



**Tesi di stage di formazione ambientale**

**CONTRIBUTO AL DATABASE “SURFIN” (*SURFACE FAULTING*  
*INTENSITY*) – CATALOGO DELLE INTENSITA’  
MACROSISMICHE DI TERREMOTI STORICI ASSOCIATI A  
FAGLIAZIONE SUPERFICIALE – ELABORAZIONI  
STATISTICHE**

**Dott.sa Cristina Di Salvo**

**Tutors: Eutizio Vittori & Valerio Commerci**

## **RIASSUNTO**

Il lavoro presentato in questa tesi è inserito nel progetto INQUA finalizzato alla compilazione di una nuova scala d'intensità macrosismica; la novità di questa scala consiste nell'associare principalmente i parametri di rottura superficiale (effetti "primari") di un terremoto alla sua intensità. La valutazione dell'intensità stessa viene così svincolata dagli effetti sui manufatti e sulle persone, che, nel caso di terremoti che avvengono in aree poco antropizzate, porta ad una stima erronea della reale energia del terremoto.

Il database 'Surfin' è stato compilato allo scopo di raccogliere informazioni sui terremoti relative anche (e soprattutto) ai parametri di rottura superficiale; in particolare, le informazioni riguardanti rottura cosismica e intensità permettono di correlare queste due grandezze. Le correlazioni sono state quindi utilizzate testare i criteri di costruzione della scala INQUA. Ad ognuno dei 12 gradi d'intensità della nuova scala corrisponde un range di lunghezza del segmento di faglia cosismico e un range di rigetto massimo della faglia stessa.

Database già presenti in letteratura sono stati aggiornati, completati e cospicuamente integrati, per arrivare alla compilazione di Surfin con 340 eventi.

Nella fase successiva del lavoro, sono state messe in correlazione le seguenti coppie di grandezze:

- Intensità – lunghezza di faglia;
- Intensità –massimo rigetto;
- Intensità – area del piano quotato di V grado;

I dati, raccolti in un foglio di lavoro Excel, sono stati plottati su grafici, e ne sono stati ricavati i coefficienti di correlazione. In ultima analisi, sono state effettuate delle correlazioni multiple, trovando così equazioni che descrivono il variare della variabile dipendente (l'intensità) al variare delle variabili indipendenti (parametri di rottura superficiale e area del piano quotato).

## **ABSTRACT**

This study is inserted on the INQUA project, finalized to the compilation of the new macroseismic intensity scale. The innovation of this scale is that it associates principally surface rupture parameters (the “ primary” effects of an earthquake), to its intensity. By this way the evaluation of the intensity is not tied by the effects on human people and on man-made constructions, that is often the cause of an erroneous evaluation of the real energy of the earthquake.

The “Surfin” database is been compiled with the scope to collect informations regarding mostly surface rupture parameters relative to an earthquakes; in particular, informations regarding coseismic rupture and intensity allow us to observe correlations between this two factors, and they are utilized for the construction of the INQUA scale. In fact, for every one of the 12 intensity grades of the new scale corresponds a range of coseismic fault length and a range of maximum displacement of the fault plane.

Databases yet existing in bibliography were dawned, completed and largely integrated, arriving at the compilation of the Surfin database with 340 events.

In a second phase of the work, we correlated these couples of factors:

- Intensity- surface fault length
- Intensity – maximum displacement
- Intensity – area of the V grade quoted plane of

This dates, collected in an Excel worksheet, were plotted on graphics, and correlation coefficients were gained.

Finally, we made multiple correlations, finding three equations describing the variation of the dependent variable (Intensity) with the changing of the independent variables (surface rupture parameters and area of the quoted plane.

## INDICE

1 – Introduzione.....	5
2 - L'INQUA scale.....	8
3 - Il database “SURFIN”.....	9
4 - Correlazioni tra dati.....	15
5 – Il processo di scrematura del database.....	20
6 - Correlazioni tra piani quotati e intensità.....	33
7 - Correlazioni multiple.....	37
8 – Conclusioni.....	39
9 – Bibliografia.....	43

## ALLEGATI

**Allegato 1** - Database SURFIN

**Allegato 2** – Database comprendente solo gli eventi con intensità uguale o pari a +/- 1 l'intensità INQUA stimata in base ai parametri di rottura

**Allegato 3** – Lista degli eventi con intensità uguale o pari a +/- 1 l'intensità valutata sulla base del massimo rigetto di faglia

**Allegato 4** – Lista degli eventi con intensità uguale o pari a +/- 1 l'intensità INQUA valutata sulla base della lunghezza di faglia

**Allegato 5** – Database delle mappe d'intensità macrosismica raccolte.

## 1 - INTRODUZIONE

Un terremoto è una vibrazione del suolo che si produce quando rocce che subiscono una deformazione superano il limite di rottura rompendosi lungo una faglia. I due blocchi di roccia ai lati della faglia scivolano ponendo il suolo in vibrazione. Questo scivolamento ha luogo nella maggior parte dei casi lungo i margini delle placche, le regioni della crosta o del mantello superiore dove si produce la maggior parte delle deformazioni in atto.

I terremoti vengono descritti in tutto il mondo in base a due parametri: la magnitudo e l'intensità. La magnitudo è misurata strumentalmente, ed è basata sul confronto tra l'ampiezza del sisma registrata da un sismografo e l'ampiezza di un terremoto standard. In realtà la Magnitudo strumentale ( $M_s$ ), ovvero il rapporto tra queste due grandezze, è stata usata solo a partire dalla fine dell'800, con la comparsa dei sismografi; per i terremoti avvenuti precedentemente si usa in genere una magnitudo derivata dall'intensità, detta Magnitudo equivalente ( $M_e$ ).

L'intensità è una valutazione dell'energia del terremoto basata sugli effetti prodotti sulla popolazione, sulle strutture costruite dall'uomo e sull'ambiente; le cronache scritte immediatamente dopo gli eventi sono state di fondamentale importanza per ricostruire l'intensità degli eventi sismici storici. Su parametri riguardanti effetti sull'ambiente, sull'uomo e sui manufatti (lunghezza e rigetto delle faglie superficiali, frane, fratture, liquefazione dei terreni, modificazione della portata delle sorgenti, distruzione di manufatti come edifici, strade ecc, lesione dell'incolumità della popolazione) sono costruite le scale macrosismiche, che sono in genere strutturate secondo 12 gradi; le più importanti sono:

- Mercalli Modificata (MM)
- Rossi-Forel
- Scala d'intensità Giapponese (JMA, Japanese Meteorological Agency)
- Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), utilizzata prevalentemente in Italia
- Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), utilizzata prevalentemente nei paesi dell'ex-Unione Sovietica.

Un confronto tra le varie scale è stato proposto da Leon Reiter nel 1990, e viene riportato di seguito

MODIFIED MERCALLI	ROSSI FOREL	JMA	MERCALLI CANCANI SIEBERG	MEDVEDEV SPONHEUER KARNIK
I	I	I	II	I
II	II		III	II
III	III		IV	III
IV	IV		V	IV
V	V	II	VI	V
VI	VI	III	VII	VI
VII	VII	IV	VIII	VII
VIII	VIII	V	IX	VIII
IX	IX		X	IX
X	X	VI	XI	X
XI			XII	XI
XII		VII		XII

Figura 1 – Confronto tra differenti scale d'intensità macrosismica

Anche Panza (2006) riporta un confronto delle varie scale d'intensità; nella sua tabella, le scale MSK e MM sono uguali, e per quanto riguarda la scala JMA il grado 6 corrisponde solo al grado 9

MM, mentre il grado 7 JMA comprende l'intervallo dei gradi dal 10 al 12 MM. Per il lavoro descritto in questa tesi è stata però presa in considerazione la tabella di Reiter.

L'ultima scala d'intensità, in senso cronologico, è l'European Macroseismic Scale (EMS), elaborata nel 1992 (e aggiornata nel 1998) dal Centro Europeo di Geodinamica e Sismologia; questa scala è essenzialmente basata su una particolareggiata suddivisione degli edifici in base alle qualità costruttive, e riporta nel dettaglio i danni che ciascun tipo di costruzione può subire per una certa intensità. Tuttavia, nella scala EMS la descrizione degli effetti sull'ambiente è presente solo in appendice. Questo approccio presenta evidenti limiti in quanto la valutazione dell'intensità è strettamente dipendente dalla presenza o meno di persone ed edifici, e quindi influenzata dalla qualità costruttiva degli edifici stessi. Così accade che un terremoto avvenuto in aree edificate secondo criteri antisismici o comunque con materiali di qualità produca effetti distruttivi molto blandi rispetto ad un evento sismico di pari intensità avvenuto in una località con costruzioni scadenti; ciò porta ad una valutazione d'intensità bassa nel primo caso, alta nel secondo. In questo modo l'intensità esprime la condizione socio-economica del luogo e non una valutazione oggettiva dell'energia rilasciata dal sisma.

Un ulteriore problema si pone nelle aree scarsamente popolate, dove terremoti di forte magnitudo vengono valutati con basse intensità per l'assenza di costruzioni.

Un esempio dei problemi legati alle scale d'intensità è il terremoto indonesiano del dicembre 2004, che provocò un devastante tsunami: quasi tutti i testi (Bilham et al. 2005, Martin 2005, Banerijee P. 2007) riportano un'intensità pari al nono grado della scala MM, a fronte di una magnitudo di grado 9. La causa principale di questa sottovalutazione risiede nel fatto che l'epicentro del terremoto è localizzato in mare; essendo l'area di maggior risentimento sommersa, in molte aree non ci sono stati danni per gli uomini a causa del terremoto (ma solo a causa del successivo tsunami).

## **2 - L'INQUA SCALE**

Per queste ragioni la comunità scientifica ha sentito il bisogno di ridare importanza all'uso degli EEE (Earthquake Environmental Effects), per la valutazione dell'intensità. Tali effetti sono presenti in tutte le altre scale d'intensità, ma oggi possiamo avvalerci dei notevoli progressi ottenuti nel campo della geologia dei terremoti.

E' stata così elaborata l'INQUA scale (la sigla sta per International union for QUaternary research), frutto del lavoro di un gruppo internazionale di ricercatori che ha agito sotto la coordinazione dell'INQUA nell'ambito dell'INQUA Subcommission on Paleoseismicity, di cui l'APAT è il leader scientifico. La scala è stata presentata nella sua prima versione nel XVI INQUA Congress, a Reno, negli USA, nel luglio 2003 e attualmente sono in corso studi in tutto il mondo per arrivare ad una versione definitiva da presentare al futuro Congresso dell'INQUA che si terrà a Cairns, Australia, nell'agosto 2007.

L'INQUA Scale è nata con l'obiettivo di integrare le preesistenti scale d'intensità macrosismica con una scala basata su effetti sul terreno direttamente correlati all'energia del terremoto; tale approccio è guidato dalla necessità di stimare l'intensità di probabili futuri terremoti dall'analisi dei parametri di rottura superficiale dei terremoti passati, anche pre-storici (grazie al contributo fornitoci dalla paleosismologia).

L'INQUA Scale non è stata elaborata per sostituire le altre scale, ma per completarle: in città, per esempio, è difficile valutare correttamente un sisma in base agli effetti sull'ambiente, e pertanto devono essere considerati gli altri tipi di effetti (sull'uomo e sul costruito).

Per questo motivo, la nuova scala è tarata su 12 gradi in modo da essere direttamente correlabile alle altre scale (in particolare alle due scale maggiormente in uso, la MM e la MSK).

La scala INQUA prende in considerazione sia gli effetti primari che quelli secondari relativi al sisma. Sono considerati "primari" gli effetti riconducibili direttamente alla faglia sismogenetica, mentre gli effetti "secondari" sono controllati principalmente dalla durata e dalle caratteristiche del moto (accelerazione, velocità) (Vittori & Comerci, 2004).



Nel presente lavoro sono stati considerati solo gli effetti primari.

### **3 - IL DATABASE “SURFIN”**

I dati di fagliazione superficiale di 341 eventi sismici storici e contemporanei di tutto il mondo sono stati raccolti nel database “SURFIN” (SURface Fault INTensity). Nella costruzione del database si è cercato di garantire: l’uniformità dei dati, la loro affidabilità scientifica e l’ampia distribuzione spaziale (cioè la presenza di eventi sismici avvenuti in tutto il mondo). Per uniformità dei dati si intende dire che la raccolta dei dati di Intensità, riportata in varie scale a seconda dell’autore e/o del luogo geografico del sisma, è stata uniformata in scala MM al fine di rendere i dati correlabili tra di loro e con i parametri di rottura superficiale. A loro volta tali parametri sono stati riportati nel database con unità di misura uniformi (Km per le lunghezze di faglia e la profondità, m per il rigetto di faglia) al fine di agevolare durante la lettura un confronto tra i dati e facilitare le operazioni di correlazione con le intensità.

Inoltre, per aumentare l’affidabilità statistica di questo lavoro, si è cercato di estendere il più possibile il database spazialmente e temporalmente; per quanto riguarda la dimensione spaziale, esso è esteso all’intero globo terrestre, (ovviamente si tratta per la quasi totalità di eventi sismici avvenuti sulla terraferma, poiché non sono facilmente rilevabili i fenomeni di fagliazione superficiale di quelli avvenuti in mare aperto), e nella dimensione temporale va dai primi terremoti di cui si conoscano intensità e parametri di rottura superficiale (terremoto di Sparta, -464 a.C.) fino ai nostri giorni.

La maggior parte delle informazioni riportate nel database proviene dai lavori di Wells & Coppersmith (1994), Yeats et al. (1997) e Stirling et al. (2002); i terremoti catalogati sono solo quelli che abbiano prodotto fagliazione superficiale, di cui vengono riportati i vari parametri (lunghezza del segmento di faglia riattivata, massimo rigetto, meccanismo focale).

I dati originari sono stati quindi integrati e spesso aggiornati con una cospicua ricerca bibliografica.

Il database ultimato comprende i seguenti campi:

- numero d'ordine del database;
- nazione;
- nome della località epicentrale;
- latitudine;
- longitudine;
- data;
- meccanismo focale;
- intensità;
- magnitudo;
- lunghezza della faglia (in Km);
- massimo rigetto (in m);
- profondità ipocentrale (in Km);
- Riferimenti bibliografici;
- Bibliografia.

L'intensità riportata è generalmente in scala MM; a volte, dove indicato, è espressa in MCS, JMA o MSK.

La magnitudo dei terremoti avvenuti in epoca pre-strumentale (cioè quando le reti di sismografi non esistevano) è espressa come magnitudo equivalente ( $M_e$ ), cioè calcolata in base all'intensità, mentre per quelli recenti è espressa come magnitudo delle onde superficiali ( $M_s$ ).

Gli eventi sono riportati in ordine cronologico e vanno dal 464 a.C. (terremoto di Sparta, Grecia,  $I=11$  MM) al 2005 (terremoto del Kashmir, Pakistan,  $I=11$  MSK).

Sono stati considerati nel database solamente i terremoti crostali, cioè compresi tra 1 e 70 Km, e sono stati esclusi i terremoti di origine vulcanica. La maggior parte degli eventi sismici raccolti è

avvenuto a profondità comprese tra 1 e 20 Km (fig. 2); è ovvio che tali valori sono più affidabili solo per gli eventi più recenti.

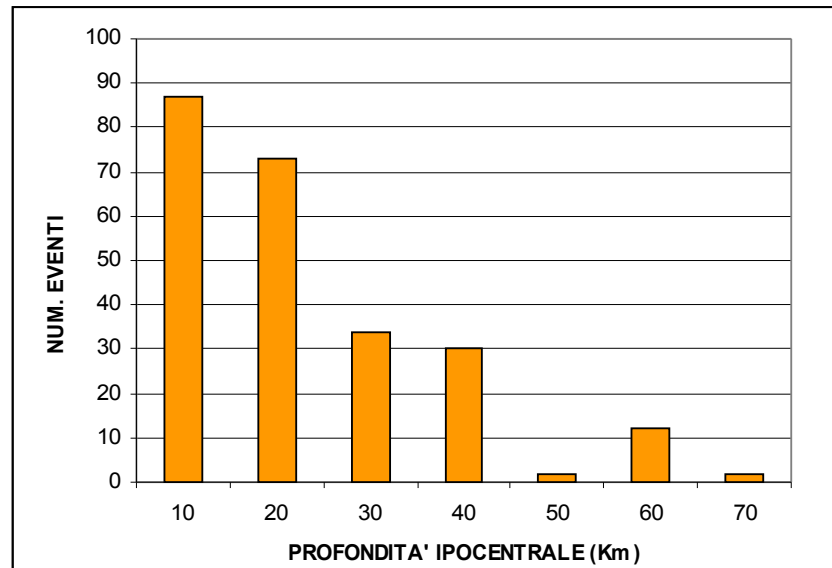


Figura 2- distribuzione delle profondità ipocentrali dei terremoti raccolti nel database.

Dal grafico in fig. 3 si può notare che la maggior parte dei terremoti presenti in database è stata provocata da un movimento trascorrente; nel database sono riportati non solo i tre tipi principali di movimento, ma anche quelli con componenti di altro tipo, come Normal/S.S., Reverse/S.S., S.S. Normal e S.S./ Rev, dove il primo termine rappresenta la componente principale di movimento.

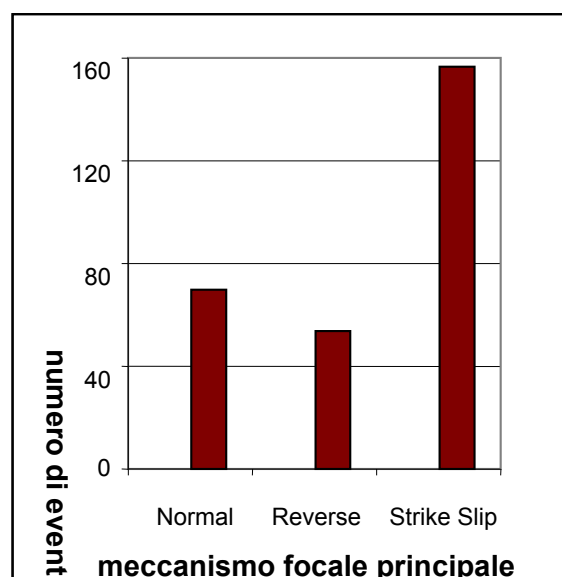


Figura 3- distribuzione dei tipi di meccanismo focale

Sono state inoltre raccolte circa 100 mappe di intensità macrosismica relative ad altrettanti eventi.

I dati raccolti ricadono nei range di valori di seguito riportati:

INTENSITA': da 3 a 12 (MM)

MAGNITUDO: da 4,2 a 8,7 (Ms)

LUNGHEZZE DI FAGLIA : da 0,20 A 1500 Km

MASSIMI RIGETTI DI FAGLIA : da 0 a 24 m

ESTENSIONE IN KM DEL PIANO QUOTATO DI V GRADO: da 1315 a 2955696 Km<sup>2</sup>

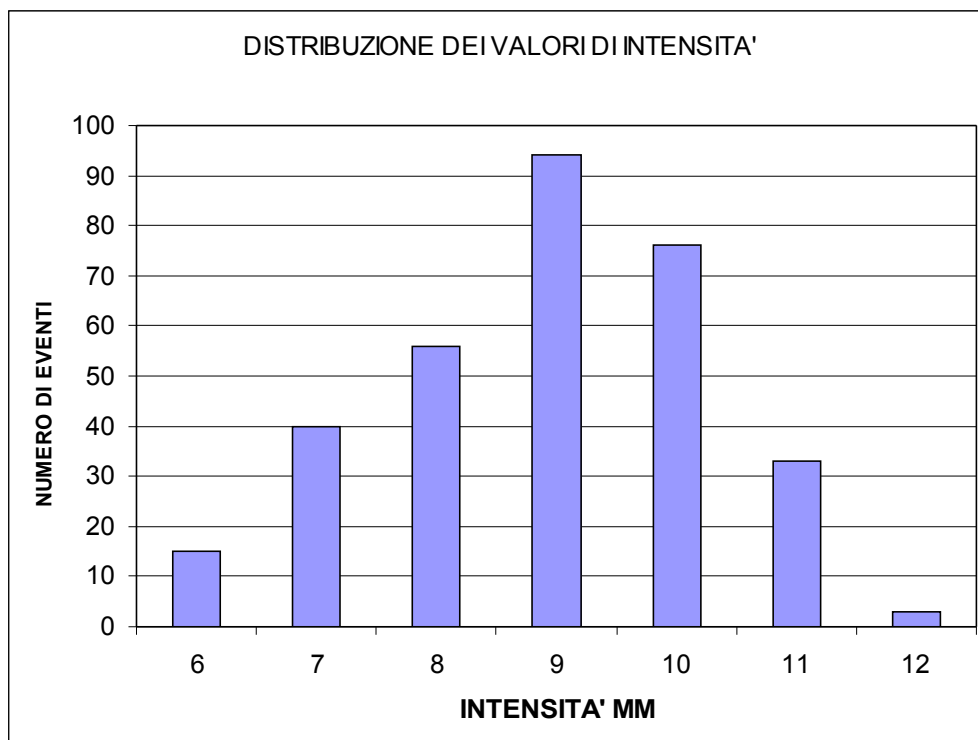


Figura 4 – Distribuzione dei valori di intensità. Dal grafico si nota come la maggior parte degli eventi abbia I=9 (95 eventi) e I=10 (77 eventi); gli eventi di grande intensità (I=11 e I=12) sono soltanto 34, mentre gli eventi con intensità compresa tra 6 e 8 sono 110.

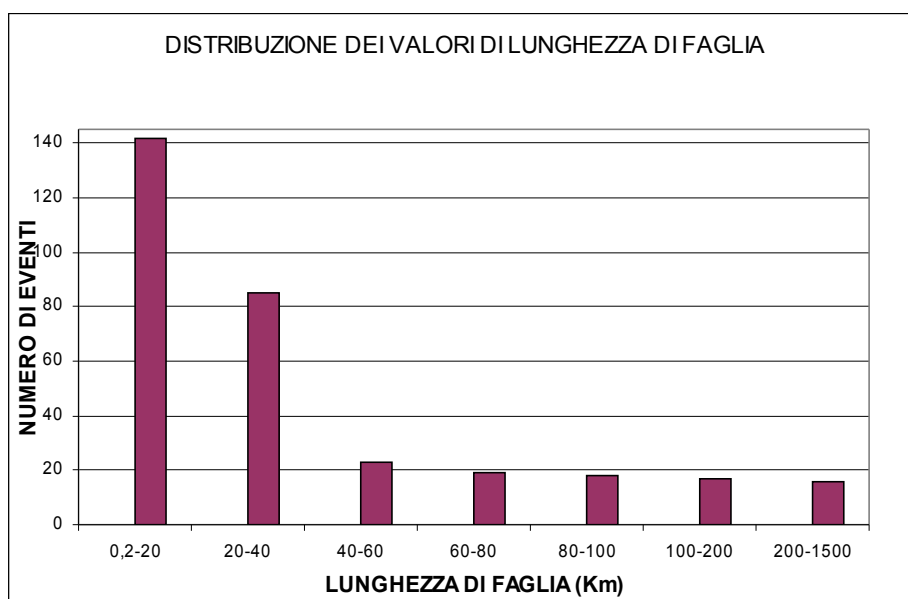


Figura 5 – Dal grafico si può notare che la maggior parte degli eventi presenti nel database hanno una lunghezza di faglia compresa tra 0,2 e 40 Km (220) e in particolare la classe col maggior numero di eventi (140) è quella di lunghezze comprese tra 0,2 e 20 Km. Al di sopra dei 40 Km il numero di eventi diminuisce sensibilmente; per lunghezze di faglia comprese tra 100 e 1500 Km il numero di eventi diventa molto esiguo (35 eventi).

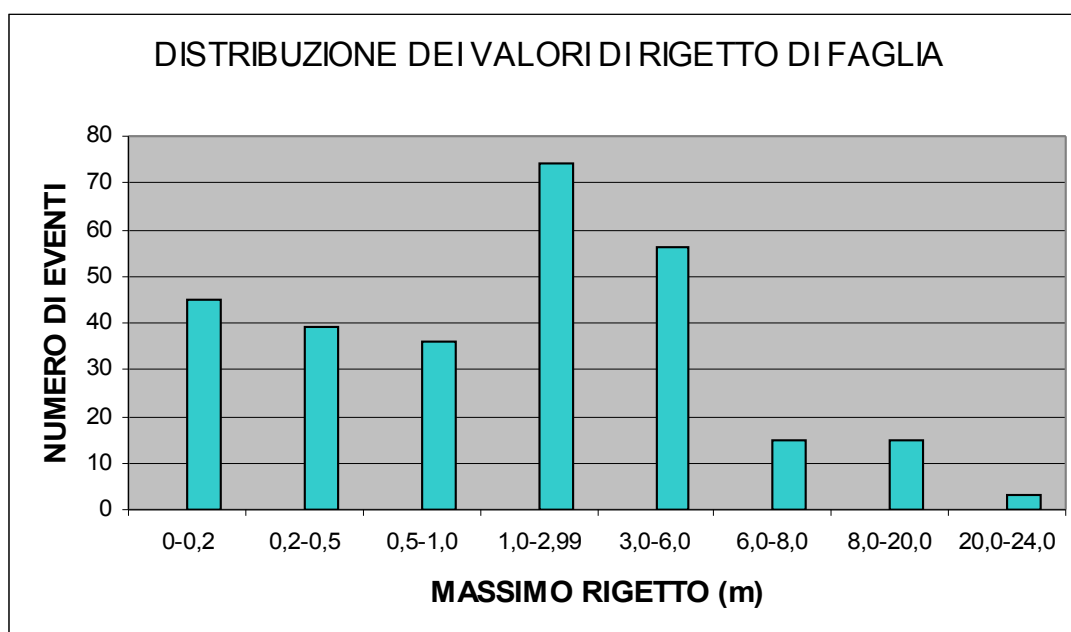


Figura 6 – Il grafico mostra che la maggior parte degli eventi presenti nel database (250) presenta un massimo rigetto di faglia minore di 6 metri; in particolare, 120 di questi eventi hanno rigetto massimo inferiore o uguale a 1 metro, e 130 eventi hanno rigetto compreso tra 1 e 6 metri. Gli eventi con massimo rigetto maggiore di 6 m sono in numero molto basso (30).

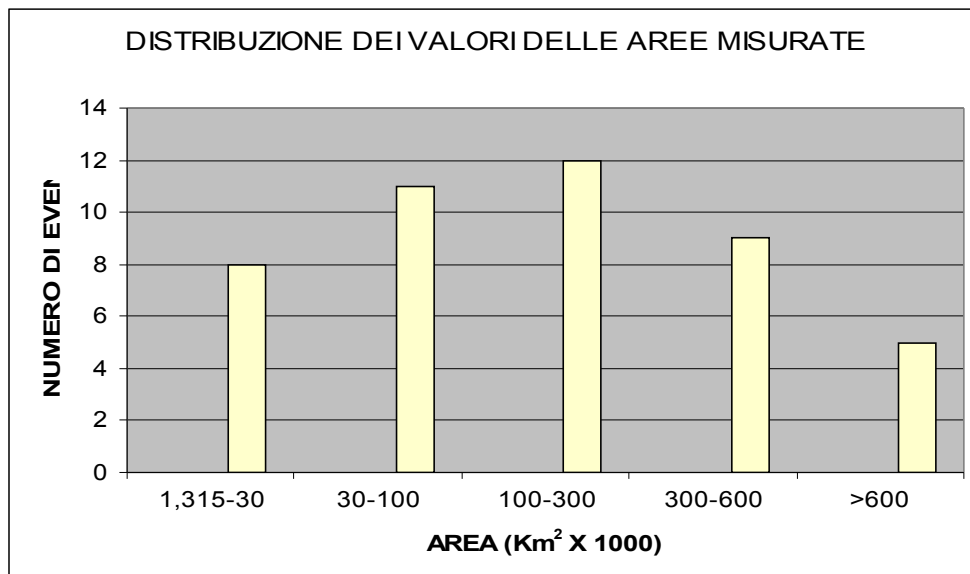


Figura 7 – La maggior parte delle aree calcolate per il piano quotato di V grado ha una estensione compresa tra 1.315 e 300.000 Km<sup>2</sup> (31 aree), con due picchi corrispondenti a valori compresi tra 100.000 e 300.000 Km<sup>2</sup> (12 aree) e tra 30.000 e 100.000 Km<sup>2</sup> (11 aree).

#### 4 - CORRELAZIONI TRA DATI

I dati raccolti nel database sono stati elaborati mediante programmi di statistica; molti autori, tra cui Wells & Coppersmith (1994), Ambraseys & Jackson (1997), Stirling et al. (2002), hanno messo in relazione la magnitudo con i parametri di rottura superficiale, trovando una correlazione diretta tra le grandezze (figura 8); ossia, all'aumentare della magnitudo del terremoto, aumentano anche la lunghezza e il rigetto del segmento di faglia che taglia la superficie durante il sisma.

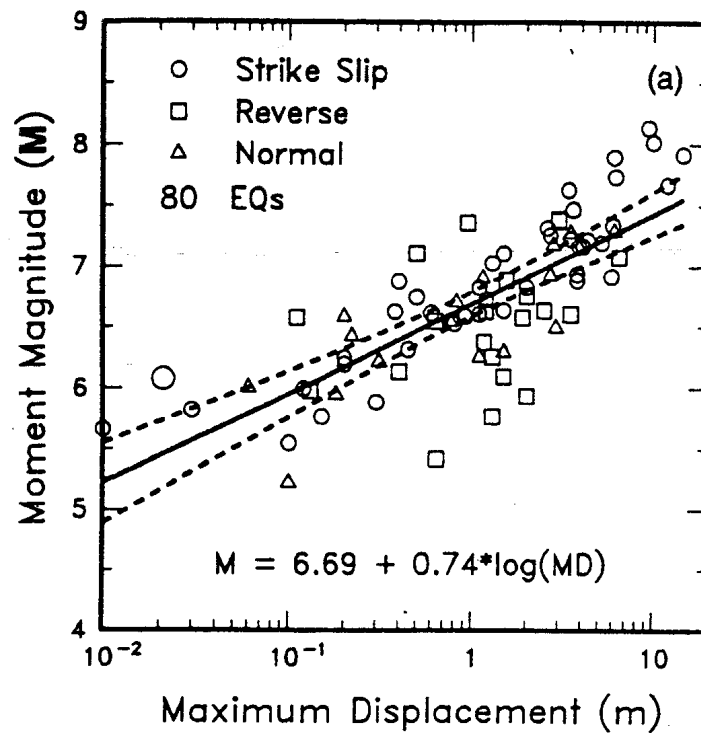


Figura 8: correlazione tra magnitudo e parametri di rottura superficiale: esempio del massimo rigetto della faglia cosismica (da Wells & Coppersmith, 1994)

Poiché esistono correlazioni empiriche che trovano una corrispondenza pressoché lineare tra magnitudo e intensità (per i terremoti italiani un esempio è Boschi et al., 1999, figura 9), si assume che al crescere dell'intensità debbano aumentare anche i valori dei parametri di rottura della faglia cosismica.

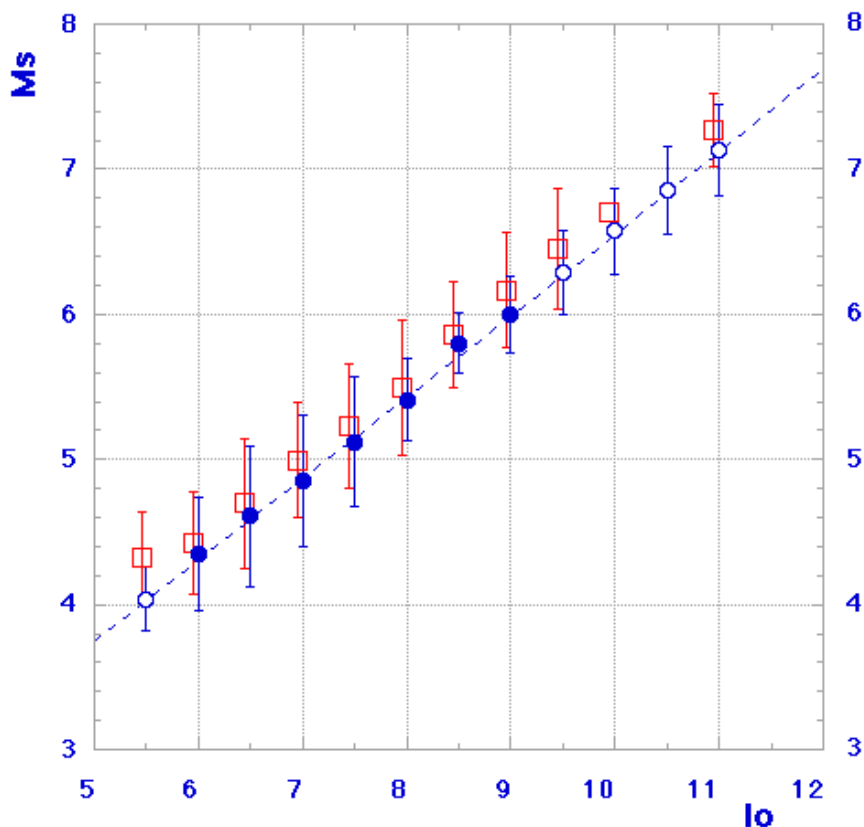


Figura 9: Correlazione perfettamente lineare tra magnitudo e intensità. Da Boschi et al., 1999.

Prima di procedere con le correlazioni, i dati di intensità sono stati uniformati alla scala MM, prendendo in considerazione le differenze tra i gradi delle scale MCS e JMA e quelli della MM.

La scala MCS, nella quale sono espressi la maggior parte dei terremoti italiani, ha 12 gradi, ma, secondo Reiter (1990) non corrispondenti ai 12 gradi della MM: per esempio, il grado IX MCS corrisponde ad una intensità a cavallo tra VII e VIII MM, e il XII grado MCS corrisponde al X grado MM, cioè la scala MCS si “satura” prima della MM.

La scala di intensità giapponese, la JMA (Japanese Metereological Agency), è formata da sette gradi e la difficoltà nella conversione in MM deriva dal fatto che i gradi dal V al VII JMA coprono un intervallo molto ampio sulla MM, e cioè dal grado VII al grado XII. La conversione in questo caso è stata effettuata ponendo il grado V JMA = VIII MM e il grado VI JMA = X MM; infatti, secondo le comparazioni di Reiter (1990) e Panza (2006), al grado V JMA corrisponde l'intervallo



VII-VIII MM, e al grado VI JMA corrisponde l'intervallo IX-X MM; all'interno di tali intervalli si sono scelti i gradi compatibili con i parametri di rottura associati.

Per quanto riguarda i valori riportati in scala MKS, questi non presentano problemi dal momento che per gradi elevati (dal V in poi) c'è una corrispondenza precisa con la scala MM.

E' necessario specificare che per terremoti di intensità dal grado 1 al grado 8 la stragrande maggioranza degli eventi sismici non compare nel database, in quanto non ha prodotto fagliazione superficiale.

Spesso nel database sono riportati più valori per ciascun parametro, in quanto durante la ricerca bibliografica sono state raccolte valutazioni differenti; in questo caso, in fase di correlazione si è escluso il valore proveniente da una fonte bibliografica più vecchia, a meno che quest'ultima non sia stata considerata più autorevole. Per esempio, nel terremoto di Kozani (Grecia) del 1995 la lunghezza di faglia è di 27 Km per Pavlides & Caputo (2004) e di 15 Km per Ambraseys & Jackson (1998); nella correlazione si è scelto il primo valore, in quanto pubblicato più recentemente.

Quando si è dovuto scegliere tra dati raccolti da siti internet e dati pubblicati, sono stati preferiti questi ultimi.

I primi risultati delle correlazioni Intensità-lunghezza della faglia e Intensità-massimo rigetto hanno mostrato una correlazione molto bassa: per quanto riguarda la lunghezza di faglia il coefficiente di correlazione  $R^2$  è intorno a 0,11, (figura 10), mentre  $R^2$  migliora leggermente nel caso della correlazione col rigetto (figura 11,  $R^2=0,25$ ).

Se si prende in considerazione il logaritmo in base 10 dei valori lunghezza di faglia e rigetto, come già era stato fatto da Wells & Coppersmith (1994), il coefficiente  $R^2$  arriva a 0,23 per la correlazione I – lunghezza di faglia (figura 12) e a 0,26 per la correlazione I – massimo rigetto (figura 13) : si nota quindi un miglioramento piuttosto limitato.

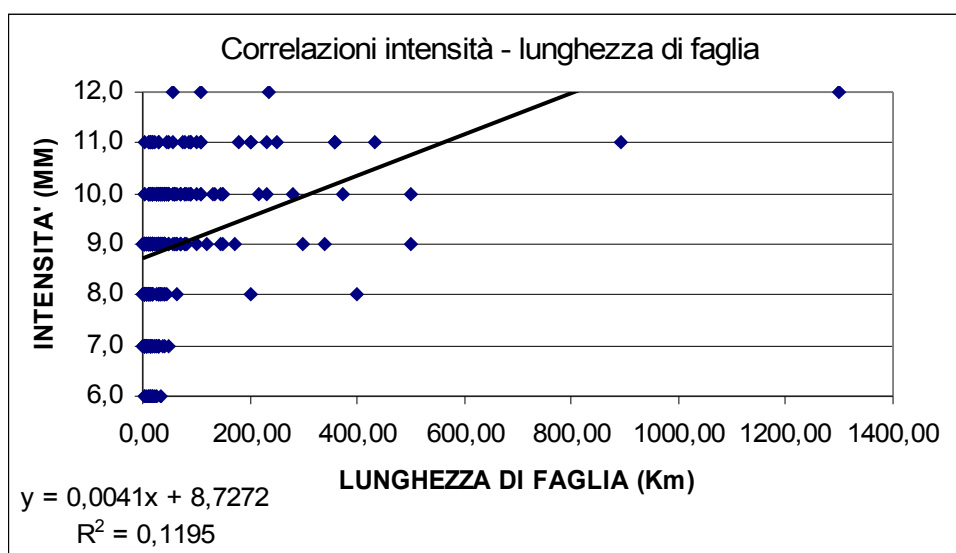


Figura 10: Correlazione tra intensità e lunghezza del segmento di faglia cosismica (Km). Sono stati presi in considerazione tutti i dati presenti nel database aventi i dati di intensità e lunghezza di faglia cosismica (314 eventi).

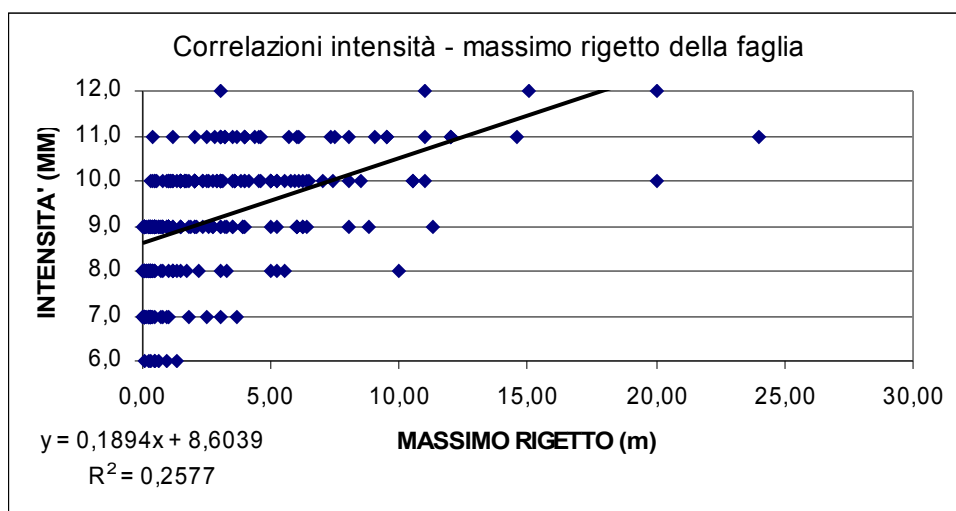


Figura 11: Correlazione tra intensità e massimo rigetto della faglia cosismica (m). Sono stati presi in considerazione tutti i dati presenti nel database aventi i dati di intensità e massimo rigetto di faglia cosismica (277 eventi).

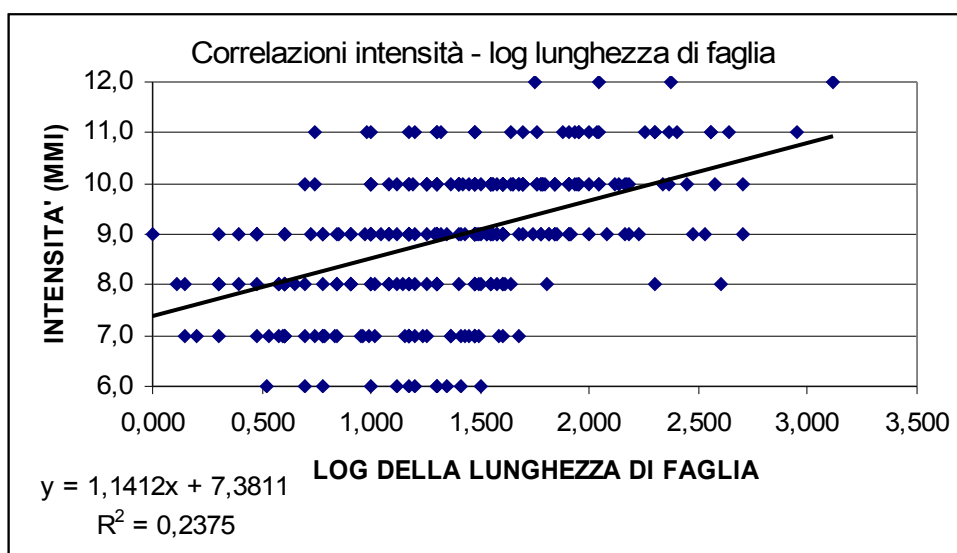


Figura 12: Correlazioni tra intensità e logaritmo in base 10 della lunghezza di faglia. Sono stati presi in considerazione tutti i dati presenti nel database.

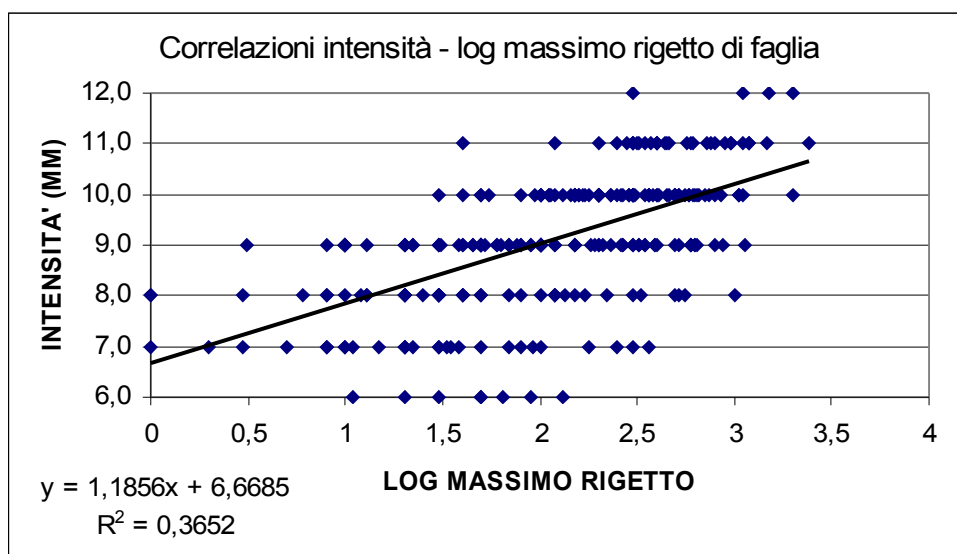


Fig 13: Correlazioni tra intensità e logaritmo in base 10 del massimo rigetto. Sono stati presi in considerazione tutti i dati presenti nel database.

## 5 - IL PROCESSO DI SCREMATURA DEL DATABASE

Se è vero che la magnitudo è proporzionale ai parametri di rottura e che la magnitudo è proporzionale all'intensità, allora ci si aspetta che anche l'intensità sia proporzionale ai parametri di rottura. Ma le intensità vengono calcolate trascurando spesso gli effetti sull'ambiente. Inoltre le intensità non sono tutte epicentrali ma calcolate nel centro abitato più vicino. Da ciò si evince il limite dell'attribuzione di intensità con le scale tradizionali, che si riflette nei grafici presentati.

La scala INQUA è stata compilata da geologi esperti sulla base di centinaia di terremoti analizzati in tutto il mondo, che ha permesso di stabilire i range di lunghezza della faglia cosismica e suo rigetto associabili ad un certo grado di intensità. Nel presente lavoro si è voluta verificare la corrispondenza tra le intensità e i valori di rottura superficiale relativi ai terremoti raccolti, e i range stabiliti dal gruppo di lavoro della scala INQUA.

Sulla base dei range riportati in tabella 1 e 2 (aggiornati a marzo 2007 e tuttora in revisione) sono state attribuite le intensità INQUA a tutti gli eventi presenti in database. Di questi, solo 109 eventi su 317 hanno una intensità attribuita in letteratura uguale a quella fatta in base ai parametri INQUA. Se però si estende il campo degli eventi considerati anche a quelli con intensità  $I = \pm 1$  INQUA, cioè si considerano anche i terremoti con intensità di un grado in più o in meno rispetto al grado assegnato con l'INQUA scale (approssimazione accettabile se si considera la variabilità dei fattori considerati), il numero di eventi arriva a 206. Negli allegati 3 e 4 sono riportati tutti gli eventi considerati mediante il criterio appena descritto: l'Allegato 3 riporta gli eventi selezionati in base al massimo rigetto, e l'Allegato 4 contiene gli eventi selezionati in base alla lunghezza di faglia. La lista completa degli eventi sismici considerati nelle correlazioni (206 eventi) è riportata in Allegato 2, ed è il risultato ottenuto unendo le precedenti due tabelle, ovvero contiene tutti gli eventi del database con grado di intensità INQUA (stimato sulla base dei ranges relativi a lunghezza di faglia e massimo rigetto), uguale o differente non più di un grado rispetto alla intensità MM attribuita in letteratura. Vediamo cosa si ottiene correlando tali terremoti con i parametri di rottura.

RANGE INQUA (SURFACE RUPTURE LENGHT) - aggiornati a marzo 2007			
Intensity EEE	SRL range	Numero di eventi	Commenti
I	0	0	
II	0	0	
III (totale: 1 evento)	0	0	C'è 1 evento con I=3 e SRL=0,6 Km
IV (totale: 1 evento)	0	0	C'è 1 evento con I=4 e SR=9
V (totale: 1 evento)	0	0	C'è 1 evento con I=5 e SRL=10
VI (totale: 12 eventi)	0	0	Ci sono <b>12</b> eventi con I=6 e SRL tra 3,3 e 32 Km di cui: 4 eventi tra 3,3 e 10 Km, 5 eventi tra 10 e 20 Km e 3 eventi tra 22 e 33 Km
VII (totale: 39 eventi)	up to few hundreds of meters (for volcanic earthquakes)	0	Ci sono <b>39</b> eventi con I=7 e SRL compresa tra 1,40 e 48 Km, di cui: 20 eventi tra 1,4 e 9,7 Km, 9 eventi tra 10 e 18 e 11 eventi tra 23 e 40 Km e 1 evento di 48 Km
VIII (totale: 60 eventi)	from few up to several hundreds meters	1	Ci sono <b>59</b> eventi con I=8 e SRL compresa tra 1,3 e 400 Km, di cui: 24 eventi tra 1 e 9,5 Km, 12 eventi tra 10 e 19 Km, 7 eventi tra 20 e 29 , 11 eventi da 30 a 40 Km, 3 eventi da 41 a 100 Km e 2 eventi da 200 a 400 Km
IX (totale: 94 eventi)	several hundreds of meters to few tens (<=20) Km	37	Ci sono <b>57</b> eventi con I=9 e SRL compresa tra 22 e 1500 Km, di cui: 15 eventi tra 22 e 30, 19 eventi tra 31 e 40 Km, 8 eventi da 41 a 70 Km, 6 eventi tra 71 e 100 Km, 5 eventi tra 110 e 200 Km, 3 eventi tra 300 e 500 Km e 1 evento di 1500 Km
X (totale: 74 eventi)	from few tens to 70 Km	44	ci sono <b>9</b> eventi con I=10 e SRL tra 5 e 15 Km. Ci sono <b>21</b> eventi con SRL compresa tra 80 e 500, di cui: 16 tra 80 e 200 e 5 tra 200 e 500
XI (totale: 32 eventi)	from several tens (70) up to more then one hundred(<200 Km)	11	ci sono <b>15</b> eventi con I= 11 e SRL compresa tra 5,5 e 57 Km, di cui 7 eventi tra 5,5 e 20 Km, e 8 eventi tra 21 e 57 Km. Ci sono <b>6</b> eventi con SRL compresa tra 230 e 891 Km
XII (totale: 3 eventi)	> 200 Km	1	ci sono <b>2</b> eventi con I=12 e SRL compresa tra 56 e 61 Km
totale: 317		totale: 94	

Tabella 1 – Range di lunghezza di rottura della faglia cosismica corrispondenti a differenti gradi di intensità.

<b>RANGE INQUA (MAXIMUM DISPLACEMENT) - aggiornati a marzo 2007</b>			
<b>INTENSITY EEE</b>	<b>MD range</b>	<b>numero di eventi</b>	<b>Com menti</b>
I	0		
II	0		
III (totale: 1 evento)	0	0	C'è 1 evento di I=3 e MD= 20 cm
IV (totale: 1 evento)	0	0	C'è 1 evento di I=4 e MD=10 cm
V (totale: 1 evento)	0	0	C'è 1 evento di I=5 con MD=150 cm
VI (totale: 9 eventi)	0	1	Ci sono <b>8</b> eventi con I= 6 e MD compreso tra 11 e 130 cm, di cui 5eventi tra 11 e 50 cm, 2 eventi tra 60 e 90 cm e 1 evento con MD=130 cm
VII (totale: 29 eventi)	< 5 cm	4	Ci son <b>25</b> eventi con I=7 e MD compreso tra 8 e 365 cm, di cui 4 eventi da 8 a 10 cm, 12 eventi tra 11 e 50 cm, 5 eventi tra 60 e 100 e 4 eventi tra 1,80 e 365 cm
VIII (totale:48 eventi)	5 - 10 cm	7	Ci sono <b>3</b> eventi con I=8 e MD compreso tra 1 e 3 cm. Ci sono <b>38</b> eventi con I=8 e SRL compresa tra 12 e 1000 cm , di cui 17 eventi tra 12 e 50 cm, 17 eventi tra 50 e 500 cm, 2 eventi tra 52 e 56 cm e 2 eventi tra 60 e 1000 cm
IX (totale: 85 eventi)	10 - 50 cm	29	C' è <b>1</b> evento con I=9 e MD=3 cm. Ci sono <b>55</b> eventi con I=9 e MD compresa tra 52 e 2000 cm, di cui 43 eventi tra 60 e 500 cm, 9 eventi tra 520 e 880 cm, 3 eventi tra 1100 e 2000
X (totale:73 eventi)	50 - 500 cm	55	Ci sono <b>2</b> eventi con I=10 e MD da 0 a 40 cm. Ci sono <b>16</b> eventi con I=10 e tra 520 e 2000 cm, di cui: 14 eventi tra 520 e 1050 cm e 2 eventi tra 1050 e 2000 cm
XI (totale: 33 eventi)	500 - 1000 cm	9	Ci sono <b>19</b> eventi con I=11 e MD tra 40 e 460 cm, di cui: 5 eventi tra 40 e 200 cm e 14 eventi tra 240 e 460 cm. Ci sono <b>5</b> eventi con I=11 e MD compresa tra 1100 e 2400 cm.
XII (totale: 3 eventi)	>1000 cm	1	Ci sono <b>2</b> eventi con I= 12 e MD compreso tra 300 e 400 cm
totale: 286		totale: 106	

Tabella 2 - Range di massimo rigetto della faglia cosismica corrispondenti a differenti gradi di intensità.

In figura 14 è riportata la correlazione tra intensità e lunghezza superficiale della faglia cosismica; il coefficiente di correlazione  $R^2$  arriva a 0,52, e c'è quindi un miglioramento rispetto alla correlazione fatta considerando la totalità dei dati (figura 12), dove  $R^2$  arriva a 0,23.

Anche per quanto riguarda il massimo rigetto (figura 15) il coefficiente di correlazione aumenta: da  $R^2 = 0,36$ , dopo la scrematura si arriva a  $R^2 = 0,44$ .

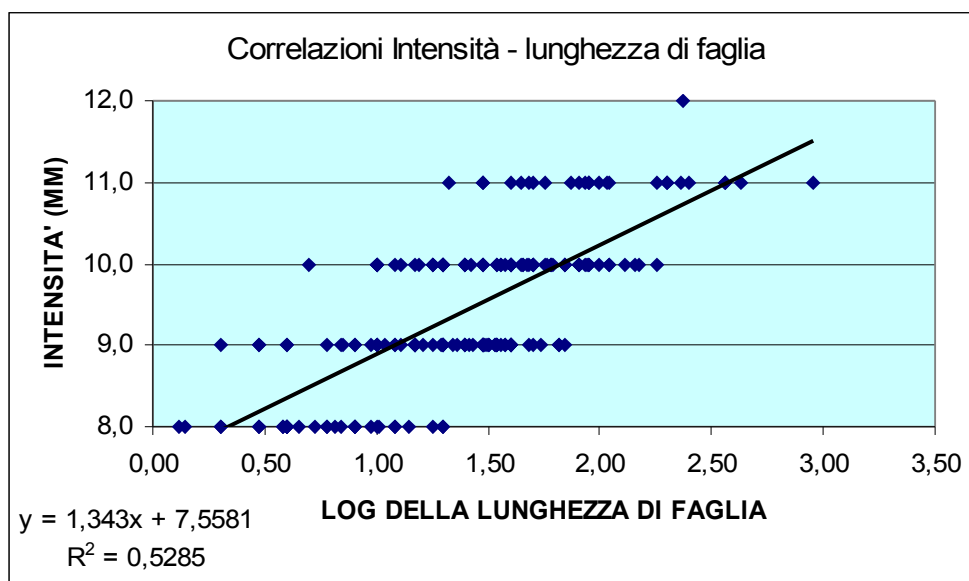


Figura 14 – Correlazioni tra intensità e lunghezza di faglia (in scala logaritmica) dopo la selezione di 206 eventi su 317 effettuata in base ai range INQUA aggiornati a marzo 2007.

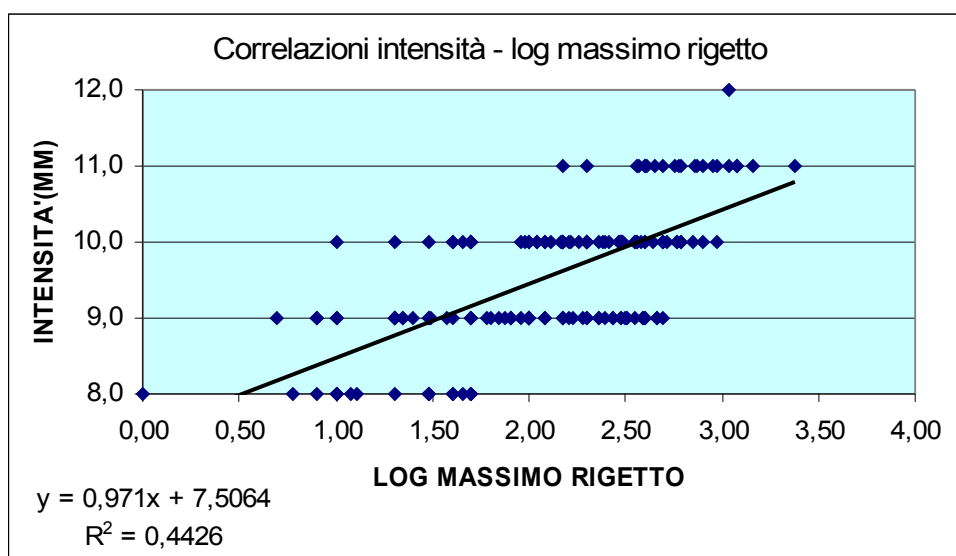


Figura 15 - Correlazioni tra intensità e massimo rigetto della faglia (in scala logaritmica) dopo la selezione di 206 eventi su 317 effettuata in base ai range INQUA aggiornati a marzo 2007.

Sono stati quindi raggruppati gli eventi secondo altri due parametri raccolti nel database: la **profondità ipocentrale** e il **meccanismo focale**. Lo scopo è quello di verificare se la correlazione Intensità – parametri di rottura migliora considerando terremoti appartenenti a stesse famiglie di profondità ipocentrali e meccanismo focale.

Correlazioni Intensità - massimo rigetto della faglia e profondità ipocentrale :

Le profondità dei terremoti raccolti variano da 3 a 70 Km; dei 206 eventi, sono stati considerati quelli di cui è nota la profondità ipocentrale (oltre ovviamente a quelli con il massimo rigetto), arrivando a 122 eventi. Si è scelto di considerare due famiglie di profondità: quella tra 0 e 29 Km e quella tra 30 e 70 Km. Per il gruppo di terremoti ricadente nell'intervallo di profondità da 3 a 29 Km il coefficiente  $R^2$  è 0,47 (figura 16), mentre per il gruppo appartenente all'intervallo 30-70 Km,  $R^2=0,5$  (figura 17).

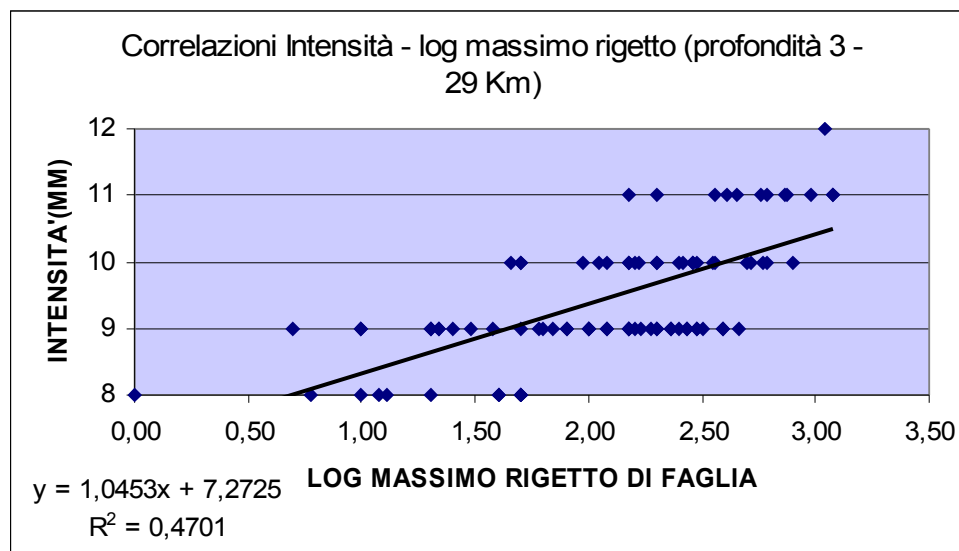


Figura 16 – Correlazioni tra intensità e massimo rigetto considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con profondità ipocentrali tra 3 e 29 Km (88 eventi).



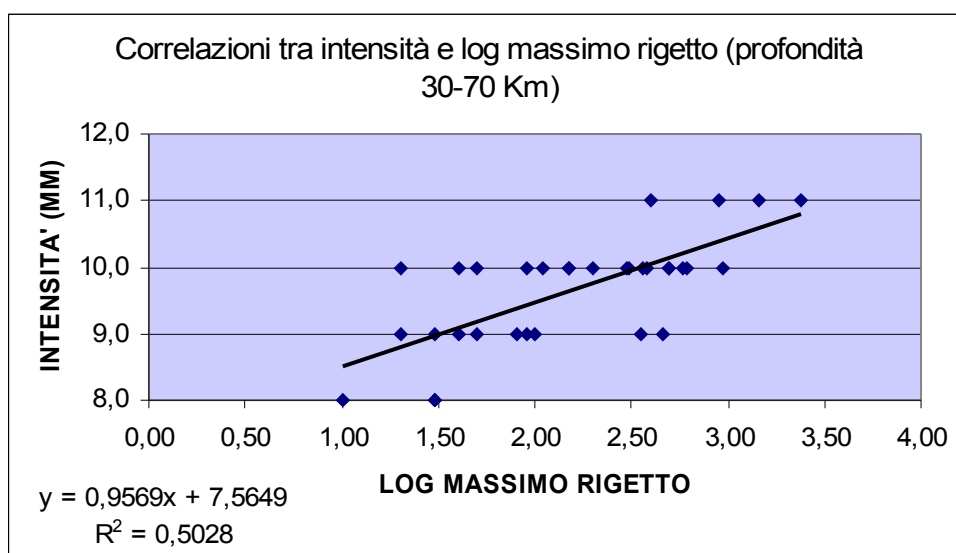


Figura 17 – Correlazioni tra intensità e massimo rigetto considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con profondità ipocentrali tra 30 e 70 Km (34 eventi).

Non sembrano quindi esserci grosse differenze nella correlazione tra intensità e massimo rigetto al variare della profondità; è necessario però specificare che gli eventi con profondità fino a 29 km sono 88, mentre gli eventi con profondità da 30 a 70 Km sono solo 34.

- Correlazioni Intensità – lunghezza di faglia e profondità :

Dai 206 eventi considerati dopo la selezione, quelli di cui è stato reperito sia il valore di lunghezza di faglia sia la profondità ipocentrale sono 146.

Di questi, 111 eventi hanno profondità comprese tra 3 e 29 Km, e 35 hanno profondità tra 30 e 70 Km. Anche in questo caso, come nel caso delle correlazioni intensità-massimo rigetto suddivise per profondità, non ci sono notevoli differenze: per i terremoti più superficiali (figura 18)  $R^2=0,47$ , mentre per quelli più profondi  $R^2= 0,52$  (figura 19).

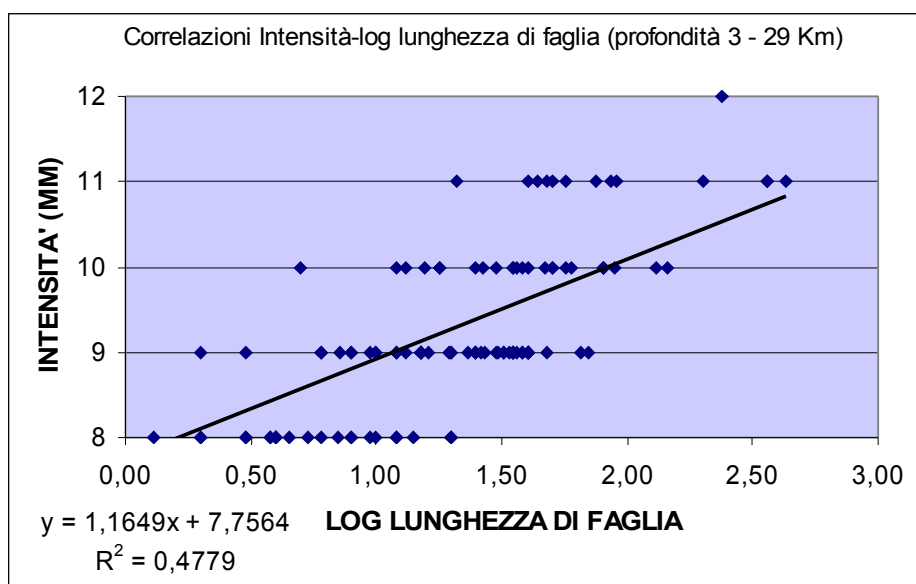


Figura 18 - Correlazioni tra intensità e lunghezza della faglia cosismica considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con profondità ipocentrali tra 3 e 29 Km (111 eventi).

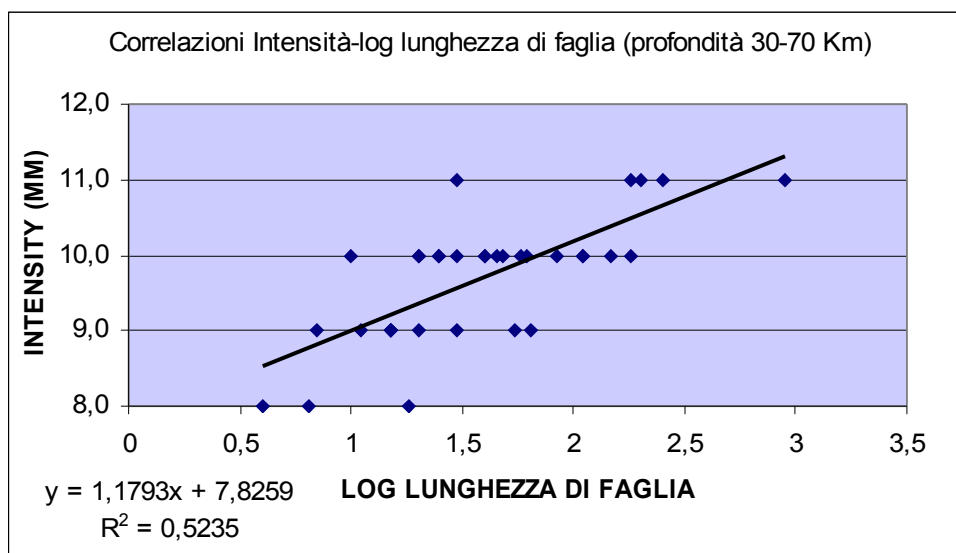


Figura 19 - Correlazioni tra intensità e massimo rigetto considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con profondità ipocentrali tra 30 e 70 Km (35 eventi).

- Correlazioni Intensità – massimo rigetto di faglia e meccanismo focale :

Nei grafici delle figure 20, 21 e 22 sono riportate le correlazioni tra intensità e massimo rigetto della faglia per gruppi di eventi suddivisi per tipo di meccanismo focale. Gli eventi selezionati sono stati distribuiti come segue: eventi con meccanismo focale Normal 46; eventi con meccanismo focale Reverse 18; eventi con meccanismi focali Strike Slip 96. Come si può notare dai grafici, il coefficiente di correlazione varia molto: per gli eventi a meccanismo focale Normal  $R^2=0,3$ , per meccanismo focale Reverse  $R^2=0,73$  e per gli eventi Strike Slip  $R^2=0,46$ .

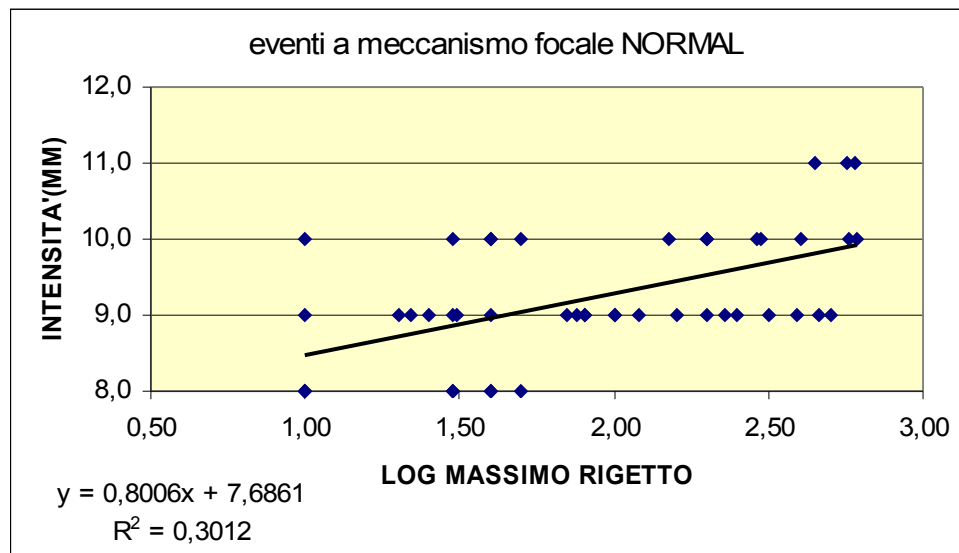


Figura 20 - Correlazioni tra intensità e massimo rigetto considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con meccanismo focale NORMAL (46 eventi).

Dai grafici si vede che per meccanismi focali Normal e Strike Slip i coefficienti  $R^2$  sono piuttosto bassi, mentre per meccanismo focale Reverse i risultati migliorano sensibilmente, arrivando a 0,73. Il numero di eventi a meccanismo Reverse è però molto esiguo, perciò essi sono meno rappresentativi.

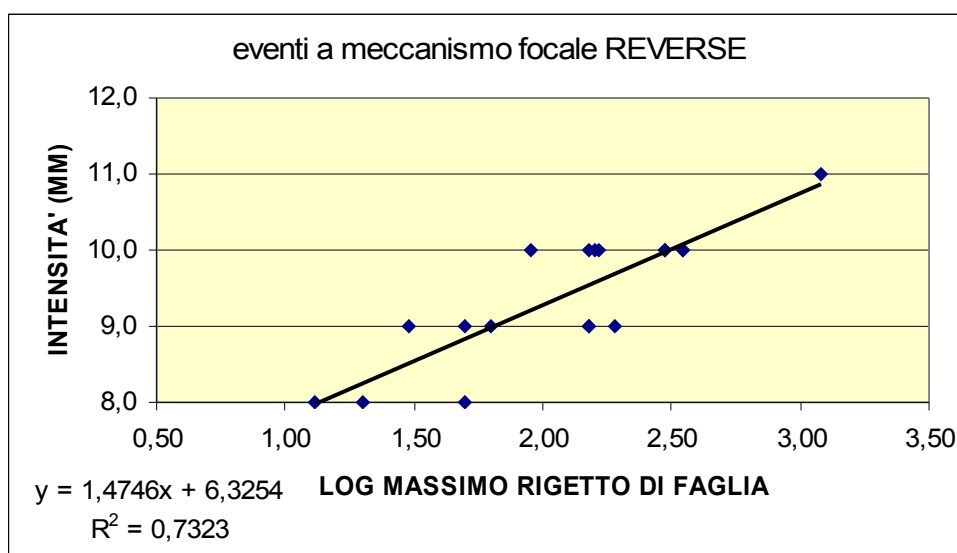


Figura 21 - Correlazioni tra intensità e massimo rigetto considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con meccanismo focale REVERSE (18 eventi).

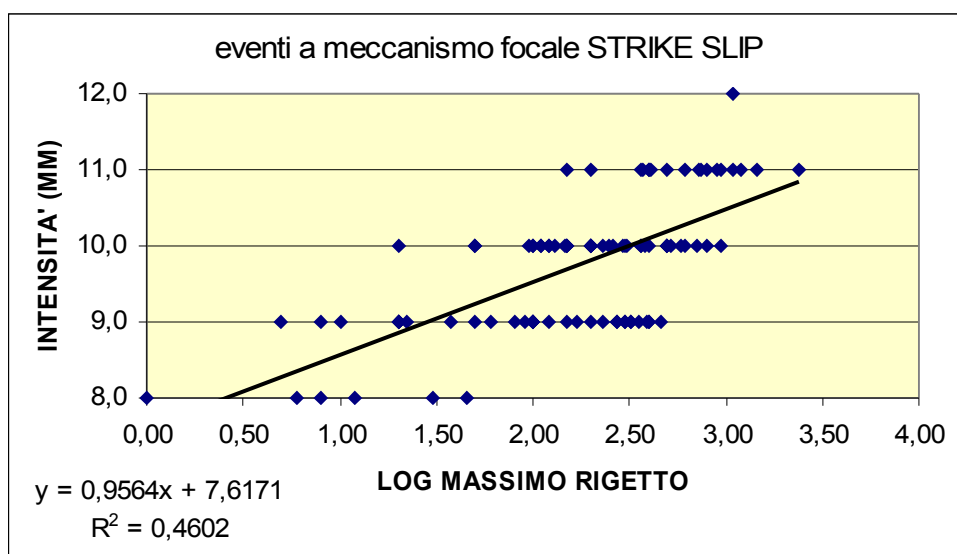


Figura 22 - Correlazioni tra intensità e massimo rigetto considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con meccanismo focale STRIKE SLIP (96 eventi).

- Correlazioni Intensità – lunghezza di faglia e meccanismo focale :

Per quanto riguarda le correlazioni intensità – lunghezza di faglia, dei 206 eventi selezionati inizialmente, quelli aventi il dato di lunghezza di faglia e di meccanismo focale sono 184; i coefficienti  $R^2$  per le famiglie di eventi diverse per meccanismo focale sono:

- eventi a meccanismo focale NORMAL:  $R^2 = 0,47$  (53 eventi)
- eventi a meccanismo focale REVERSE  $R^2 = 0,49$  (22 eventi)
- eventi a meccanismo focale STRIKE SLIP  $R^2 = 0,53$  (109 eventi)

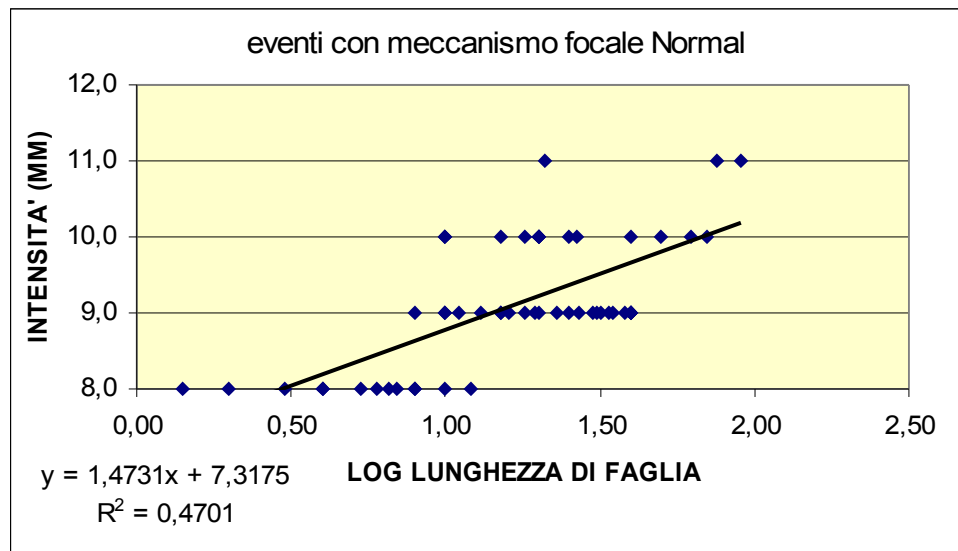


Figura 23 - Correlazioni tra intensità e lunghezza della faglia cosismica considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con meccanismo focale NORMAL (53 eventi).

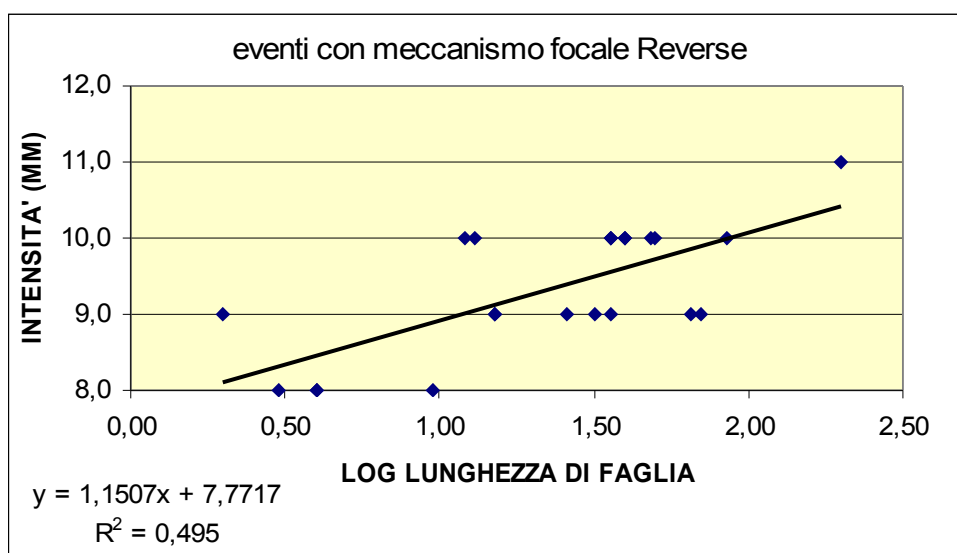


Figura 24 - Correlazioni tra intensità e lunghezza della faglia cosismica considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con meccanismo focale REVERSE (22 eventi).

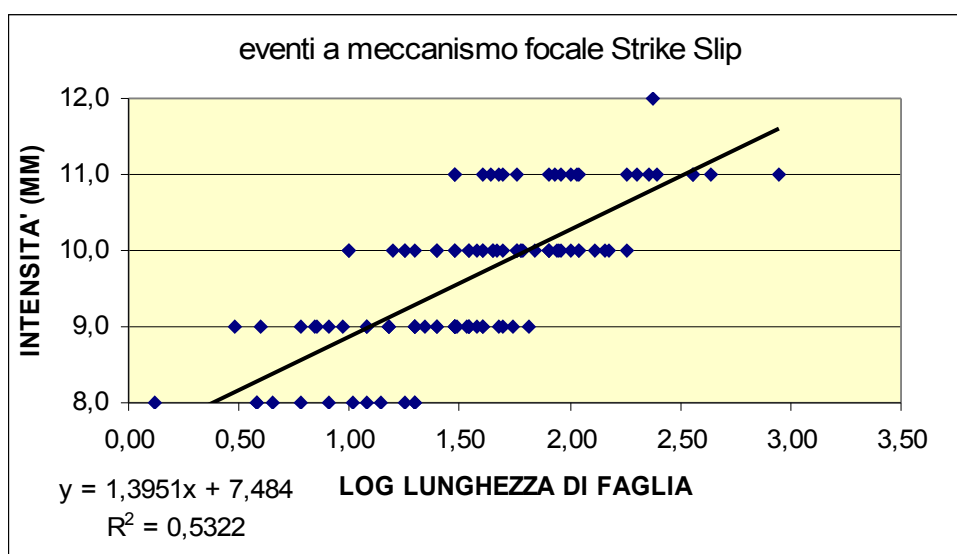


Figura 25 - Correlazioni tra intensità e lunghezza della faglia cosismica considerando solo gli eventi con parametri di rottura compatibili con i range INQUA e, tra questi, solo gli eventi con meccanismo focale STRIKE SLIP (109 eventi).

In conclusione, la suddivisione degli eventi fatta sulla base della profondità ipocentrale non ha mostrato grandi differenze nei coefficienti di correlazione: quindi, la relazione esistente tra intensità e parametri di rottura non sembra variare a seconda della profondità.

Per quanto riguarda i coefficienti di correlazione al variare del tipo di meccanismo focale, l'unica differenza marcata è emersa dal confronto dei coefficienti  $R^2$  delle relazioni Intensità-massimo rigetto:  $R^2$  varia notevolmente rispetto al coefficiente ottenuto considerando tutti gli eventi indistintamente, e in particolare diventa alto ( $R^2=0,7$ ) per gli eventi REVERSE e basso ( $R^2=0,3$ ) per gli eventi NORMAL.

Per quanto riguarda le correlazioni Intensità-lunghezza di faglia, l' $R^2$  non varia analogamente a quanto dimostrato da Wells & Coppersmith (1994) per la correlazione magnitudo-lunghezza di faglia: esse non variano al variare del meccanismo focale.

Il tentativo fatto di selezionare i terremoti del database prendendo in considerazione tutti gli eventi con intensità uguale oppure superiore o inferiore di un grado rispetto alla intensità attribuita secondo i criteri INQUA (per mezzo della lunghezza di rottura superficiale e del rigetto della faglia sismogenetica), ha portato ad ottenere dei coefficienti di correlazione tra intensità e parametri di rottura piuttosto bassi.

Il successivo tentativo è stato quello di effettuare le correlazioni escludendo dalla lista **tutti** gli eventi i cui parametri di rottura per l'Intensità assegnata siano differenti rispetto ai range previsti dal gruppo di lavoro INQUA.

In questo caso, come si può vedere nelle figure 26 e 27, eliminando gli eventi che hanno una lunghezza di faglia e un rigetto non compatibili con l'intensità loro assegnata (secondo quanto stabilito dalla commissione INQUA),  $R^2$  migliora, arrivando a 0,63 per la lunghezza di faglia e a 0,76 per quanto riguarda il rigetto.

E' però significativo il fatto che il numero degli eventi si riduca a 76: ciò significa che più dei tre quarti dei terremoti raccolti nel database riporta parametri di rottura superficiale non compatibili con le intensità assegnate.

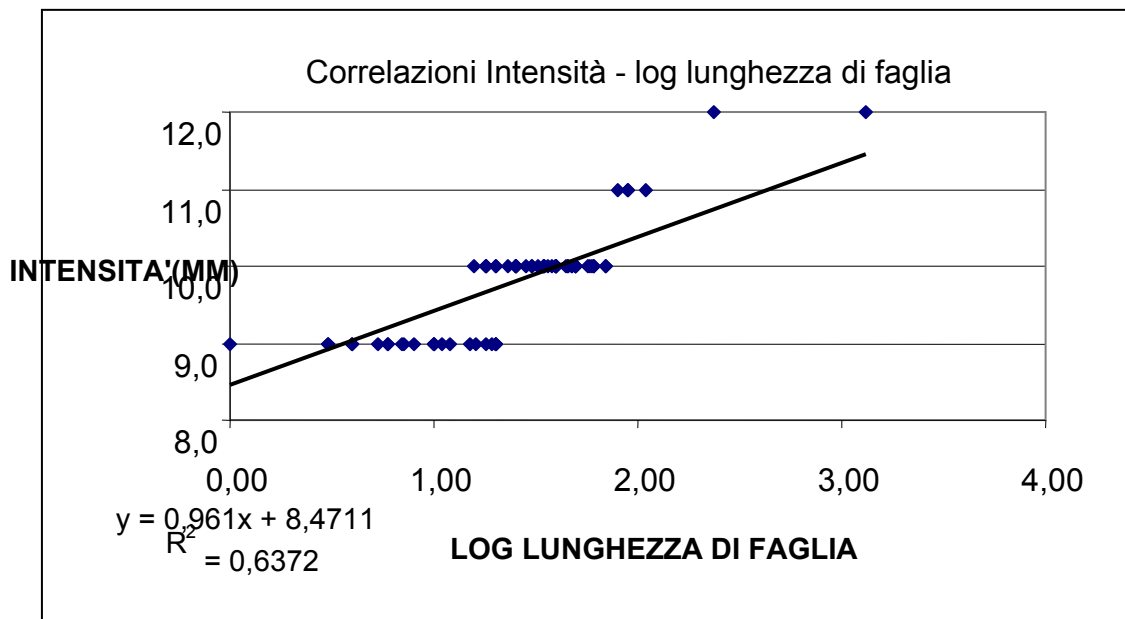


Fig 26: Correlazioni tra intensità e logaritmo in base 10 della lunghezza di faglia considerando solo i terremoti la cui intensità e parametri di rottura sono compatibili con i range stabiliti dal gruppo di lavoro INQUA.

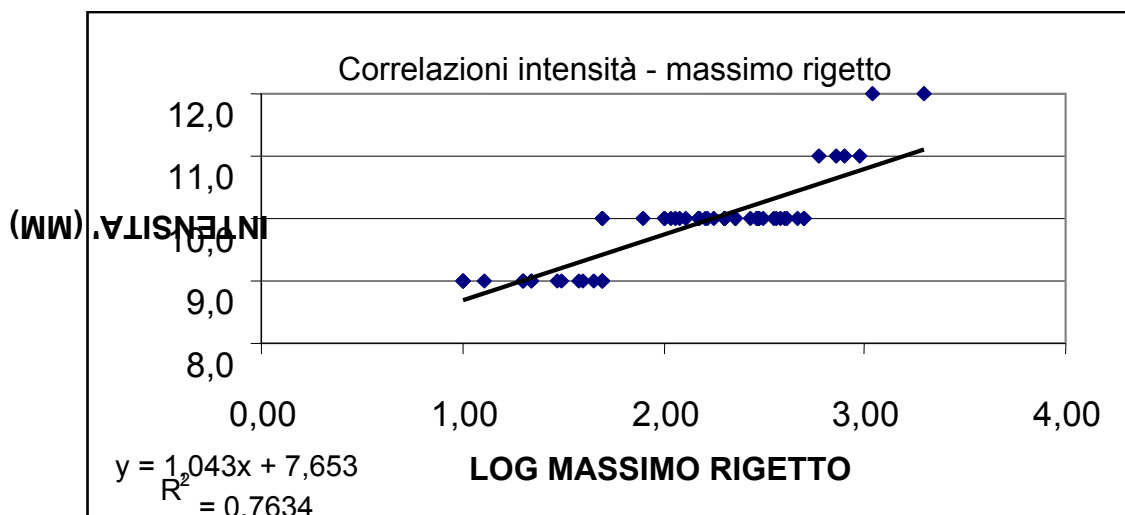


Fig 27: Correlazioni tra intensità e logaritmo in base 10 del massimo rigetto dopo l'eliminazione degli eventi con parametri di rottura non compatibili con l'intensità attribuita, sulla base della scala INQUA



## 6 - Correlazioni tra aree dei piani quotati e I

Si è cercato di verificare l'esistenza di una correlazione diretta tra l'intensità del terremoto e l'area dei piani quotati delle relative mappe di intensità: a questo scopo sono state raccolte circa 100 mappe di intensità macrosismica; per i terremoti italiani la maggior parte delle mappe è stata presa da Postpischl (1985). Per quanto riguarda i terremoti americani, molte mappe sono state prese dal lavoro di Stover & Coffman del 1993; altre mappe sono state raccolte da altre pubblicazioni o da siti internet.

E' stato fatto un primo tentativo correlando le intensità dei terremoti con l'area compresa all'interno della isosisma  $I_{max-2}$ ; il coefficiente di correlazione ottenuto è risultato però molto basso.

Per esempio consideriamo il terremoto di Assam (India) del 1897, al quale fu associata una rottura superficiale di 110 Km e un massimo rigetto di 15 m . Oldham (1899) attribuì a questo evento una intensità di grado X sulla scala Rossi-Forel , che nella scala MM copre un intervallo dal X al XII grado; secondo Ambraseys & Bilham (2003) l'intensità massima raggiunta localmente arriva al grado XII MM. Pertanto, l'area del piano quotato  $I_{max-2} = X$ , che risulta essere un'area relativamente piccola ( $1.021 \text{ Km}^2$ ), molto minore di quella associata alla  $I_{max-2}$  di eventi sicuramente meno forti come per esempio quello di Hansel Valley, USA, 1934:  $I_{max} = 8$ , lunghezza di faglia = 8 Km, rigetto = 0,25 m, area compresa nell'isosisma 6 =  $2.4291 \text{ Km}^2$ .

A questo punto si è cercato di elaborare un altro tipo di correlazione: Intensità massima- area compresa nell'isosisma di grado V; infatti, l'idea è che terremoti di maggiore energia dovrebbero far sentire il loro effetto su un'area più vasta, e tendenzialmente presentare piani quotati realmente più grandi dei corrispettivi piani quotati di terremoti di minore energia.

Il calcolo dell'area compresa all'interno delle isosisme ha necessariamente comportato un processo di approssimazione, per vari motivi: a volte l' approssimazione delle fonti originarie si riflette sul disegno delle mappe di intensità, poco precise. Inoltre le mappe raccolte non hanno tutte la

medesima scala, quindi per mappe con scala molto piccola il grado di approssimazione è maggiore rispetto a mappe a grande scala.

Un ulteriore problema deriva dal fatto che molte linee di intensità si interrompono sulla linea di costa, non avendo senso proseguirle in mare aperto; in questi casi si è cercato di proseguire le linee anche in mare, includendo così nel calcolo anche le zone al di fuori della costa, ma tale operazione comporta ovviamente un certo grado di approssimazione nel processo di estrapolazione delle aree: per paesi come Giappone, Stati Uniti o Nuova Zelanda, il ricorso a questo metodo è stato frequente, vista la loro conformazione geografica, determinando necessariamente delle imprecisioni nella stima delle aree interessate da effetti di intensità 5 (Fig 28A-B).

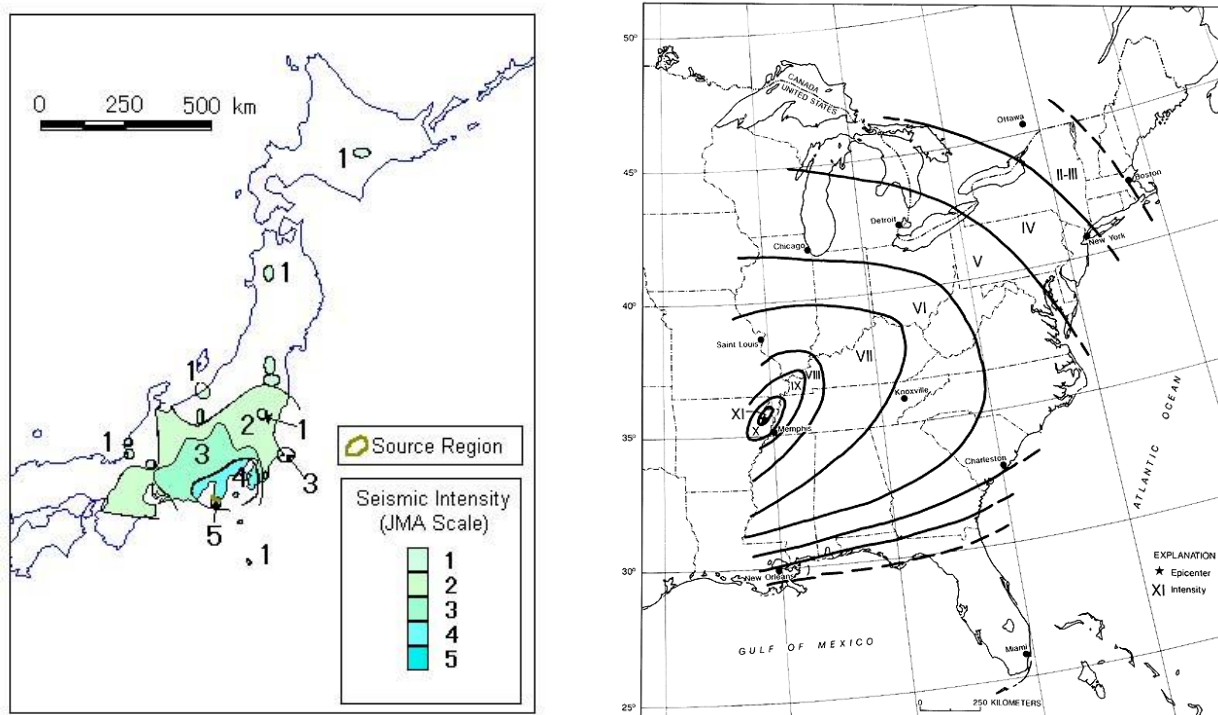


Figura 28- Esempi di mappe di intensità macrosismica con isosisme interrotte dalla linea di costa o da confini di stato: A- Mappa delle isosisme relative al terremoto giapponese del 9/5/1974; come è logico, le isosisme vengono tracciate solo sulla terraferma. B- Isosisme relative al terremoto di New Madrid (USA) del 1811; in questo caso le isosisme sono state interrotte lungo i confini degli stati occidentali, riducendo della metà la reale estensione dei piani quotati. In entrambi i casi è stato necessario estrapolare parte delle isosisme per il calcolo delle aree del piano quotato di grado V.

C'è dunque un certo grado di approssimazione per quanto riguarda le correlazioni Intensità-aree.

La correlazione AREE-INTENSITA' calcolata considerando l'intero elenco di eventi sismici dei quali è stata reperita la mappa comprensiva della V isosisma (70 eventi) mostra uno scarso coefficiente di correlazione (0,12, figura 29). Se si considera il logaritmo dell'area si ha  $R^2=0,22$ . Questo basso coefficiente di correlazione non sorprende, in quanto le aree dei piani quotati che sono state calcolate abbiano una elevata variabilità (da 1315 a 2955697 Km<sup>2</sup>), e quindi la distribuzione dei punti nel grafico ha un andamento non lineare.

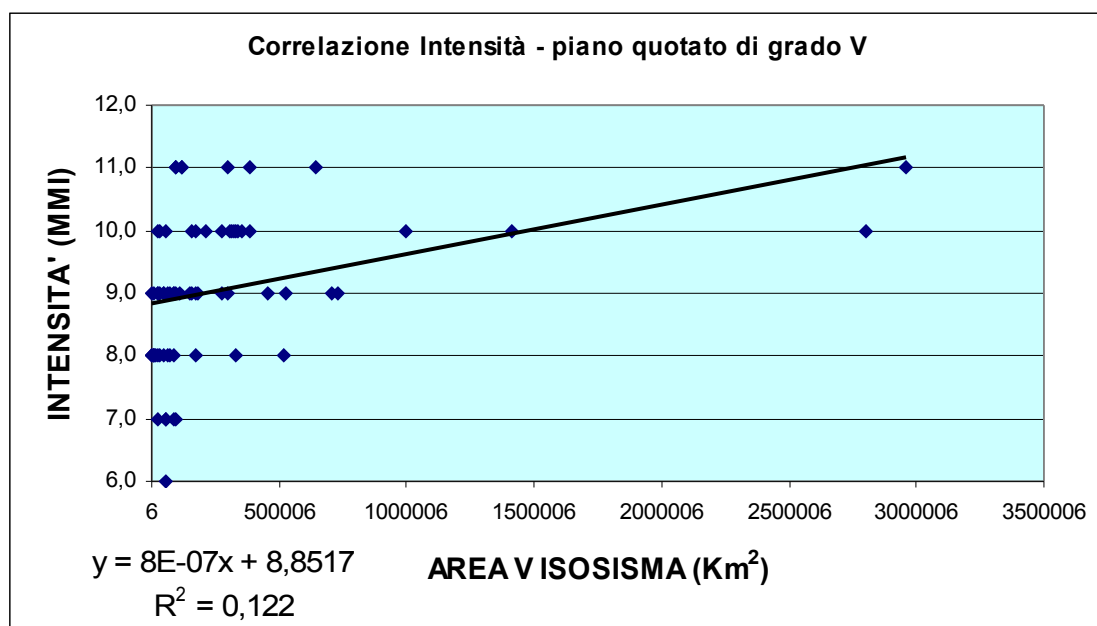


Fig. 29: Correlazione Intensità massime - area compresa nell'isosisma di V grado, considerando 70 eventi, dei quali è stata raccolta la mappa di intensità macrosismica.

Una correlazione di poco migliore si ottiene utilizzando una scala logaritmica per le aree, come mostrato in figura 30: il coefficiente di correlazione è in questo caso pari a 0,22.

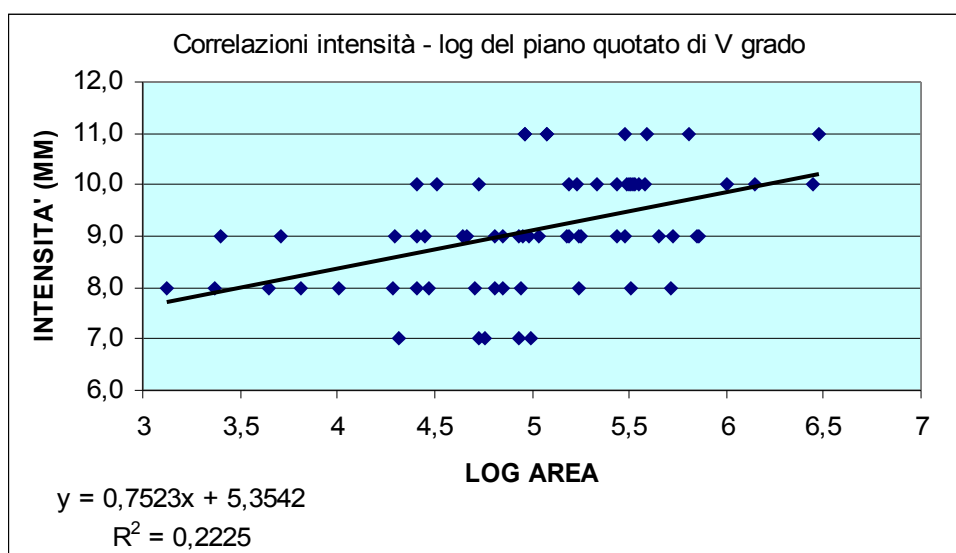


Fig. 30: correlazioni intensità massima -logaritmo in base 10 dell'area contenuta nella isosisma di V grado, considerando 70 eventi dei quali è stata reperita la mappa di intensità macrosismica

Considerando tra i 70 eventi solo quelli con intensità uguale a  $\pm 1$  grado rispetto alla intensità INQUA (stabilita sulla base dei valori di fagliazione superficiale, la correlazione è quella riportata in figura 31: il coefficiente  $R^2 = 0,38$ , migliora lievemente.

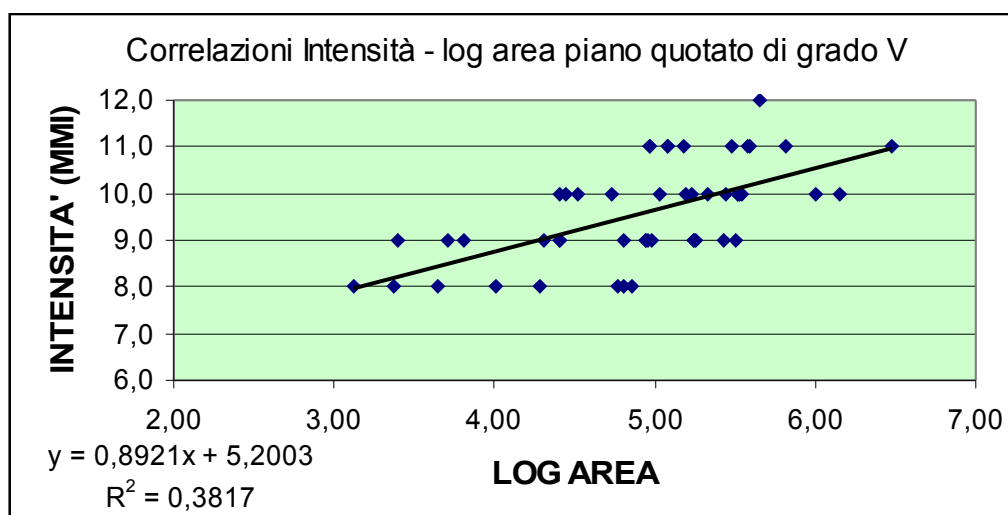


Figura 31 – Correlazioni tra Intensità massime e aree del piano quotato di grado V considerando gli eventi con intensità pari a  $\pm$  un grado rispetto alla intensità attribuita sulla base dei valori di fagliazione superficiale.

Successivamente sono stati selezionati solo quegli eventi con intensità uguali a quelle stabilite in base ai range di lunghezza di faglia e rigetto assegnata loro in base a quanto previsto nella scala INQUA.

Il coefficiente  $R^2$  arriva a 0,49 (Fig. 32); c'è però da dire che il numero di eventi è in questo modo ridotto a 19. Inoltre il valore di  $R^2$  non è del tutto soddisfacente.

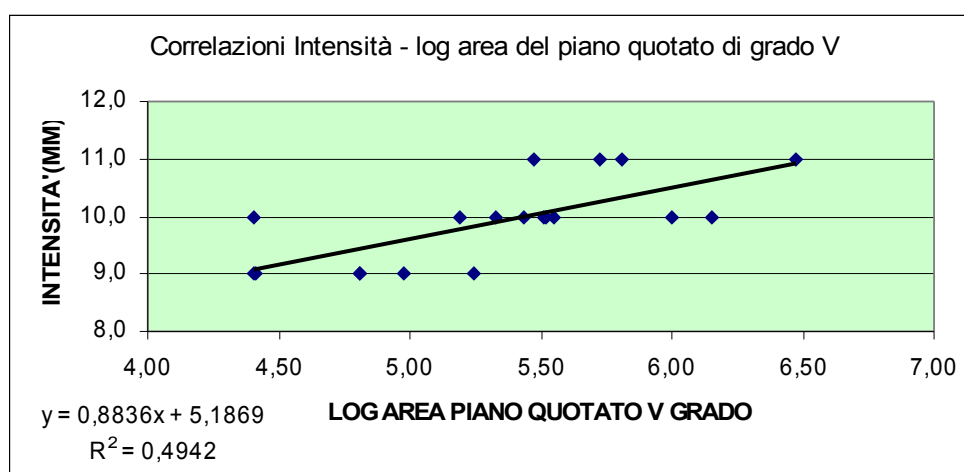


Fig. 32: correlazione Intensità - log area considerando solo gli eventi con intensità compatibili con la lunghezza di faglia e massimo rigetto secondo quanto previsto nell' INQUA scale

## 7 - Correlazioni multiple

Dopo aver correlato l'intensità ai singoli parametri di rottura, (lunghezza di faglia in superficie, massimo rigetto, area del piano quotato di V grado), sono state fatte alcune correlazioni multiple correlando tutti i parametri contemporaneamente. Per questa operazione, è stata fissata l' intensità come variabile dipendente e come variabili indipendenti i parametri lunghezza di faglia, massimo rigetto e area del piano quotato di V grado; le correlazioni multiple sono state fatte col foglio di lavoro excel "Sagata Regression".

Inizialmente sono stati presi in considerazione tutti gli eventi del database, ma la correlazione è risultata bassissima come del resto era prevedibile, dato che già le correlazioni singole non avevano mostrato grandi risultati.

Quindi, nel foglio excel sono stati inseriti solo gli eventi con intensità uguale o pari a +/- un grado rispetto all'intensità INQUA (206 eventi). L'equazione di variabilità dell'intensità al variare delle variabili indipendenti è la seguente:

$$\text{INTENSITY (MM)} = 7,92 + 1,25 \cdot \log \text{SRL} - 0,08 \cdot \log \text{MAX DISPL}$$

$$(R^2 = 0,487)$$

SRL= Lunghezza della faglia in superficie

MD= Massimo rigetto della faglia

Successivamente, è stata fatta una correlazione inserendo solo i 76 eventi derivanti dal processo di selezione secondo i range INQUA, cioè scegliendo solo gli eventi che avessero una lunghezza di faglia e un rigetto compatibile con l'intensità, secondo i criteri INQUA.

L'equazione di correlazione multipla è la seguente:

$$\text{INTENSITY (MM)} = 7,80 + 1,08 \cdot \log \text{SRL} + 0,23 \cdot \log \text{MAX DISPL}$$

$$(R^2 = 0,676)$$

Dunque, in questo caso il coefficiente di correlazione mostra che c'è una discreta dipendenza della variabile dipendente (I) dai parametri di rottura.

L'ultimo passo è stato quello di considerare nelle correlazioni anche la variabile indipendente aree del piano quotato di grado V. In questo caso si ha:

$$\text{INTENSITY (MM)} = 5,85 + 1,00 \cdot \log \text{SRL} + 0,03 \cdot \log \text{MAX DISPL} + 0,42 \log \text{AREA}$$

$$(R^2 = 0,651)$$

## 8- CONCLUSIONI

Il lavoro presentato in questa tesi è inserito nel progetto INQUA finalizzato alla compilazione di una nuova scala di intensità macrosismica; la novità di questa scala consiste nell'associare principalmente i parametri di rottura superficiale (effetti "primari") di un terremoto alla sua intensità. La valutazione della intensità stessa viene così svincolata dagli effetti sui manufatti e sulle persone, che, come abbiamo visto, nei casi di terremoti che avvengono in aree poco antropizzate porta ad una stima erronea della reale energia del terremoto.

Il database 'Surfin' è stato compilato allo scopo di raccogliere informazioni sui terremoti relative anche (e soprattutto) ai parametri di rottura superficiale; in particolare, le informazioni riguardanti rottura cosismica e intensità permettono di correlare queste due grandezze. Le correlazioni sono state quindi utilizzate per testare i criteri di costruzione della scala INQUA. Ad ognuno dei 12 gradi di intensità della nuova scala corrisponde un range di lunghezza del segmento di faglia cosismico e un range di rigetto massimo della faglia stessa.

Database già presenti in letteratura sono stati aggiornati, completati e cospicuamente integrati, per arrivare alla compilazione di SURFIN, con 340 eventi.

Nella fase successiva del lavoro, sono state messe in correlazione le seguenti coppie di grandezze:

- Intensità – lunghezza di faglia;

- Intensità –massimo rigetto;
- Intensità – area del piano quotato di V grado;

I dati, raccolti in un foglio di lavoro Excel, sono stati plottati su grafici; massimo rigetto, lunghezza di faglia e area del piano quotato sono stati posti in scala logaritmica; ulteriori correlazioni sono state effettuate suddividendo gli eventi in base a profondità ipocentrale e meccanismo focale. I coefficienti di correlazione ottenuti considerando semplicemente gli eventi facenti parte del database sono molto bassi:

- Intensità – lunghezza di faglia:  $R^2 = 0,23$
- Intensità – massimo rigetto:  $R^2 = 0,36$
- Intensità – area del piano quotato di grado V:  $R^2 = 0,22$

Dunque, all'interno dei dati raccolti, al crescere dell'intensità di un terremoto, non crescono anche i parametri di rottura. Questi risultati sono in contraddizione con la relazione diretta esistente tra magnitudo-intensità e parametri di rottura così come descritta da Gutenberg & Richter (1958), Ambraseys & Jackson (1997) e Boschi et al.(1999).

Tra tutti i terremoti selezionati si può notare che esistono molti casi in cui a eventi con magnitudo, parametri di rottura, profondità confrontabili, sono state associate intensità molto diverse. Probabilmente molte delle intensità presenti nel database non sono intensità ipocentrali ma sono intensità attribuibili sull'asse dei danni presenti nei centri abitati più vicini all'epicentro, che però possono distare dallo stesso anche centinaia di Km (Cina, Mongolia, etc).

Questo rende necessario selezionare solo eventi la cui intensità assegnata sia proporzionale ai parametri di rottura superficiale; tale selezione è stata fatta sulla base di range di rottura superficiale stabiliti sulla base dell'esperienza sul campo acquisita in riferimento a terremoti ben studiati. Sono stati selezionati gli eventi con intensità pari a + o - 1 grado rispetto all'intensità INQUA, corrispondenti a 206. Le correlazioni sono state ripetute utilizzando entrambi i gruppi di terremoti.



Considerando i 206 eventi si ha:

- Intensità – lunghezza di faglia:  $R^2 = 0,52$
- Intensità – massimo rigetto:  $R^2 = 0,44$
- Intensità – area del piano quotato di grado V:  $R^2 = 0,38$

Selezionando ulteriormente gli eventi con intensità coincidente all'intensità INQUA, il database si riduce a 74 eventi. In questo caso si ottiene:

- Intensità – lunghezza di faglia:  $R^2 = 0,63$
- Intensità – massimo rigetto:  $R^2 = 0,76$
- Intensità – area del piano quotato di grado V:  $R^2 = 0,49$

Dunque, per trovare una correlazione valida tra Intensità e parametri di rottura superficiale è necessario eseguire una notevole selezione dei terremoti raccolti nel database.

Il motivo per cui in alcuni casi si hanno bassi coefficienti di correlazione è che le intensità macrosismiche spesso non sono attribuite correttamente, per i vari motivi elencati nell'introduzione: sottostima in aree desertiche, sovrastima in aree con costruzioni scadenti etc. Per questi motivi sono stati selezionati nell'elenco gli eventi compatibili con l'INQUA Scale, prima di ripetere le correlazioni. Il gran numero di eventi che si deve scartare porta a fare una considerazione: è probabile che durante un terremoto generato da una faglia capace (in grado di rompere la superficie) la stima della intensità venga fatta in un'area non coincidente con questa; se per esempio il terremoto viene risentito in una città che non sia ubicata esattamente nella zona epicentrale, l'intensità calcolata potrebbe essere più bassa di quella che si avrebbe nel caso in cui la città si trovasse esattamente sulla zona di faglia. In tal modo, mentre nella zona epicentrale possiamo avere una faglia di lunghezza e rigetto notevoli, è possibile che nell'area urbanizzata venga stimata una

intensità non proporzionale alla grandezza della faglia, in quanto stabilita sulla base degli effetti che si sono avuti a chilometri di distanza dalla stessa.

Si ritiene che per un gran numero di terremoti riportati nel database il calcolo dell'intensità sia stato effettuato con questo criterio, e pertanto non è possibile arrivare ad un buon grado di correlazione con i parametri di rottura.

Sarebbe dunque opportuno valutare caso per caso i terremoti raccolti nel database e valutare se le intensità attribuite loro sono epicentrali o meno in quanto solo queste sono idonee ad essere utilizzate per le correlazioni con le intensità. A valle di tale selezione ci si aspetta di poter determinare una valida legge di correlazione tra parametri di rottura e intensità.

## BIBLIOGRAFIA

Ambraseys N.N. and Jackson J.A, 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern mediterranean region, *Geophys. Jour. Int.*, 133, pp 390-406

Ambraseys N.N. & Bilham R., 2003, MSK Iseismic intensities evaluated for the 1897 Great Assam Earthquake, *Bull. Seism Soc. Am.* 93, (2) 655-673.

Banerjee P., Pollitz F., Nagarajan P., Burgmann R., 2007, Coseismic slip distributions of the 26 december 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Nias earthquake from GPS static offsets, *Bull. Seism. Soc. of America*, Vol 97, N. 1A, pp S86-S102, 2007.

Bilham R., Engdhal E. R., Feldl N., Satyabala S. P., Partial and complete rupture of the Indo-Andamane plate boundary 1847-2004, *Seism. Res. Lett.*, 2005

Boschi E., Gasperini P., Valensise G., 1999, *Catalogo parametrico dei terremoti italiani*, ING,

Esposito E., Porfido S., Mastrolorenzo G., Nikonov A. A., Serva L., 1997, Brief review and preliminary proposal for the use of ground effects in the macroseismic intensity assessment, *Proc.*, 30<sup>th</sup> International Geological Congress, Beijing, China, Vol 5, "Contemporary lithospheric motion and seismic geology", VSP ed., the Netherlands, pp. 233-243.

Johnston A.C., 1996, Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions. II historical seismicity, *Geoph. J. Int.*, 125 pp 639-678

Martin S. S., 2005, Intensity distribution from the 2004, M= 9.0 Sumatra-Andaman earthquake, *Seismological Research Letters*, 76, pp 321-330, 2005

Oldham R.D., 1899, Report on the great earthquake of 12<sup>th</sup> june 1897. *Memoirs of the geological survey of India*, Vol XXIX, pp 379

Panza, 2006, The Abdus Salam Centre for Theoretical Physics, atti del convegno “The conduct of seismic hazard analyses for critical facilities”, Trieste, 19 may 2006.

Pavlides S. & Caputo R. 2004, Magnitude versus faults' surface parameters: quantitative relationships from Aegean Region. *Tectonophysics* 380, 159-188.

Reiter L., 1990, *Earthquake hazard analyssis: Issues and Insights*, Columbia University press, c 1990- X, 254 p.

Serva L., 1994, Ground effects in the intensity scales, *Terra Nova*, 6, pp 414-416.

Stirling M, Rhoades D., Berryman K., 2002 , Comparison of earthquake scaling relations derived from data of instrumental and preinstrumental era, *Bull. Seism. Soc. of America*, Vol. 92, N.2, pp 812-830, marzo 2002

Wells D. L. & Coppersmith K. J., 1994, New empirical relashionships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, n 4, pp 974-1002.

Yeats S.A., Yeats R.S., Sieh K.E. & Allen C.R., 1997, *The Geology of Earthquakes*, Oxford University Press US