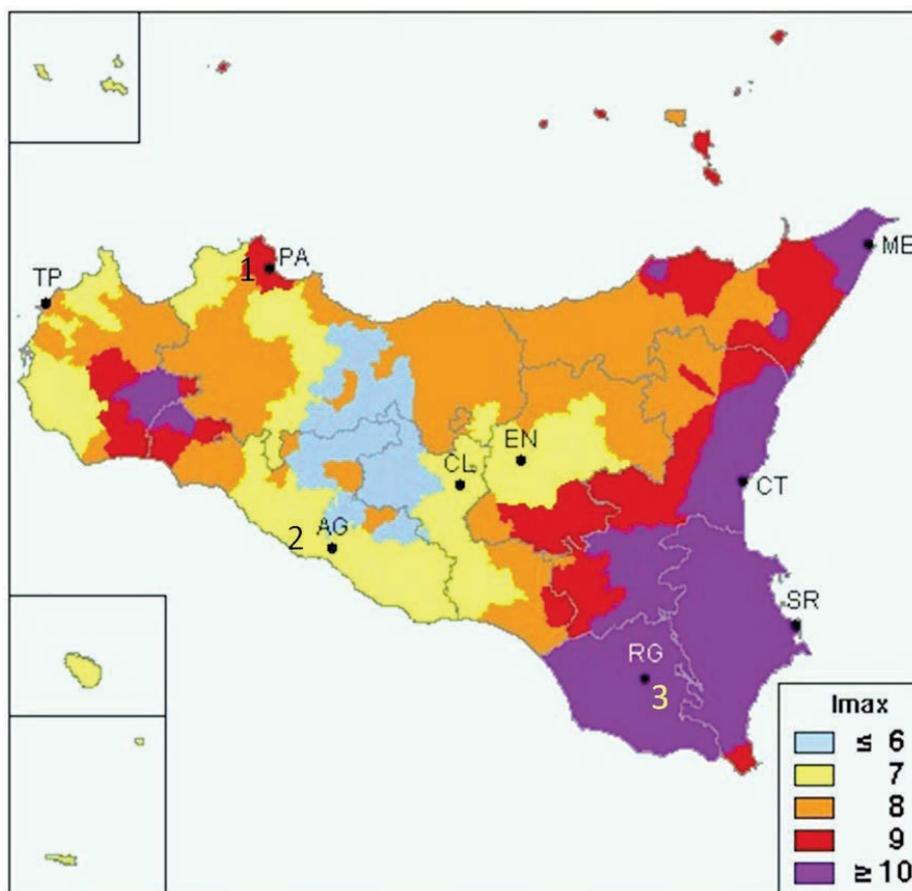


Figura 5 Mappa delle massime intensità avvertite storicamente sul territorio della Sicilia. Sono indicati i confini provinciali, i capoluoghi di provincia e i siti delle discariche considerati nel Progetto SIGLOD: 1 - Bellolampo (PA), 2 - Siculiana (AG), 3 - Cava dei Modicani (RG).

Figure 5 Map of the maximum seismic intensities historically felt on the territory of Sicily. The map shows the province borders, the province capital cities and the landfill sites considered in the SIGLOD Project: 1 - Bellolampo (PA), 2 - Siculiana (AG), 3 - Cava dei Modicani (RG).

La figura 6 mostra l'istogramma delle intensità risentite, nel capoluogo comunale di ciascuno dei tre siti, in funzione del tempo. Si noti che tali intensità sono state determinate da dati macrosismici realmente osservati, e non calcolate attraverso leggi di attenuazione. Gli stessi dati, completati con le informazioni epicentrali dei relativi terremoti, sono anche

riportati in forma tabulare nell'Appendice 1. Osservando la figura 6 è possibile evidenziare l'incompletezza dei dati riguardanti i secoli precedenti al 1700, rispetto a quelli più recenti. In particolare, per la zona di Palermo, sembra evidente che soltanto a partire dal XVIII secolo esista un catalogo affidabile per intensità superiori al V-VI grado Mercalli.

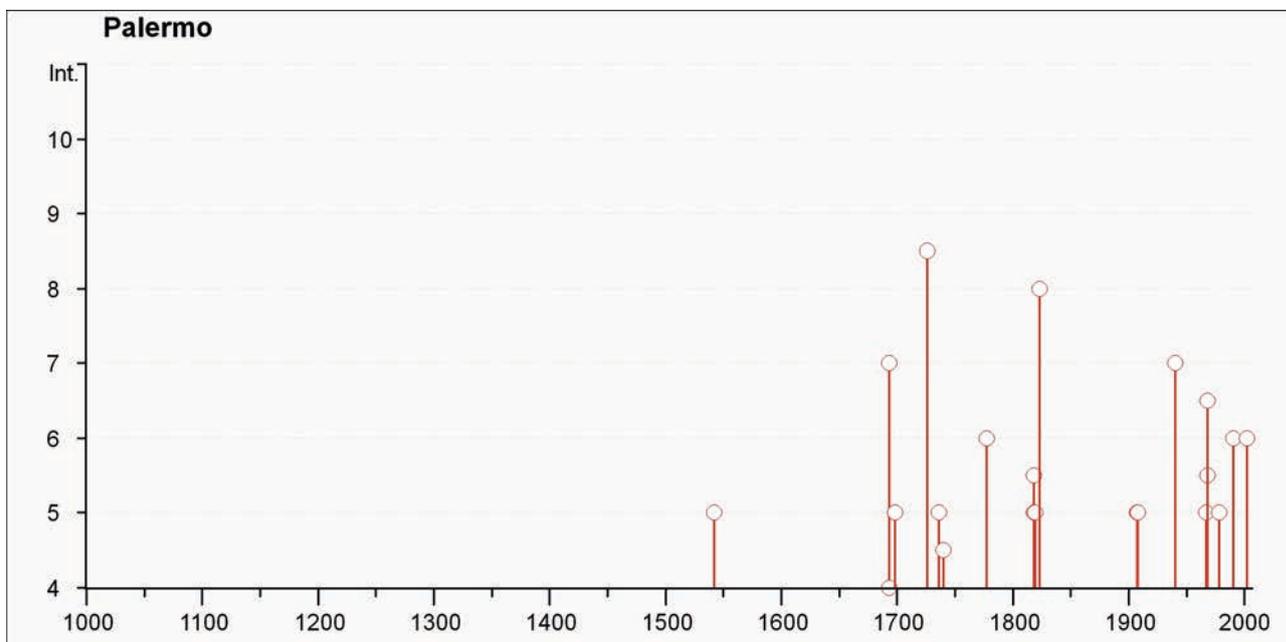


Figura 6a Intensità dei terremoti riportate storicamente nel comune dell'area di discarica di Bellolampo (PA), considerata nel Progetto SIGLGD.
Figure 6a Intensity of the earthquakes historically reported in the municipality of the Bellolampo (PA) landfill site, considered in the SIGLGD Project.

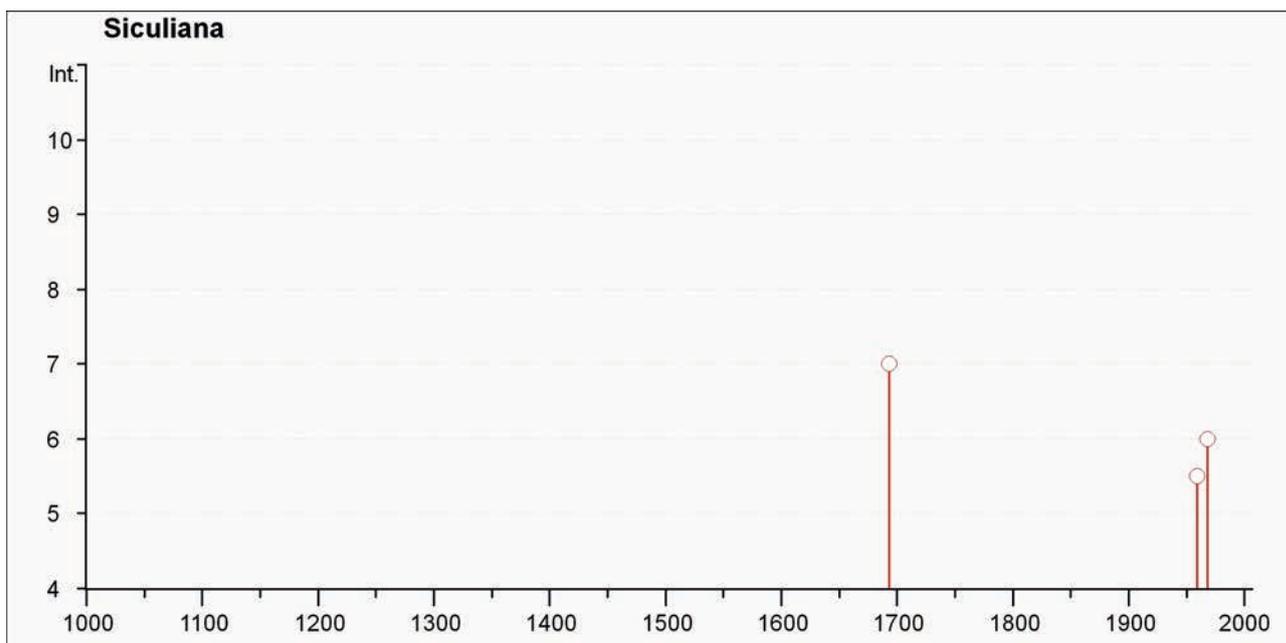


Figura 6b Intensità dei terremoti riportate storicamente nel comune dell'area di discarica di Siculiana (AG), considerata nel Progetto SIGLGD.
Figure 6b Intensity of the earthquakes historically reported in the municipality of the Siculiana (AG) landfill site, considered in the SIGLGD Project.

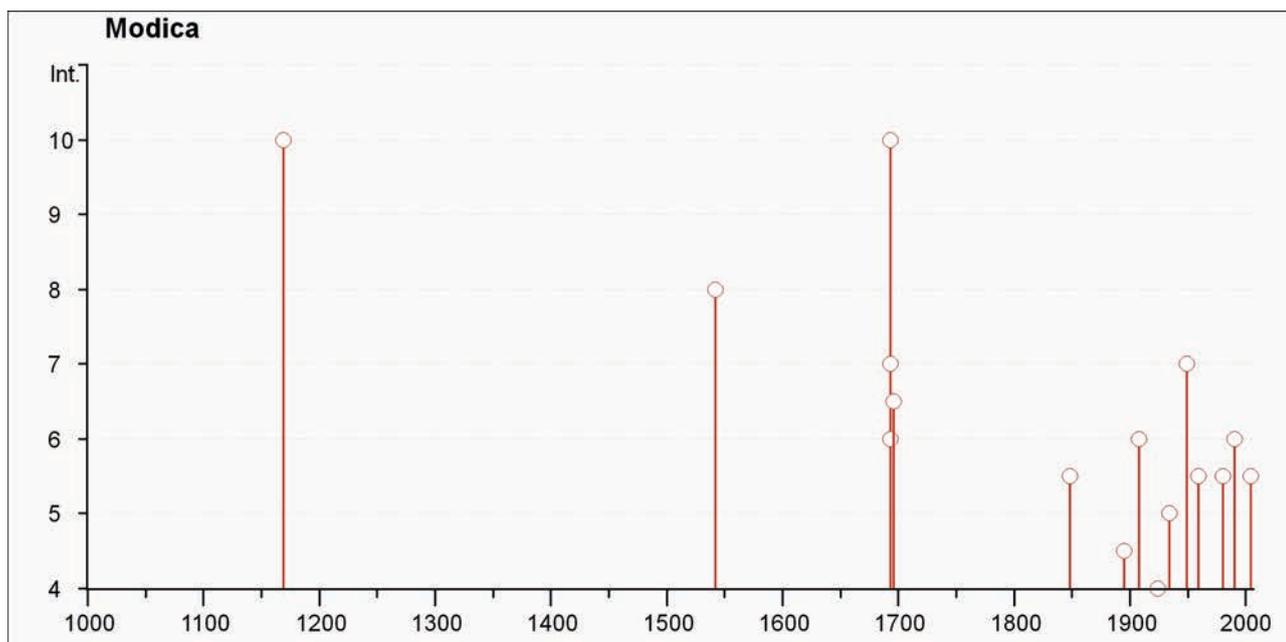


Figura 6c Intensità dei terremoti riportate storicamente nel comune dell'area di discarica di Cava dei Modicani (RG), considerata nel Progetto SIGLOD.

Figure 6c Intensity of the earthquakes historically reported in the municipality of the Cava dei Modicani (RG) landfill site, considered in the SIGLOD Project.

Per quanto riguarda invece la zona di Modica, si può affermare che, a parte la sequenza sismica del 1693, una certa completezza per intensità superiori al V-VI grado Mercalli esiste soltanto a partire dalla seconda metà del XIX secolo.

A scopo di verifica di quanto ora affermato sulla completezza della Banca Dati DBMI, è stato anche consultato il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI) [Rovida et al., 2011]. In tutta la regione comprendente i tre siti presi in esame il CPTI non riporta alcun evento sismico precedente al 1700 che non sia compreso anche nel DBMI, ad eccezione del terremoto di Mineo del 1624 (Mw 5.6), il cui epicentro dista circa 40 km dal sito di Cava dei Modicani. Citiamo, inoltre, i risultati di un'analisi statistica sulla completezza della storia sismica italiana [Albarello et al., 2001], condotta sul catalogo sismico NT4.1 [Camassi e Stucchi, 1997]. Secondo tale analisi, l'intervallo di completezza per terremoti di intensità pari o superiore all'VIII grado MCS inizia rispettivamente nel 1600-1650 (Bellolampo e Siculiana) e nel 1650-1700 (Cava dei Modicani).

Per concludere questa rassegna storica si riportano, per le aree di nostro interesse, le informazioni contenute nella banca dati della pericolosità sismica in Italia gestita dall'INGV [Meletti and Montaldo, 2007]. Questi dati sono disponibili in forma probabilistica come valori di accelerazione di picco del suolo (PGA) caratterizzata da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (periodo di ritorno di 475 anni), e sono determinati sia a partire dall'applicazione di leggi di attenuazione agli eventi sismici dei quali sia

conosciuta la ricorrenza, sia attraverso considerazioni di omogeneità geologica fra zone interessate dalle stesse strutture sismogenetiche [Meletti and Montaldo, 2007]. La figura 7 mostra i valori dell'accelerazione di picco attorno alle aree di discarica su una griglia con passo di 0.05° . Tali valori dell'accelerazione risultano consistenti con quelli delle suddette intensità massime osservate. In particolare, l'area di maggiore pericolosità sismica risulta quella di Cava dei Modicani, dominata dagli effetti del terremoto della Val di Noto del 1693, seguita da quella di Bellolampo e da quella di Siculiana. Per tali aree, le mappe di figura 7 forniscono i seguenti valori:

Bellolampo	0.150 - 0.175 g
Siculiana	0.050 - 0.075 g
Cava dei Modicani	0.225 - 0.250 g

3. Stima delle deformazioni tettoniche in atto

3.1 Osservazioni geodetiche

Vengono qui riportate alcune delle conoscenze disponibili sulla cinematica in atto sulle strutture sismogenetiche precedentemente descritte, con lo scopo di utilizzare tali informazioni in algoritmi di simulazione di attività sismica. Le informazioni qui contenute derivano largamente dallo studio "Tettonica attiva nel settore peri-tirrenico meridionale tramite integrazione di dati geodetici e geologici" [Mazzella, 2010].

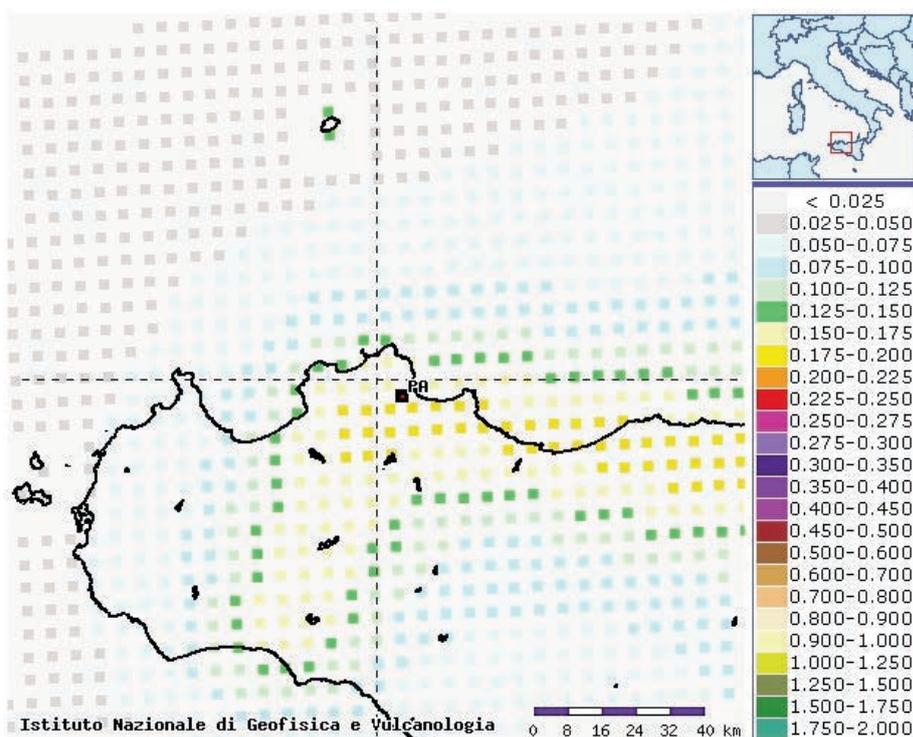


Figura 7a Accelerazione di picco del suolo (PGA) caratterizzata da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni nei punti centrati sull'area di discarica di Bellolampo (PA), considerata nel Progetto SIGLOD.

Figure 7a Peak ground acceleration (PGA) relative to a probability of exceedance of 10% in 50 years in the points centred on the Bellolampo (PA) landfill site, considered in the SIGLOD Project.

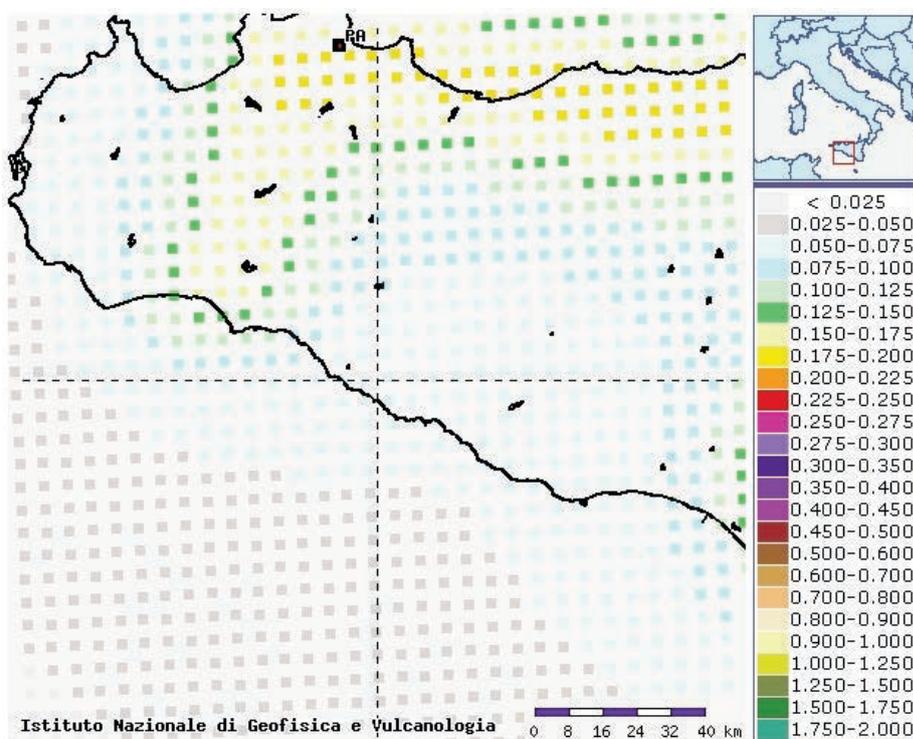


Figura 7b Accelerazione di picco del suolo (PGA) caratterizzata da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni nei punti centrati sull'area di discarica di Siculiana (AG), considerata nel Progetto SIGLOD.

Figure 7b Peak ground acceleration (PGA) relative to a probability of exceedance of 10% in 50 years in the points centred on the Siculiana (AG) landfill site, considered in the SIGLOD Project.

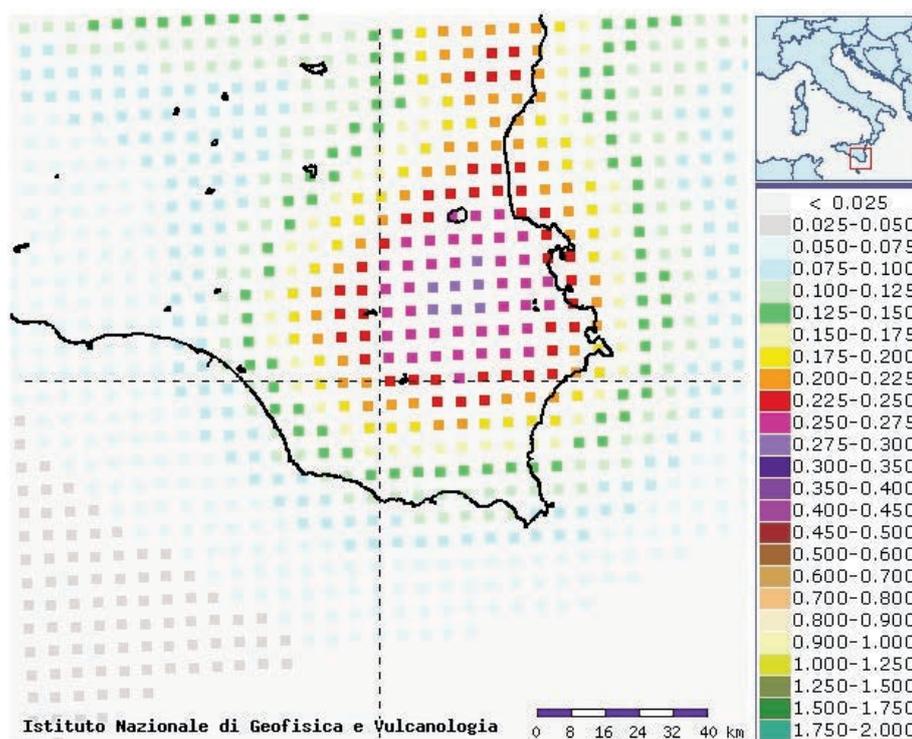


Figura 7c Accelerazione di picco del suolo (PGA) caratterizzata da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni nei punti centrati sull'area di discarica di Cava dei Modicani (RG), considerata nel Progetto SIGLGD.

Figure 7c Peak ground acceleration (PGA) relative to a probability of exceedance of 10% in 50 years in the points centred on the Cava dei Modicani (RG) landfill site, considered in the SIGLGD Project.

Tale studio si inserisce all'interno di un progetto di ricerca che sfrutta sistemi GPS non-permanenti per effettuare misure di alta precisione di spostamenti nell'area peri-tirrenica (progetto PTGA: "Pery-Tyrrhenian Geodetic Array") [Oldow et al., 2002; Ferranti et al., 2008]. Il principale obiettivo del progetto è la caratterizzazione cinematica dell'Appennino meridionale e delle isole tramite misure GPS che consentono di indagare i movimenti relativi nell'area peri-tirrenica. A tal fine sono stati utilizzati dati relativi a 5 campagne di misura condotte nel 1995, 1997, 2000, 2008 e 2010, per un totale di 40 siti misurati in intervalli di tempo che vanno da 10 a 15 anni a seconda dei siti. I risultati scaturiti dalle misure GPS hanno permesso di migliorare i dati ottenuti dalle precedenti analisi [Ferranti et al., 2008].

Nel sistema di riferimento europeo tutti i siti della rete tranne quelli in Sardegna mostrano spostamenti verso i quadranti settentrionali (Fig. 8). Questi spostamenti non sono però paralleli al generale movimento dell'Africa; più specificamente la porzione a W del *rift* africano, nota come Nubia, presenta una migrazione verso l'Europa, che avviene a S della Sicilia, a circa 4 mm/a in direzione NW (Fig. 8). Essi, inoltre, presentano una significativa variabilità interna che sottolinea la presenza non di un solo dominio con un unico movimento, quantunque slegato da Nubia,

bensi di distinti domini di deformazione con differenti componenti del movimento orizzontale (Fig. 8). Le velocità variano da 0,4 a 8 mm/a, e le maggiori dislocazioni avvengono in Appennino meridionale e in Sicilia. In Sicilia nord-occidentale le velocità sono orientate verso NNW con valori fino a 5 mm/a, e in Sicilia sud-orientale raggiungono gli 8 mm/a mantenendo la stessa orientazione verso NNW.

La variabilità interna delle velocità dei siti PTGA in Sicilia dimostra come questi siano svincolati dal generale movimento di Nubia verso Europa in direzione NW (Fig. 8), e si muovano non come un unico blocco coerente bensì come differenti domini con differenti componenti del movimento orizzontale.

3.2 Relazione tra deformazioni, sismicità e sorgenti sismogenetiche

La Sicilia orientale è caratterizzata dalle sorgenti composite di Gela-Catania a N e di Scicli-Giarratana a S (Fig. 9; e Fig. 3 nel paragrafo 2.1). Il movimento relativo delle stazioni al sito IGS NOTO in quest'area orientale della Sicilia suggerisce una dislocazione attiva al fronte della catena, dove le velocità dei siti CONS e JUDI differiscono tra loro di 1.2 ± 0.7 mm/a lungo una direzione NW-SE, perpendicolare al fronte

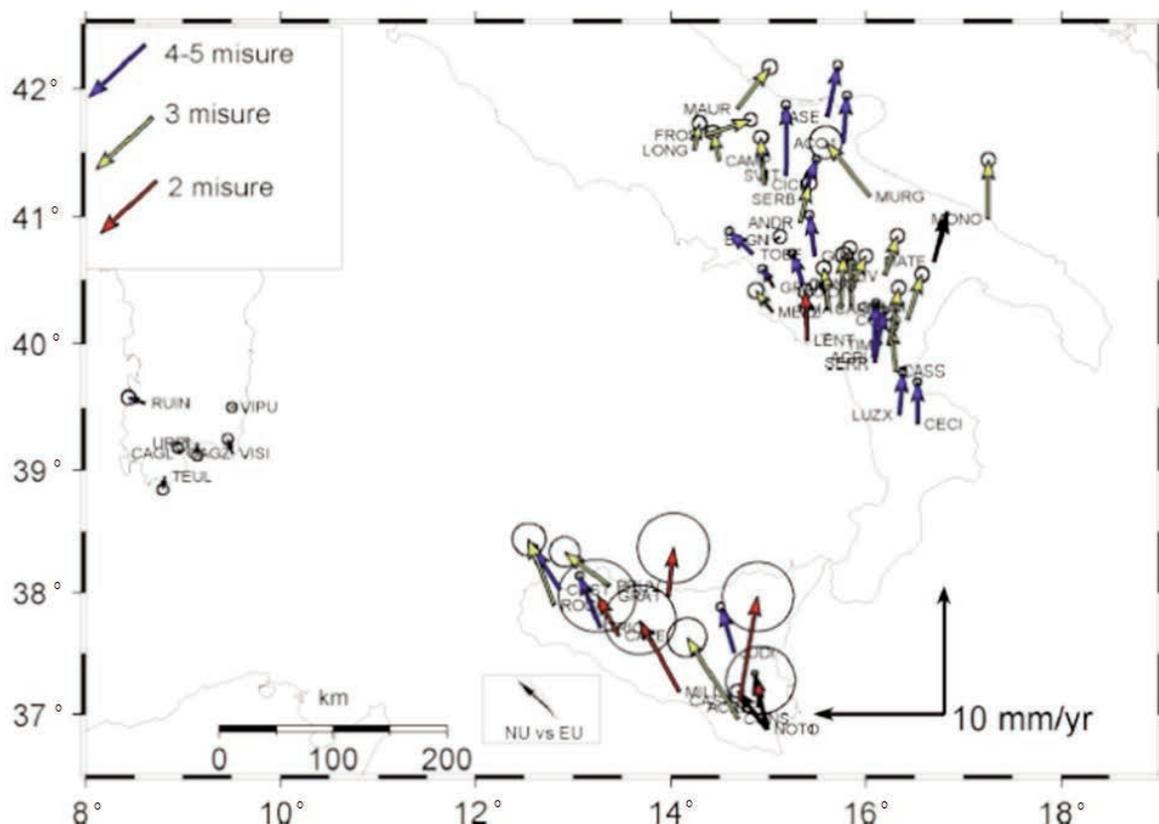


Figura 8 Campo di velocità rispetto a Europa stabile delle stazioni PTGA e delle stazioni permanenti dell'International GNSS Service (IGS) di Matera, Noto e Cagliari, con ellissi di confidenza al 95%. Le frecce blu indicano stazioni con 5 misure, le frecce gialle stazioni con 3 misure, le frecce rosse, stazioni con 2 misure. È anche mostrata la soluzione della velocità geodetica di Nubia (NU) rispetto a Europa (EU) [Mazzella, 2010].

Figure 8 Velocity field referred to a stable Europe of the PTGA stations and of the permanent stations of the International GNSS Service (IGS) Matera, Noto and Cagliari, with their respective 95% confidence ellipses. The blue arrows show stations with 5 measurements, the yellow arrows stations with 3 measurements, the red arrows stations with 2 measurements. The solution of the geodetic velocity of Nubia (NU) with respect to Europe (EU) is also shown [Mazzella, 2010].

DISS code	Site	Min Depth (km)	Max Depth (km)	Strike	Dip	Rake	Slip Rate (mm/yr)
ITCS014	Southern Tyrrhenian	2.0	18.0	220-280	30-55	60-120	1.5-2.7
ITCS042	Patti - Eolie	1.0	25.0	140-170	70-90	180-220	0.1-0.5
ITCS021	Marsala - Belice	3.0	10.0	250-290	40-60	85-135	0.9-2.1
ITCS006	Castelvetrano - Gela	3.0	10.0	260-320	20-40	75-125	0.5-1.9
ITCS029	Gela - Catania	3.0	10.0	226-260	20-40	80-100	0.5-1.9
ITCS035	Ragusa - Palagonia	1.0	23.0	355-15	60-90	350-30	0.1-1.0
ITCS017	Scicli - Giarratana	1.0	23.0	10-30	70-90	350-10	1.8-3.0
ITCS036	Monte Lauro	3.0	15.0	50-70	40-50	60-90	1.8-3.0
ITCS016	Aspromonte - Peloritani	2	13.0	10-30	25-40	250-280	0.9-2.0

Tabella 4 Parametri delle sorgenti composite del DISS presenti in Sicilia e nelle zone limitrofe rivalutati alla luce del presente studio (valori in rosso).

Table 4 Parameters of the DISS composite sources in Sicily and surrounding areas re-evaluated in the light of the present study (values in red).

della catena, e di 1.6 ± 0.7 mm/a lungo una direzione parallela al fronte stesso. Pertanto ne risulta una convergenza nell'area del sovrascorrimento frontale, accompagnata da un movimento trascorrente sinistro.

Nel *foreland* ibleo il sito CONS invece si allontana da NOTO ad una velocità di 2.8 ± 0.6 mm/a suggerendo la presenza di una struttura attiva tra i due, identificabile con quella di Scicli-Giarratana, per la quale gli studi geomorfologici suggeriscono una più recente trascorrenza sinistra che, tuttavia, non ritroviamo nella componente di velocità di CONS parallela alla direzione della faglia di 2.4 ± 0.6 mm/a verso N, e quindi in trascorrenza destra.

In Sicilia occidentale la struttura principale è la sorgente composita di Marsala-Belice (Fig. 9) che costituisce la porzione occidentale del sistema a *thrust* Appenninico-Magrebide. In quest'area è stata riconosciuta la sorgente individuale del Belice, legata al terremoto del 1968 di Mw 5.6. I dati sono consistenti con una fascia di deformazione compressiva nella parte centro-settentrionale dell'isola. Tra i siti più occidentali ROCC e CRST, la convergenza avviene a 1.8 ± 0.6 mm/a in direzione N-S, tra TRIO e PRUV, più ad E, i valori sono simili e si attestano a 1.3 ± 0.6 mm/a. Questi ultimi registrano, inoltre, un movimento di trascorrenza sinistra di $1.9 \pm$

0.6 mm/a lungo una direzione E-W (Fig. 9).

Per quanto riguarda la fascia sismica del Tirreno meridionale (indicata con ITCS014 nel catalogo DISS), Serpelloni et al. [2007] riportano che su di essa si scarica una deformazione pari a 2.1 ± 0.6 mm/a (vale a dire circa metà) del moto verso NW della placca siciliana. La restante deformazione è attribuita invece all'area più settentrionale tra Ustica e il blocco sardo-corso.

In conclusione il confronto tra il comportamento cinematico dell'area tirrenica meridionale e della Sicilia e le principali strutture sismogenetiche attive riportate dal DISS 3.1.1 ha consentito di caratterizzare tali aree deformative tramite una valutazione dell'accumulo di *strain* intersismico.

In Sicilia, il movimento relativo al sito IGS NOTO suggerisce una dislocazione attiva del settore frontale della catena a poco più di 1 mm/a, mentre in Sicilia nord-occidentale il campo di velocità mostra un allontanamento dei siti rispetto a NOTO con velocità decrescente procedendo verso W tra 0.4 e 2.2 mm/a circa. Il campo di deformazione mostra compressione in tutta l'isola fatta eccezione per il bordo sud-orientale. La tabella 4 riporta il rateo di *slip* dedotto dalle misure di geodesia satellitare PTGA per le sorgenti composte del DISS prese in considerazione.

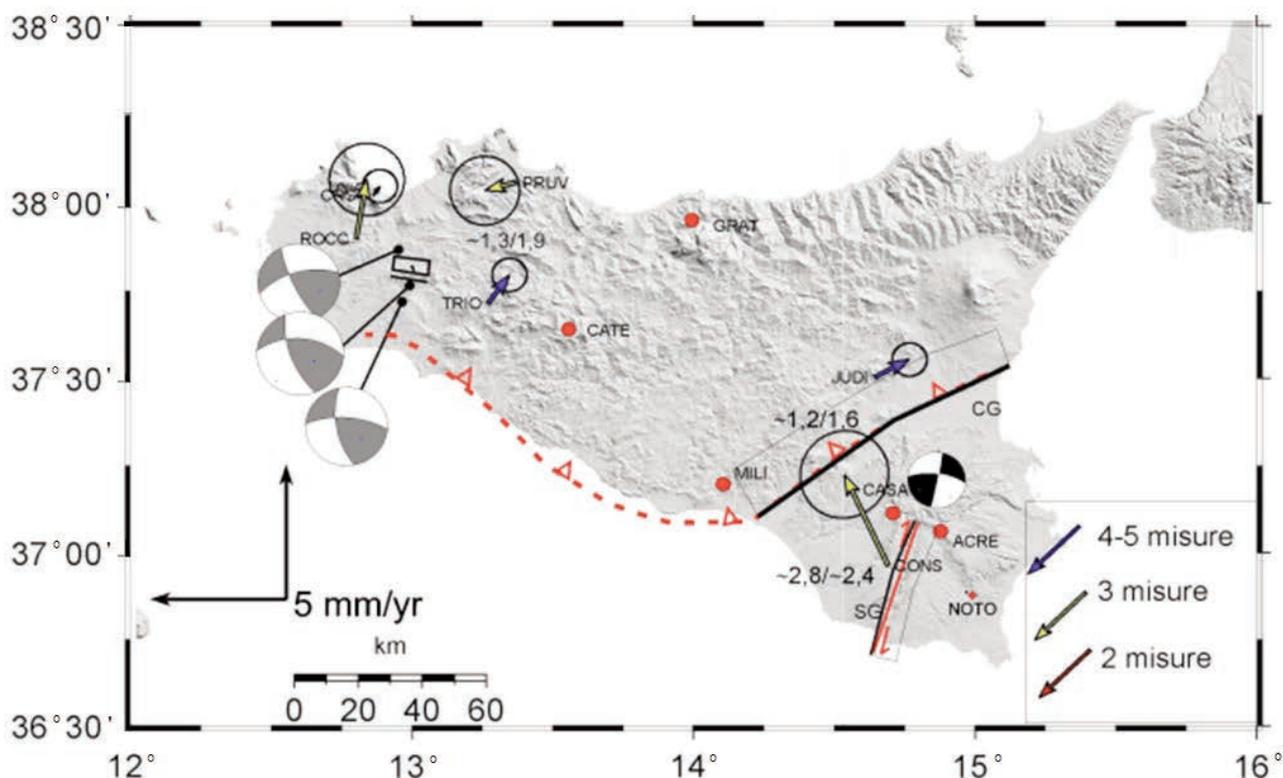


Figura 9 Campo di velocità PTGA in Sicilia riferito al sito stabile di NOTO, ricavato dai siti con tre o più misure. Sono presenti inoltre i meccanismi focali dei terremoti recenti, le sorgenti sismogenetiche DISS, composite e individuali, e i siti con 2 sole misure (pallini rossi). SG: faglia di Scicli-Ragusa; CG: faglia di Gela-Catania [Mazzella, 2010].

Figure 9 PTGA velocity field in Sicily referred to the stable site of NOTO, obtained from the sites with three or more measurements. Also shown are the focal mechanisms of the recent earthquakes, the DISS seismogenic sources, composite and individual, and the sites with only two measurements (red dots). SG: Scicli-Ragusa fault; CG: Gela-Catania fault-[Mazzella, 2010].

4. Simulazione di un catalogo sismico

È ben noto che la verifica e la validazione di modelli di occorrenza di eventi sismici a lungo termine (decine e centinaia di anni) costituisce un formidabile problema. Infatti, nello studio dei grandi terremoti le nostre osservazioni storiche abbracciano un periodo di tempo troppo breve per consentire la verifica statistica di tali modelli. Per superare queste difficoltà, vari sismologi hanno considerato utile l'applicazione di simulatori di attività sismica basati su potenti algoritmi in grado di riprodurre lo sviluppo dinamico di fratture su sistemi di faglie interagenti e il trasferimento di sforzo fra le loro varie parti [Ward, 2012; Richards-Dinger and Dieterich, 2012]. In particolare, questi algoritmi sono stati applicati con successo a un modello che comprende il complesso sistema di faglie della California [Tullis, 2012].

Nel presente studio, seguendo le linee dei lavori pubblicati dagli autori sopra citati, è stata simulata l'attività sismica del sistema di faglie interne o circostanti al territorio della regione siciliana. Sebbene sia basato su alcuni dei principi adottati in tali lavori, il nostro algoritmo è stato sviluppato indipendentemente, allo scopo di dimostrare che un modello caratterizzato da poche, semplici e realistiche assunzioni consente la replica, non solo delle caratteristiche spaziali, ma anche di quelle temporali tipiche della sismicità osservata. Le relazioni fra i parametri di sorgenti sismiche usati nel nostro algoritmo hanno una giustificazione fisica, e sono consistenti con le relazioni empiriche note dalla letteratura [Console et al., 2015].

4.1 Algoritmo del programma di simulazione

L'algoritmo applicato in questo studio è stato sviluppato su concetti quali il vincolo rappresentato dal rateo di *slip* a lungo termine sulle faglie, e l'aderenza a un modello fisico di espansione della frattura, ma senza l'introduzione di parametri reologici dipendenti dal tempo sulle faglie. In virtù della sua relativa semplicità, il nostro algoritmo è utilizzabile per la produzione di cataloghi che simulano l'attività sismica a lungo termine di sistemi di faglie relativamente semplici e che includono decine di migliaia di eventi, anche facendo uso di modeste risorse di calcolo.

I concetti essenziali sui quali è basato l'algoritmo sono rappresentati nel diagramma di flusso di figura 10.

La sorgente sismogenetica è approssimata da un rettangolo, comunque orientata nello spazio ed è composta da un numero di celle di dimensioni assegnate. A ogni cella è attribuito uno stress iniziale compreso in un determinato intervallo, attorno a un valore medio, entrambi assegnati liberamente. Il valore corrente su ogni cella è variato progressivamente in tre modi:

1. è aumentato ad ogni passo temporale in base al rateo di *slip* tettonico assegnato alla luce di misurazioni geodetiche o di altro tipo di informazioni;
2. è diminuito all'istante di occorrenza di ogni frattura, di un valore ricavato in base al valore dello *slip* dell'evento, tenendo conto del numero di celle fratturate. Una stessa cella può fratturarsi più volte nello stesso terremoto, se la frattura continua a svilupparsi;
3. è aumentato del valore della variazione di *stress* di Coulomb (DCSS) associato a una sorgente puntiforme posta al centro di ogni altra cella del sistema; dato che si assume che ogni cella si fratturi approssimativamente con lo stesso meccanismo e sullo stesso piano di faglia, questo DCSS è sempre positivo.

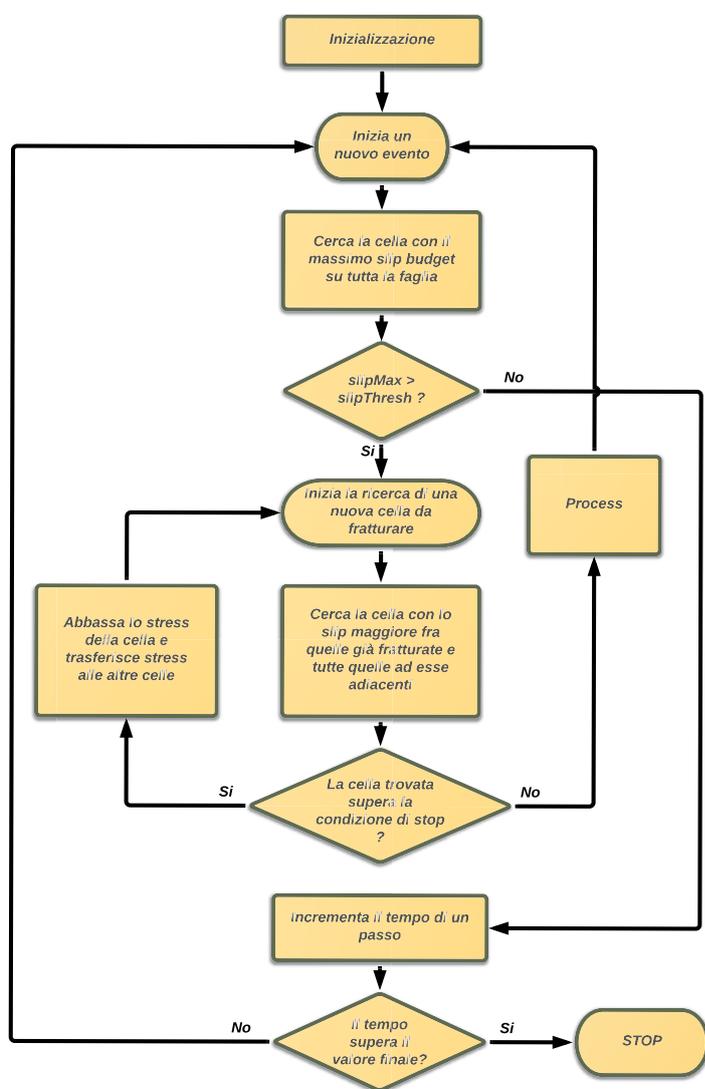


Figura 10 Diagramma di flusso semplificato dell'algoritmo di simulazione spazio-temporale di attività sismica.
Figure 10 Simplified flow chart of the algorithm for the space-time simulation of seismic activity.

Ogni frattura viene attivata sulla cella che presenta il maggiore *stress* di tutto il sistema, a condizione che

tale *stress* superi un valore di soglia, assegnato inizialmente entro un determinato intervallo attorno a un valore medio. La seconda cella a fratturarsi, in uno specifico evento, è scelta come quella con il maggiore *stress* fra le otto altre celle che circondano la cella sulla quale è avvenuta la nucleazione. Il processo prosegue finché le condizioni di arresto vengono soddisfatte, vale a dire quando nessuna cella, fra quelle limitrofe o quelle precedentemente fratturate nello stesso evento, presenta uno *stress* residuo che superi il rispettivo valore di soglia.

È stata posta particolare attenzione alla parte del programma di simulazione che determina le condizioni di arresto di una frattura già iniziata. Si sono ottenuti risultati ragionevoli mediante l'introduzione di un paio di regole "euristiche" per modulare la soglia di *stress* che deve essere superata per espandere la frattura a nuove celle o ripetere lo *slip* di una cella preventivamente fratturata. Queste regole, che hanno un notevole impatto sulla distribuzione in magnitudo dei cataloghi sintetici, implicano che:

- la soglia di *stress* prefissata, per ogni cella, per la nucleazione di un evento sia diminuita, dopo la rottura iniziale della cella di nucleazione, di una quantità proporzionale alla radice quadrata del numero di celle già fratturate, moltiplicata per un parametro libero denominato "*strength reduction coefficient*". Questa regola tiene conto dell'improvvisa diminuzione di resistenza ai bordi dell'area di frattura in espansione;
- la radice quadrata del numero di celle già fratturate sia limitata a un numero uguale alla larghezza della faglia, divisa per la larghezza di una cella, e moltiplicata per un parametro libero denominato "*fault aspect ratio*".

Sebbene la prima di queste due regole empiriche favorisca la capacità di un evento già nucleato a espandersi in una frattura più grande, la seconda limita tale tendenza a una dimensione che non superi un certo numero di volte quella della larghezza della faglia. Come è stato dimostrato da numerose prove, il parametro "*strength reduction coefficient*" (tipicamente dell'ordine di qualche per cento) influenza la proporzione fra il momento sismico rilasciato dai piccoli e dai grandi eventi: minore è questo parametro, maggiore è il numero di eventi piccoli. Al contrario, il parametro "*fault aspect ratio*" non influisce sulla distribuzione di magnitudo dell'attività di fondo, ma agisce sulla forma della distribuzione di magnitudo nel *range* delle magnitudo più grandi.

Questo algoritmo abbastanza semplice assicura un processo stabile, durante il quale lo *stress* disponibile si mantiene al disotto della soglia di nucleazione, e non si annulla mai, se viene scelto un valore iniziale appropriato. Il rateo di terremoti nel tempo è controllato dal rateo di *slip* tettonico assegnato alla faglia.

La magnitudo più piccola di un evento prodotto dal simulatore è quella corrispondente alla frattura di una singola cella;

comunque il programma consente all'utente di scegliere a proprio piacimento la minima magnitudo riportata nel catalogo sintetico (che non può essere minore della magnitudo associata a un evento che frattura una sola volta un'unica cella). Inoltre il programma dispone di un'opzione che fa girare l'algoritmo per un certo tempo, definito *tempo di stabilizzazione*, prima dell'inizio effettivo del catalogo fornito in uscita. È stato dimostrato da numerose prove che, se il tempo di stabilizzazione è sufficientemente lungo (in genere dell'ordine di alcune migliaia di anni), i valori arbitrariamente assegnati allo *stress* inizialmente disponibile su ciascuna cella non influenzano le proprietà statistiche dei cataloghi sintetici.

L'algoritmo di simulazione, pur nella sua semplicità, mostra preferenza per nuove fratture che si nucleano nei punti in cui lo *stress* disponibile è più alto, ovvero dove è maggiore il tempo trascorso dall'ultimo evento. Una volta nucleata, la frattura si espande nelle direzioni in cui lo *stress* disponibile è più alto, simulando così la preferenza a riempire lacune pre-esistenti e la migrazione di epicentri. Inoltre, grazie al trasferimento di *stress* previsto dal modello, i terremoti hanno maggiore probabilità di verificarsi presso i bordi di precedenti fratture (asperità), simulando una proprietà simile a quella della produzione di "*aftershocks*".

4.2 Applicazione del programma di simulazione

Il programma è stato applicato, per l'area oggetto di questo studio, a ciascuna delle nove faglie composite individuate e descritte in precedenza. La faglia ITCS006 (Castelvetrano-Gela) è stata suddivisa in due segmenti (a, b), data la sua curvatura variabile, per poter essere meglio approssimata dal modello rettangolare usato nell'algoritmo. Il numero totale di segmenti è stato portato così a 10, come elencato in tabella 5. La discretizzazione delle sorgenti è stata realizzata con celle di 0.5 km x 0.5 km per tutte le faglie, tranne quella del Tirreno meridionale (ITCS014), tenendo conto delle sue maggiori dimensioni. I valori dello *slip rate* adottati sono stati quelli medi riportati nel catalogo DISS per le sorgenti composite, tranne che per la faglia già menzionata del Tirreno meridionale per la quale lo *slip rate* è stato abbassato a 0.2 mm/a, per tener conto della possibile frazione di deformazione che viene persa anelasticamente per scorrimento lento sulla faglia (*creep*). In questo caso il valore dello *slip rate* è stato scelto per ottenere un rateo di terremoti moderati (magnitudo superiore a 5.0) compatibile con le osservazioni sismografiche dell'ultima ventina di anni (catalogo ISIDe dell'INGV [Mele et al., 2010]).

Le simulazioni sono state tutte condotte su un periodo di tempo di 100.000 anni, preceduti da un tempo di stabilizzazione iniziale di 10.000 anni. Il passo temporale scelto è stato quello di un giorno, tranne che per la faglia del Tirreno meridionale, per la quale il passo è di 10 giorni per una maggiore uniformità nel tempo totale di elaborazione, rispetto alle altre faglie. In questo caso il tempo di stabilizzazione è

stato portato a 50.000 anni.

La tabella 6 riporta alcuni parametri dei cataloghi sintetici ottenuti per le varie faglie.

I dieci sotto-cataloghi ottenuti separatamente sono stati inseriti in un unico file contenente 96855 records (con una frequenza di poco inferiore a un evento l'anno). Tali records sono stati poi riordinati cronologicamente. Un esempio del

catalogo sintetico è mostrato nella mappa di figura 11, limitatamente ai primi 1000 anni di simulazione, per un numero complessivo di 827 terremoti.

La figura 11 delinea chiaramente le strutture sismogenetiche adottate per la simulazione, sulle quali si notano molti eventi di magnitudo moderata ed alcuni di magnitudo maggiore (riconoscibili dai simboli neri più grandi).

DISS code	Site	Origin lat.	Origin long.	Origin depth (km)	Strike	Dip	Length (km)	Width (km)	Slip Rate (mm/yr)
ITCS014	Southern Tyrrhenian	38.349	14.833	4.0	265	42.5	273	24	0.2
ITCS042	Patti - Eolie	38.630	14.916	1.0	155	80	50	24	0.3
ITCS021	Marsala - Belice	37.719	13.065	3.0	270	50	59	9	0.3
ITCS006a	Castelvetrano - Gela	37.243	13.450	3.0	310	30	69	14	0.3
ITCS006b	Castelvetrano - Gela	37.100	14.208	3.0	280	30	70	14	0.3
ITCS029	Gela - Catania	37.525	15.142	3.0	242.5	30	96	12	0.3
ITCS035	Ragusa - Palagonia	36.939	14.718	1.0	5	75	43	23	0.6
ITCS017	Scicli - Giarratana	36.681	14.657	1.0	20	80	45	22	1.2
ITCS036	Monte Lauro	37.126	14.842	3.0	60	45	31	17	0.6
ITCS016	Aspromonte - Peloritani	37.890	15.360	2.0	20	32.5	48	20	1.4

Tabella 5 Parametri delle sorgenti composite del DISS considerate nell'applicazione del programma di simulazione.
Table 5 Parameters of the DISS composite sources considered in the application of the simulation code.

DISS code	Site	Number of events $M \geq 5.0$	Number of events $M \geq 6.0$	Largest magnitude
ITCS014	Southern Tyrrhenian	25011	166	6.95
ITCS042	Patti - Eolie	8155	54	6.57
ITCS021	Marsala - Belice	2721	4	6.07
ITCS006a	Castelvetrano - Gela	4254	42	6.67
ITCS006b	Castelvetrano - Gela	4195	44	6.65
ITCS029	Gela - Catania	6006	44	6.42
ITCS035	Ragusa - Palagonia	8679	55	6.76
ITCS017	Scicli - Giarratana	14973	83	6.77
ITCS036	Monte Lauro	5320	46	6.49
ITCS016	Aspromonte - Peloritani	17541	128	6.72

Tabella 6 Caratteristiche salienti dei cataloghi ottenuti nell'applicazione del programma di simulazione alle faglie del DISS per la Sicilia, su un periodo di 100.000 anni.
Table 6 Main features of the catalogues obtained by the application of the simulation code to the DISS faults in Sicily, for a period of 100.000 years.

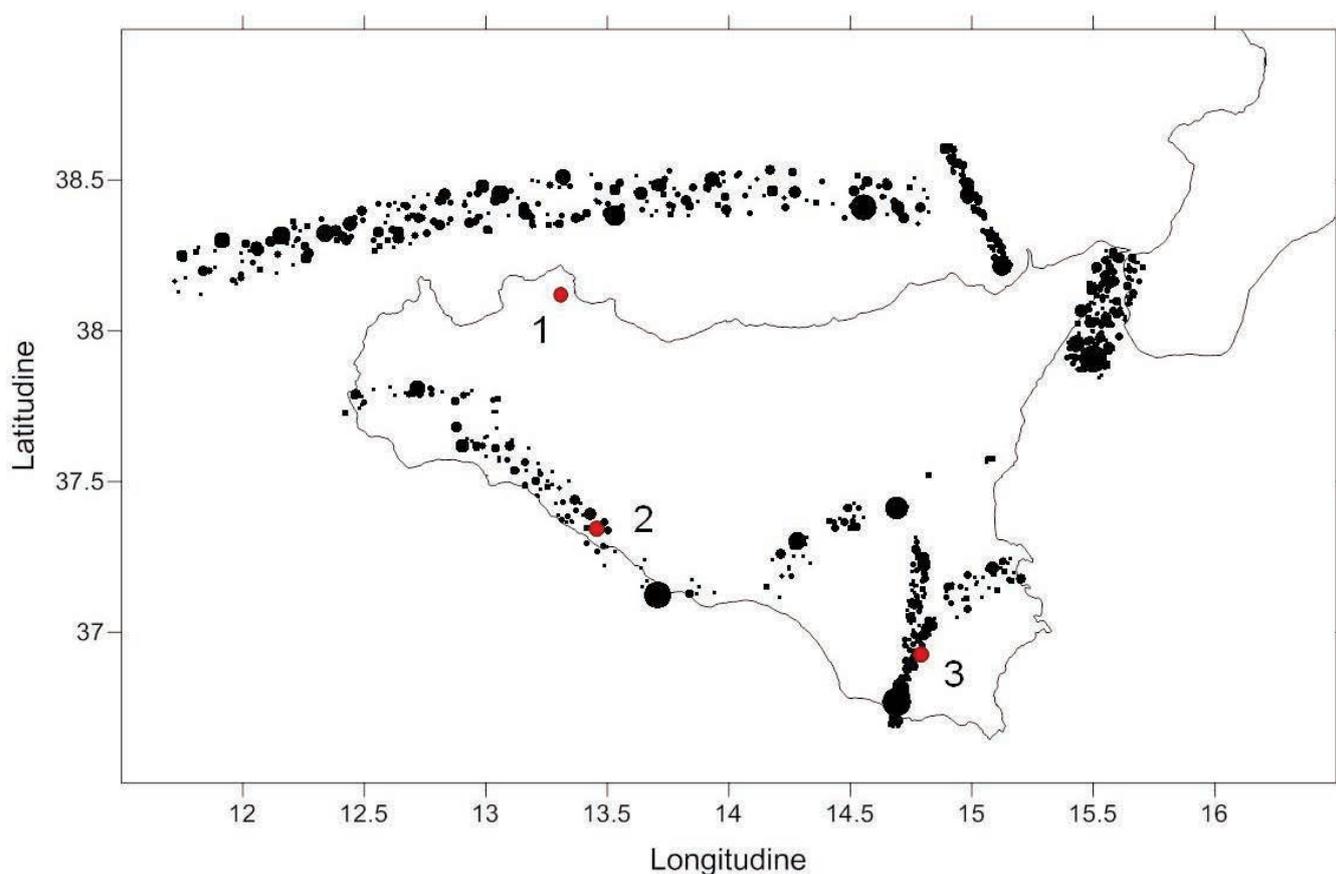


Figura 11 Mappa epicentrale del catalogo sismico sintetico ottenuto per i primi 1000 anni di simulazione sulle principali strutture sismogenetiche riconosciute in Sicilia. Le dimensioni dei simboli neri degli epicentri sono scalate con la magnitudo. I pallini rossi mostrano la posizione dei siti di discarica considerati nello studio: 1 - Bellolampo (PA), 2 - Siculiana (AG), 3 - Cava dei Modicani (RG). Si può notare che i due siti meridionali, Siculiana (AG) e Cava dei Modicani (RG), sono situati praticamente su due strutture sismogenetiche (rispettivamente quelle di Castelvetro-Gela e di Scicli-Giarratana) e pertanto sono i più esposti a effetti da parte di eventi sismici.

Figure 11 Epicentres of the synthetic catalogue obtained for the first 1000 years of simulation on the main seismogenic structures recognized in Sicily. The sizes of the epicenter symbols (black dots) are scaled with magnitude. The red dots show the landfill sites considered in this study: 1 - Bellolampo (PA), 2 - Siculiana (AG), 3 - Cava dei Modicani (RG). It can be noted that the two southern sites, Siculiana (AG) and Cava dei Modicani (RG), are located right on two seismogenic structures (Castelvetro-Gela and Scicli-Giarratana respectively) and therefore are the most subject to the effects of seismic events.

5. Analisi statistica dei risultati: periodi di ritorno e probabilità di occorrenza di grandi eventi sismici

5.1 Distribuzione in magnitudo

Nonostante le simulazioni siano state eseguite partendo da una discretizzazione delle faglie in quadrati di 0.5 km di lato, corrispondente a terremoti di magnitudo minima intorno a 4.0 (tranne che per la faglia ITCS014, Tirreno meridionale, per la quale, come si è già detto, la discretizzazione è di 1 km di lato), nell'analisi statistica sono stati considerati soltanto terremoti di magnitudo pari o superiore a 4.95. L'analisi della distribuzione in frequenza vs. magnitudo è stata condotta, come avviene abitualmente, suddividendo il numero di terremoti in fasce di 0.1 unità di magnitudo.

Le figure 12a e 12b presentano l'andamento della distribuzione frequenza-magnitudo per ciascuna delle 10 sorgenti sismogenetiche considerate nello studio. In tali figure le ordi-

nate rappresentano il numero di terremoti di magnitudo pari o superiore a quella indicata in ascissa, prodotti dalla sorgente sismica considerata nell'arco di 100.000 anni.

Come noto, la legge empirica di Gutenberg-Richter descrive la distribuzione frequenza-magnitudo per una data zona e in un intervallo di tempo sufficientemente lungo, con una relazione semi-logaritmica del tipo:

$$\text{Log}_{10} N = a - bM \quad (1)$$

dove N è il numero di terremoti di magnitudo pari o superiore a M , a è un parametro che rappresenta il logaritmo decimale del numero totale di terremoti pari o superiore a zero, e b è il coefficiente angolare (negativo) della retta che rappresenta l'andamento della distribuzione. È ovvio che il numero di terremoti è tanto più piccolo quanto più grande è la magnitudo di soglia considerata.

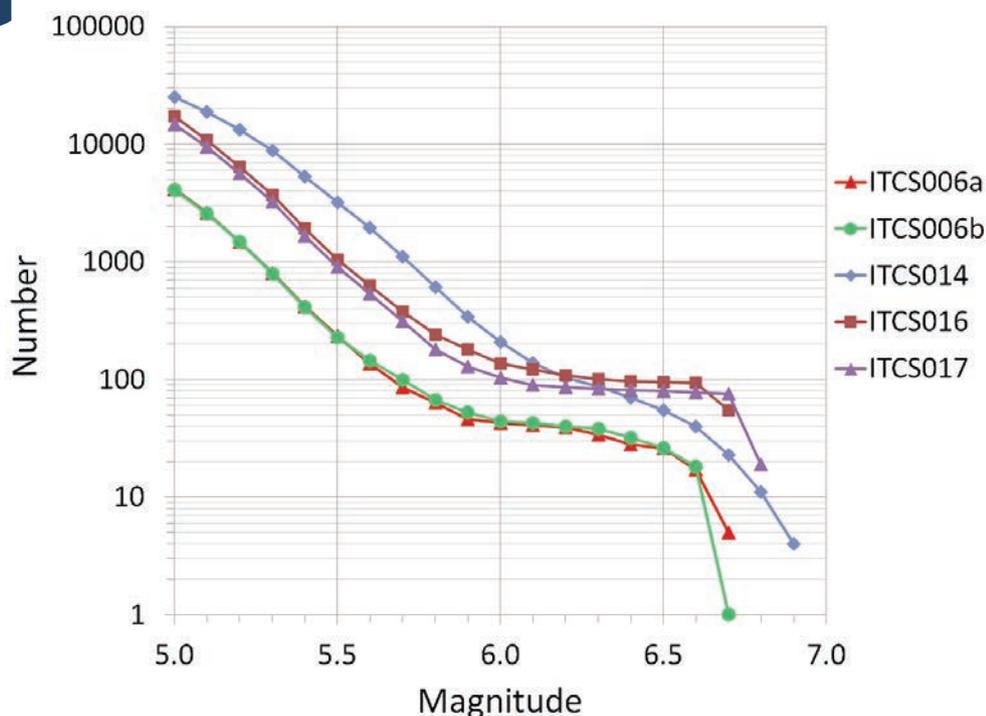


Figura 12a Distribuzione frequenza–magnitudo per le prime 5 strutture sismogenetiche considerate: ITCS006a, Castelvetro-Gela, segmento occidentale; ITCS006b, Castelvetro-Gela, segmento orientale; ITCS014, Southern Tyrrhenian; ITCS016, Aspromonte-Peloritani; ITCS017, Scicli-Giarratana.

Figure 12a Cumulative magnitude distribution for the first 5 seismogenic structures considered in this study: ITCS006a, Castelvetro-Gela, West segment; ITCS006b, Castelvetro-Gela, East segment; ITCS014, Southern Tyrrhenian; ITCS016, Aspromonte-Peloritani; ITCS017, Scicli-Giarratana.

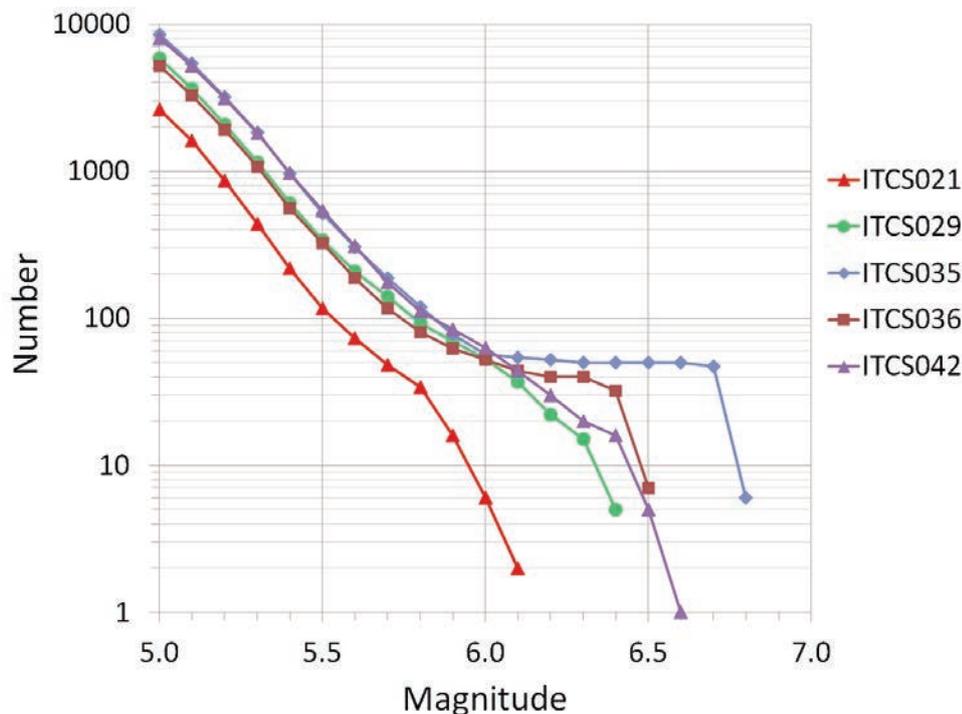


Figura 12b Come in figura 12a, per le ulteriori 5 strutture sismogenetiche: ITCS021, Marsala-Belice; ITCS029, Gela-Catania; ITCS035, Ragusa-Palagonia; ITCS036, Monte Lauro; ITCS042, Patti-Eolie.

Figure 12b As in figure 12a, for the second group of 5 seismogenic structures: ITCS021, Marsala-Belice; ITCS029, Gela-Catania; ITCS035, Ragusa-Palagonia; ITCS036, Monte Lauro; ITCS042, Patti-Eolie.

Si può notare come le distribuzioni ottenute dai cataloghi sintetici (Fig. 12a e 12b) si discostino in maniera più o meno pronunciata dall'andamento rettilineo ipotizzato nell'equazione (1). Ciò è dovuto principalmente a due fatti:

1. la magnitudo non può crescere oltre valori legati alle dimensioni massime di una frattura che comprende tutta la struttura sismogenetica considerata;
2. nell'osservazione sulla sismicità reale si nota una carenza di terremoti nell'intervallo compreso fra quello della sismicità di fondo (*background*) e quello prossimo alla magnitudo massima della sorgente (magnitudo del "terremoto caratteristico").

Queste proprietà dei cataloghi reali sono rispecchiate dalle distribuzioni osservabili nei nostri cataloghi simulati, nei quali si nota una magnitudo del terremoto caratteristico che si aggira intorno a 6.4-6.7.

Assumendo la validità della legge di Gutenberg-Richter per le magnitudo più basse della distribuzione (nel nostro caso per magnitudo inferiori a 6.0), mediante una semplice regressione statistica, sono facilmente calcolabili i valori dei parametri a e b della distribuzione stessa. Questi valori sono riportati in tabella 7 per i dati relativi alle distribuzioni mostrate nelle figure 12a e 12b.

Dall'esame della tabella 7 si nota chiaramente che la struttura più attiva, sia per numero di terremoti sia per magnitudo massima è la ITCS014 (Tirreno meridionale).

DISS code	Site	a	b	Number of events M ≥ 6.0	Largest magnitude
ITCS014	Southern Tyrrhenian	9.40	1.65	166	6.95
ITCS042	Patti - Eolie	8.91	2.19	54	6.57
ITCS021	Marsala - Belice	8.43	2.37	4	6.07
ITCS006a	Castelvetrano - Gela (ovest)	8.63	2.33	42	6.67
ITCS006b	Castelvetrano - Gela (est)	8.62	2.31	44	6.65
ITCS029	Gela - Catania	8.78	2.37	44	6.42
ITCS035	Ragusa - Palagonia	8.94	2.24	55	6.76
ITCS017	Scicli - Giarratana	9.17	2.59	83	6.77
ITCS036	Monte Lauro	8.73	2.28	46	6.49
ITCS016	Aspromonte - Peloritani	9.24	2.25	128	6.72

Tabella 7 Parametri della distribuzione frequenza-magnitudo ricavati per le sorgenti composite del DISS presenti in Sicilia e nelle zone limitrofe.

Table 7 Parameters of the frequency-magnitude distribution obtained for the DISS composite sources recognized in Sicily and surrounding areas.

nale), seguita dalla ITCS016 (Aspromonte-Peloritani), mentre quella a più bassa sismicità è la ITCS021 (Marsala-Belice). Va anche notato che la sorgente sismica del Tirreno meridionale, nonostante l'elevata sismicità legata alle sue dimensioni geometriche, si trova totalmente in mare, e a una certa distanza dai principali centri abitati, contribuendo pertanto in maniera limitata alla pericolosità sismica nell'entroterra.

5.2 Analisi temporale dell'attività sismica

La pericolosità sismica di un dato sito è legata alla frequenza con cui i terremoti si presentano nel sito stesso. Assumendo come ipotesi iniziale che i terremoti al disopra di una certa soglia di magnitudo si manifestino come un processo senza memoria di tipo "poissoniano", il parametro fondamentale per la determinazione della pericolosità è il periodo di ritorno T_r , ovvero il tempo che mediamente trascorre tra un evento e il successivo. Il valore di T_r è facilmente ricavabile, in prima approssimazione, calcolando la media di tutti gli intervalli di tempo che separano due eventi consecutivi nel catalogo. Per i terremoti di magnitudo pari o superiore a 6.0 tali valori sono riportati nella terza colonna della tabella 8. Noto il tempo di ritorno T_r di un determinato tipo di evento, una semplice relazione statistica, basata sulla teoria di Poisson, consente di calcolare la probabilità di accadimento di tale evento in un periodo di tempo assegnato T . La formula in questione è:

$$P(M|T) = 1 - e^{-T/Tr(M)} \quad (2)$$

L'equazione (2) è stata applicata per calcolare le probabilità (P_{100}) di accadimento, in 100 anni, di un terremoto di magnitudo pari o superiore a 6.0, e tali valori di probabilità vengono riportati nella quarta colonna di tabella 8.

Tuttavia, contrariamente a quanto avviene per le estrazioni di un numero alla lotteria, per i terremoti è fisicamente plausibile l'esistenza di un processo per il quale il ritardo nel tempo trascorso dall'ultimo evento accaduto tenda ad aumentare la probabilità dell'evento successivo nell'immediato futuro. Questo processo con memoria, definito in inglese come processo di *renewal*, è legato alla teoria di Reid [1910] conosciuta come *elastic rebound*. Mentre la teoria di Poisson non attribuisce alcuna importanza al tempo trascorso dal terremoto precedente, quella dell'*elastic rebound* porterebbe al caso limite di una totale periodicità, e quindi prevedibilità, dei terremoti.

Le osservazioni storiche e paleosismologiche portano a ritenere che il processo sismogenetico si manifesti in maniera intermedia fra la totale casualità e la completa periodicità. Si ritiene comunemente che gli intervalli di tempo che separano eventi sismici successivi su una medesima sorgente sismica siano modellabili da una distribuzione matematica pseudo-periodica della quale esistono svariate versioni (come, per esempio, la distribuzione log-normale, la distribuzione "gamma", quella di Weibull, quella del *Brownian Passage*

DISS code	Site	$T_r(M \geq 6.0)$ (years)	P_{100} (%)	σ (years)	C_v
ITCS014	Southern Tyrrhenian	605	15.2	557	0.920
ITCS042	Patti - Eolie	1801	5.4	1811	1.006
ITCS021	Marsala - Belice	30264	0.33	16481	0.545
ITCS006a	Castelvetrano - Gela (ovest)	2323	4.1	1826	0.772
ITCS006b	Castelvetrano - Gela (est)	2278	4.2	1875	0.807
ITCS029	Gela - Catania	1788	4.3	2387	1.048
ITCS035	Ragusa - Palagonia	1206	5.4	993	0.555
ITCS017	Scicli - Giarratana	1206	8.0	782	0.649
ITCS036	Monte Lauro	2184	4.5	1733	0.793
ITCS016	Aspromonte - Peloritani	785	12.0	617	0.659

Tabella 8 Parametri della distribuzione dei tempi di intercorrenza ricavati per le sorgenti composite del DISS presenti in Sicilia e nelle zone limitrofe.

Table 8 Parameters of the inter-event time distribution obtained for the DISS composite sources recognized in Sicily and surrounding areas.

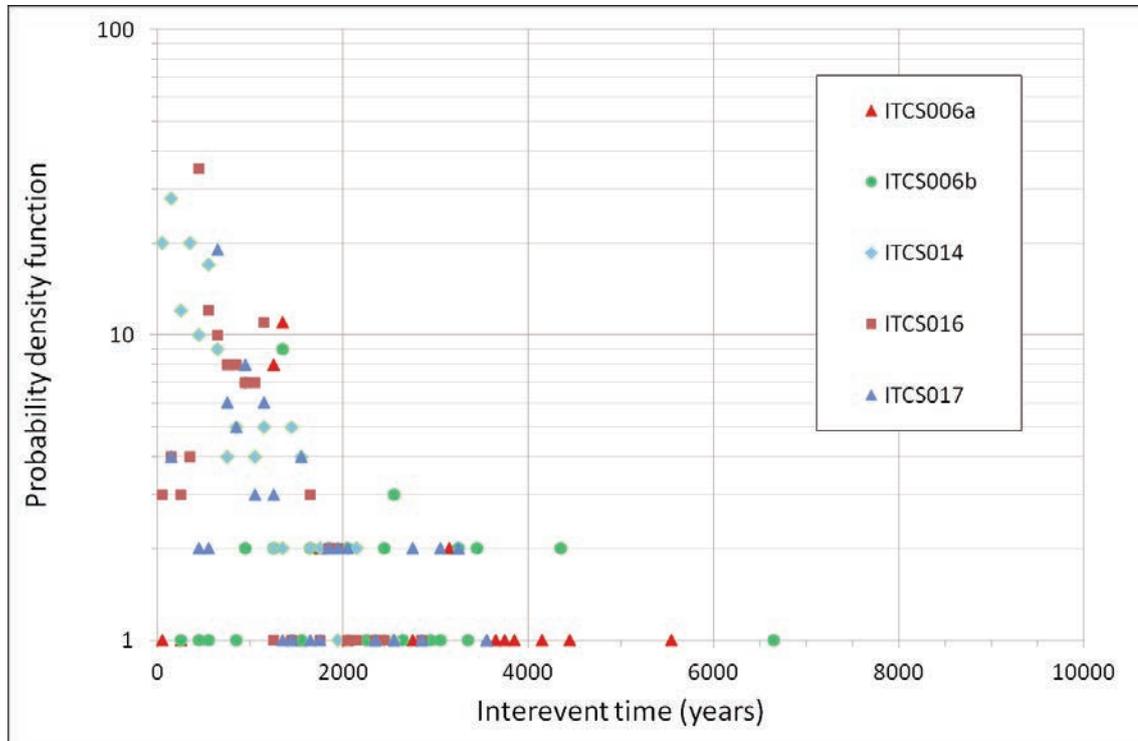


Figura 13a Distribuzione frequenza–magnitudo per le prime 5 strutture sismogenetiche considerate: ITCS006a, Castelvetrano-Gela, segmento occidentale; ITCS006b, Castelvetrano-Gela, segmento orientale; ITCS014, Southern Tyrrhenian; ITCS016, Aspromonte-Peloritani; ITCS017, Scicli-Giarratana.

Figure 13a Cumulative magnitude distribution for the first 5 seismogenic structures considered in this study: ITCS006a, Castelvetrano-Gela, West segment; ITCS006b, Castelvetrano-Gela, East segment; ITCS014, Southern Tyrrhenian; ITCS016, Aspromonte-Peloritani; ITCS017, Scicli-Giarratana.

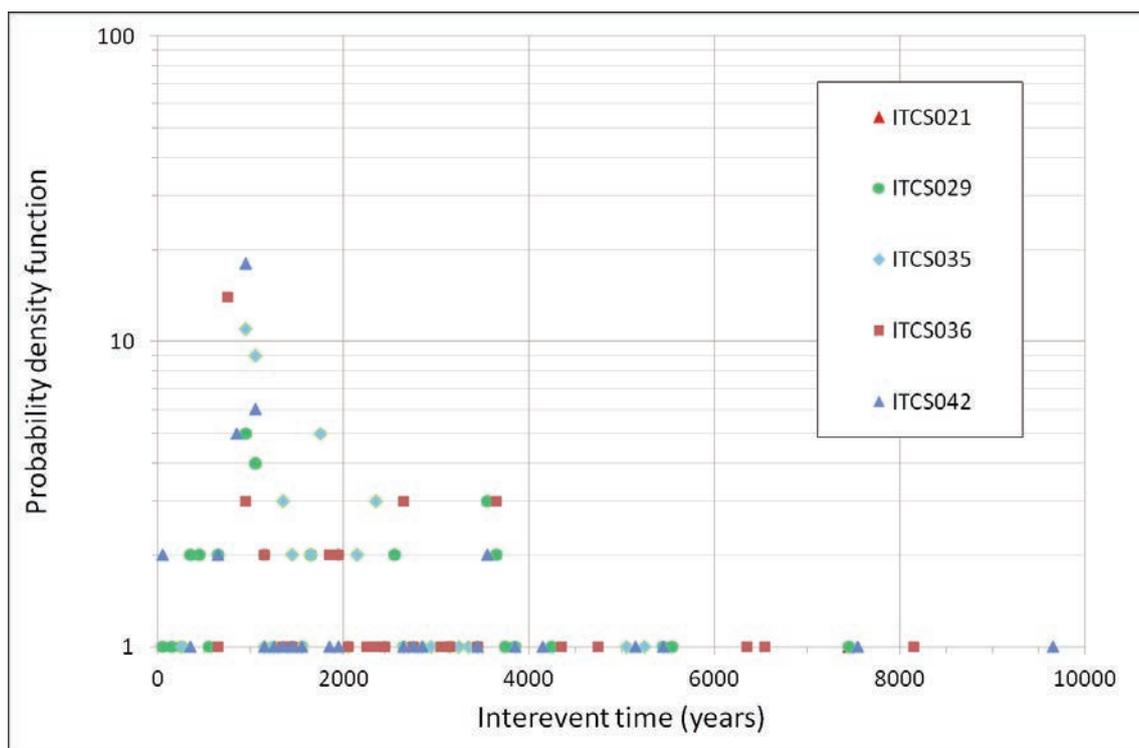


Figura 13b Come in figura 12a, per le ulteriori 5 strutture sismogenetiche: ITCS021, Marsala-Belice; ITCS029, Gela-Catania; ITCS035, Ragusa-Palagonia; ITCS036, Monte Lauro; ITCS042, Patti-Eolie.

Figure 13b As in figure 12a, for the second group of 5 seismogenic structures: ITCS021, Marsala-Belice; ITCS029, Gela-Catania; ITCS035, Ragusa-Palagonia; ITCS036, Monte Lauro; ITCS042, Patti-Eolie.

Time (BPT), ecc.) tra le quali la distribuzione esponenziale negativa (relativa all'ipotesi di Poisson) costituisce un caso particolare.

Un parametro che consente di distinguere quantitativamente un processo che segue una distribuzione di intertempi del tipo pseudo-periodico da quella di un semplice processo di Poisson è il coefficiente di variazione C_v , denominato anche "aperiodicità". Quest'ultimo è definito come il rapporto fra la deviazione standard degli intertempi e il tempo di ritorno T_r :

$$C = \sigma / T_r \quad (3)$$

Più il coefficiente di variazione è piccolo, più il processo da esso caratterizzato si comporta in maniera periodica. Il processo a probabilità indipendente dal tempo di Poisson è caratterizzato da un coefficiente di variabilità pari a 1, mentre valori superiori a 1 denotano processi nei quali gli eventi tendono a presentarsi in raggruppamenti temporali (*clusters*), separati da lunghi intervalli di quiescenza. I valori della deviazione standard (σ) e del coefficiente di variazione (C) per i cataloghi sintetici ottenuti dalle simulazioni per ciascuna struttura sismogenetica considerata sono riportati in tabella 8 (quinta e sesta colonna).

Le figure 13a e 13b mostrano le distribuzioni di intertempi

ottenute dai cataloghi simulati individualmente per ciascuna delle 10 sorgenti sismogenetiche.

I valori del coefficiente di variazione (Tab. 8) indicano, per le strutture ITCS021 (Marsala-Belice) e ITCS035 (Ragusa-Palagonia), un processo sismogenetico pseudo-periodico che si discosta dalla semplice statistica a probabilità uniforme. Va notato, però, che per la struttura ITCS021 il numero di eventi sintetici di magnitudo pari o superiore a 4.0 è risultato soltanto di quattro, il che non consente di fare affermazioni robuste sul suo comportamento statistico. Per questa struttura nessun intertempo è risultato inferiore a 10.000 anni, e quindi nessuno di essi rientra nel diagramma di figura 13a. Tutte le rimanenti strutture mostrano un comportamento moderatamente pseudo-periodico (con coefficiente di variazione nella fascia di valori compresi tra 0.6 e 0.9) o addirittura poissoniano, per le strutture ITCS029 (Gela-Catania) e ITCS042 (Patti-Eolie).

6. Stima delle probabilità di eccedenza di determinati valori di PGA

Al fine di fornire una stima della probabilità di superamento di determinati valori di PGA in un dato sito è necessario analizzare la pericolosità sismica del sito stesso. Tale pericolosi-

tà sismica può essere caratterizzata sia attraverso un metodo deterministico sia attraverso un metodo probabilistico.

Il metodo deterministico (terremoto trattato come evento non casuale) mira semplicemente alla stima del massimo valore del parametro attraverso il quale è definita la pericolosità, senza attribuirvi un periodo di tempo entro il quale esso venga osservato nel sito di interesse. Il metodo probabilistico o statistico (terremoto trattato come evento casuale, caratterizzato da una sua probabilità di occorrenza) è quello che è stato invece adottato in questo studio, con particolare riferimento al “metodo Cornell” (Fig. 14).

Il “metodo Cornell” consiste essenzialmente di due fasi:

- 1 nel primo *step*, le sorgenti sismogenetiche vengono caratterizzate nelle loro proprietà geometriche e statistiche di ricorrenza di eventi di una certa magnitudo nel tempo. Come si può vedere in figura 14, le sorgenti sismogenetiche possono essere immaginate come concentrate in un punto, allineate su segmenti, oppure distribuite spazialmente su aree geografiche. In questo studio è stato adottato un modello di sorgenti formate da superfici rettangolari opportunamente orientate nello spazio;
- 2 nel secondo *step* si impiegano idonee leggi di attenuazione per la determinazione degli effetti di ciascun evento sismico nel sito di interesse, a partire dalla sua magnitudo. In questo studio gli effetti sono stati quantificati mediante l’accelerazione massima di picco (PGA), osservata al suolo e sulla componente orizzontale, durante il sisma.

La legge di attenuazione adottata è quella di Sabetta-Pugliese [1987], scelta sia per la sua semplicità e popolarità, sia per il fatto di essere stata ricavata da dati acquisiti sul territorio italiano. Tale legge è espressa come:

$$\log(\text{PGA}) = -1.562 + 0.306M - \log d^2 + 5.82 + 0.169S_1 +$$

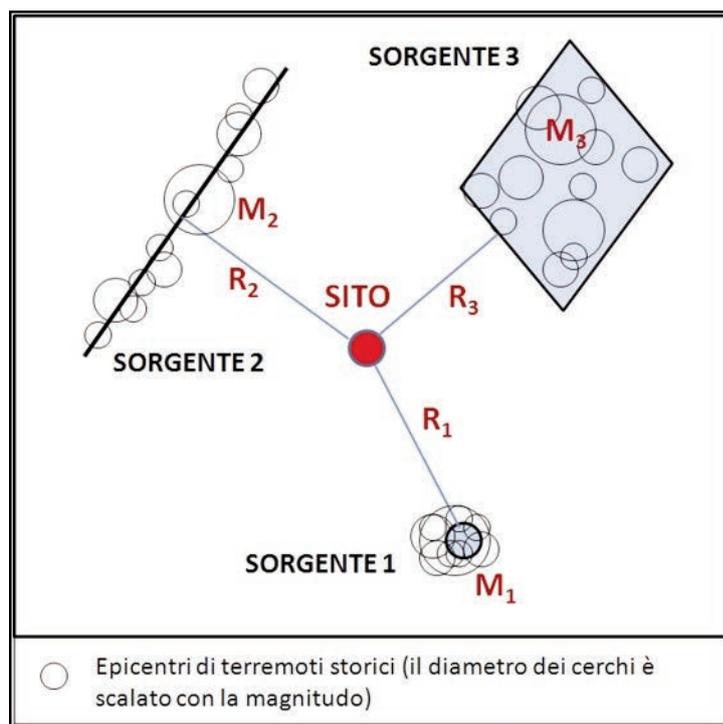


Figura 14 Illustrazione grafica del “metodo Cornell” per la determinazione della pericolosità sismica in un sito.

Figure 14 Graphic representation of the “Cornell method” for the assessment of seismic hazard of a site.

$$0.169S_2 - 0.173 \quad (4)$$

dove PGA è espressa in g, M è la magnitudo dell’evento sismico, d è la distanza epicentrale in km e i coefficienti S_1 e S_2 caratterizzano le condizioni del suolo al sito. Tali coefficienti sono dati da:

- $S_1 = 0, S_2 = 0$ per roccia o materiale molto rigido ($V_s > 750$ m/s);
- $S_1 = 1, S_2 = 0$ per profilo di terreno rigido (360 m/s $< V_s < 750$ m/s);
- $S_1 = 0; S_2 = 1$ per profilo di terreno soffice (180 m/s $< V_s < 360$ m/s);
- $S_1 = 1, S_2 = 1$ per profilo di terreno molto deformabile ($V_s < 180$ m/s).

Site	Geological background	V_s	S_1	S_2
Bellolampo (PA)	Substrato carsificato di calcari mesozoici	1400 - 1900 m/s	0	0
Siculiana (AG)	Complesso argilloso che costituisce la base del Gruppo Gessoso-Solfifero	1000 - 1200 m/s	0	0
Cava dei Modicani (RG)	Calcari e calcari marnosi, strati calcarenitici	400 - 600 m/s	1	0

Tabella 9 Caratteristiche geologiche dei tre siti di discarica analizzati.
Table 9 Geological features of the three landfill sites considered in this study.

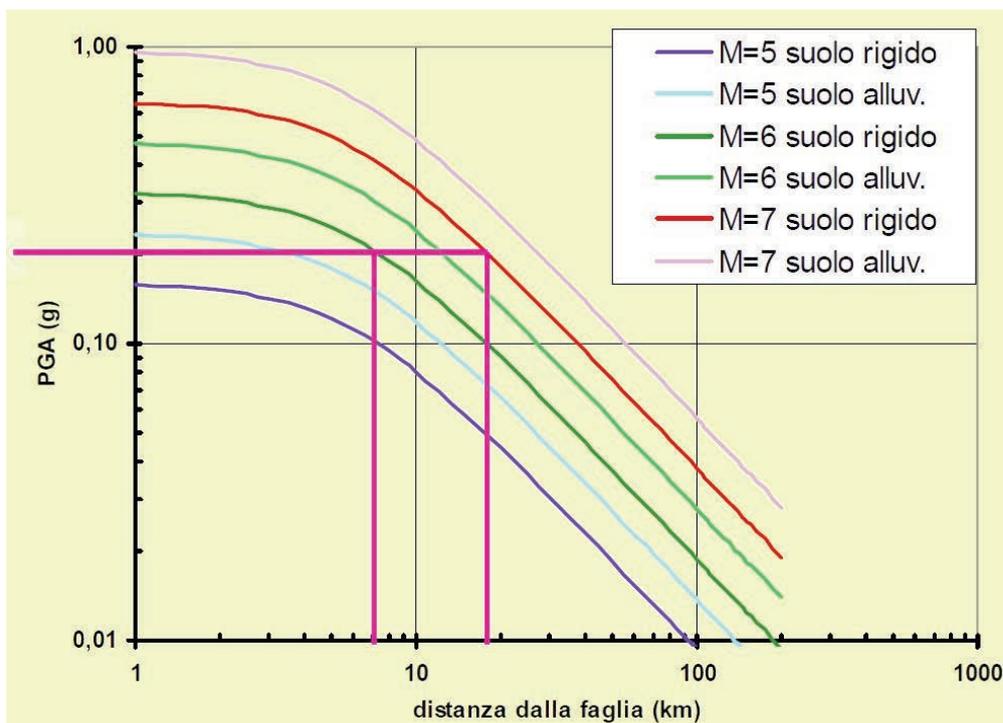


Figura 15 Curve di attenuazione per terreni rigidi (o rocciosi) calcolati con l'espressione (4).
Figure 15 Attenuation laws for stiff (or rocky) soil computed by equation (4).

La figura 15 mostra, a titolo di esempio, i valori di PGA attesi per diverse magnitudo, in funzione della distanza epicentrale.

I valori dei coefficienti S_1 e S_2 , per i tre siti di discarica analizzati in questo studio, sono stati ottenuti dall'esame delle caratteristiche geologiche descritte nel capitolo 1 e vengono sinteticamente riportati in tabella 9.

La tabella 10 fornisce un esempio dei valori di PGA even-

tualmente associabili al sito di Cava dei Modicani per gli eventi sismici riportati nei primi 25 anni del catalogo sismico simulato.

Dall'applicazione del metodo sopra descritto sono state ottenute le tre storie temporali, della durata di 100.000 anni ciascuna, delle accelerazioni di picco, che potrebbero essere risentite ai tre siti di discarica per effetto degli eventi contenuti nel catalogo sismico simulato. Dalle tre storie tempora-

T (anni)	Magn.	Dist. (km)	PGA (g)
0.9000	5.14	48.85	0.031
7.6400	5.37	10.94	0.144
7.6400	5.25	8.76	0.156
10.0400	5.13	169.43	0.009
10.0400	5.14	171.77	0.009
10.0400	5.07	149.73	0.010
10.0400	5.64	168.97	0.013
13.2100	5.09	9.81	0.128
13.3900	4.98	173.94	0.008
21.4300	4.98	176.45	0.008

Tabella 10 Effetti stimati sul sito di Cava dei Modicani per gli eventi dei primi 25 anni del catalogo sismico simulato in questo studio.

Table 10 Effects estimated at the Cava dei Modicani site for the seismic events of the first 25 years of the synthetic seismic catalogue simulated in this study.

li, ordinate nelle figure 16a, 16b e 16c in verso crescente per le rispettive PGA, è stata ricavata, per ciascun sito, la statistica delle probabilità di eccedenza di determinati valori della PGA stessa in un periodo di 50 anni.

La conclusione di questa analisi, basata sul simulatore di attività sismica porta a confermare il sito di Cava dei Modicani come quello sismicamente più pericoloso fra i tre presi in

esame. A differenza di quanto risulta dalla mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (di cui si è parlato nel capitolo 2) il sito meno pericoloso, in base ai risultati del nostro metodo innovativo, risulta quello di Bellolampo, e non quello di Siculiana. Questo risultato è legato alla relativa distanza di Bellolampo da ciascuna delle aree sismogenetiche descritte nel catalogo DISS.

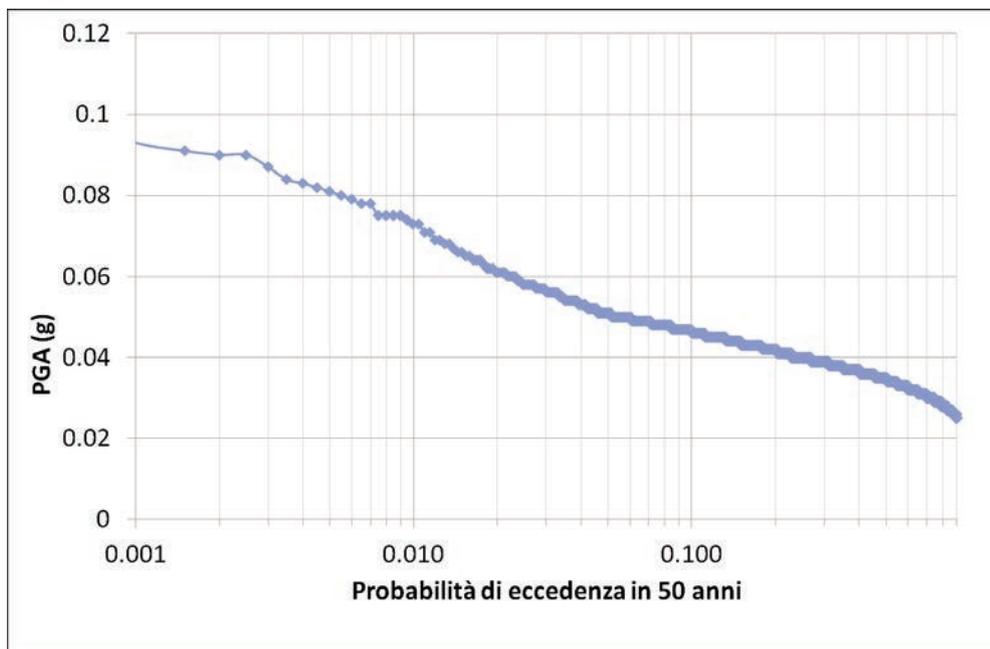


Figura 16a Pericolosità sismica stimata per il sito di Bellolampo (PA).
Figure 16a Seismic hazard estimated for the site of Bellolampo (PA).

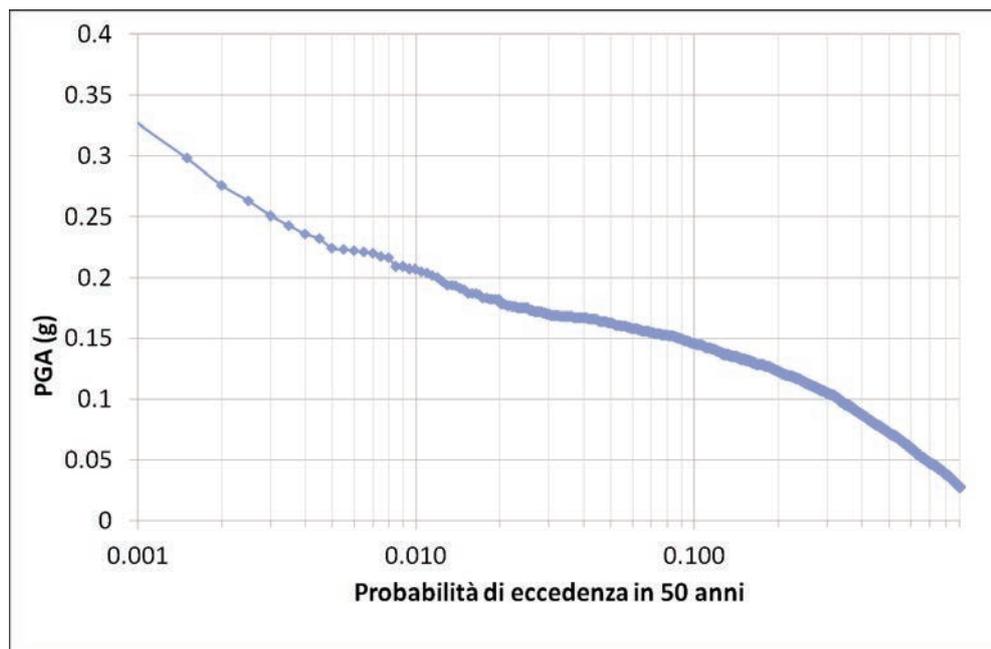


Figura 16b Pericolosità sismica stimata per il sito di Siculiana (AG).
Figure 16b Seismic hazard estimated for the site of Siculiana (AG).

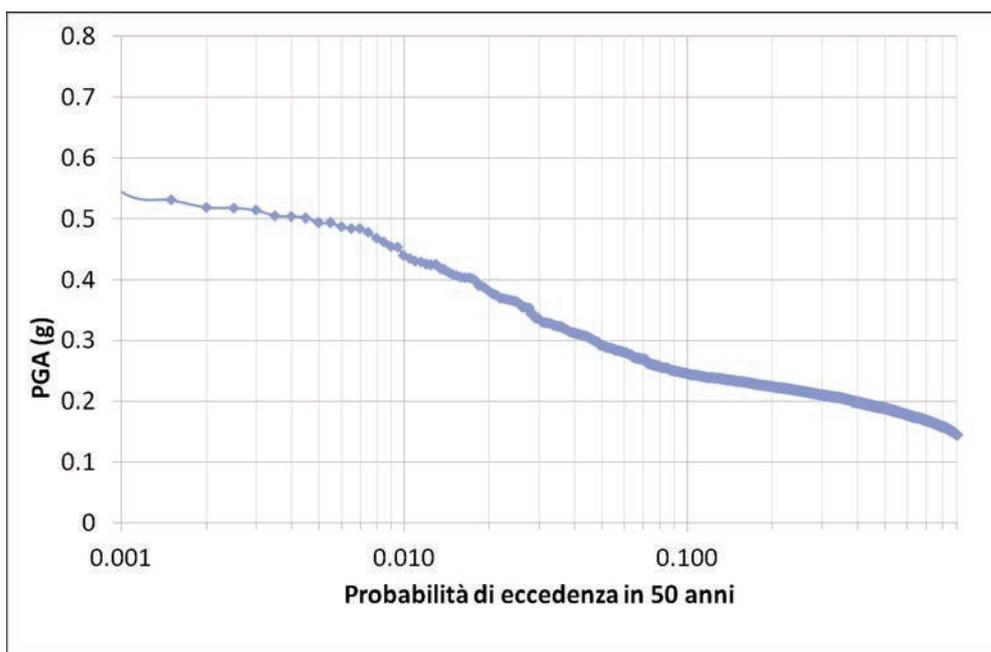


Figura 16c Pericolosità sismica stimata per il sito di Cava dei Modicani (RG).
Figure 16c Seismic hazard estimated for the site of Cava dei Modicani (RG).

7. Conclusioni

In questo studio, svolto nell’ambito del Progetto PON SIGLOD è stata esaminata la pericolosità sismica nei tre siti di discarica nella regione siciliana (Bellolampo, PA; Siculiana, AG e Cava dei Modicani, RG), ritenendo che terremoti di forte magnitudo potrebbero avere effetti negativi sulla sicurezza di tali discariche. Sono state dapprima individuate le principali strutture sismogenetiche presenti in Sicilia e nelle aree ad essa circostanti [DISS, 2010], quindi sono state valutate le conoscenze disponibili sulla sismicità storica del territorio indagato, disponibili nella banca dati dell’INGV [Locati et al., 2011]. Ricorrendo ancora alle banche dati gestite dall’INGV, sono state poi prese in esame le condizioni di pericolosità sismica dei tre siti sui quali è focalizzato lo studio, espresse in termini di valori dell’accelerazione di picco

del suolo (PGA) con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni [Meletti and Montaldo, 2007].

L’esame dei dati storici, il cui periodo di completezza copre soltanto gli ultimi tre secoli, in relazione alla lunghezza dei periodi di ritorno dei terremoti caratteristici sulle sorgenti sismogenetiche [DISS, 2010], mostra che le conoscenze disponibili non consentono la realizzazione di analisi statistiche attendibili per la stima della pericolosità sismica. Questa constatazione ha suggerito l’applicazione di metodologie alternative ai fini della valutazione della pericolosità sismica nei siti di interesse.

Sono state raccolte le informazioni disponibili in letteratura riguardanti la cinematica in atto sulle strutture sismogenetiche di interesse per questo studio. Tali informazioni sono state poi utilizzate in un algoritmo di simulazione di attività sismica [Console et al., 2015], che ha consentito la realizza-

Denominazione del sito	Meletti and Montaldo (2007)	Questo studio
Bellolampo (PA)	0.150-0.175g	0.048g
Siculiana (AG)	0.050-0.075g	0.145g
Cava dei Modicani (RG)	0.225-0.250g	0.240g

Tabella 11 Valori dell’accelerazione orizzontale di picco (PGA) stimati in questo studio per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, messi a confronto con quelli della mappa della pericolosità sismica del territorio nazionale dell’INGV.

Table 11 Horizontal peak ground acceleration (PGA) estimated in this study for a probability of exceedance of 10% in 50 years, compared with those reported in the map of seismic hazard for the Italian territory of INGV.

zione di un catalogo sismico sintetico (della durata di 100000 anni), riguardante l'intero territorio della Sicilia. Questo catalogo sintetico è stato successivamente analizzato con metodo statistico al fine di determinare i periodi di ritorno e la probabilità di occorrenza di grandi eventi sismici nell'area. È stata infine applicata, a tutti gli eventi presenti nel catalogo sintetico, la legge di attenuazione di Sabetta e Pugliese [1987] per la stima delle accelerazioni di picco prodotte da ciascun evento sismico nei tre siti di interesse per lo studio. I valori di tali accelerazioni, ordinati in senso crescente, hanno a loro volta consentito il calcolo delle probabilità di eccedenza di determinate soglie di PGA nei siti stessi.

Il confronto fra i valori di probabilità di eccedenza della PGA riportate nella mappa di pericolosità sismica pubblicata dall'INGV [Meletti and Montaldo, 2007] e quelli ottenuti dal nostro studio basato sul simulatore di terremoti, è mostrato in tabella 11.

La conclusione di questo lavoro, basato sui dati di cinematica delle sorgenti sismiche applicati all'algoritmo di simulazione di terremoti, conferma i valori della mappa di pericolosità sismica dell'INGV [Meletti and Montaldo, 2007] per quanto riguarda il sito di Cava dei Modicani, che risulta come quello sismicamente più pericoloso fra i tre presi in esame. Lo studio mette però in evidenza una discrepanza tra i nostri valori e quelli della mappa dell'INGV per i siti di Bellolampo e di Siculiana, che risultano praticamente invertiti. Questo risultato è legato alla relativa distanza di Bellolampo da ciascuna delle aree sismogenetiche descritte nel catalogo DISS, e alla coincidenza geografica del sito di Siculiana con la struttura sismogenetica, potenzialmente attiva, di Castelvetro-Gela.

Le importanti differenze riscontrabili per i siti di Bellolampo e Siculiana tra i risultati del nostro studio e i valori riportati nella Mappa di Pericolosità Sismica (MPS04) [Gruppo di Lavoro, 2004], sono attribuibili alle differenze nel modello adottato. Mentre la MPS04 è basata su una zonazione sismogenetica areale, nel nostro modello ci basiamo sulle strutture sismogenetiche descritte nel DISS. In particolare, la MPS04 ignora completamente il contributo della struttura sismogenetica ITCS006 (Castel Vetro-Gela) sulla quale è collocato il sito di Siculiana, mentre il DISS non include effetti da parte della zona sismogenetica 933 della MPS04, nella quale si trova Bellolampo.

Ringraziamenti

Questo studio è stato svolto in collaborazione con il CRATI Scrl, partner del progetto di ricerca PON04A2_F "Sistema intelligente di supporto alla Gestione e alla Localizzazione delle Discariche e di impianti di gestione dei rifiuti - SIGLOD".

Gli autori sono grati alla D.ssa Anna Nardi per il prezioso

supporto fornito nella redazione del testo di questo lavoro, e al Dott. Salvatore D'Amico che con la sua attenta revisione del manoscritto ha contribuito al miglioramento della versione definitiva.

Acknowledgments

This study has been conducted in close cooperation with CRATI Scrl as part of the research project PON04A2_F "Intelligent system to support the management and the localization of landfills and waste management facilities - SIGLOD".

The authors are grateful to Dr. Anna Nardi for the valuable support provided during the writing of the text of this work, and Dr. Salvatore D'Amico for his careful review of the manuscript, contributing to the improvement of the final version.

Bibliografia

- Albarelo D., Camassi R., and Rebez A., (2001). *Detection of Space and Time Heterogeneity in the Completeness of a Seismic Catalog by a Statistical Approach: An Application to the Italian Area*. Bull. Soc. Seism. Am., 91, 6, 1694–1703.
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. and Boschi E., (2008). *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*. Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014.
- Camassi R. and Stucchi M., (1997). *NT4.1, un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno*. GNDT, Milano, 95 pp.; <http://emidius.itim.mi.cnr.it/NT/home.html>.
- Catalano R. and D'Argenio B., (1982). *Schema Geologico della Sicilia*. Guide Geologiche Regionali, Mem. Soc. Geol. It., Suppl. A; V. XXIV, 9-41. Palermo.
- Catalano R., Di Stefano P., Sulli A. and Vitale F.P., (1996). *Paleogeography and structure of the central Mediterranean: Sicily and its offshore area*. Tectonophysics, 260, 291-323.
- Console R., R. Carluccio, E. Papadimitriou and V. Karakostas, (2015). *Synthetic earthquake catalogs simulating seismic activity in the Corinth Gulf, Greece, fault system*. Journal of Geophysical Research, 120 (1), 326 - 343.
- DISS Working Group, (2010). *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 - Istituto

- Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - All rights reserved; doi :10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1
- Ferranti L., Oldow J.S., D'Argenio B., Catalano R., Lewis D., Marsella E., Avellone G., Maschio L., Pappone G., Pepe F. and Sulli A., (2008). *Active deformation in Southern Italy, Sicily and southern Sardinia from GPS velocities of the Peri-Tyrrhenian Geodetic Array (PTGA)*. Boll. Soc. Geol. It., (Ital. J. Geosci.), 127/2, 299–316.
- Giunta G., Nigro F., Luzio D., D'Anna G., Tondi E., Renda P., Cello G., Giorgianni A., De Luca L. and Vitale M. (2001). *Sismicità e tettonica recente in Sicilia nord-occidentale e nel Tirreno meridionale per un modello sismotettonico preliminare*. GNGTS – Atti del 21° Convegno Nazionale / 01.11.
- Gruppo di Lavoro, (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pagine + 5 appendici.
- Locati M., Camassi R. and Stucchi M. (a cura di), (2011). *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. doi: 10.6092/INGV.IT-DBMI11
- Mazzella M.E., (2010). *Tettonica attiva nel settore peri-tirrenico meridionale tramite integrazione di dati geodetici e geologici*. Inedito. Tesi di Dottorato. Università degli studi di Napoli "Federico II", 256 pp. http://www.fedoa.unina.it/8362/1/Mazzella_Maria_Enica_23.pdf.
- Mele F.M., Marcocci C., Bono A. e Marchetti A. (2010). *IDIDe, Italian Seismological Instrumental and Parametric Data-Base*. INGV, CNT: <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>
- Meletti C. and Montaldo V., (2007). *Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag*. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>
- Molin D., Stucchi M. and Valensise G. (a cura di), (1996). *Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani valutate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA*, http://emidius.mi.ingv.it/GNDT/IMAX/max_int_oss.html
- Oldow J.S., Ferranti L., Lewis D.S., Campbell J.K., D'Argenio B., Catalano R., Pappone G., Carmignani L., Conti P. and Aiken C.L.V., (2002). *Active fragmentation of Adria, the north African promontory, central Mediterranean orogen*. Geology, 30, 779-782.
- Reid H.F., (1910). *The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906*, Report of the State Investigation Commission,, 2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C.
- Richards-Dinger K. and Dieterich J.H., (2012). *RSQSim earthquake simulator*. Seism. Res. Lett., 6, 983-990, doi: 10.1785/0220120105.
- Rovida A., Camassi R., Gasperini P. e Stucchi M., (2011). *CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Bologna. doi: <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI11>.
- Sabetta F. and Pugliese A., (1987). *Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong motion records*. Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 1491-1513.
- Serpelloni E., Vannucci G., Pondrelli S., Argnani A., Casula G., Anzidei M., Baldi P. and Gasperini P., (2007). *Kinematics of the Western Africa – Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data*. Geophys. J. Int., 169, 1180 – 1200.
- Tullis T.E., (2012). *Preface to the Focused Issue on Earthquake Simulators*. Seism. Res. Lett., 83, 6, 957–958.
- Ward S.N., (2012). *ALLCAL Earthquake Simulator*. Seism. Res. Lett., 83, 964–972.

Appendice 1

**Intensità dei terremoti
storicamente osservati nei siti
di interesse del Progetto SIGLOD**

Seismic history of Palermo

[38.121, 13.353]

Total number of earthquakes: 41

Intensità al sito	Data e ora	Zona epicentrale	Numero di osservazioni	Int. Epic.	Magnitudo Mw
5	1542 12 10 15:15	Siracusano	32	10	6.77 ±0.32
4	1693 01 09 21:00	Val di Noto	30	8-9	6.21 ±0.31
7	1693 01 11 13:30	Sicilia orientale	185	11	7.41 ±0.15
4	1693 04 17 19:00	Val di Noto	4	5	4.30 ±0.34
5	1698 01 01	Vizzini	6	7-8	5.86 ±0.71
8-9	1726 09 01 21:55	Palermo	8	7-8	5.58 ±0.72
3-4	1727 01 07	NOTO	14	6-7	4.83 ±0.35
5	1736 08 16	CIMINNA	5	6-7	4.93 ±0.34
4-5	1740 06 13	SCIACCA	3	6-7	4.93 ±0.34
6	1777 06 06 16:15	CALABRIA	9		
3-4	1780 04 09 02:30	Messina	3	6-7	4.93 ±0.34
3	1783 02 05 12:00	Calabria	356	11	7.02 ±0.08
F	1817 01 14	SCIACCA	4	4-5	4.09 ±0.34
5	1818 02 20 18:15	Catanese	128	9-10	6.23 ±0.12
5-6	1818 09 08 09:50	Madonie	24	7-8	5.16 ±0.36
5	1819 02 24 23:20	Madonie	24	7-8	5.31 ±0.51
8	1823 03 05 16:37	Sicilia settentrionale	107		6.47 ±0.15
2-3	1870 10 04 16:55	Cosentino	56	9-10	6.10 ±0.19
3	1892 03 16 12:38	ALICUDI	28	7	5.29 ±0.31
2-3	1894 11 16 17:52	Calabria meridionale	303	9	6.07 ±0.10
NF	1898 11 03 05:59	Caltagirone	48	5-6	4.80 ±0.30
2-3	1905 09 08 01:43	Calabria meridionale	895		7.04 ±0.16
5	1907 01 21 03:41	TERMINI IMERESE	32	5	4.36 ±0.33
2	1907 10 23 20:28	Calabria meridionale	274	8-9	5.87 ±0.25

5	1908 12 28 04:20:24	Calabria meridionale-Messina	800	11	7.10 ±0.15
3	1926 08 17	ISOLA DI SALINA	44	7-8	5.41 ±0.23
7	1940 01 15 13:19:24	Golfo di Palermo	60	7-8	5.28 ±0.20
NF	1949 10 08 03:08:49	NOTO	32	7	5.20 ±0.27
3	1959 12 23 09:29	PIANA DI CATANIA	108	6-7	5.29 ±0.20
5	1967 10 31 21:08:08	Monti Nebrodi	60	8	5.46 ±0.19
5-6	1968 01 15 01:33:04	Valle del Belice	15		
6-7	1968 01 15 02:01:04	Valle del Belice	163	10	6.33 ±0.13
5	1978 04 15 23:33:47	Golfo di Patti	332		6.06 ±0.09
NF	1980 11 23 18:34:52	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.89 ±0.09
3	1981 06 07 13:00:57	MAZARA DEL VALLO	50		4.96 ±0.09
6	1990 12 13 00:24:28	Sicilia sud-orientale	304	7	5.64 ±0.09
2-3	1995 05 29 06:52:28	Trapani	45		4.80 ±0.09
2-3	1999 02 14 11:45:54	Patti	101		4.69 ±0.09
2	2001 11 25 19:34:20	MADONIE	25	4-5	4.74 ±0.09
6	2002 09 06 01:21:29	PALERMO	132		5.94 ±0.09

Seismic history of Siculiana

[37.336, 13.421]

Total number of earthquakes: 7

Intensità al sito	Data e ora	Zona epicentrale	Numero di osservazioni	Int. Epic.	Magnitudo Mw
7	1693 01 11 13:30	Sicilia orientale	185	11	7.41 ±0.15
NF	1898 11 03 05:59	Caltagirone	48	5-6	4.80 ±0.30
NF	1905 09 08 01:43	Calabria meridionale	895		7.04 ±0.16
NF	1908 12 28 04:20:24	Calabria meridionale-Messina	800	11	7.10 ±0.15
F	1933 02 26 02:48	SCIACCA	11	5	4.29 ±0.62
5-6	1959 12 23 09:29	PIANA DI CATANIA	108	6-7	5.29 ±0.20
6	1968 01 15 02:01:04	Valle del Belice	163	10	6.33 ±0.13

Seismic history of Modica

[36.858, 14.761]

Total number of earthquakes: 26

Intensità al sito	Data e ora	Zona epicentrale	Numero di osservazioni	Int. Epic.	Magnitudo Mw
10	1169 02 04 07:00	Sicilia orientale	10	10	6.41 ±0.34
8	1542 12 10 15:15	Siracusano	32	10	6.77 ±0.32
10	1693 01 11 13:30	Sicilia orientale	185	11	7.41 ±0.15
6	1693 02 23	Modica	1	6	4.72 ±0.34
6	1693 04 17 19:00	Val di Noto	4	5	4.30 ±0.34
7	1693 05 12 13:20	Modica	2	6	4.72 ±0.34
6	1693 07 08 17:50	Monti Iblei	7	6	4.94 ±0.64
6-7	1696 04 20 12:00	Modica	2	5-6	4.51 ±0.34
3-4	1727 01 07	NOTO	14	6-7	4.83 ±0.35
F	1783 02 05 12:00	Calabria	356	11	7.02 ±0.08
NF	1823 03 05 16:37	Sicilia settentrionale	107		6.47 ±0.15
5-6	1848 01 11 12:00	Golfo di Catania	41	7-8	5.45 ±0.39
4-5	1895 04 13 15:01	Vizzini	32	6-7	4.89 ±0.45
F	1896 07 02 00:30	CANALE DI SICILIA	10	4	4.21 ±0.56
NF	1905 09 08 01:43	Calabria meridionale	895		7.04 ±0.16
NF	1908 12 10 06:20	NOVARA DI SICILIA	64	7	5.13 ±0.26
6	1908 12 28 04:20:24	Calabria meridionale-Messina	800	11	7.10 ±0.15
4	1924 08 17 21:40	MONTI IBLEI	22	5	4.73 ±0.24
2-3	1928 03 07 10:55:16	CAPO VATICANO	30	7-8	5.83 ±0.26
5	1934 09 11 01:19:58	MADONIE	28	5-6	4.95 ±0.24
7	1949 10 08 03:08:49	NOTO	32	7	5.20 ±0.27
5-6	1959 12 23 09:29	PIANA DI CATANIA	108	6-7	5.29 ±0.20
2	1978 04 15 23:33:47	Golfo di Patti	332		6.06 ±0.09
5-6	1980 01 23 21:21:06	MODICA	122	5-6	4.58 ±0.14

6	1990 12 13 00:24:28	Sicilia sud-orientale	304	7	5.64 ±0.09
5-6	2004 12 30 04:04:50	Monti Iblei	49	5	4.17 ±0.17

This file has been downloaded from INGV - DBMI11

Indice

Introduzione	4
1. Inquadramento geologico-strutturale	5
2. Definizione delle strutture sismogenetiche e analisi della sismicità storica	6
2.1 Sorgenti sismogenetiche composite e individuali	6
2.2 Sismicità storica	9
3. Stima delle deformazioni tettoniche in atto	11
3.1 Osservazioni geodetiche	11
3.2 Relazione tra deformazioni, sismicità e sorgenti sismogenetiche	13
4. Simulazione di un catalogo sismico	16
4.1 Algoritmo del programma di simulazione	16
4.2 Applicazione del programma di simulazione	17
5. Analisi statistica dei risultati: periodi di ritorno e probabilità di occorrenza di grandi eventi sismici	19
5.1 Distribuzione in magnitudo	19
5.2 Analisi temporale dell'attività sismica	21
6. Stima delle probabilità di eccedenza di determinati valori di PGA	23
7. Conclusioni	27
Ringraziamenti	28
Acknowledgments	28
Bibliografia	28
Appendice 1	31

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia