

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

Scuola di Scienze

Corso di Laurea Magistrale in Fisica

Applicazione e confronto di modelli per  
lo studio della vulnerabilità da maremoto  
nel golfo di Siracusa, Italia.

Relatore:

Prof. Stefano Tinti

Presentata da:

Francesco Rallo

Correlatore:

Dott. Gianluca Pagnoni

Sessione III

Anno Accademico 2012/2013



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	5
<b>Obiettivo del lavoro</b> .....	6
<b>Capitolo 1: Funzioni di fragilità e di danno</b> .....	9
1.1 Il lavoro di Koshiumura.....	10
1.1.1 Le funzioni di fragilità nel lavoro di Koshimura .....	10
1.2 Il lavoro di Valencia .....	17
<b>Capitolo 2: Il progetto SCHEMA</b> .....	23
2.1 Analisi di vulnerabilità e di danno - SCHEMA.....	24
<b>Capitolo 3: Il modello PTVA</b> .....	29
3.1 Analisi di vulnerabilità - PTVA.....	29
3.1.1 Sviluppo del modello .....	30
3.2 Analisi di vulnerabilità - PTVA.....	34
3.2.1 Sviluppo del modello .....	34
3.3 Analisi di vulnerabilità - PTVA.....	36
3.3.1 Sviluppo del modello .....	36
<b>Capitolo 4: Applicazione e confronto di modelli per lo studio della vulnerabilità da maremoto nel golfo di Siracusa, Italia</b> .....	41
4.1 I maremoti che hanno colpito la città di Siracusa.....	42
4.2 Obiettivo del lavoro .....	47

4.3 Strumenti utilizzati e field survey a Siracusa .....	48
4.3.1 Carte Tematiche Numeriche - CTN.....	48
4.3.2 Individuazione delle strutture nella zona sud del golfo di Siracusa .....	54
4.4 Analisi di vulnerabilità .....	57
<b>Capitolo 5: Analisi del danno e field survey a Siracusa .....</b>	<b>69</b>
5.1 Valutazione del danno delle strutture selezionate .....	69
5.1.1 Metodo SCHEMA .....	69
5.1.2 Metodo PTVA-3 .....	73
5.2 Field survey a Siracusa .....	76
<b>Conclusioni.....</b>	<b>87</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>91</b>

## Introduzione

Fenomeni naturali assai pericolosi come terremoti, eruzioni vulcaniche, maremoti, ondate di calore, incendi boschivi ed alluvioni, si verificano continuamente sulla Terra, con intensità e frequenza variabile. Molti di essi risultano essere eventi distruttivi, e nonostante i progressi in campo scientifico, non si riescono ancora a prevedere in modo soddisfacente.

Poiché è impossibile impedire che accadano e la previsione non sempre è possibile, l'obiettivo principale è limitarne il più possibile il potenziale distruttivo; e quindi un ruolo molto importante è svolto dalla prevenzione.

In modo formale si può introdurre il concetto di rischio ambientale. Per rischio ambientale, secondo la definizione proposta dall'UNDRO (United Nations Disasters Relief Organization) si intende la possibile perdita di valore di uno o più elementi (popolazione, manufatti, attività sociali o economiche) esposti al pericolo degli effetti prodotti da un particolare fenomeno naturale.

La sua formulazione matematica è generalmente indicata come il prodotto di quattro quantità:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} \cdot \text{Vulnerabilità} \cdot \text{Esposizione} \cdot \text{Valore}$$

- *Pericolosità*: probabilità che un evento naturale di intensità data colpisca un sito entro un dato periodo di tempo. È determinata dall'attività naturale della Terra.
- *Vulnerabilità*: è la misura della propensione di un elemento a subire danni, (per un edificio, valutata generalmente sulla base delle caratteristiche costruttive; per una persona, valutata sulla base delle sue capacità di reazione dipendente dall'età, cultura, salute, ecc...)
- *Esposizione*: comprende diversi fattori, tra cui soprattutto la posizione dell'elemento rispetto al cammino di propagazione del fenomeno pericoloso.

- *Valore*: valore economico dell'elemento che per una persona potrebbe essere quantificato secondo i criteri utilizzati dall'industria delle assicurazioni.

Dalle definizioni si deduce che la pericolosità non può essere modificata, mentre la vulnerabilità e l'esposizione possono essere ridotte. Ed è quindi possibile comprendere che la prevenzione si basa soprattutto sulle nostra capacità di modificare queste ultime due quantità.

Ad oggi, con il ritmo incalzante della crescita demografica, risulta difficile pensare ad aree geografiche che siano del tutto esenti da eventi disastrosi. Convivere con il rischio di un terremoto, che è imprevedibile, è però possibile se si seguono norme e protocolli di sicurezza ben definiti; allo stesso modo si può monitorare la prevedibile ripresa di un'attività vulcanica, si può di molto ridurre il rischio di essere travolti da una frana o di morire affogati in un'alluvione, oppure gestire al meglio le conseguenze di uno tsunami. In altre parole, è importante non tanto proporsi di annullare il rischio di un determinato evento pericoloso, ma di attutirne il più possibile le conseguenze, accettando di convivere con il suo manifestarsi.

## **Obiettivo del lavoro**

Come esposto in precedenza la gestione del rischio si pone l'obiettivo di mitigare le conseguenze di un evento catastrofico. L'analisi della vulnerabilità è l'attuazione della fase preliminare della gestione del rischio e deve tener conto dell'impatto di un fenomeno naturale sia sugli elementi fisici che sul tessuto socio-economico di una comunità (aspetti sociali, economici, culturali, e ambientali).

Il primo tipo di impatto è generalmente analizzato mediante modelli quantitativi che forniscono sia valori che, anche se non sempre, le relative incertezze. Invece gli aspetti socio-economici-ambientali sono spesso analizzati solo mediante un approccio qualitativo.

Il lavoro svolto in questa tesi s'inserisce e sviluppa soprattutto nel campo dell'analisi della vulnerabilità relativa agli tsunami ed è centrato sull'analisi della vulnerabilità di strutture ed edifici. Per la precisione ho focalizzato l'attenzione su un'area geografica specifica, cioè ho considerato l'ipotesi che un maremoto colpisca le coste orientali della Sicilia ed in particolare della città di Siracusa.

Questo lavoro di tesi prenderà in considerazione due modelli distinti per la stima della vulnerabilità: il modello SCHEMA (SCenarios for Hazard-induced Emergencies MAnagement) che prende il nome dal progetto europeo in cui è stato sviluppato e il modello PTVA (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment) introdotto da Papathoma et al. (2003) e successivamente modificato da Dominey-Howes et al. (2007) e da Dall'Osso et al. (2009).

Tali modelli sono esempi dei due possibili approcci (quantitativo e qualitativo). Altri modelli simili sono stati sviluppati e/o migliorati dopo lo tsunami del 26 dicembre 2004 verificatosi nell'Oceano Indiano. Tutti i metodi sono stati inizialmente introdotti analizzare un sito determinato, ma il loro utilizzo può essere adattato a qualsiasi altro sito mediante le variazioni opportune. Per esempio il PTVA, versione 3, nasce per l'analisi delle coste australiane ma è stato anche utilizzato per l'analisi della vulnerabilità nelle isole Eolie.

Nei seguenti capitoli tratterò le curve di fragilità e di danno, in particolare seguendo la metodologia di Koshimura et al. (2009) ed il lavoro di Valencia et al. (2011). A seguire saranno descritti i due metodi utilizzati per lo studio della vulnerabilità (SCHEMA, PTVA) ed il lavoro che ho condotto nell'area di Siracusa. Il lavoro di tesi si concluderà mostrando i risultati della classificazione di vulnerabilità evidenziando e discutendo differenze e similarità delle mappe risultanti dai due metodi applicati.





## Capitolo 1: Funzioni di fragilità e di danno

Il concetto di “funzioni (o curve) di fragilità” e “funzioni di danno” è stato introdotto in un’ottica di stima quantitativa dell’impatto di un evento catastrofico e nell’analisi di vulnerabilità sviluppata nel progetto SCHEMA è stata applicata agli edifici attaccati da un maremoto.

Iniziamo col dare una definizione di entrambe le funzioni, che all’apparenza possono sembrare uguali, ma che in realtà risultano leggermente diverse.

Anche se gli effetti di un flusso di inondazione su edifici e strutture dipendono da numerosi parametri idrodinamici, come mostrano esperimenti di laboratorio specifici, si fa l’ipotesi semplificatrice che il fattore principale sia l’altezza del flusso, misurata dalla base della struttura. Sotto tale approssimazione, la *funzione di fragilità* è la probabilità cumulativa di avere, per ogni colonna d’acqua, un livello di danno uguale o maggiore di una data soglia, mentre la *funzione di danno* mostra il livello di danno previsto.

Nel seguito consideriamo due applicazioni una dovuta a Koshimura et al. (2009) ed una a Valencia et al., (2011). Nel primo lavoro che si riferisce alla città di Banda Aceh, in Indonesia, colpita dal maremoto del 26 dicembre 2004, le funzioni di fragilità sono state stimate sulla base di un modello numerico dello tsunami per il calcolo della colonna di inondazione e di un controllo visivo delle strutture danneggiate o distrutte, mediante immagini satellitari ad alta risoluzione. In questo caso gli autori non hanno tenuto conto della tipologia di edifici presenti ed hanno descritto il danno di una struttura mediante due sole classi: distrutta completamente o sopravvissuta.

Nel lavoro di Valencia et al. (2011), anch’esso eseguito su dati relativi alla città di Banda Aceh, le funzioni di fragilità e di danno sono calcolate mediante l’acquisizione combinata di dati raccolti da un’indagine post-disastro sul campo e da un’interpretazione visiva di immagini satellitari ad alta risoluzione. Tali autori propongono una classificazione degli edifici e una suddivisione del livello di danno in più classi.

## **1.1 Il lavoro di Koshimura**

L'obiettivo primario del lavoro pubblicato da Koshimura et al. (2009) è stato quello di eseguire un'analisi di vulnerabilità in un'area colpita da uno tsunami, attraverso lo sviluppo di funzioni di fragilità espresse come relazione tra la probabilità di danno delle strutture e le caratteristiche idrodinamiche dello tsunami. Per sviluppare le funzioni di fragilità, Koshimura si è concentrato sulla città di Banda Aceh, posizionata nella parte nord dell'isola di Sumatra, in Indonesia. Lo tsunami del 26 dicembre 2004 ha causato in questa zona più di 70.000 vittime ed ha danneggiato circa 12.000 case.

Per l'elaborazione delle funzioni di fragilità si richiede l'utilizzo combinato di informazioni fisiche riguardanti lo tsunami e di dati sui danni provocati.

Per ottenere informazioni sullo tsunami, come la colonna d'acqua e la velocità del flusso, è stata eseguita una simulazione numerica del maremoto che ha colpito Sumatra nel 2004, focalizzata sulla città di Banda Aceh, utilizzando dati topografici e batimetrici ad alta risoluzione.

I risultati del modello, come l'estensione della zona di inondazione, la colonna d'acqua e la velocità della flusso, sono stati convalidati dalle osservazioni sul campo, rivelandosi abbastanza adatti per lo sviluppo delle funzioni di fragilità.

Per rilevare, invece, i dati sui danni strutturali, sono state utilizzate immagini satellitari ad alta risoluzione.

Le funzioni di fragilità infine sono state sviluppate tramite un'analisi statistica, sotto l'ipotesi che possano essere rappresentate da funzioni di distribuzione normale o log-normale mediante due parametri statistici (media e deviazione standard).

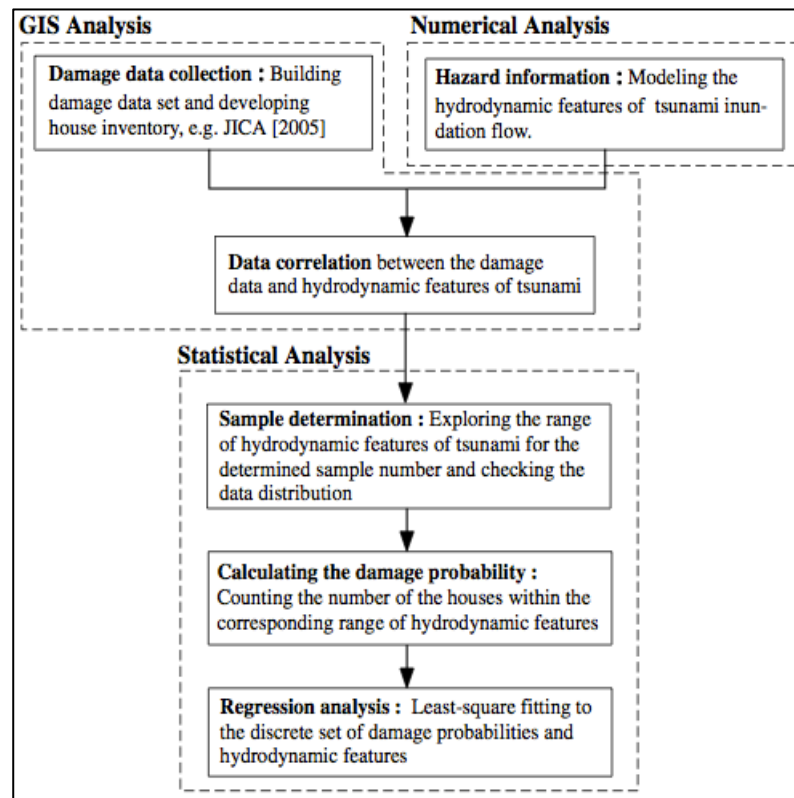
### **1.1.1 Le funzioni di fragilità nel lavoro di Koshimura**

Lo sviluppo delle funzioni di fragilità, nel lavoro di Koshimura, nasce dall'integrazione di tre analisi:

- Analisi numerica

- Analisi GIS
- Analisi statistica

Come accennato nell'introduzione, per l'elaborazione delle funzioni di fragilità è stato considerato un approccio statistico con l'utilizzo combinato dei risultati della modellazione numerica e dei dati post-tsunami, come mostrato nella figura 1:



**Figura 1: Processo di sviluppo delle funzioni di fragilità**

- Raccolta dei dati riguardanti i danni: dati di danno per le singole strutture e inventario di ogni struttura con il suo numero ID (Interpretation Damage), l'interpretazione del danno (distretto o no).
- Correlazione dei dati tra il danno strutturale e le proprietà dello tsunami: creare una tabella con l'ID, l'interpretazione del danno, e le caratteristiche idrodinamiche dello tsunami, come l'inondazione, attraverso l'analisi GIS.

- Determinazione del campione: specificare il range delle caratteristiche idrodinamiche dello tsunami, per il numero di campioni determinati e controllare la distribuzione dei dati.
- Calcolo della probabilità di danno: calcolare le probabilità di danno contando il numero di strutture distrutte o sopravvissute, per ogni caratteristica idrodinamica descritta sopra.
- Analisi di regressione: sviluppare la funzione di fragilità tramite l'analisi di regressione del set discreto di probabilità di danno e delle caratteristiche idrodinamiche dello tsunami.

Koshimura et al. hanno eseguito l'acquisizione di dati post-tsunami basandosi sull'interpretazione visiva di immagini satellitari ad alta risoluzione (IKONOS), concentrandosi sull'individuazione della presenza o meno dei tetti negli edifici. Come mostrato in Figura 2, l'alta risoluzione delle immagini ha permesso di rilevare i danni singolarmente per ogni edificio (la presenza del tetto o meno) ed interpretarle con l'utilizzo di due termini:

- “sopravvissuto”, per gli edifici che avevano ancora il tetto;
- “distrutto”, per quegli edifici che ne erano sprovvisti.

L'analisi GIS, per integrare sia le informazioni idrodinamiche dello tsunami (colonna d'acqua) che l'analisi dei dati di danno post-tsunami, ha portato a un risultato aggregato che può essere rappresentato tramite l'istogramma mostrato in Figura 3.

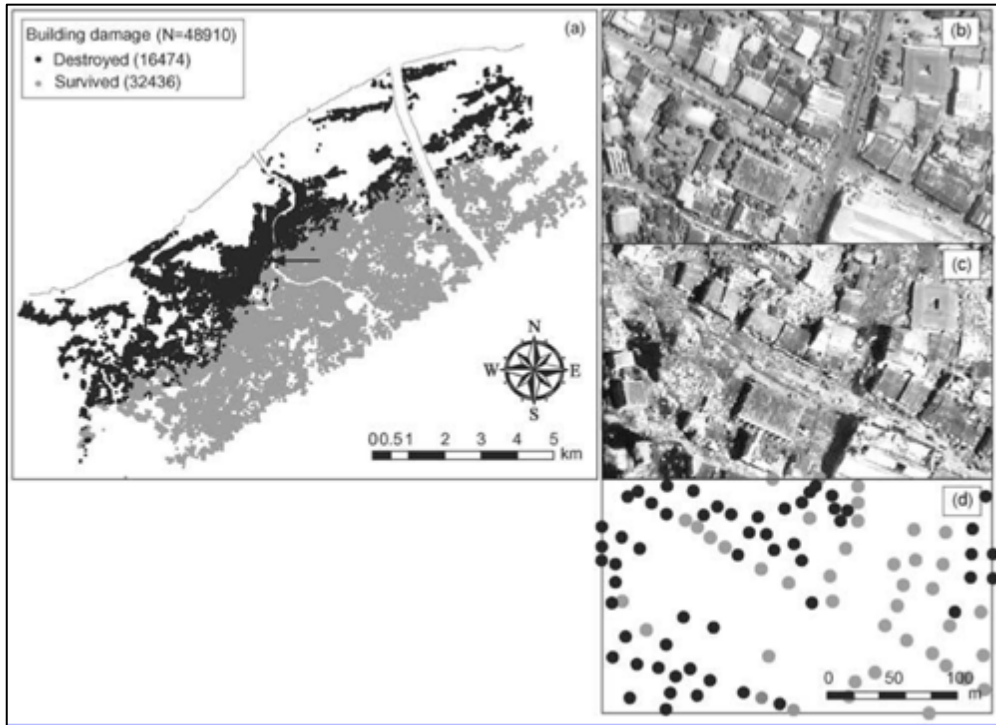


Figura 2: Distribuzione spaziale e interpretazione delle strutture danneggiate da immagini satellitari (IKONOS). I punti neri indicano le strutture distrutte e quelli grigi le strutture sopravvissute.

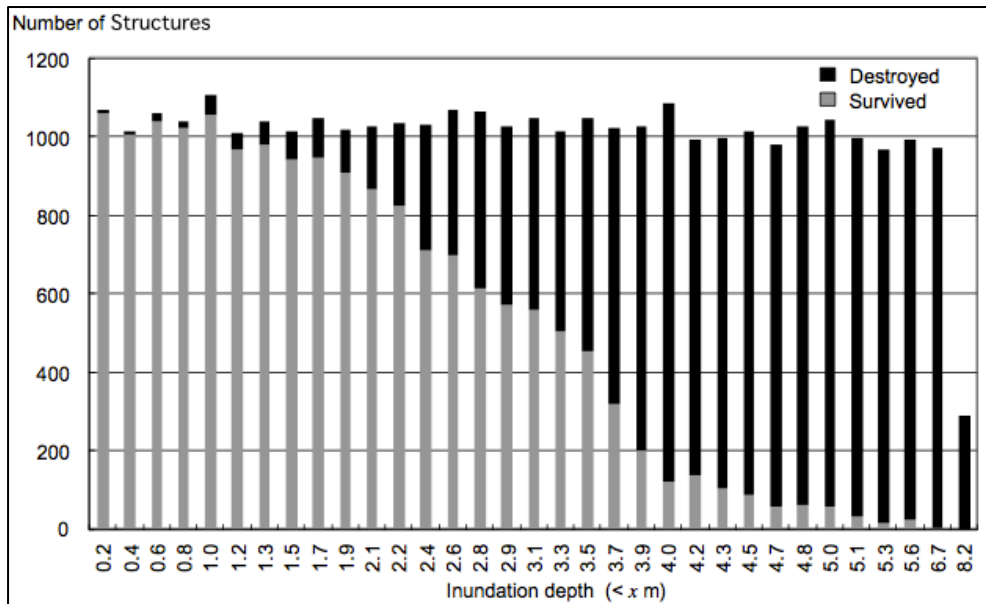


Figura 3: Istogramma rappresentante le strutture distrutte e sopravvissute in ogni intervallo della colonna d'acqua individuato.

Ogni intervallo della colonna d'acqua comprende una media di 1000 edifici. Per ottenere il rapporto tra la probabilità di danno e la colonna d'acqua, Koshimura et al. hanno eseguito il calcolo delle strutture distrutte all'interno di ogni intervallo della colonna d'acqua, riportandolo in percentuale. Il risultato che hanno ottenuto è quello mostrato in Figura 4.

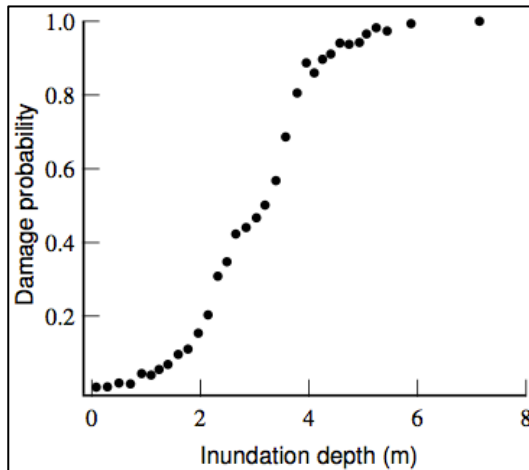


Figura 4: Probabilità di danno in funzione della colonna d'acqua

Dopodiché, dalla relazione tra probabilità di danno e colonna d'acqua, hanno ricavato una funzione di fragilità effettuando un'analisi di regressione lineare.

Per prima cosa gli autori hanno assunto che la probabilità cumulativa  $P$  del verificarsi del danno è data come:

$$P(x) = \Phi \left[ \frac{x - \mu}{\sigma} \right] = \Phi \left[ \frac{\ln x - \mu'}{\sigma'} \right]$$

dove  $\Phi$  è la funzione di distribuzione normale standardizzata (o lognormale),  $x$  è la caratteristica idrodinamica dello tsunami (ad esempio la profondità di inondazione, velocità della corrente o la forza idrodinamica),  $\mu$  e  $\sigma$  (o  $\mu'$  e  $\sigma'$ ) sono la media e la deviazione standard di  $x$  (o  $\ln x$ ) rispettivamente.

I due parametri statistici della funzione di fragilità, cioè  $\mu$  e  $\sigma$  (o  $\mu'$  e  $\sigma'$ ), sono ottenuti plottando  $x$  (o  $\ln x$ ) e l'inversa di  $\Phi^{-1}$  ed eseguendo il fit dei minimi quadrati su questo plot, come mostrato nella Figura 5.

Quindi, i due parametri sono ottenuti prendendo l'intercetta (=  $\mu$  o  $\mu'$ ) e il

coefficiente angolare ( $= \sigma$  o  $\sigma'$ ) nelle equazioni:

$$x = \sigma\Phi^{-1} + \mu \quad \text{oppure} \quad \ln x = \sigma'\Phi^{-1} + \mu'$$

Pertanto le curve di fragilità ottenute per la città di Banda Aceh, vedi Figura 6 e 7, indicano la probabilità di danno in funzione della colonna d'acqua e della velocità del flusso.

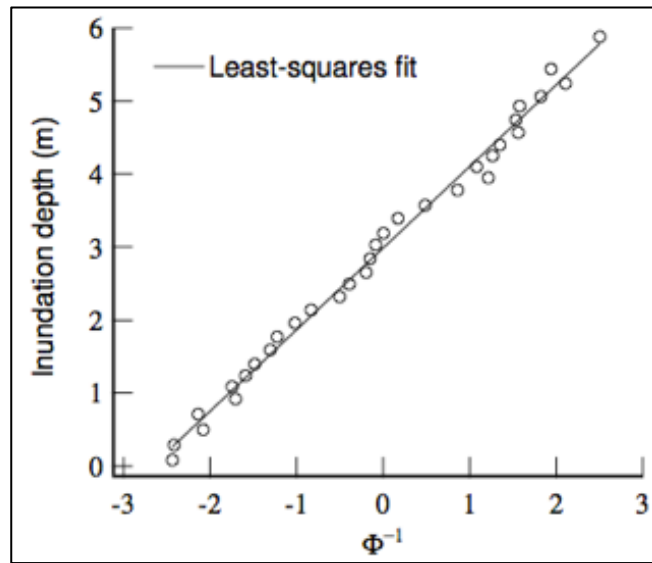


Figura 5: Esempio di plot dove è stato eseguito il fit dei minimi quadrati

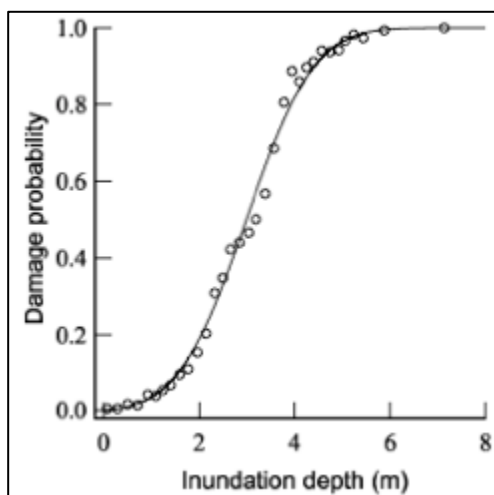


Figura 6: Funzione di fragilità in funzione della colonna d'acqua

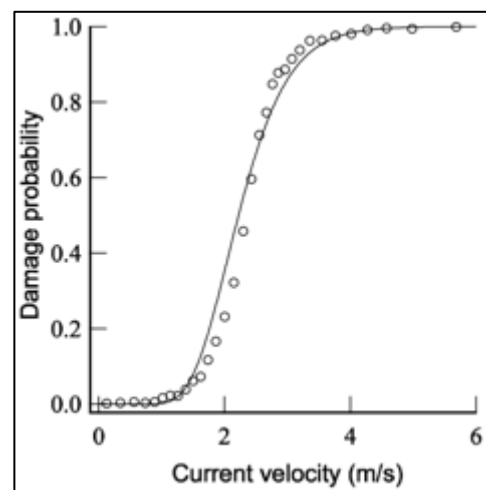


Figura 7: Funzione di fragilità in funzione della velocità del flusso

Inoltre Koshimura et al. hanno anche sviluppato una funzione di fragilità in funzione della forza idrodinamica agente sulle strutture.

La forza idrodinamica è definita come la forza di resistenza per unità di larghezza:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 D$$

dove  $C_D$  è il coefficiente di resistenza ( $C_D = 1.0$  per semplicità),  $\rho$  è la densità dell'acqua ( $1,000 \text{ kg/m}^3$ ),  $u$  è la velocità del flusso d'acqua (in  $\text{m/s}$ ), e  $D$  è la profondità di inondazione (in  $\text{m}$ ). Si noti che la funzione di fragilità rispetto alla colonna d'acqua è data dalla funzione di distribuzione normale standardizzata con  $\mu$  e  $\sigma$ , mentre quella relativa alla velocità del flusso e alla forza idrodinamica dalle funzioni di distribuzione lognormale standardizzate con  $\mu'$  e  $\sigma'$ .

Quindi la curva di fragilità che indica la probabilità di danno in funzione della forza idrodinamica, sempre per la città di Banda Aceh, è mostrata in Figura 8.

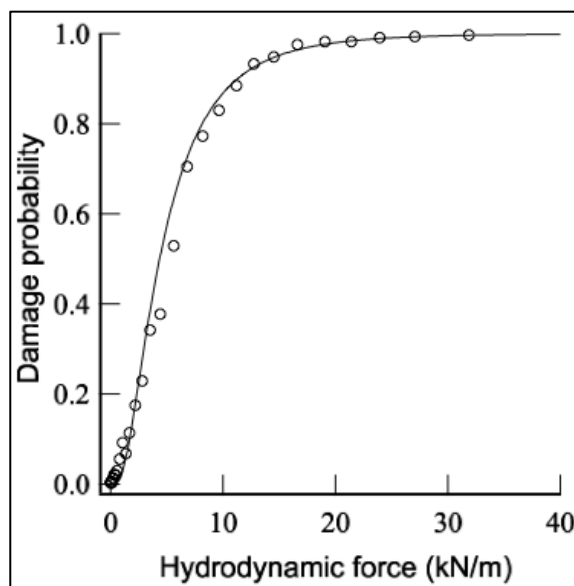


Figura 8: Funzione di fragilità in funzione della forza idrodinamica

Si può notare che le strutture sono significativamente vulnerabili quando la colonna d'acqua supera i 2 o 3 metri, la velocità del flusso supera i 2,5  $\text{m/s}$  o il carico idrodinamico su una struttura supera i 5  $\text{kN/m}$ .



Si consideri tuttavia che il danno strutturale osservato nel sito campione potrebbe essere stato causato sia dal maremoto che dal forte scuotimento del suolo. Il gran numero di strutture, sopravvissute al forte scuotimento sismico con danni di lieve entità, infatti potrebbero essere state successivamente distrutte dallo tsunami. L'interpretazione dei danni è stata effettuata tramite l'osservazione dei tetti delle case da immagini satellitari, supponendo che il danno strutturale sia stato causato esclusivamente dall'inondazione dello tsunami.

## **1.2 Il lavoro di Valencia**

Il lavoro di Valencia et al. (2011) può essere suddiviso in quattro fasi:

- classificazione degli edifici da interpretazione visiva di immagini satellitari ad alta risoluzione risalenti a prima del verificarsi dello tsunami;
- individuazione della colonna d'acqua da indagini sul campo;
- sviluppo delle funzioni di danno;
- valutazione e mappatura del danno.

La classificazione degli edifici fa riferimento ad un database iniziale, ottenuto interamente da indagini sul campo effettuate un anno dopo lo tsunami del 26 dicembre 2004, poi ampliato usando immagini satellitari precedenti all'evento. Questa integrazione è stata necessaria in particolare per quelle strutture totalmente distrutte dallo tsunami, per le quali era impossibile una classificazione attraverso l'indagine sul campo. Alla fine sono state individuate sei classi: A per strutture leggere in legno, B per strutture in muratura non rinforzata, C per strutture in muratura rinforzata, D per strutture in calcestruzzo non rinforzato, E per strutture in cemento armato ed M per edifici religiosi o Moschea.

L'individuazione della colonna d'acqua, tramite indagini sul campo, è stata eseguita da tre gruppi di ricerca indipendenti l'uno dall'altro. I risultati di ognuno di essi sono stati prima riportati tutti allo stesso livello di riferimento e poi interpolati al fine di avere tutte le misure consistenti. Questo perché alcuni gruppi facevano riferimento alla colonna d'acqua come "flow depth" e altri invece come

“water elevation”. Per quanto riguarda la “flow depth”, va specificato che rappresenta l’altezza del livello dello tsunami che va dal suolo alla traccia lasciata sulla struttura, mentre “water elevation” è l’altezza dell’onda che va dal livello medio del mare al segno lasciato sulla struttura.

In questo modo è stato assegnato un valore di colonna d’acqua ad ogni edificio.

Per quanto riguarda le funzioni di danno risultano essere praticamente lo step successivo allo sviluppo delle funzioni di fragilità. Queste ultime mostrano la probabilità cumulativa di avere, per ogni colonna d’acqua, un livello di danno uguale o maggiore di una data soglia.

La probabilità cumulativa di avere o superare un dato danno "D" per una data colonna d’acqua "h" è espresso dalla funzione:

$$P[D/h] = \Phi\left(\frac{\ln(h - h_D)}{\alpha_D}\right)$$

dove:  $\Phi$  è la funzione di distribuzione cumulativa normale standard,  $h_D$  è il valore medio della colonna d’acqua per ogni livello di danno "D",  $h$  è il valore della colonna d’acqua, e  $\alpha_D$  è la deviazione standard del logaritmo naturale di "h" per ogni livello di danno "D". Quindi, le funzioni di fragilità sono definite da due parametri,  $h_D$  e  $\alpha_D$ , dove:

$$\alpha_D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot h_D^2}{N} - \mu_H^2$$

$$\mu_H = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot \ln(h_D)}{N}$$

Dunque per ogni tipologia edilizia si ottengono tutte le curve (o funzioni) di fragilità riferite ad ogni livello di danno. Nella Figura 9 sono mostrate quelle relative alla classe edilizia B.

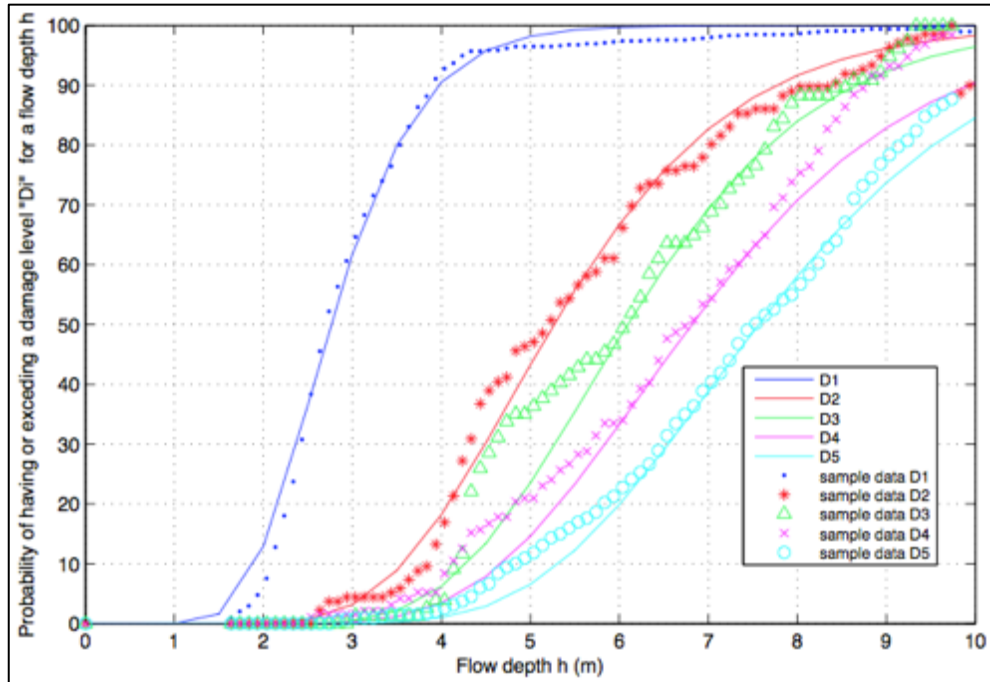
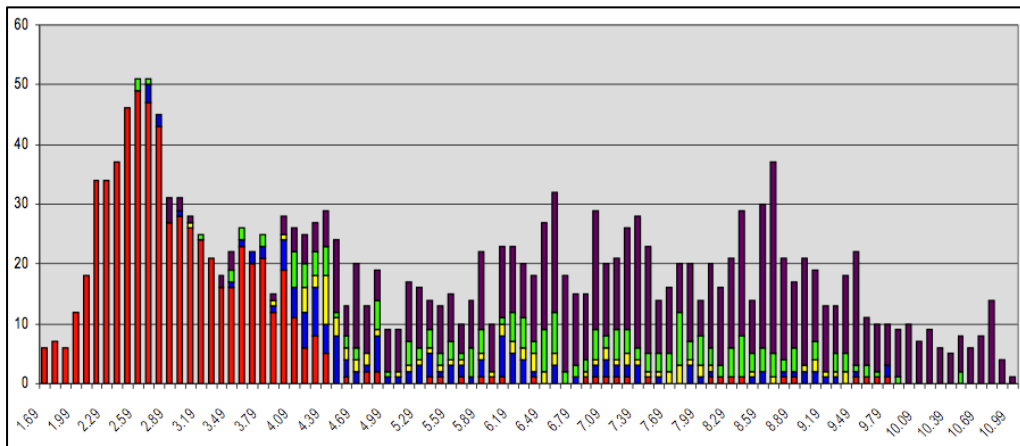


Figura 9: Curve di fragilità riferite alla classe edilizia B in funzione della colonna d'acqua. Si noti l'incremento del livello di danno da D1 (nessun danno) a D5 (completa distruzione). Ogni punto invece si riferisce alla frequenza cumulativa empirica.

Ogni punto sulle curve si riferisce alla frequenza cumulativa empirica di un livello di danno “D” nell’intervallo della colonna d’acqua “i”. Questa frequenza è data da:

$$f_i = \frac{n_i}{N}$$

dove  $n_i$  è il numero totale di edifici con livello di danno “D<sub>j</sub>” nell’intervallo della colonna d’acqua “i”, mentre N è il numero totale di edifici con livello di danno “D<sub>j</sub>”, con j da 1 a 5. Il numero degli edifici, riferiti alla stessa tipologia edilizia, in ogni intervallo della colonna d’acqua, può essere mostrato in un istogramma (Figura 10), che permette di ricavare facilmente  $n_i$  e N.



**Figura 10: Istogramma che mostra la distribuzione delle strutture di classe B in funzione della colonna d'acqua. I vari colori si riferiscono al livello di danno: D1 rosso, D2, blu, D3 giallo, D4 verde, D5 viola**

Allora per ogni tipologia edilizia si crea un istogramma, nel quale in ascissa troviamo gli intervalli della colonna d'acqua e in ordinata il numero degli edifici. Quindi in ogni intervallo della colonna d'acqua troviamo gli edifici con un determinato livello di danno.

Dato che in ogni intervallo il numero di edifici è sempre diverso, si calcola  $\bar{D}_i$  il *livello di danno medio ponderato* per ogni intervallo della colonna d'acqua:

$$\bar{D}_i = \frac{1 \cdot nD1_i + 2 \cdot nD2_i + 3 \cdot nD3_i + 4 \cdot nD4_i + 5 \cdot nD5_i}{nD1_i + nD2_i + nD3_i + nD4_i + nD5_i}$$

dove:  $nD1_i$  è numero totale di edifici con danno "D1" per l'intervallo della colonna d'acqua "i";  $nD2_i$  è numero totale di edifici con danno "D2" per l'intervallo della colonna d'acqua "i"; ecc...

La deviazione standard " $\sigma_{D_i}$ " è stata calcolata per ogni intervallo della colonna d'acqua utilizzando l'equazione seguente:

$$\sigma_{D_i}^2 = \frac{nD1_i \cdot (1 - \bar{D}_i)^2 + nD2_i \cdot (2 - \bar{D}_i)^2 + nD3_i \cdot (3 - \bar{D}_i)^2 + nD4_i \cdot (4 - \bar{D}_i)^2 + nD5_i \cdot (5 - \bar{D}_i)^2}{nD1_i + nD2_i + nD3_i + nD4_i + nD5_i}$$

che viene rappresentata, sulle curve di danno, tramite una barra rossa intorno al livello di danno ponderato. Infine si può procedere alla rappresentazione grafica

della curva di danno per ogni tipologia edilizia (Figura 11), ottenuta tramite l'involuppo del livello di danno medio ponderato per ogni colonna d'acqua.

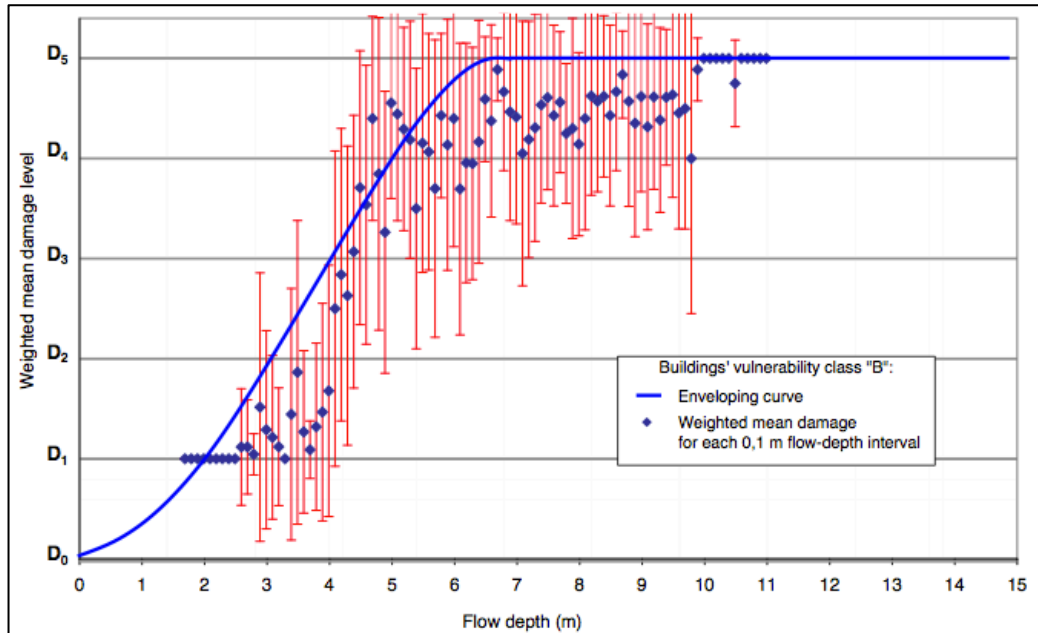


Figura 11: Curva di danno per la classe edilizia B. Risulta essere l'involuppo del livello di danno medio ponderato per ogni colonna d'acqua. Le barre rosse rappresentano la deviazione standard.

Poiché i siti campione selezionati per il progetto SCHEMA si trovano in un'area diversa rispetto all'area indonesiana, si è cercato di adattare le classi edilizie alle strutture esistenti nei siti campione. Questo è dovuto alla mancanza di dati post-tsunami sufficienti a sviluppare nuove funzioni di danno adatte alle classi edilizie del luogo.

Avendo fornito in maniera generale nozioni e metodi di sviluppo delle funzioni di fragilità e di danno, possiamo adesso iniziare ad esporre il lavoro eseguito nel progetto SCHEMA, focalizzando la nostra attenzione soprattutto sui metodi utilizzati per l'analisi di vulnerabilità.



## Capitolo 2: Il progetto SCHEMA

Uno dei due metodi impiegati per l'analisi della vulnerabilità delle strutture presenti nel Golfo di Siracusa è stato quello utilizzato nell'ambito del progetto SCHEMA (SCenarios for Hazard-induced Emergencies MAnagement).

Uno degli obiettivi fondamentali di SCHEMA era lo sviluppo di una metodologia, il più possibile generale, facilmente adattabile alle esigenze degli utenti finali, come le amministrazioni pubbliche locali, che fra i loro compiti hanno la protezione dei cittadini dai disastri naturali e la gestione del territorio. Per questa ragione la metodologia SCHEMA è stata applicata a cinque aree campione molto diverse tra loro: Rabat (Marocco), Setúbal (Portogallo), Mandelieu (Francia), Catania (Italia) e Balchik (Bulgaria).

La metodologia utilizzata si compone delle seguenti tre fasi principali:

- elaborazione di scenari di pericolosità per maremoto (Hazard Scenarios) per ciascuna area campione
- analisi della vulnerabilità degli elementi esposti
- elaborazione di scenari di danno (Damage Scenarios)

delle quali approfondiremo soltanto la seconda, quella che riguarda l'analisi della vulnerabilità degli elementi esposti. Per un approfondimento più dettagliato delle altre due fasi si consiglia la lettura dell'*Handbook of Tsunami Hazard and Damage Scenarios* (S. Tinti, R. Tonini, L. Bressan, A. Armigliato, A. Gardi, R. Guillande, N. Valencia, S. Scheer, 2011), un manuale concepito per illustrare i concetti base ed i metodi elaborati e applicati all'interno del progetto per la produzione di scenari di maremoto, necessari a fornire gli strumenti per la valutazione della pericolosità dei maremoti e dei loro potenziali danni.

## 2.1 Analisi di Vulnerabilità e Danno - SCHEMA

L'analisi di vulnerabilità, che è strettamente legata anche all'analisi del danno, inizia con l'individuazione di quei fattori che possono causare danni agli edifici, come la vicinanza degli edifici alla costa, l'altezza della colonna d'acqua che impatta sugli edifici, il tipo di ambiente attorno all'edificio, e quelle forze che possono portare addirittura al completo collasso dell'edificio, come le forze idrostatiche, le forze di galleggiamento (verticali), le forze idrodinamiche, l'impatto di oggetti galleggianti; inoltre si possono aggiungere il numero totale di onde che colpisce l'edificio e la durata dell'inondazione.

Naturalmente non possono essere considerati tutti questi fattori, soprattutto perché conoscerli per ogni singolo edificio, è praticamente impossibile. Quindi si ha un approccio semplificato considerando un sottoinsieme di questi fattori o addirittura anche un singolo fattore. Nella maggior parte degli attuali metodi, il danno diretto ad un determinato edificio è definito solo come una funzione della colonna d'acqua che impatta sull'edificio, sottintendendo che gli edifici devono essere classificati in base alla loro capacità di resistenza. Quindi in poche parole, il livello di danno agli edifici dipende dal tipo di struttura e dalla colonna d'acqua che impatta.

Il primo a proporre un approccio di questo tipo è stato Shuto nel 1993.

Questo metodo si basa su un certo numero di requisiti necessari per il suo utilizzo:

- una tipologia edilizia standardizzata,
- una scala di danno standardizzata,
- una funzione di danno per ogni tipo di edificio relativa al danno dovuto alla colonna d'acqua,
- un inventario degli edifici.

Per quanto riguarda la tipologia edilizia standardizzata sono stati definiti, sulla base delle loro caratteristiche strutturali di resistenza, quattro tipologie di edifici:

I. costruzioni leggere



II. costruzioni in muratura

III. costruzioni in cemento armato

IV. altre costruzioni

Classe		Edificio	Piani
I. Costruzioni Leggere	A1	Costruzioni leggere in legno o argilla che fronteggiano il mare	da 0 a 1
	A2	Costruzioni molto leggere senza alcun design. Capanne rudimentali costruite con legno o argilla	1
II. Costruzioni in Muratura	B1	Costruzione in mattoni non rinforzati, cemento, muri di malta, muratura	Da 1 a 2
	B2	Costruzioni leggere e molto concentrate in legno o materiale argilloso	Da 1 a 2
	C1	Edifici singoli, ville: costruzioni in mattone con colonne rinforzate e riempimento in muratura	Da 1 a 2
	C2	Costruzioni in muratura fatte da blocchi in pietra lavica alternando mattoni in argilla	Da 1 a 2
	D	Grandi ville o costruzioni collettive, edifici residenziali o commerciali: in cemento non rinforzato	Da 1 a 3
III. Costruzioni in Cemento Armato	E1	Strutture residenziali o collettive o uffici, parcheggi, scuole: in cemento armato e acciaio	Da 0 a 3
	E2	Strutture residenziali o collettive o uffici, parcheggi, scuole, torri: in cemento armato e acciaio	>3
IV. Altre Costruzioni	F	edifici portuali o industriali, hangars: in cemento armato e acciaio	Indifferente
	G	Edifici amministrativi, storici, religiosi o altro	Indifferente

**Tabella 1: Tipologie edilizie in funzione delle capacità di resistenza delle costruzioni**

In più, oltre alla definizione delle quattro tipologie di costruzione, come si può notare dalla Tabella 1, le strutture sono state riclassificate tramite una lettera dell'alfabeto, in base alla tipologia edilizia specifica.

In poche parole, questa classificazione corrisponde all'analisi di vulnerabilità.

Invece, la scala per il livello di danno degli edifici ha sei gradi, che vanno dal D0 al D5:

- D0 nessun danno
- D1 danno leggero
- D2 danno importante
- D3 danno pesante
- D4 collasso parziale
- D5 collasso totale

Un approccio sviluppato per la stima del danno degli edifici consiste invece nel derivare una funzione di danno empirica a partire dalle osservazioni sul campo. In questo modo si ricavano gli attributi che influenzano la vulnerabilità del singolo

edificio attraverso un'analisi diretta degli edifici danneggiati, creando così un database di dati e funzioni di danno. Questi possano essere utilizzati per lo studio della vulnerabilità di un altro sito.

Il livello di danno dovrebbe essere legato solo all'altezza massima della colonna d'acqua. Le funzioni di danno proposte per gli edifici sono state elaborate da un database compilato per la città di Banda Aceh (Sumatra, Indonesia) che è stata colpita dallo tsunami del 26 dicembre 2004. Queste fanno riferimento solo alle classi edilizie A, B, C, D e E1. Purtroppo la mancanza di edifici di classe E2, F e G in quella zona non ha permesso il calcolo di leggi empiriche di danno medio (Figura 12).

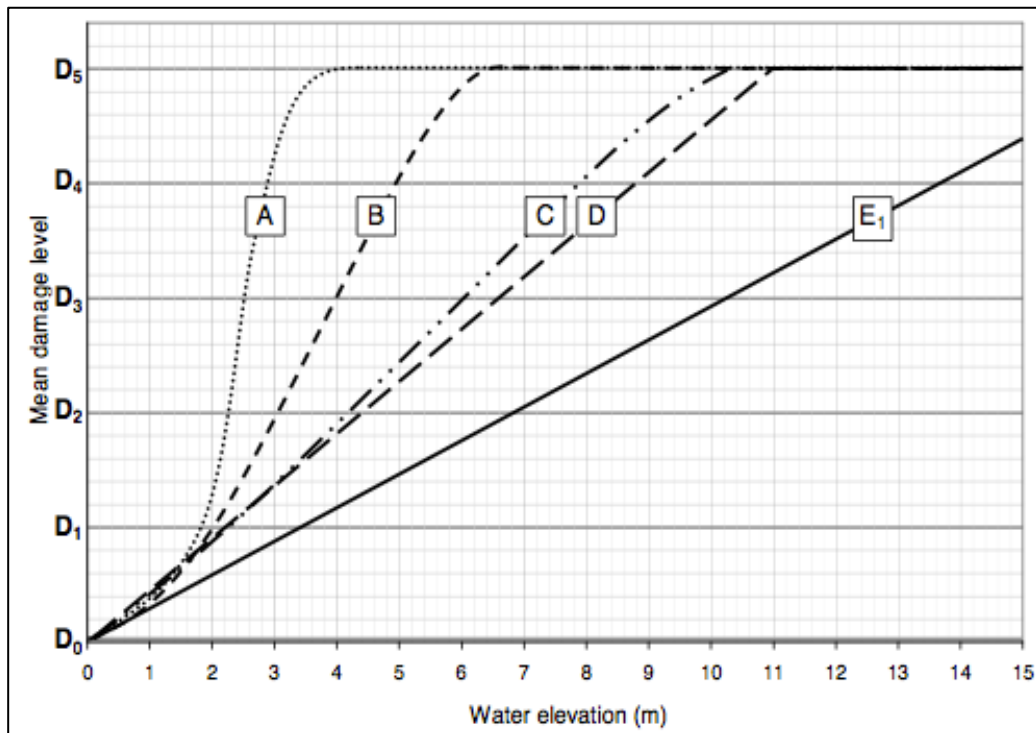


Figura 22: Curve di danno delle classi edilizie A, B, C, D ed E1 sviluppate per la città di Banda Aceh, Indonesia

Dal grafico delle funzioni di danno, per ogni categoria di edificio, possiamo ricavare le matrici di danno: sono stati messi in relazione una variabile continua (colonna d'acqua) ed una discreta (livello di danno) ricavando degli intervalli di valori per l'altezza della colonna d'acqua (Tabella 2).

Livello di Danno	Valore più basso e più alto della profondità del flusso (m) per ogni tipologia di edificio				
	A	B	C	D	E1
D0	0	0	0	0	0
D1	0	0	0	0	0
	1.8	2	2.5	2	3
D2	1.8	2	2.5	2	3
	2.2	3	4	4.5	6
D3	2.2	3	4	4.5	6
	2.6	4	6	6.5	9.5
D4	2.6	4	6	6.5	9.5
	3.8	5	8	9	12.5
D5	> 3.8	> 5	> 8	> 9	> 12.5

**Tabella 2: Matrice di danno, mette in relazione la colonna d'acqua con il livello di danno**

Il quarto punto è quello di creare un inventario degli edifici. Il progetto SCHEMA basa la classificazione sulla fotointerpretazione di immagini da satellite. Questo compito può essere facilitato utilizzando dati forniti dalle amministrazioni locali (CTR 1:10000 e CTN 1:2000). L'uso di immagini satellitari può risultare molto importante al fine di velocizzare la classificazione di tutte le strutture (Figura 13); inoltre è necessaria un'indagine sul campo al fine di confermare il risultato della classificazione.

Quando la densità di edifici è elevata l'analisi può avvenire per blocchi di edifici e non per singole strutture.

Lo step successivo è quello di fornire le mappe di danno. Combinando i dati delle colonne d'acqua con la distribuzione degli inventari, e facendo uso delle matrici



**Figura 13: Esempio di immagine satellitare per l'individuazione e la classificazione di una struttura edilizia**

di danno, risulta possibile stimare il livello di danno per ogni edificio.

C'è da notare che fattori secondari possono influenzare il danno agli edifici e incrementare il livello di danno. Uno di questi fattori può essere il volume di oggetti galleggianti (auto, barche, moto, ecc), ma in questi casi vengono fornite soltanto delle informazioni qualitative perché non vi è alcun modo quantitativo di collegare questa presenza al livello di danno degli edifici.

## Capitolo 3: Il modello PTVA

La versione 3 del modello PTVA per la classificazione degli edifici, è la seconda metodologia presa in considerazione in questo lavoro. La prima versione del modello PTVA (PTVA-1) è stata applicata per lo studio della vulnerabilità in una zona a ovest di Heraklion, Creta, (Papathoma et al., 2003), successivamente è stata aggiornata (PTVA-2) utilizzando i dati ottenuti dopo lo tsunami dell'Oceano Indiano del 2004 (Dominey-Howes et al., 2007). L'ultima versione del modello (PTVA-3), sviluppata da Dall'Osso et al., 2009, e applicata alle zone costiere di Sidney (Australia), introduce l'RVI (Relative Vulnerability Index) e modifica il valore di alcuni attributi, elementi fondamentali per l'analisi di vulnerabilità. Il PTVA-3 è stato applicato anche nell'area mediterranea, in particolare nelle Isole Eolie (Dall'Osso et al., 2010).

Di seguito sarà brevemente esposta l'evoluzione del modello PTVA, dalla prima fino alla terza versione, che è stata presa in considerazione, nel lavoro di tesi, per lo studio della vulnerabilità da maremoto nel Golfo di Siracusa.

### 3.1 Analisi di Vulnerabilità – PTVA

Il primo modello PTVA, per l'analisi di vulnerabilità, è stato descritto da M. Papathoma et al. (2003) e da Papathoma e Dominey-Howes (2003) ed applicato rispettivamente in una zona a ovest di Heraklion sulla costa settentrionale di Creta e in due villaggi costieri del Golfo di Corinto, Grecia.

Questa metodologia si articola in quattro punti, di cui i primi tre sono quelli principali:

- identificazione delle zone d'inondazione con relative profondità del flusso d'acqua, le IDZ, *Inundation Depth Zone*
- identificazione e catalogazione di tutti quei fattori che influenzano la vulnerabilità degli edifici e delle persone
- calcolo della vulnerabilità per ogni edificio, Building (BV) e Human (HV) Vulnerability

- elaborazione delle mappe con BV e HV

### **3.1.1 Sviluppo del Modello**

Di seguito facciamo riferimento all'applicazione nel Golfo di Corinto. Dopo aver scelto uno scenario di maremoto, in questo caso lo tsunami del 7 febbraio 1693, e tenendo conto dell'altezza massima dell'onda registrata nella zona colpita, circa 5 metri, sono state individuate le IDZ (Inundation Depth Zone) senza considerare la direzione d'impatto del maremoto né analizzare in dettaglio la batimetria del fondale nel tratto di mare antistante. Questo perché non è stata considerata un'onda specifica, ma l'impatto che hanno avuto varie onde provenienti da direzioni diverse e anche perché in alcune zone si è rivelato difficile ottenere una batimetria abbastanza dettagliata.

In via preliminare è stata assunta come zona inondata un'area tra la costa e la linea di contorno topografica dei 5 metri, che si riferisce appunto alla massima altezza dell'onda desumibile dalle fonti storiche.

Sono state individuate quattro zone d'inondazione:

- High IDZ (elevazione del terreno 0 – 2 m)
- Medium IDZ (elevazione del terreno 2 – 3 m)
- Low IDZ (elevazione del terreno 3 – 4 m)
- Very low IDZ (elevazione del terreno 4 – 5 m)

In seguito, è stato eseguito un lavoro d'individuazione e catalogazione di tutti quei fattori che potrebbero influire sulla vulnerabilità degli edifici. Questi fattori sono stati raggruppati in tre categorie:

- Quantitativi: popolazione, densità di popolazione e proprietari di case.
- Qualitativi: condizioni, ambiente che circonda gli edifici, ambiente naturale, ecc.
- Descrittivi: gestione del territorio.

Dopo avere assegnato ad ogni fattore un punteggio opportuno, si procede al calcolo di un punteggio normalizzato secondo la seguente formula:

punteggio normalizzato  $X = \text{punteggio non normalizzato } X / \text{massimo punteggio non normalizzato}$

Dato che i fattori incidono in maniera differente sulla vulnerabilità di un edificio, essi vengono classificati in base alla loro importanza secondo un coefficiente di ponderazione:

- 7 materiale di costruzione;
- 6 fondamenta;
- 5 ambiente circostante;
- 4 condizione del piano terra;
- 3 numero di piani;
- 2 difese dal mare;
- 1 ambiente naturale.

I fattori riguardanti soprattutto il materiale di costruzione e le fondamenta dell'edificio, come si può notare, acquisiscono un peso maggiore perché sono quelli che incidono di più sulla resistenza e sulla sopravvivenza dell'edificio dopo l'impatto con la colonna d'acqua. In più, i primi fattori sono anche quelli che per un'eventuale ricostruzione totale o parziale della struttura influiscono in maniera sostanziale a livello sociale ed economico.

Il passo successivo è il calcolo della vulnerabilità che tenga conto del coefficiente di ponderazione, ovvero della Building Vulnerability (BV), data dalla somma dei prodotti dei fattori standardizzati (denotati con  $a, b, \dots$ ) con i propri coefficienti di ponderazione:

$$BV = (a \cdot 7) + (b \cdot 6) + (c \cdot 5) + (d \cdot 4) + (e \cdot 3) + (f \cdot 2) + (g \cdot 1)$$

e della Human Vulnerability (HV), data invece dal prodotto di BV per la

Popolazione:

$$HV = BV \cdot P$$

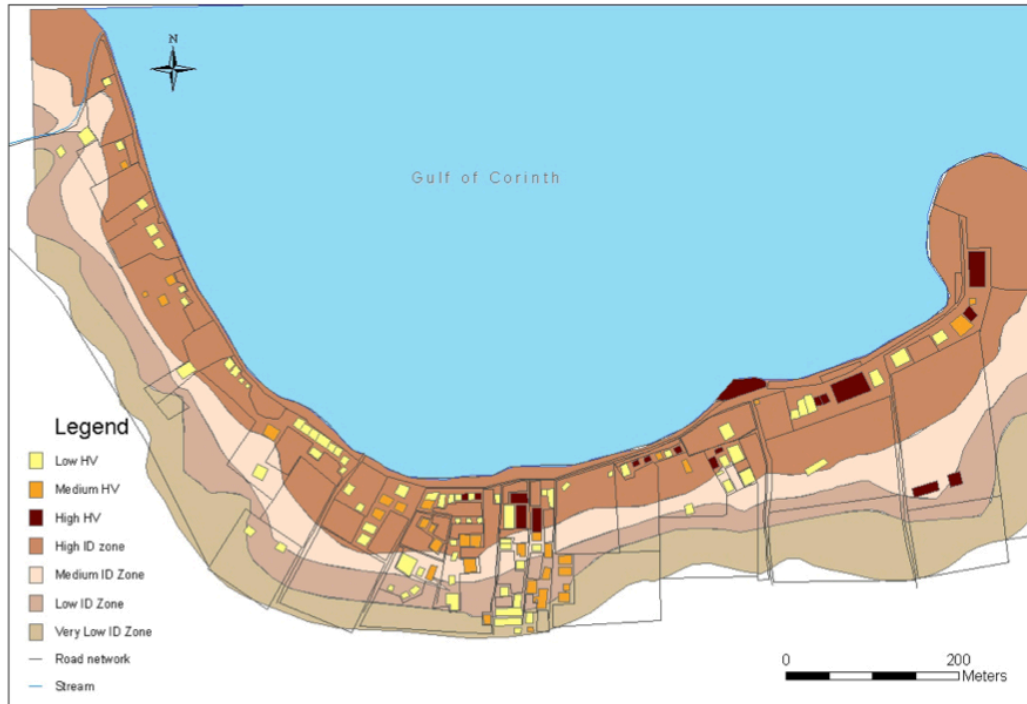
Anche i risultati ottenuti per la BV e l'HV vengono classificati in High, Medium e Low, in base ai valori ottenuti.

Infine si elaborano le mappe che raffigurano i risultati ottenuti per le IDZ, la BV e l'HV, Figure 14 e 15.



**Figura 34: Esempio di mappa che mostra la Building Vulnerability (BV) e le Inundation Depth Zone (IDZ) nel villaggio di Akoli, Golfo di Corinto.**





**Figura 15: Esempio di mappa che mostra la Human Vulnerability (HV) e le Inundation Depth Zone (IDZ) nel villaggio di Akoli, Golfo di Corinto.**

## **3.2 Analisi di Vulnerabilità - PTVA-2**

Nella versione 2 del modello, migliorata e convalidata da Dominey-Howes e Papathoma (2007), non si esaminano più i BV e gli HV ma si calcola la vulnerabilità tramite un'espressione simile utilizzata per il calcolo della Building Vulnerability. Il PTVA-2 è praticamente un perfezionamento della prima versione e la base dei miglioramenti avvenuti con la versione 3.

### **3.2.1 Sviluppo del modello**

La versione 2 del PTVA, essendo, praticamente, un aggiornamento della prima versione, non presenta significative modifiche nello sviluppo generale del modello: le modalità di individuazione delle zone colpite e allagate dal maremoto, le modalità d'individuazione degli attributi che influenzano la vulnerabilità degli edifici e la comprensione dei risultati dopo l'analisi di vulnerabilità.

Il principale aggiornamento consiste nell'individuare diversi attributi che possono influenzare la vulnerabilità dell'edificio e nell'assegnare un diverso peso a questi attributi. Anche qui, dato che i diversi attributi agiscono in maniera diversa sulla vulnerabilità dell'edificio, ad essi viene assegnato un peso corrispondente alla loro influenza:

- 8 profondità dell'acqua sulla superficie;
- 7 distanza dal mare, misurata in file di edifici;
- 6 materiale di costruzione;
- 5 numero di piani presente nell'edificio;
- 4 orientazione dell'edificio;
- 3 condizioni dell'edificio;
- 2 costruzioni circostanti (muri, dighe, ecc...);
- 1 copertura del terreno (alberi, terreno circostante, ecc...).

Dopo essere stati individuati e avergli assegnato un punteggio opportuno, si procede alla standardizzazione di questi secondo la seguente formula:

punteggio standardizzato  $X = \text{punteggio non standardizzato } X / \text{massimo}$   
punteggio non standardizzato

Water depth above ground surface (m) (a)		Building row number (from the sea) (b)		Building material (c)		Number of floors (d)		Orientation of building (e)		Condition of building (f)		Building surroundings (g)		Land cover (h)	
Depth	Raw score	Row number	Raw score	Material	Raw score	Floor number	Raw score	Orientation	Raw score	Condition	Raw score	Surroundings	Raw score	Cover	Raw score
≥4.0	6*	1	37*	Wood only; wood on concrete base; steel frame with wood walls	4*	1 story	2*	Irregular	3*	Poor	3*	None	4*	None	3*
3.0-3.99	5	Down to...		Stone and concrete; concrete and brick	3	2 or more	1#	Cubic with corner to sea	2	Fair	2	Low brick wall	3	Bushes and low trees	2
2.0-2.99	4	37#	1#	Concrete	2			Cubic/parallel	1#	Excellent	1#	Medium brick/concrete wall	2	Large trees	1#
1.0-1.99	3			Steel and concrete	1#							High concrete wall	1#		
0.5-0.9	2														
0.01-0.49	1#														

**Tabella 3: Tabella in cui sono mostrati gli attributi che influenzano la vulnerabilità di un edificio e i relativi punteggi da assegnare**

Dopodiché, si calcola la Vulnerabilità  $V$  per ogni edificio, tenendo conto dei vari attributi assegnati ad ogni struttura e il loro coefficiente di ponderazione:

$$V = (8 \cdot a) + (7 \cdot b) + (6 \cdot c) + (5 \cdot d) + (4 \cdot e) + (3 \cdot f) + (2 \cdot g) + (1 \cdot h)$$

dove  $a, b, c, d, e, f, g, h$  si riferiscono ai punteggi standardizzati.

In base ai risultati ottenuti da quest'espressione, si suddivide l'intervallo, che va dal punteggio maggiore a quello minore, in cinque parti, dalle quali sono individuate cinque classi di vulnerabilità, ripartite come segue:

- 30.53 – 36 High Vulnerability;
- 25.031 – 30.529 Medium-High Vulnerability;
- 19.56 – 25.03 Medium Vulnerability;
- 14.08 – 19.55 Medium-Low Vulnerability;
- 8.609 – 14.079 Low Vulnerability.

### 3.3 Analisi di Vulnerabilità - PTVA-3

Il modello PTVA-3 è stato sviluppato da Dall'Osso et al. (2009) soprattutto per dare maggiore solidità ai modelli precedenti e per fornire delle analisi di vulnerabilità più esatte e sofisticate dando come output un Relative Vulnerability Index, l'RVI, indice relativo di vulnerabilità, per ogni edificio considerato. L'obiettivo della nuova versione del modello è stato quello di rivedere il modello originale PTVA, tenendo conto dei nuovi dati pubblicati sugli attributi che influenzano le costruzioni e di introdurre un meccanismo matematico (un Analytic Hierarchy Process o AHP) per calibrare i vari attributi, al fine di rendere più oggettiva possibile la loro classificazione rispetto al modello originale.

La versione 3 del modello è stata testata usando dei dati riferiti ad edifici della città di Maroubra, Sidney, Australia.

#### 3.3.1 Sviluppo del Modello

In questa versione, l'RVI è calcolato come la somma di due elementi separati:

- SV: la vulnerabilità strutturale dell'edificio relazionata alle forze idrodinamiche orizzontali del flusso d'acqua;
- WV: la vulnerabilità dell'edificio dovuta all'intrusione del flusso d'acqua.

$$RVI(1,5) = \frac{2}{3}SV + \frac{1}{3}WV$$

Naturalmente i valori di SV e WV da inserire in quest'espressione sono dei valori standardizzati. A SV è stato assegnato un peso superiore a quello assegnato a WV perché i danni che potrebbe subire la struttura dell'edificio, causati dalle forze idrodinamiche orizzontali del flusso d'acqua, potrebbero comportare riparazioni con costi che risulterebbero uguali o superiori al valore totale dell'edificio stesso. Anche SV è calcolato come una somma di elementi separati:

$$SV(1, 125) = Bv \cdot Ex \cdot Prot$$

con

- Building vulnerability (Bv), Tabella 4: dipende dagli attributi fisici dell'edificio come n° di piani (s), materiale e tecniche di costruzione (m), idrodinamica del piano terra (g), fondamenta (f) e forma e orientazione dell'edificio nell'impatto (so), oggetti in movimento (mo) e condizioni di conservazione (pc)

	-1	-0.5	0	(+0.25)	+0.5	(+0.75)	+1
<b>s</b> (number of stories)	more than 5 stories	4 stories	3 stories		2 stories		1 story
<b>m</b> (material)	reinforced concrete		double brick		single brick		timber
<b>g</b> (ground floor hydrodynamics)	100 % open plan	75 % open plan	50 % open plan		25 % open plan		not open plan
<b>f</b> (foundation strength)	deep pile foundation		average depth foundation			shallow foundation	
<b>so</b> (shape and orientation)	high hydrodynamic shape		average hydrodynamic shape			poor hydrodynamic shape	
<b>mo</b> (movable objects)			minimum risk of being damaged by movable objects	moderate risk of being damaged by movable objects	average risk of being damaged by movable objects	high risk of being damaged by movable objects	extreme risk of being damaged by movable objects
<b>pc</b> (preservation condition)	excellent	good	average		poor		very poor

Tabella 4: Tabella che mostra i vari attributi che influenzano la vulnerabilità fisica di un edificio (Bv) e i relativi punteggi da assegnare

$$Bv(-1, +1) = \frac{1}{423} (100 \cdot s + 80 \cdot m + 63 \cdot g + 60 \cdot f + 51 \cdot mo + 46 \cdot so + 23 \cdot pc)$$

- Protection factor (Prot), Tabella 5: dipende dai fattori che influenzano la protezione di un edificio come la fila di edifici (Prot\_br), la presenza di una diga (Prot\_sw), barriere naturali (Prot\_nb) e la presenza di un muro attorno all'edificio (Prot\_w)

	0	+0.25	+0.5	+0.75	+1
<i>Prot_br</i> (building row)	>10th	7-8-9-10th	4-5-6th	2nd-3rd	1st
<i>Prot_nb</i> (natural barriers)	very high protection	high protection	average protection	moderate protection	no protection
<i>Prot_sw</i> (seawall height and shape)	vertical and >5 m	vertical and 3 to 5 m	vertical and 1.5 to 3 m	vertical and 0 to 1.5 m OR sloped and 1.5 to 3 m	sloped and 0 to 1.5 m OR no seawall
<i>Prot_w</i> (brick wall around building)	height of the wall is from 80% to 100% of the water depth	height of the wall is from 60% to 80% of the water depth	height of the wall is from 40% to 60% of the water depth	height of the wall is from 20% to 40% of the water depth	height of the wall is from 0% to 20% of the water depth

**Tabella 5:** Tabella che mostra i vari Protection factors (Prot) di un edificio e i relativi punteggi da assegnare

$$Prot(0, +1) = \frac{1}{301} [100 \cdot (Prot\_br) + 73 \cdot (Prot\_nb) + 73 \cdot (Prot\_sw) + 55 \cdot (Prot\_w)]$$

- Exposure (Ex): è un attributo relativo alla profondità della colonna d'acqua nel punto in cui si trova l'edificio

I risultati di tutti e tre gli elementi vengono poi convertiti da 1 a 5. Lo stesso è stato fatto anche per SV, che da una scala da 1 a 125 è stato convertito da 1 a 5. Bisogna sottolineare che in questa versione del modello, il processo di assegnazione e calibrazione dei pesi ai vari attributi, che influenzano la vulnerabilità di un edificio, è stata eseguita tramite un processo matematico, l'Analytic Hierarchy Process o AHP, per mezzo di un software denominato M-Macbeth, e non più tramite il giudizio personale di qualche esperto (cosa che invece veniva fatta nelle versioni precedenti), al fine di rimuovere il più possibile qualsiasi tipo di giudizio personale e rendere il modello il più oggettivo possibile. Invece per quanto riguarda la vulnerabilità per l'intrusione dell'acqua WV, essa è calcolata come segue:

$$WV(0, +1) = \frac{n^{\circ} \text{ di piani inondati}}{n^{\circ} \text{ totale di piani}}$$

anche qui, i risultati ottenuti sono stati convertiti da 1 a 5.

Infine quando otteniamo tutti i valori opportunamente convertiti, possiamo calcolare l'RVI, che descrive il livello relativo di vulnerabilità, tramite

l'equazione illustrata all'inizio. In base al risultato, si ottengono cinque livelli di vulnerabilità, Tabella 6:

- da 1 a 1.8 MINOR
- da 1.8 a 2.6 MODERATE
- da 2.6 a 3.4 AVERAGE
- da 3.4 a 4.2 HIGH
- da 4.2 a 5 VERY HIGH

<i>RVI</i> (1-5)	1-1.8	1.8-2.6	2.6-3.4	3.4-4.2	4.2-5
Description of relative vulnerability level	MINOR	MODERATE	AVERAGE	HIGH	VERY HIGH
<b>Relative Vulnerability Index (<i>RVI</i>) = (2/3) × (<i>SV</i>) + (1/3) × (<i>WV</i>) (Eq. 1)</b>					
<i>SV</i> (original)	1-25	25-50	50-75	75-100	100-125
<i>SV</i> (scaled)	1	2	3	4	5
<b><i>SV</i> = (<i>Bv</i>) × (<i>Ex</i>) × (<i>Prot</i>) (Eq. 2)</b>					
<i>Bv</i> (original)	-1 to -0.6	-0.6 to -0.2	-0.2 to +0.2	+0.2 to +0.6	+0.6 to +1
<i>Bv</i> (scaled)	1	2	3	4	5
<i>Ex</i> (original)	0-1 m	1-2 m	2-3 m	3-4 m	>4 m
<i>Ex</i> (scaled)	1	2	3	4	5
<i>Prot</i> (original)	0 to 0.2	0.2 to 0.4	0.4 to 0.6	0.6 to 0.8	0.8 to 1
<i>Prot</i> (scaled)	1	2	3	4	5
<b><i>WV</i> = (number of inundated levels)/(total number of levels) (Eq. 7)</b>					
<i>WV</i> (original)	0 to 0.2	0.2 to 0.4	0.4 to 0.6	0.6 to 0.8	0.8 to 1
<i>WV</i> (scaled)	1	2	3	4	5

Tabella 6: Tabella che riassume i vari elementi utili al calcolo dell'*RVI* e le varie scale rispetto alle quali bisogna convertire i punteggi ottenuti.





## Capitolo 4: Applicazione e confronto di modelli per lo studio della vulnerabilità da maremoto nel Golfo di Siracusa, Italia

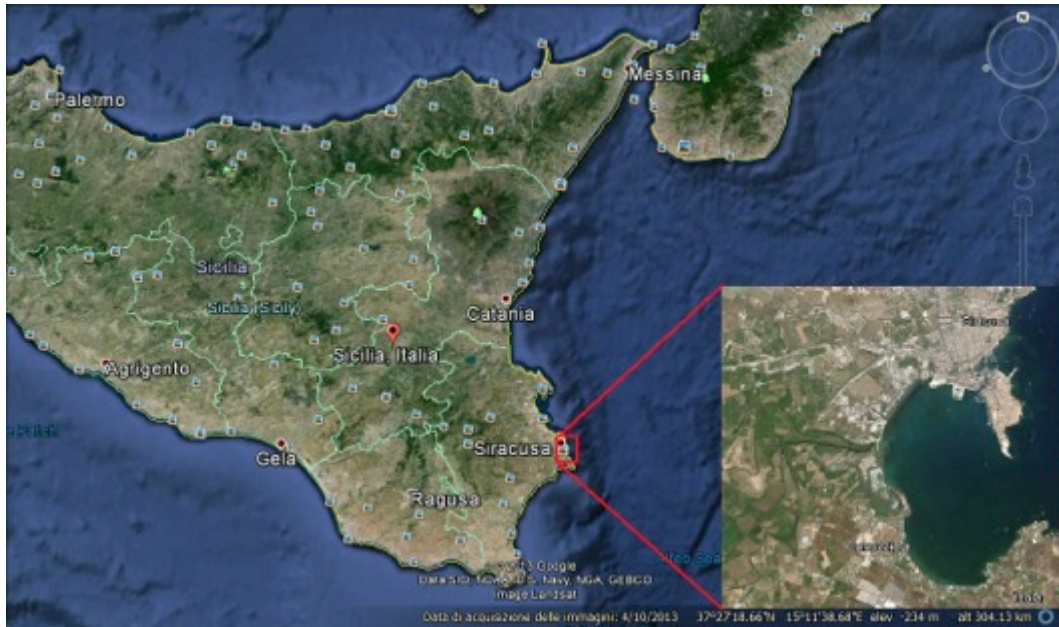


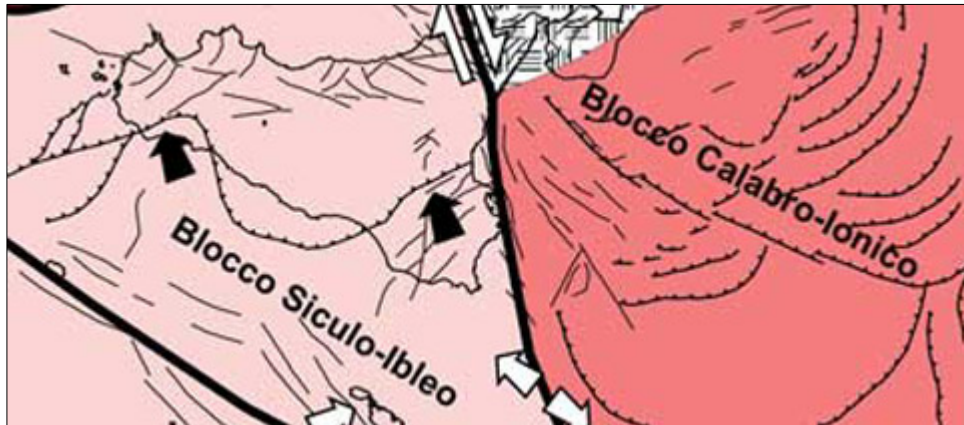
Figura 46: Golfo di Siracusa

Siracusa è posizionata sulla costa sud-orientale della Sicilia, è la quarta città della Sicilia per numero di abitanti, dopo Palermo, Catania e Messina, ed in passato è stata una fra le più grandi polis del mondo greco.

Per oltre un millennio Siracusa è stata la più importante città siciliana ed il capoluogo dell'isola nel periodo romano e bizantino; per i numerosi siti di alto valore storico, archeologico e paesaggistico, è stata insignita nel 2005 del titolo di Patrimonio dell'Umanità da parte dell'UNESCO.

La città è bagnata dal Mar Ionio e presenta coste prevalentemente scogliose.

Le sue caratteristiche geologiche vanno collocate nel quadro tettonico della Sicilia sud-orientale, dominata dal *Plateau Siculo-Ibleo*. Questa struttura costituisce parte dei prolungamenti settentrionali emersi dalla Placca Africana, la quale ha nel mediterraneo il suo punto di scontro con il blocco Calabro-Ionico nella Scarpata Ibleo-Maltese, Figura 17.



**Figura 17: Zona di scontro tra i prolungamenti della Placca Africana e il blocco Calabro-Ionico. La linea nera più spessa è la Scarpata Ibleo-Maltese.**

La Scarpata Ibleo-Maltese si estende tra i 15 e i 50 km a largo delle coste orientali siciliane. È un sistema di faglie con un'orientazione NNW-SSE, lungo circa 300 km, caratterizzate da un evidente dislivello (la profondità del mare passa da 200 m a 3000 m) e da meccanismi di faglie normali, che si immergono verso ENE.

Questa zona è nota per essere una zona tettonicamente molto attiva. I cataloghi storici (Figura 18) mostrano come questa zona sia stata colpita più volte da disastrosi terremoti. Si ricordano gli eventi del 4 febbraio 1169 ( $M_w = 7.3$ ), del 10 dicembre 1542 (con magnitudo stimata  $> 6$ ), dell'11 gennaio 1693 ( $M_w = 7.4$ ), del 28 dicembre 1908 ( $M_w = 7.2$ ) e dell'ultimo significativo terremoto verificatosi in questa regione il 13 dicembre 1990 ( $M_w = 5.4$ ).

#### **4.1 I maremoti che hanno colpito la città di Siracusa**

Le caratteristiche tettoniche della zona e la posizione della città di Siracusa fanno sì che essa possa essere colpita sia da maremoti locali, generati da sorgenti sismiche o da frane, sia da maremoti generati da sorgenti situate a grande distanza.

Tra gli eventi che rappresentano il primo gruppo possiamo citare il maremoto del 4 febbraio 1169, l'evento dell'11 gennaio 1693 e quello del 28 dicembre 1908, mentre tra quelli generati a grande distanza il più importante è stato il maremoto generato dal terremoto del 365 d.C. nell'Arco Ellenico Occidentale ( $M_w = 8.3$ ), Figura 18.

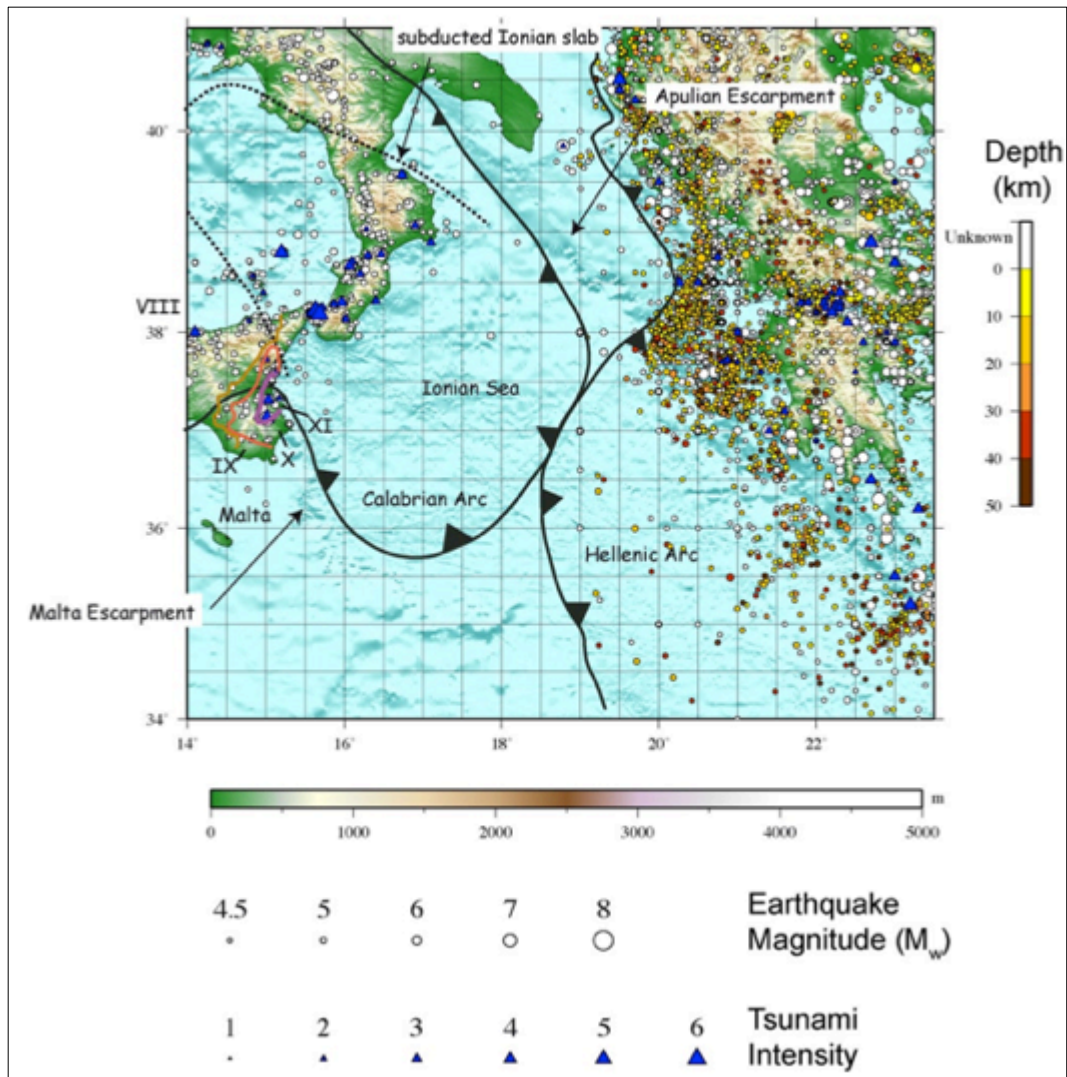


Figura 18: Terremoti (cerchi) e maremoti (triangoli) che si sono verificati nella zona ionica con relativa scala di intensità.

I maremoti del 1693 e del 1908 risultano essere gli eventi che hanno avuto maggiore impatto sulle coste siracusane. Le cause di questi eventi sono ancora fonte di dibattito poiché le evidenze macrosismiche e i racconti riguardanti i maremoti non trovano un riscontro univoco nelle sorgenti finora proposte. Possiamo citare il caso del 1693 dove negli anni sono stati suggeriti differenti

modelli di faglia e modelli di frane:

- faglie costituite da sorgenti distensive individuate in mare aperto in corrispondenza della scarpata Ibleo-Maltese (Bianca et al., 1999; Zollo et al., 1999; Argnani et al., 2012);
- faglia posta prevalentemente sulla terraferma ma con una (supposta) estensione non trascurabile in mare aperto, in corrispondenza del graben di Scordia-Lentini (D'Addezio e Valensise, 1991);
- faglie costituite da un certo numero di sorgenti poste completamente sulla terraferma (Sirovich e Pettenati, 1999; Sirovich e Pettenati, 2001; Valensise e Pantosti, 2001; Pettenati et al., 2003);
- in più sono stati presi in esame anche tutti i possibili corpi franosi, lungo la Scarpata Iblea-Maltese per la generazione del maremoto (Gutscher et al., 2006; Argnani et al., 2012).

Gli effetti dei maremoti elencati precedentemente provengono principalmente da testimonianze storiche e molte di queste sono state raccolte nell'articolo di Guidoboni, e Comastri (2005).

Per quanto riguarda l'evento del 365 d.C. sappiamo che il maremoto generato colpì molte coste del sud Italia, tra cui Siracusa (Stiros, 2001; Guidoboni e Comastri, 2005; Shaw et al., 2008).

Per il maremoto del 1169, Guidoboni e Comastri (2005) riportano testimonianze di ritiro del mare e di inondazione sulle coste della città di Catania fino alla foce del fiume Simeto, posizionato a sud della spiaggia di Catania.

L'evento del 1693 si apprende dalle fonti (Tinti et al., 2004) che si è abbattuto principalmente sulla zona di Augusta. L'area maggiormente interessata si estese da Catania a Siracusa, con effetti registrati anche sulle coste meridionali della Calabria e sullo Stretto di Messina.

Il maremoto ha colpito le città di Augusta e Siracusa dopo circa 4-5 minuti il verificarsi del sisma, mentre dopo circa 10 minuti è arrivato nella città di Catania. I picchi delle onde che hanno colpito le coste di Catania e Siracusa furono al di sotto dei 3 m, mentre quelli ad Augusta hanno raggiunto i 6-7 m.

Le fonti storiche riguardanti l'evento del 28 Dicembre 1908 (Platania, 1909) riferiscono che a Siracusa, circa 10 minuti dopo il terremoto, fu notato un primo abbassamento delle acque, seguito da un innalzamento e poi da un nuovo abbassamento che lasciò a secco molte barche nel Canale Grande. L'altezza massima dell'onda fu di 1,60 m, in un punto dove il mare era profondo 2,45 m, e fu misurata dalle tracce lasciate sui piloni del ponte di questo canale. Nell'antico cantiere di S. Lucia l'altezza dell'onda fu di circa 70 cm e secondo la Capitaneria di Porto il maremoto "avvenne quasi contemporaneamente al terremoto e diede luogo a un'onda dall'altezza di circa 2 m sul livello del mare la quale coprì il ciglio della banchina".

Secondo il Monsignor Pasquale Magnano, durante la celebrazione del centenario dell'evento, "nessun abitante né alcun edificio di Siracusa subì un qualsivoglia danno dal terremoto: ci fu soltanto una paurosa, ma grazie a Dio, innocua inondazione delle due piazze (Poste e Pancali) che si affacciano sulla darsena che congiunge i due porti della città. Lì il maremoto si arrestò e il pericolo cessò".

Durante la field survey a Siracusa abbiamo incontrato il Mons. Mangnano che ci ha confermato quanto riportato senza riuscire a fornirci alcuna referenza, inoltre si racconta che l'inondazione sia arrivata fino al tempio di Apollo, triangolo azzurro nella Figura 19, posto ad una quota superiore ai 3 m.



**Figura 19:** Il tondino rosso indica la posizione della cella votiva nel piazzale delle Poste che ricorda l'inondazione del 28 Dicembre 1908. Il triangolo azzurro invece indica la zona del Tempio di Apollo dove è arrivata l'inondazione.

Dalle fonti storiche si evince che il maremoto non causò danni particolari, e ciò fu attribuito, dalla popolazione locale, alla protezione di Santa Lucia. Da ciò la presenza di molti riferimenti iconografici della Santa sparsi per la città. In particolare, sulla piazza delle Poste è stata collocata una cella votiva che oltre a ricordare l'evento segna anche l'altezza dell'inondazione raggiunta, Figure 20 e 21.



**Figura 50: celletta votiva di Santa Lucia, situata nel piazzale delle Poste a Siracusa.**



Figura 21: Targa collocata sotto la cella votiva che ricorda il terremoto ed il maremoto del 1908. La base dell'incisione dovrebbe indicare l'altezza massima raggiunta dall'acqua.

Secondo alcuni studi condotti in questa zona, Tonini et al., 2011, e i resoconti dei terremoti storici possiamo ipotizzare che l'elevazione massima raggiungibile da un maremoto nella zona di Siracusa sia inferiore ai 5 m. Utilizzeremo quindi questo valore per calcolare la massima zona inondata e la colonna d'acqua.

## 4.2 Obiettivo del lavoro

La zona presa in esame, per lo studio della vulnerabilità, è stata quella del Golfo di Siracusa, e tale lavoro è stato affrontato seguendo 4 fasi principali:

- selezione degli edifici situati al di sotto della soglia di 5 m;
- analisi di vulnerabilità con il metodo SCHEMA e con il metodo PTVA-3;
- convalida dei dati mediante “field survey” a Siracusa;
- calcolo dei livelli di danno per un'inondazione di 5 m subita dalla città;
- analisi e confronto dei risultati ottenuti.

### **4.3 Strumenti utilizzati e spedizione a Siracusa**

Gli strumenti utilizzati durante il periodo di lavoro sono stati:

- mappe CTR (Carta Tematica Regionale, 1:10000) e CTN (Carta Tematica Numerica, 1:2000), digitali e cartacee, dalle quali si sono evidenziate tutte le unità che presentavano un'elevazione inferiore ai 5 m. Le mappe digitali sono state fornite gratuitamente dal Dipartimento Urbanistica Area 2 Interdipartimentale dell'Assessorato Regionale del Territorio e Ambiente;
- immagini satellitari, in particolare di Google Earth, e immagini del database Google Earth consultabile mediante la modalità StreetView, che hanno permesso una prima classificazione delle strutture edilizie dalla postazione in laboratorio. Le immagini satellitari prese in considerazione durante il lavoro erano datate 9/11/2011, mentre le immagini visualizzate in modalità Street View facevano riferimento al 3/2009, 2/2010, 10/2010 e soprattutto al 7/2012.

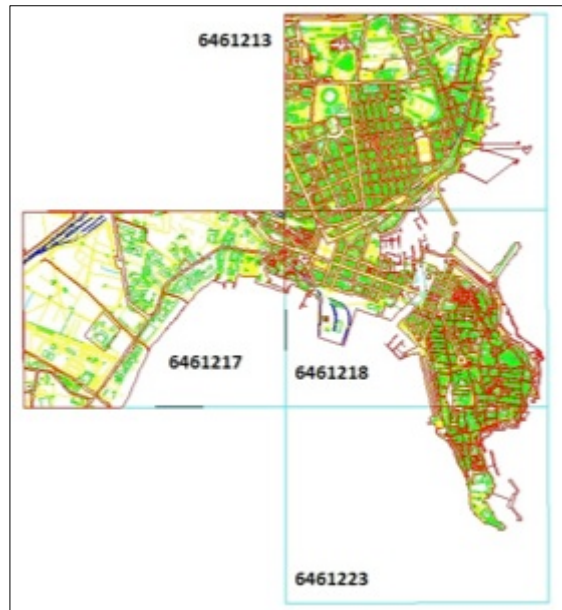
#### **4.3.1 Carte tematiche numeriche (CTN)**

Con la sigla CTN (carta tematica numerica) si intende una *cartografia numerica* ottenuta da strumentazione topografica informatizzata. Ogni CTN contiene un insieme organizzato di informazioni costituite da dati numerici (coordinate cartografiche E, N, Q o geografiche) e alfanumerici (attributi codificati), organizzati con opportune strutture logiche (detti database cartografici e abbreviati con la sigla DB) e memorizzati in modo tale da poter essere trattati dal computer. L'unità di riferimento per la memorizzazione dei dati numerici è il "foglio". I fogli utilizzati in questo lavoro sono a scala 1:2.000 ed il sistema di riferimento delle coordinate è il sistema Gauss-Boaga, nel fuso Est.

Qui sono stati utilizzati 4 fogli (Figura 22), 6461213, 6161217, 6161218 e 6461223, che comprendono l'isola di Ortigia, parte della città di Siracusa e l'area industriale ad ovest della città.



Ogni foglio contiene 5 tipologie di strutture (shape): Annotation, Point, Polyline, Polygon e Multipath. La struttura che ci interessa, poiché descrive gli edifici, è quella denominata “POLYLINE” e contiene entità lineari che possono avere il primo e l'ultimo punto coincidenti al contrario delle entità areali (POLYGON) che devono avere il primo e ultimo punto coincidenti.



**Figura 22: Rappresentazione delle carte tematiche numeriche 1:2000 utilizzate per la città di Siracusa.**

Lo shape “Polyline” è suddiviso in strati informativi e per la realizzazione della cartografia a scala 1:2000 sono stati previsti i seguenti strati:

- A Sistema delle comunicazioni;
- B Edificato ed altre strutture;
- C Acque;
- D Strutture connesse alla produzione e trasporto di energia;
- E Elementi divisorii e di sostegno;
- F Morfologia;
- G Vegetazione;
- H Orografia;
- I Limiti amministrativi e varie;

- L Toponimi;
- M Punti di inquadramento.

Ogni elemento (entità) dello shape (Figura 23) è riconosciuto univocamente mediante un codice-attributo (chiave) chiamato *handle*, mentre gli altri attributi ne definiscono le caratteristiche cartografiche. In questo lavoro gli attributi utilizzati sono stati il *layer*, che raggruppa le entità per affinità logiche, e l'attributo *elevation*, che definisce la quota a terra e in particolare per gli edifici rappresenta la quota media del terreno tale da potere essere considerata di riferimento a tutta l'unità volumetrica.

ID	Shape	Entity	Handle	Layer	LyrStrat	LyrLock	LyrVis	LyrVisTrn	LyrHandle	Color	FillColor	LyrColor	BlkColor	Linetype	FontType	LyrType	BlkLinetype	Elevation
1	Polyline 2	Polyline	794	A020	0	0	1	0	17C	11	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.384
2	Polyline 2	Polyline	796	B040000	0	0	1	0	20E	7	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.381
3	Polyline 2	Polyline	798	B005	0	0	1	0	12A	3	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.524
4	Polyline 2	Insert	745	B17	0	0	1	0	15B	1	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.524
5	Polyline 2	Insert	746	B79	0	0	1	0	15C	1	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.524
6	Polyline 2	Polyline	747	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.422
7	Polyline 2	Polyline	799	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.377
8	Polyline 2	Polyline	796	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.351
9	Polyline 2	Polyline	797	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.444
10	Polyline 2	Polyline	798	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.377
11	Polyline 2	Polyline	794	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.448
12	Polyline 2	Polyline	799	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.422
13	Polyline 2	Polyline	807	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.593
14	Polyline 2	Polyline	813	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.393
15	Polyline 2	Polyline	814	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.544
16	Polyline 2	Polyline	820	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.481
17	Polyline 2	Polyline	827	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.373
18	Polyline 2	Polyline	832	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.373
19	Polyline 2	Polyline	838	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.348
20	Polyline 2	Polyline	842	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.328
21	Polyline 2	Polyline	843	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.544
22	Polyline 2	Polyline	855	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.495
23	Polyline 2	Polyline	856	A021	0	0	1	0	09	5	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.324
24	Polyline 2	Polyline	866	F001	0	0	1	0	18B	2	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.593
25	Polyline 2	Polyline	88C	F001	0	0	1	0	18B	2	-1	0	0	CONTINUOUS	CONTINUOUS	CONTINUOUS	0	4.388

Figura 23: Esempio dello shape “Polyline”. Le righe identificano le entità mentre nelle colonne troviamo gli attributi. La chiave che identifica univocamente l’entità è l’“handle”, gli attributi utilizzati in questo lavoro sono il “layer” e l’“elevation”.

Il primo step per semplificare il lavoro è stato quello di selezionare, dal DB della struttura “POLYLINE” di ogni foglio, le entità con una quota uguale o minore a 5 m, Figura 24. Nelle Figure 25-27 possiamo vedere le entità raggruppate per strato informativo.



**Figura 24:** Selezione delle entità con una “elevation” minore o uguale a 5 m per il foglio 6161218.



**Figura 25:** Selezione delle entità con una “elevation” minore o uguale a 5 m appartenenti al layer A (Sistema delle Comunicazioni) per il foglio 6161218.



Figura 26: Selezione delle entità con una “elevation” minore o uguale a 5 m appartenenti al layer B (Edificato ed altre strutture) per il foglio 6161218.



Figura 27: Selezione delle entità con una “elevation” minore o uguale a 5 m appartenenti al layer C (Acque) in azzurro, al layer D (Strutture connesse alla produzione e trasporto di energia) in marrone, al layer E (Elementi divisori e di sostegno) in viola, al layer F (Morfologia) in arancione e al layer G (Vegetazione) in verde per il foglio 6161218.

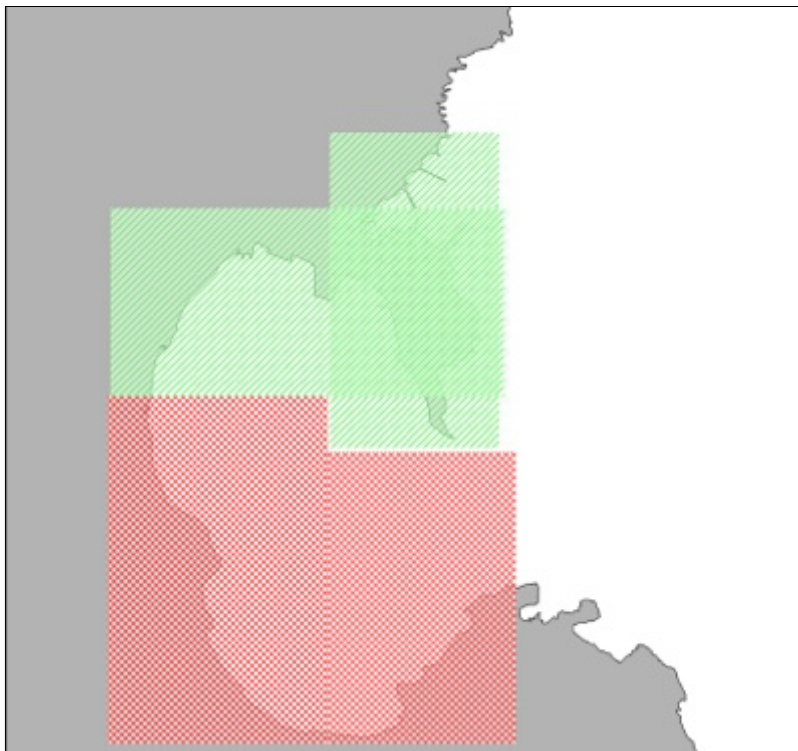
Per la classificazione degli edifici il layer che ci interessa in modo particolare è stato quello identificato con la lettera B (Edificato ed altre strutture), il quale suddivide ulteriormente gli edifici. Nella Tabella 7 possiamo vedere per ogni gruppo il codice alfanumerico identificativo, una descrizione sintetica e quante strutture con una quota uguale od inferiore a 5m sono presenti in ogni foglio.

<b>Codice</b>	<b>Descrizione</b>	<b>213</b>	<b>217</b>	<b>218</b>	<b>223</b>	<b>Totale</b>
<b>B001</b>	Unità Volumetrica civile Unità volumetrica sociale Unità volumetrica amministrativa	527	145	1370	6	2048
<b>B002</b>	Unità Volumetrica industriale Unità volumetrica commerciale Capannone	2	171	2	0	175
<b>B003</b>	Unità volumetrica di culto Campanile Tabernacolo rappresentabile	3	0	14	0	17
<b>B004</b>	Edificio in costruzione	0	1		0	1
<b>B005</b>	Rudere	1	20	10	0	31
<b>B006</b>	Baracca – edicola	17	117	28	0	162
<b>B007</b>	Tettoia, pensilina	11	119	71	1	202
<b>B009</b>	Centrale elettrica, cabina elettrica	0	19	6	0	25
<b>B010</b>	Serra stabile	0	2	0	0	2
<b>B012</b>	Gradinata	2	0	6	0	8
<b>B015</b>	Complesso sportivo	0	0	0	0	0
<b>B017</b>	Complesso scolastico	0	1	1	0	2
<b>B018</b>	Complesso religioso	0	0	5	0	5
<b>B019</b>	Complesso sociale	0	0	4	0	4
<b>B020</b>	Linee proprie degli impianti sportivi	0	15	21	0	36
<b>B021</b>	Torre, ciminiera, silos	0	1	5	0	6
<b>B022</b>	Croce isolata, tabernacolo	0	0	0	0	0
<b>B023</b>	Monumento	0	0	4	2	6
<b>B025</b>	Rampa	0	0	0	2	2
<b>B026</b>	Isolato	39	29	113	6	187
<b>Totale</b>		602	486	1660	17	

Tabella 7: Nella tabella sono indicati per ogni foglio (identificato con le ultime tre cifre), il numero di strutture appartenenti ad ogni gruppo del layer B con quota uguale o inferiore a 5m. La prima colonna contiene il codice di ogni gruppo, la seconda una descrizione sintetica del gruppo, dalla terza alla sesta colonna la suddivisione per foglio mentre l'ultima il numero totale di strutture appartenenti ad ogni gruppo. Per isolato si intende un'area urbana racchiusa completamente da strade di pubblico transito e pertanto delimitato di norma dalle aree viarie. Un isolato può contenere più strutture appartenenti ad altri gruppi.

### 4.3.2 Individuazione delle strutture nella zona sud del golfo di Siracusa

L'area del golfo di Siracusa è stata suddivisa in due zone, Figura 28. Questa divisione è stata eseguita perché per la *zona verde*, che va da dalla zona industriale, a ovest dell'isola di Ortigia, fino alla zona nord-est dell'isola stessa, eravamo in possesso di mappe CTR e CTN digitali. Invece per la *zona rossa*, che comprende la zona a sud del golfo, avevamo solo delle mappe CTR in formato .TIFF e georeferenziate.



**Figura 28: Suddivisione del golfo di Siracusa dovuta alla presenza di mappe CTR digitali (zona verde) e mappe CTR non digitali (zona rossa) per l'individuazione e selezione delle strutture edilizie.**

L'individuazione delle strutture della zona di villeggiatura (zona rossa), posizionate nell'area a sud dell'isola di Ortigia, è stato eseguito tramite un confronto tra la mappa CTR in formato .TIFF e le immagini satellitari di Google Earth. Sono state selezionate tutte quelle strutture presenti tra la costa e la linea topografica dei 10 m, Figura 29 e Figura 30. Chiaramente la nostra scelta sovrastima la zona di inondazione scelta precedentemente (5 m) ma sulla mappa

era disegnata solo la linea topografica dei 10 m. Era quindi molto complicato individuare quali strutture erano posizionate dentro la quota dei 5 m.



Figura 29: Mapa CTR in formato .TIFF dalla quale sono state selezionate le strutture nella zona di villeggiatura. La linea rossa indica la distanza della linea topografica dei 10m dalla costa.

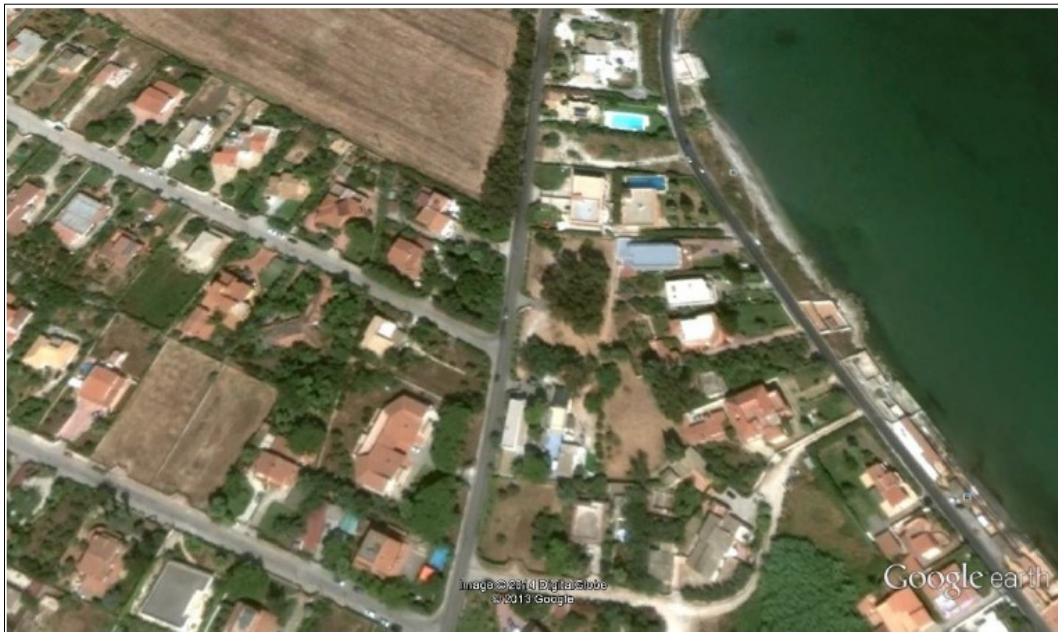


Figura 30: Esempio di immagine satellitare da Google Earth utilizzata per il confronto con la mappa CTR in formato .TIFF (Figura 29).

Oltre a quelle selezionate con i criteri menzionati sopra, sono state aggiunte anche quelle strutture che per una questione di posizione potessero avere un'importanza

rilevante nel nostro lavoro, come i blocchi di edifici selezionati nell'isola di Ortigia situati davanti al mare, nonostante non presentassero l'elevazione desiderata, Figura 31.



**Figura 31: Esempio di edifici selezionati per la loro posizione particolare nonostante la loro elevazione fosse al di sopra dei 5 m.**

In più è stato effettuato un rilevamento diretto a Siracusa, dove con l'aiuto della Protezione Civile e in particolare dell'Arch. Giuseppe Marziano, si è potuto classificare in loco un determinato numero di strutture con una precisione e un dettaglio maggiore rispetto alla classificazione effettuata dalla postazione in laboratorio. In più sono state ottenute informazioni che solo un'indagine in loco ha reso possibile, come per esempio la presenza di strutture temporanee non rilevabili dalle immagini satellitari oppure informazioni sulle caratteristiche strutturali degli edifici presi in considerazione.

Questa procedura di individuazione e selezione delle strutture da classificare si è rivelata basilare per entrambe le metodologie utilizzate.



## 4.4 Analisi di Vulnerabilità

I modelli presi in esame per lo studio della vulnerabilità sono stati due:

- quello utilizzato nel progetto SCHEMA (SCenarios for Hazard-induced Emergencies Management)
- PTVA-3 (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment, version 3)

Si è scelto di utilizzare due modelli al fine di comprendere le differenze e le analogie di due approcci diversi alla classificazione di vulnerabilità.

Per svolgere l'analisi di vulnerabilità sul nostro sito campione sono state eseguite alcune doverose assunzioni, sia per adattare i modelli utilizzati alle strutture presenti nella città di Siracusa, sia per rendere più semplice e scorrevole il lavoro di classificazione delle strutture. Per alcune di esse la classificazione è stata eseguita soltanto mediante l'analisi di immagini dall'alto, utilizzando l'applicazione Google Earth, insieme al "*Documento dei contenuti e dei codici per la cartografia numerica alla scala 1:2000*" fornito dal S.I.T.R. (Sistema Informativo Territoriale Regionale), che dava una sorta di catalogazione catastale delle strutture nell'area siracusana. Per l'analisi della maggior parte delle strutture si è fatto uso della modalità Street View che ha permesso uno studio quasi diretto. Prima di tutto è stata eseguita una semplificazione delle classi nella metodologia utilizzata in SCHEMA, con le quali catalogare le varie strutture. Infatti per la città di Siracusa sono state prese in considerazione solo le classi principali:

- classe A, per strutture leggere, come tendoni, silos e baracche. Dal documento del S.I.T.R. gli edifici appartenenti a questa classe presentano il codice layer B006, B007 e B021, Figura 32;
- classe B, per strutture in muratura, come depositi o cabine elettriche. Dal documento del S.I.T.R. gli edifici appartenenti a questa classe presentano il codice layer B009, Figura 33;
- classe C, per strutture resistenti, ma non in cemento armato, presenti soprattutto nell'isola di Ortigia e nella zona industriale. Dal documento del

S.I.T.R. gli edifici appartenenti a questa classe presentano il codice layer B001, B002, B004, B005 e B026, Figura 34;

- classe D, per edifici di costruzione non recente (anni '50 e '60) come quelli presenti nella zona di villeggiatura o i blocchi di edifici che comprendevano l'intero isolato. Dal documento del S.I.T.R. gli edifici appartenenti a questa classe presentano il codice layer B001 e B026, Figura 35;
- classe E, per edifici residenziali di grandi dimensioni a più piani o scuole. Dal documento del S.I.T.R. gli edifici appartenenti a questa classe presentano il codice layer B001 e B017, Figura 36;
- classe G, per strutture amministrative, culturali o religiose, come chiese, siti archeologici o la sede della guardia costiera. Dal documento del S.I.T.R. gli edifici appartenenti a questa classe presentano il codice layer B001 e B023, Figura 37.



Figura 32: Struttura di classe A.



**Figura 33: Struttura di classe B.**



**Figura 34: Struttura di classe C.**



**Figura 35: Struttura di classe D.**



**Figura 36: Struttura di classe E.**



**Figura 37: Struttura di classe G.**

Quando gli edifici erano talmente compatti da sembrare un singolo agglomerato di strutture, è stata eseguita un'analisi a blocchi, considerando una stessa tipologia di edificio all'interno del blocco, Figura 38. Quando all'interno del blocco si presentava una struttura completamente diversa da quella con la quale è stato classificato l'intero blocco, si è proceduto a classificare, separatamente, anche quel singolo edificio.



**Figura 38: Esempio di agglomerato di edifici sul quale è stata eseguita un'analisi a blocchi.**

In totale per il golfo di Siracusa sono state classificate 1492 strutture ripartite nel seguente modo, Tabella 8 e Figure 39-40-41:

Classe di vulnerabilità/ numero di edifici in ogni foglio- zona	Zona sud del Golfo	Foglio 6461213	Foglio 6461217	Foglio 6461218	Foglio 646123	Totale per ogni classe
<b>A</b>	7	21	216	88	2	334 (21%)
<b>B</b>	12	0	8	3	0	23 (2%)
<b>C</b>	5	0	308	12	28	353 (24%)
<b>D</b>	355	85	1	282	1	724 (49%)
<b>E</b>	1	21	0	21	1	44 (3%)
<b>G</b>	0	1	0	11	2	14 (1%)
<b>Totale</b>	380	128	533	417	34	1492

Tabella 8: La tabella ripartisce il numero di strutture individuate e classificate, tramite il metodo utilizzato in SCHEMA, per ogni zona del golfo di Siracusa.

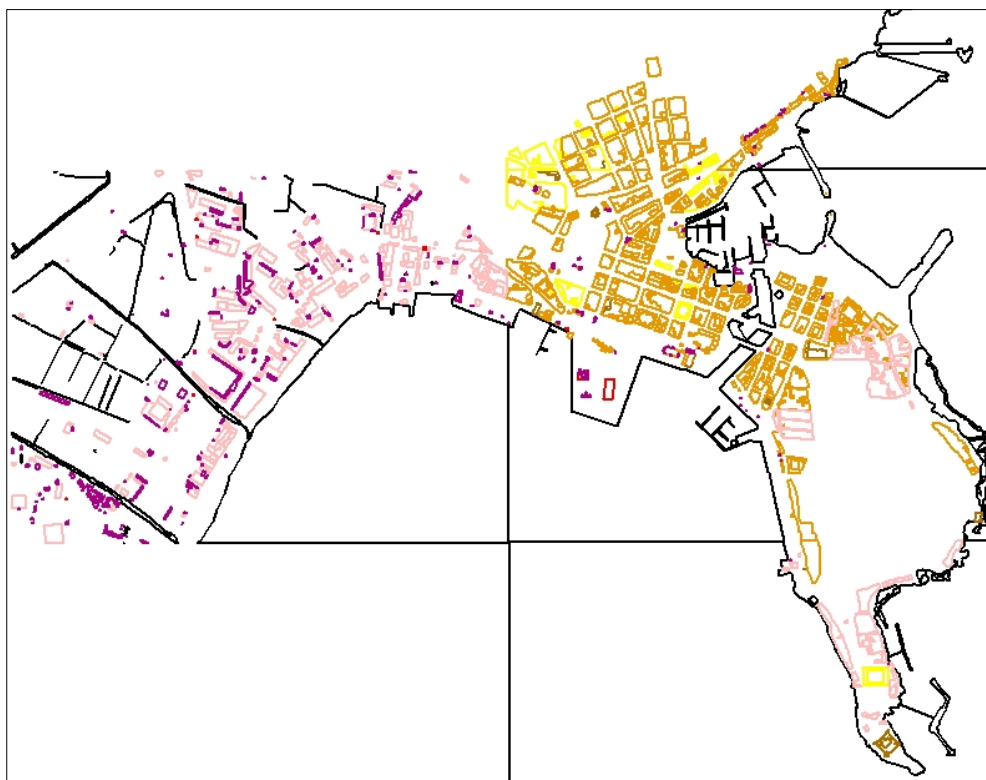
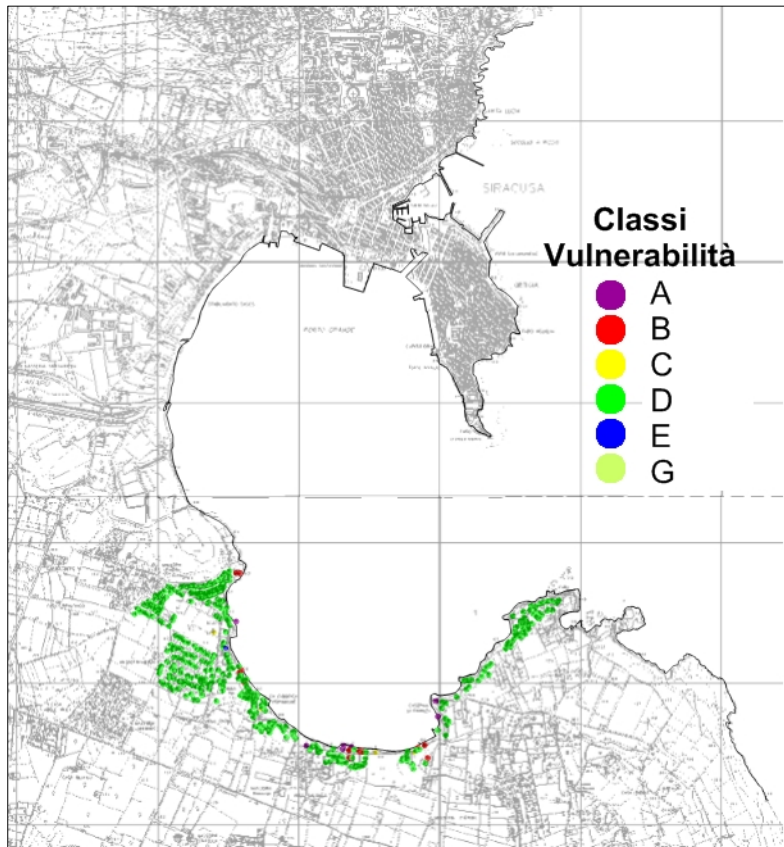
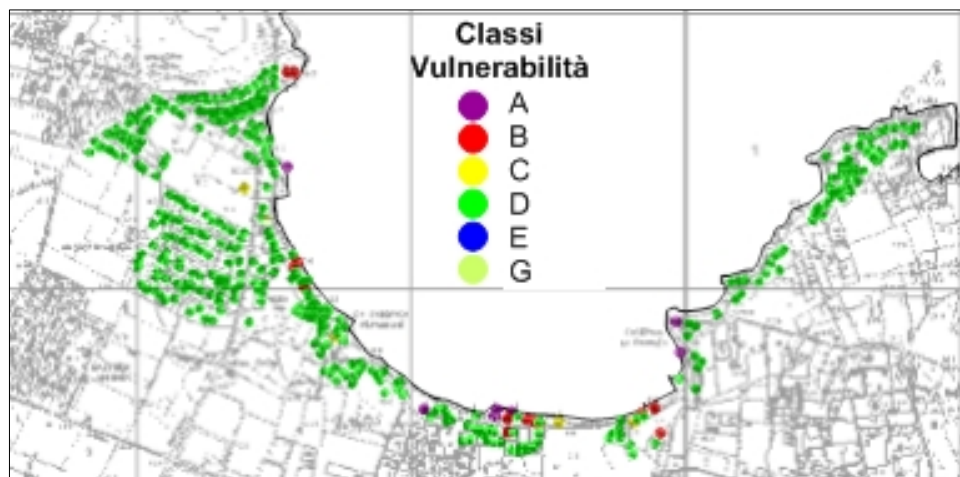


Figura 39: La figura mostra la classificazione delle strutture nel golfo di Siracusa: classe A (viola), classe B (rosso), classe C (rosa), classe D (oro), classe E (giallo) e classe G (marrone).



**Figura 40:** La figura mostra la classificazione delle strutture nella zona di villeggiatura a sud del golfo di Siracusa.



**Figura 41:** Zoom sulla zona di villeggiatura nella parte sud del golfo di Siracusa.

Per la valutazione della vulnerabilità secondo la metodologia adottata in SCHEMA, è sufficiente un'analisi visiva delle strutture.

Al contrario, il metodo PTVA-3 richiede un'analisi più accurata al fine di determinare il valore di tutti gli attributi.

Come indicato nel Capitolo 3, l'indicatore con il quale poter confrontare i dati ottenuti dalla classificazione di vulnerabilità del modello SCHEMA è il Bv, Tabella 9, che caratterizza proprio la vulnerabilità fisica dell'edificio. Il Bv è dato da:

$$Bv(-1, +1) = \frac{1}{423}(100 \cdot s + 80 \cdot m + 63 \cdot g + 60 \cdot f + 51 \cdot mo + 46 \cdot so + 23 \cdot pc)$$

I risultati ottenuti sono poi convertiti in una scala da 1 (meno vulnerabile) a 5 (più vulnerabile).

Per il calcolo di quest'indicatore, bisogna associare alla struttura da classificare un certo numero di attributi, per la precisione sette, che sono: il n° di piani della struttura (s), il materiale di costruzione (m), l'idrodinamica del piano terra (g), la profondità delle fondamenta (f), forma e orientazione dell'edificio (so), gli oggetti in movimento che possono essere presenti nei dintorni (mo) e le condizioni di conservazione (pc).

	-1	-0.5	0	(+0.25)	+0.5	(+0.75)	+1
<b>s</b> (number of stories)	more than 5 stories	4 stories	3 stories		2 stories		1 story
<b>m</b> (material)	reinforced concrete		double brick		single brick		timber
<b>g</b> (ground floor hydrodynamics)	100 % open plan	75 % open plan	50 % open plan		25 % open plan		not open plan
<b>f</b> (foundation strength)	deep pile foundation		average depth foundation				shallow foundation
<b>so</b> (shape and orientation)	high hydrodynamic shape		average hydrodynamic shape				poor hydrodynamic shape
<b>mo</b> (movable objects)			minimum risk of being damaged by movable objects	moderate risk of being damaged by movable objects	average risk of being damaged by movable objects	high risk of being damaged by movable objects	extreme risk of being damaged by movable objects
<b>pc</b> (preservation condition)	excellent	good	average		poor		very poor

Tabella 9: Tabella che mostra i vari attributi che influenzano la vulnerabilità fisica di un edificio (Bv) e i relativi punteggi da assegnare.

Le assunzioni fatte per la determinazione del valore degli attributi nell'analisi di vulnerabilità secondo il PTVA-3 sono state:



- Per gli attributi “mo” e “pc”, i valori da associare dipendevano, rispettivamente, dalla presenza di un parcheggio o di un molo nelle vicinanze della struttura e dalle condizioni di conservazione; quindi i valori oscillavano dal minimo al massimo a seconda della posizione e delle condizioni della struttura esaminata.
- All’attributo “f” è stato assegnato di default il valore 0 (media profondità) dato che difficilmente è possibile risalire, dalla sola analisi delle immagini, alla tipologia delle fondamenta. Eccezioni sono state fatte per gli edifici con codice layer B006, B007, e per quegli edifici che risultavano essere chiaramente temporanei, ai quali è stato associato il valore 1 (fondamenta superficiali o assenti). Al contrario è stato associato il valore -1 (fondamenta profonde) alle strutture a più piani, maggiori di tre, poiché si è ipotizzato dovessero avere delle fondamenta con maggiore profondità.
- Per tutte le strutture è stato associato un attributo “so” uguale 1, dal momento che quasi tutte sono strutture di pianta quadrata/rettangolare e quindi con una forma poco “idrodinamica” all’impatto con il flusso d’acqua. È stato associato il valore 0 solo al Pantheon, perché presenta una struttura circolare.
- L’attributo “g”, riguardante l’idrodinamica del piano terra, è stato assunto uguale a 0 quasi per tutte le strutture esaminate; ma per le strutture con codice layer B006 e B007 è stato assunto uguale a -1 (100% piano aperto) essendo definite come tettoie, pensiline e tendoni; inoltre per mura di cinta o castelli è stato assunto un valore di “g” uguale a 1 (nessun piano aperto).
- Per quanto riguarda gli attributi del numero di piani “s” e del materiale di costruzione “m”, essi oscillano dal più piccolo (-1) al più grande (+1), con passo di mezzo punto, in base alla struttura esaminata.

In conclusione, possiamo dire che l’associazione degli attributi s, m, g, è stata quella più semplice e oggettiva perché sono stati tutti attributi ricavabili abbastanza bene dall’analisi delle immagini in nostro possesso. Invece per gli altri è presente una componente fortemente soggettiva dovuta alle assunzioni fatte.

L'ultimo step necessario per la classificazione delle strutture è la visita in loco per la validazione delle assunzioni. Nel prossimo capitolo saranno mostrati i risultati della validazione e le variazioni che ne conseguono nella determinazione del livello di danno.

Considerando che il numero delle strutture analizzate è lo stesso ricavato per il metodo precedente (1492), i risultati ottenuti per il calcolo del Bv sono stati ripartiti nel seguente modo, Tabella 10 e Figure 42-43:

BV/ numero di edifici un ogni foglio- zona	Zona sud del Golfo	Foglio 6461213	Foglio 6461217	Foglio 6461218	Foglio 6461223	Totale per ogni classe
1	0	0	0	0	0	0 (0%)
2	0	16	0	17	0	33 (2%)
3	355	35	6	125	8	529 (35%)
4	16	59	390	206	25	696 (47%)
5	8	18	137	70	1	234 (16%)
<b>Totale</b>	379	128	533	418	34	1492

Tabella 10: La tabella mostra come sono state suddivise le strutture presenti nel golfo di Siracusa tramite l'indicatore Bv, ricavato con il metodo PTVA-3.

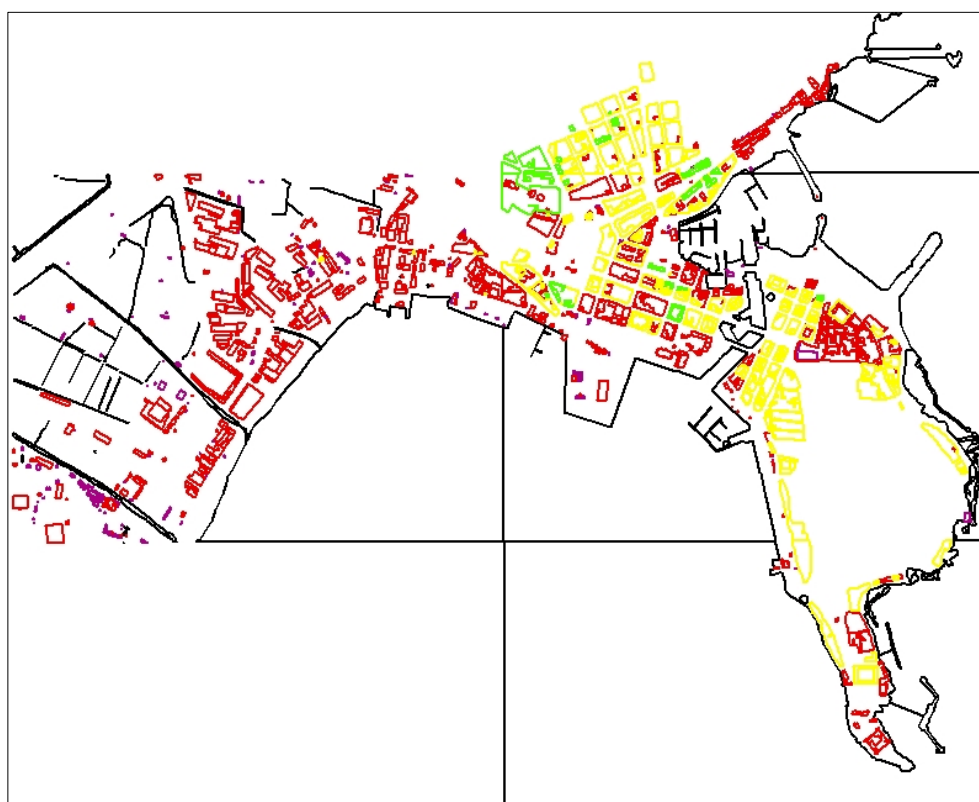
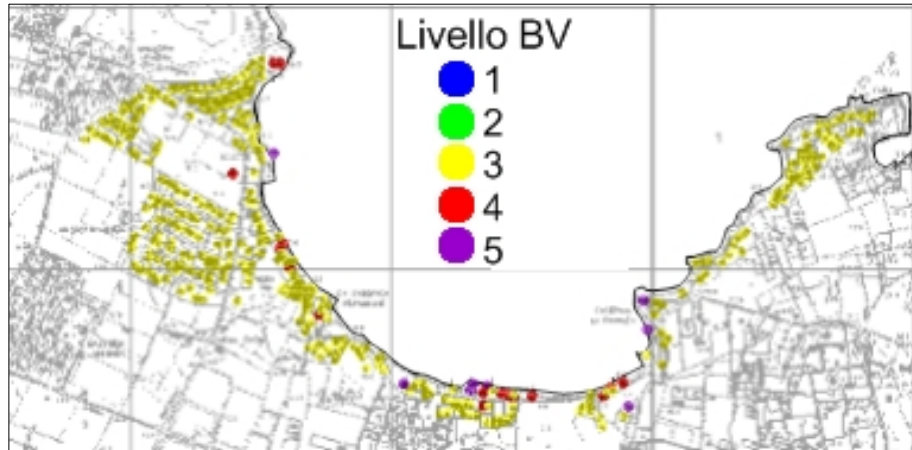


Figura 42: la figura mostra il livello dell'indicatore Bv per ogni struttura presente nel golfo di Siracusa: livello 2 (verde), livello 3 (giallo), livello 4 (rosso) e livello 5 (viola). Non sono presenti strutture con indicatore Bv di livello 1.



**Figura 43: Mappa che rappresenta il livello dell'indicatore Bv per la zona di villeggiatura nella zona sud del golfo di Siracusa.**

Dall'osservazione delle Figure 39 e 42 si può notare che tutto sommato la classificazione effettuata con SCHEMA e con l'indicatore Bv è sostanzialmente la stessa. Si osserva che l'isola di Ortigia è caratterizzata da strutture classificate con classe C e con indicatore Bv di livello 3; la zona residenziale è caratterizzata dalla classe D e Bv di livello 2 e 3; invece la zona industriale è per gran parte contraddistinta da strutture di classe C e A, e Bv di livello 4 e 5.

Da questa osservazione sono facilmente rilevabili le suddette zone caratterizzate dalla tipologia di strutture che le rappresentano.

Per quanto riguarda la zona di villeggiatura, Figura 41 e 43, si nota che la struttura maggiormente presente è quella di classe D, secondo SCHEMA, e quella con indicatore Bv di livello 3, per il PTVA-3. In più, i puntini sparsi di colore rosso o viola, mostrati da entrambe le figure, indicano la presenza di tendoni o strutture leggere (classe A-B e Bv di livello 4-5).



## **Capitolo 5: Analisi del danno e field survey a Siracusa**

### **5.1 Valutazione del danno delle strutture selezionate**

Questo capitolo presenta la valutazione del livello del danno sulle strutture calcolato con i due metodi: SCHEMA e PTVA-3.

Per determinare il danno un dato essenziale è il valore del flusso di acqua da associare ad ogni struttura. A questo proposito si è scelto di utilizzare il metodo chiamato “bath tube” già usato per il calcolo del danno nella città di Alessandria d’Egitto (Eckert et al., 2012). Questo metodo suppone di allagare uniformemente tutta l’area selezionata per lo studio di vulnerabilità. Il livello di inondazione, pari a 5 m, è stato scelto sulla base delle informazioni derivanti dall’analisi delle caratteristiche sismo-tettoniche dell’area, delle testimonianze del maremoto del 1908 e delle simulazioni numeriche proposte in Tonini et al., 2010.

Il flusso di acqua che colpisce ogni struttura è calcolato come la differenza tra il livello di inondazione (5 m) e la quota a terra (elevazione) di ogni struttura. Quest’ultimo dato è presente nel database dei CTN per gli edifici posizionati nella parte nord del golfo di Siracusa. Per la parte sud abbiamo ottenuto la quota di ogni edificio costruendo una griglia topografica a 40 m con i dati estratti dalle immagine raster (CTR 646160). A questo punto è stata assegnata l’elevazione del nodo di griglia più vicino all’edificio considerato.

#### **5.1.1 Metodo SCHEMA**

La metodologia utilizzata per la stima del danno in SCHEMA fa uso delle matrici di danno per determinare il livello di danneggiamento provocato da una data colonna d’acqua. Le matrici, ricavate dalle curve di fragilità e di danno, mettono in relazione una variabile continua (la colonna d’acqua) ed una discreta (il livello di danno), ricavando degli intervalli di valori per la profondità del flusso associati ad ogni classe di vulnerabilità, Tabella 11.

Questa tabella prende in considerazione le classi di vulnerabilità dalla A alla E per i motivi elencati nel capitolo 2.

La nostra classificazione di vulnerabilità presenta anche la tipologia di edifici contrassegnata dalla lettera G, quindi per stimare il livello di danno di queste strutture si è deciso di considerarle al pari degli edifici di classe D.

Livello di Danno	Valore più basso e più alto della profondità del flusso (m) per ogni tipologia di edificio				
	A	B	C	D	E1
<b>D0</b>	0	0	0	0	0
<b>D1</b>	0	0	0	0	0
	1.8	2	2.5	2	3
<b>D2</b>	1.8	2	2.5	2	3
	2.2	3	4	4.5	6
<b>D3</b>	2.2	3	4	4.5	6
	2.6	4	6	6.5	9.5
<b>D4</b>	2.6	4	6	6.5	9.5
	3.8	5	8	9	12.5
<b>D5</b>	> 3.8	> 5	> 8	> 9	> 12.5

Tabella 11: Matrice di danno per il metodo SCHEMA.

Livello di Danno	Tipologia di Danno	Zona sud del Golfo	Foglio 6461213	Foglio 6461217	Foglio 6461218	Foglio 6461223	Totale per ogni classe
<b>D0</b>	Nessun danno	345	6	19	55	28	453 (30%)
<b>D1</b>	Danno leggero	15	85	106	115	0	321 (21%)
<b>D2</b>	Danno importante	12	31	204	205	1	453 (30%)
<b>D3</b>	Danno pesante	4	2	38	19	4	67 (5%)
<b>D4</b>	Collasso parziale	2	3	152	15	0	172 (12%)
<b>D5</b>	Collasso totale	1	1	14	9	1	26 (2%)
<b>Totale</b>		379	128	533	418	34	1492

Tabella 12: Analisi del danno ottenuto con il metodo SCHEMA. I numeri presenti dalla colonna 3 alla 7 indicano quante strutture con un dato livello di danno ci sono in ogni zona-foglio. L'ultima colonna mostra il valore totale (percentuale) di strutture con un determinato livello di danno.

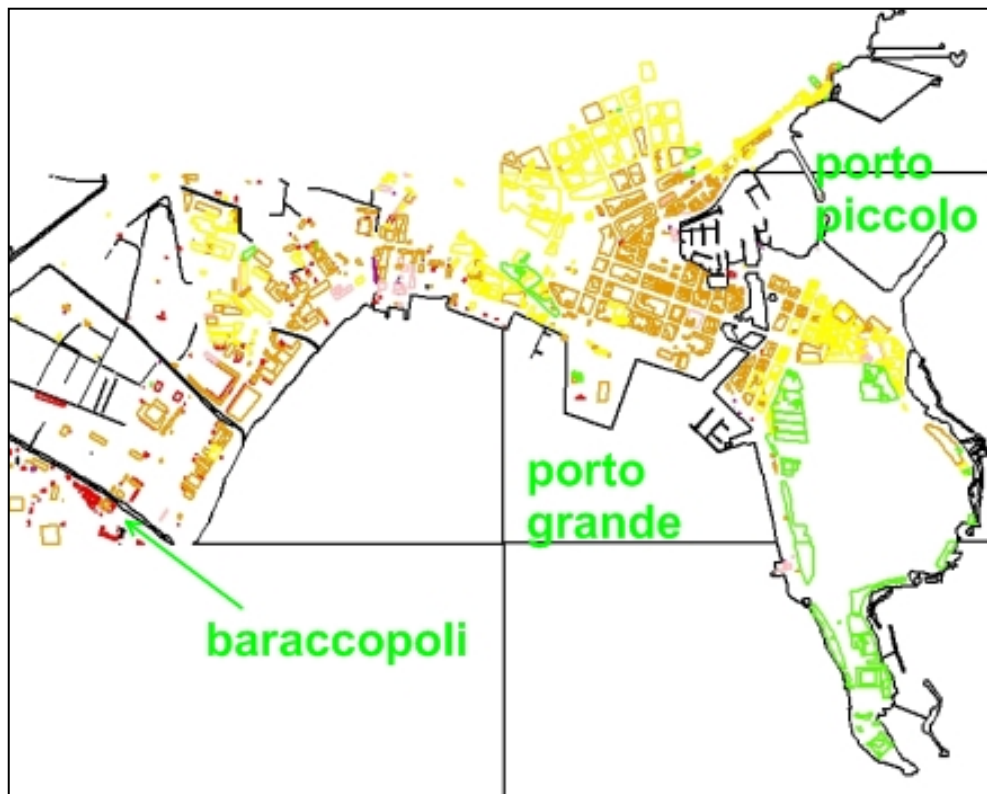


Figura 44: Mappa del danno nel golfo di Siracusa: livello D0 (verde), livello D1 (giallo), livello D2 (oro), livello D3 (rosa), livello D4 (rosso) e livello D5 (viola).

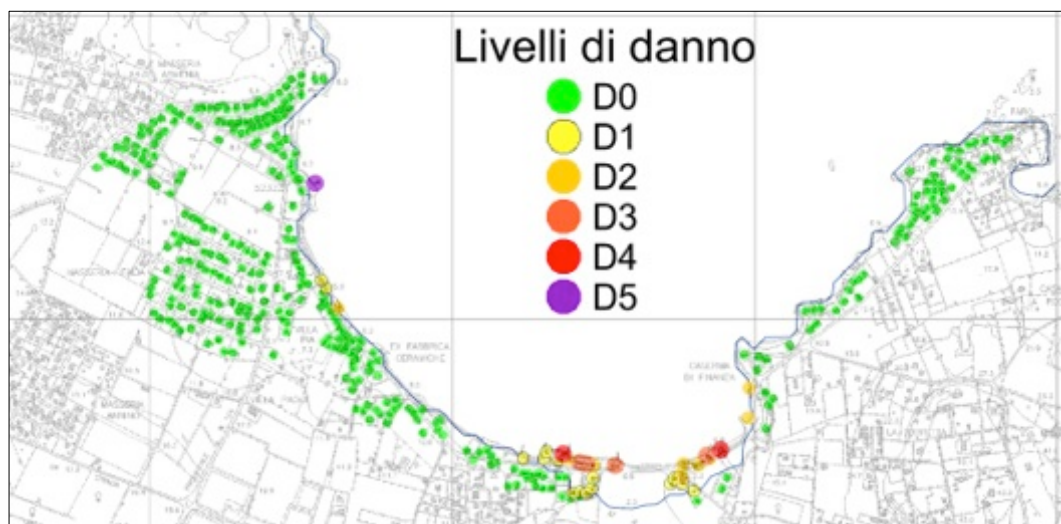


Figura 45: Mappa del danno nella zona di villeggiatura, a sud del golfo di Siracusa. La linea blu rappresenta la linea di inondazione dei 5 m.

Il livello di danno per ogni edificio così ottenuto è riassunto nella Tabella 12. Il 50% degli edifici classificati non subisce danno o subisce un danno leggero. Il valore totale degli edifici non danneggiati (453) è influenzato dal valore parziale (345) della zona sud del golfo di Siracusa. Qui sono stati classificati anche gli edifici con una quota da terra superiore ai 5 m; non avevamo i CTN e le immagini raster CTR mostrano solo la linea topografica dei 10 m. La conseguenza è che molte costruzioni non sono colpite da alcuna inondazione come si può vedere nella Figura 45 (la linea blu indica la linea topografica dei 5 m). Gli edifici posizionati nell'area inondata sono solo 34.

La scelta di un livello di inondazione uguale a 5 m impone che solo gli edifici più vulnerabili (classe A e B), vedi Tabella 11, possano subire un collasso parziale (D4) o totale (D5). La zona dove gli edifici subiscono un livello di danno più importante è quella identificata dal foglio 6461217, dove è presente una baraccopoli costituita da container abusivi in prossimità del fiume Ciane e dove sono presenti anche numerose strutture mobili (classe A) collocate in prossimità dei capannoni nella zona industriale.

Le zone meno danneggiate (Figure 44 e 45), colore giallo (D1) e verde (D0), risultano essere l'area più interna della città (foglio 6461213), l'isola di Ortigia (foglio 6461218 e 6461223) e la zona sud del golfo (zona di villeggiatura).

Il risultato ottenuto per l'area più interna della città è giustificabile sia perché è una zona prevalentemente di palazzi o blocchi di edifici di recente costruzione sia per la loro quota topografica.

Le strutture presenti nell'isola di Ortigia sono invece situate su un tratto di costa talmente elevato ( $> 5$  m) che nonostante le loro non ottimali condizioni di conservazione e la loro vicinanza al mare risultano essere non danneggiate.

Per la maggior parte delle strutture presenti nella zona sud del golfo il risultato è giustificabile dal fatto che si trovano su un tratto di costa elevato ( $> 5$  m), tranne una piccola area dove si ha una concentrazione di strutture (due ristoranti, tendoni adibiti alla vendita di prodotti ittici e un piccolo molo) che subiscono danni consistenti, Figura 45.



### 5.1.2 Metodo PTVA-3

Il PTVA-3 esprime il livello di danno mediante il parametro RVI. Ricordiamo qui di seguito come si ricava l'indicatore RVI:

$$RVI(1, 5) = \frac{2}{3}SV + \frac{1}{3}WV$$

dove:

$$WV(0, 1) = \frac{n^{\circ} \text{ di piani inondati}}{n^{\circ} \text{ totale di piani}}$$

$$SV(1, 125) = Bv \cdot Ex \cdot Prot$$

con WV si indica la vulnerabilità dell'edificio dovuta all'intrusione dell'acqua al suo interno e SV la vulnerabilità strutturale dell'edificio dovuta alle forze idrodinamiche orizzontali del flusso d'acqua. Quest'ultima è data dal prodotto della Building vulnerability (Bv), dell'Exposure (Ex) e del Protection factor (Prot).

	0	+0.25	+0.5	+0.75	+1
<i>Prot.br</i> (building row)	>10th	7-8-9-10th	4-5-6th	2nd-3rd	1st
<i>Prot.nb</i> (natural barriers)	very high protection	high protection	average protection	moderate protection	no protection
<i>Prot.sw</i> (seawall height and shape)	vertical and >5 m	vertical and 3 to 5 m	vertical and 1.5 to 3 m	vertical and 0 to 1.5 m OR sloped and 1.5 to 3 m	sloped and 0 to 1.5 m OR no seawall
<i>Prot.w</i> (brick wall around building)	height of the wall is from 80% to 100% of the water depth	height of the wall is from 60% to 80% of the water depth	height of the wall is from 40% to 60% of the water depth	height of the wall is from 20% to 40% of the water depth	height of the wall is from 0% to 20% of the water depth

**Tabella 13: Tabella che mostra i vari Protection factors (Prot) di un edificio e i relativi punteggi da assegnare.**

Per determinare gli attributi riguardanti l'indicatore Prot (protection factor), Tabella 13, e l'indicatore WV sono state fatte le seguenti assunzioni:

- a Prot\_sw è stato dato il valore +1 in tutti i casi poiché dalle immagini non era evidente la presenza di dighe o barriere frangiflutti;
- il Prot\_w non è stato determinato e quindi è stato assunto uguale a +1;
- l'indicatore WV è stato calcolato considerando che l'altezza media di ogni piano fosse pari a 2,5 m, quindi si è assunto che ogni piano risultasse allagato in presenza di un livello d'acqua superiore o uguale ai 20 cm. Il piano terra risulta allagato se la colonna d'acqua supera la soglia dei 20 cm mentre il secondo richiede un valore superiore ai 2,70 m.

Si è potuto quindi procedere al calcolo dei valori dell'RVI e in base ai risultati ottenuti si possono distinguere cinque livelli:

- da 1 a 1.8 MINOR
- da 1.8 a 2.6 MODERATE
- da 2.6 a 3.4 AVERAGE
- da 3.4 a 4.2 HIGH
- da 4.2 a 5 VERY HIGH

I risultati ottenuti con il modello PTVA-3 sono mostrati nella Tabella 14 e nelle Figure 46 e 47:

RVI	Zona sud del Golfo	Foglio 6461213	Foglio 6461217	Foglio 6461218	Foglio 6461223	Totale per ogni livello
<b>MINOR</b>	356	56	30	91	28	561 (38%)
<b>MODERATE</b>	3	38	35	98	0	174 (12%)
<b>AVERAGE</b>	10	14	49	102	0	173 (11%)
<b>HIGH</b>	2	10	124	73	1	209 (14%)
<b>VERY HIGH</b>	8	10	295	54	5	372 (25%)
<b>Totale</b>	379	128	533	417	34	1492

**Tabella 14: Analisi del danno ottenuto con il metodo PTVA-3. I numeri presenti dalla colonna 2 alla 6 indicano quante strutture con un dato livello RVI ci sono in ogni zona-foglio. L'ultima colonna mostra il valore totale (percentuale) di strutture con un determinato livello RVI.**

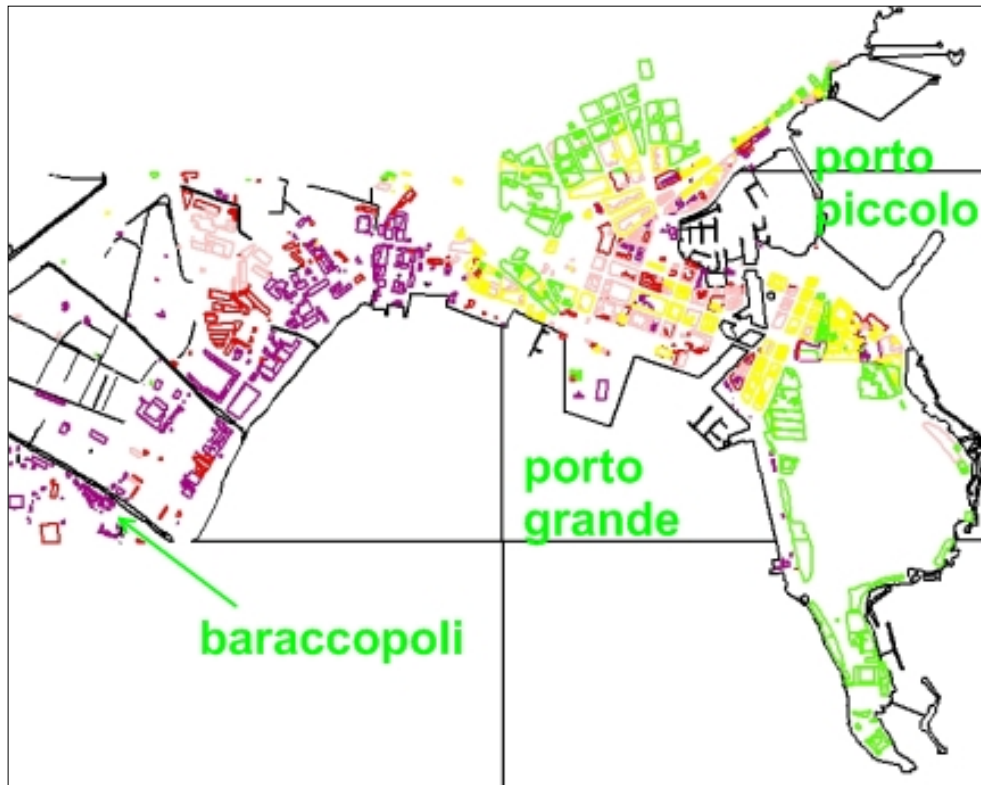


Figura 46: La figura mostra i risultati dell'indicatore RVI per ogni struttura presente nel golfo di Siracusa: MINOR (verde), MODERATE (giallo), AVERAGE (rosa), HIGH (rosso) e VERY HIGH (viola).

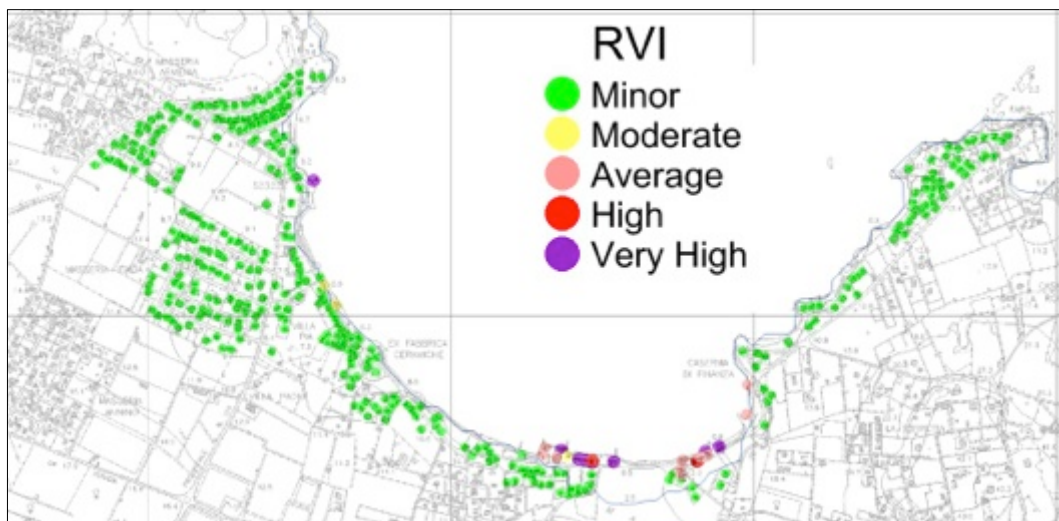


Figura 47: Risultati dell'indicatore RVI per la zona di villeggiatura a sud del golfo di Siracusa.

La tabella ci dice che un edificio su quattro subisce il massimo livello di danno, VERY HIGH, e questo dato aumenta (30%) se non si considerano gli edifici della

zona sud del golfo non inondati. Un altro dato che emerge è che nella zona indicata dal foglio 6461217 (Figura 46) l'86% degli edifici subisce un danno superiore o uguale ad HIGH. Questo è spiegabile sia dalla presenza di un alto numero di strutture molto vulnerabili (baraccopoli, tettoie e pensiline), sia dall'assenza di fattori di protezione (dighe e muri) e sia perché qui il dislivello topografico è quasi assente.

La zona tra il porto piccolo ed il porto grande presenta una eterogeneità spaziale del livello di danno che si giustifica principalmente con il variare del valore riferito all'attributo Prot\_br (building row).

Nella parte sud del golfo di Siracusa risulta pesantemente danneggiato il tratto di costa evidenziato anche nel metodo SCHEMA, Figura 47.

Le zone meno danneggiate o esenti dal danno sono le stesse ottenute anche mediante il metodo di SCHEMA, cioè la zona più interna della città e la zona dell'isola di Ortigia.

## **5.2 Field survey a Siracusa**

Per completare lo studio di vulnerabilità e la classificazione del danno è stata organizzata una ricognizione a Siracusa dove con il supporto della Protezione Civile e in particolare dell'Arch. Giuseppe Marziano, si è provveduto a classificare un determinato numero (39) di strutture con una precisione e un dettaglio maggiore rispetto alla classificazione effettuata in remoto. Durante il rilevamento inoltre è stata osservata la presenza di strutture temporanee (stagionali) e sono state validate le assunzioni fatte per determinare i vari attributi del metodo PTVA-3 e per la classificazione di vulnerabilità con il metodo SCHEMA.

Sono stati classificati 39 edifici scelti in ragione della loro posizione o perché rappresentavano le strutture edilizie caratteristiche della zona.

Il resoconto di questa classificazione è mostrato nella Tabella 15, e nella Figure 48, 49, 50 e 51 si può vedere la posizione (verde) delle strutture scelte con la relativa numerazione.



Figura 48: La figura mostra le strutture selezionate durante la field survey a Siracusa corrispondenti ai fogli 6461213 e 6461218.



Figura 49: La figura mostra le strutture selezionate durante la field survey a Siracusa corrispondenti al foglio 6461217.



Figura 50: La figura mostra le strutture selezionate durante la field survey a Siracusa corrispondenti al foglio 6461223.



Figura 51: La figura mostra le strutture selezionate durante la field survey a Siracusa corrispondenti alla zona sud del golfo di Siracusa.

N° riferimento mappa	SCHEMA	Attributi modificati										
		Bv							Prot			
		s	m	g	f	so	mo	pc	Prot_br	Prot_sw	Prot_nb	Prot_w
1	C	0	0	0,5	1	1	1	0	1	0,5	1	0,75
2	A	1	1	1	1	1	0,5	0	1	1	1	1
3	D	-0,5	0	0,5	1	1	0	-0,5	1	1	1	1
4	C	0,5	0	1	1	1	0	-0,5	1	1	1	1
5	C	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0	0,75	0,5	1	0,5
6	A	1	1	-0,5	1	1	1	0	1	0,5	1	1
7	C	1	0,5	0	1	1	1	-0,5	1	0,5	1	1
8	A	1	1	0,5	1	1	1	0	1	0,5	1	1
9	A	1	1	0,5	1	1	1	0	1	0,5	1	1
10	C	0	0	0,5	1	1	1	0	1	0,5	1	1
11	C	1	0	0,5	1	1	1	0	0,75	0,5	1	1
12	C	1	0	0,5	0	1	0,5	-1	1	1	0,75	0,75
13	A	1	1	0,5	1	1	1	0	1	0,75	1	1
14	B	1	0,5	1	1	1	0,5	0,5	1	0,75	1	1
15	B	1	0,5	1	1	1	0,5	0,5	1	0,75	1	1
16	C	0	0	0,5	0	1	0,5	-0,5	0,75	0,75	1	1
17	C	0,5	0	0,5	0	1	0,5	0,5	0,75	0,75	1	1
18	C	0,5	-1	-0,5	0	1	0	1	0,75	1	0,75	1
19	C	1	0	0,5	1	1	1	0,5	1	0,5	1	1
20	C	0,5	-1	-0,5	0	1	1	-0,5	1	0,5	1	1
21	B	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	1	0,25	1	1
22	C	0,5	0	0,5	1	1	1	0	1	0,25	1	1
23	C	0	0	0,5	1	1	0	0,5	0,75	0,25	1	1
24	B	1	0	0,5	1	1	0,5	0	0,75	0,75	1	1
25	B	1	0	-0,5	1	1	0,75	0	1	0,75	0,5	1
26	C	0	0	0	1	0	1	-0,5	1	0,75	0,5	1
27	C	0,5	0	0	1	0	1	0	0,75	0,75	0,75	1
28	D	-1	-1	-0,5	0	1	0,75	0	1	0,25	1	1
29	C	0,5	0	0,5	1	1	0,75	0,5	1	0,25	1	1
30	C	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0,75	0,25	1	1
31	A	1	1	-1	1	0	0	0	1	1	1	1
32	C	0,5	-1	0,5	0	1	1	0,5	1	0,5	0,75	0,5
33	B	1	0	0,5	1	1	1	0	0,75	0,5	0,75	0,5
34	E	-1	-1	-0,5	-1	1	1	0	0,75	0,5	0,75	0,5
35	D	-1	-1	-0,5	0	1	1	0	1	0,5	1	0,5
36	C	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0	1	0,75	1	1
37	D	0,5	-1	0,5	0	1	0	-0,5	1	1	0,25	0,5
38	B	1	0	0,5	1	1	0,25	0	1	1	1	0,75
39	B	1	0	0,5	1	1	0,25	0	1	1	1	0,75

Tabella 15: La tabella ripartisce il numero di strutture individuate e classificate durante la field survey a Siracusa.

Di seguito mostriamo anche alcuni scatti dei luoghi o delle strutture scelte per questa riclassificazione.



**Figura 52: Banchina lungo il porto grande. La presenza della banchina è stata valutata assegnando il valore +0,75 all'attributo Prot\_sw.**



**Figura 53: Lungomare dell'isola di Ortigia, lato orientale. Si può notare l'elevata altezza della costa in questa parte della città.**





**Figura 54:** Scogliera frangiflutti nella zona del porto piccolo. La presenza di questo elemento ha fatto sì che l'attributo Prot\_sw assumesse un valore uguale a +0,5.



**Figura 55:** In fondo a questa scalinata, durante il periodo estivo, viene montata una struttura di legno per i bagnanti.



**Figura 56:** Edificio caratteristico della zona di villeggiatura a sud del golfo di Siracusa. Si può notare in secondo piano la presenza di un muro che circonda tutta la struttura.



**Figura 57:** Tratto di costa della zona a sud del golfo di Siracusa, indicato nella figura 51 come “rimessaggio e deposito invernale barche”. In questa zona gli edifici sono posizionati ad un’altezza superiore ai 5 m rispetto al livello del mare.



**Figura 58: Breve tratto della costa a sud del golfo di Siracusa. Si tratta di un tratto di costa bassa, l'edificio sullo sfondo è il numero 38 nella lista delle strutture analizzate durante la field-survey a Siracusa, Figura 51.**

Le osservazioni ricavate dalla field survey hanno permesso di apportare le seguenti correzioni:

- l'attributo "f" riguardante le fondamenta degli edifici è stato modificato. Nell'isola di Ortigia la maggior parte degli edifici non presentano fondamenta, sia perché costruiti prima del '900 e sia perché posizionati su uno sperone di roccia;
- l'attributo "m" riguardante il materiale di costruzione è stato modificato per le villette presenti nella zona sud del golfo di Siracusa. Era stato assunto il valore 0 riferito al doppio mattone, modificato in seguito alla field survey nel valore -1 (cemento armato);
- l'indicatore Prot\_w che indica la presenza di un muretto davanti la struttura è stato modificato, poiché in particolare nella zona di villeggiatura si è notato che tutti gli edifici sono circondati da un muro, la cui altezza si è assunta pari a 2 m;
- l'indicatore Prot\_sw che indica la presenza di una diga/scogliera frangiflutti è stato modificato per le strutture classificate davanti la zona del porto piccolo (Figura 54). La presenza di una banchina portuale

(Figura 52) è stata valutata come un fattore di protezione, perciò si è assegnato un valore diverso da +1 (assenza di barriere) all'indicatore Prot\_sw.

In base alle informazioni apprese direttamente sono stati pertanto ricalcolati i vari indicatori\attributi.

I nuovi risultati dell'analisi del danno sono mostrati nelle Tabelle 16 e 17, dove in rosso sono evidenziate le variazioni.

Danno	Danno	Zona sud del Golfo	Foglio 6461213	Foglio 6461217	Foglio 6461218	Foglio 6461223	Totale per ogni classe
D0	Nessun danno	346	6	19	55	28	454 (30%)
D1	Danno leggero	13	85	105	116	0	319 (22%)
D2	Danno importante	13	31	206	205	1	456 (30%)
D3	Danno pesante	4	2	38	18	4	66 (5%)
D4	Collasso parziale	1	3	151	15	0	170 (11%)
D5	Collasso totale	2	1	14	9	1	27 (2%)
<b>Totale</b>		379	128	533	418	34	1492

Tabella 16: Calcolo del danno, secondo la metodologia utilizzata in SCHEMA, dopo la ricognizione a Siracusa. Sono evidenziate in rosso le variazioni rispetto ai dati calcolati prima della ricognizione.

RVI	Zona sud del Golfo	Foglio 6461213	Foglio 6461217	Foglio 6461218	Foglio 6461223	Totale per ogni livello
MINOR	356	56	30	91	28	561 (38%)
MODERATE	7	39	35	104	0	185 (12%)
AVERAGE	4	13	49	99	0	165 (11%)
HIGH	4	12	127	73	1	217 (15%)
VERY HIGH	8	8	292	51	5	364 (24%)
<b>Totale</b>	379	128	533	418	34	1492

Tabella 17: Calcolo dell'RVI, secondo il metodo PTVA-3, dopo la ricognizione a Siracusa. Sono evidenziate in rosso le variazioni rispetto ai dati calcolati prima della ricognizione.

Si nota che in generale i risultati ottenuti dalla sola analisi in remoto sono abbastanza simili a quelli ottenuti dai dati integrati dopo la field survey a Siracusa. Circa una decina di strutture, corrispondenti a meno dell'1% di tutte quelle prese in esame, hanno subito una variazione, il che conferma che le assunzioni fatte prima della ricognizione erano generalmente corrette.



## Conclusioni

Ancora oggi molti fenomeni naturali, come i maremoti, risultano essere eventi distruttivi e per poterne minimizzare gli effetti la strategia migliore è l'attuazione di misure di prevenzione.

Un fattore sul quale operare per ridurre il potenziale distruttivo di un fenomeno naturale è la vulnerabilità della zona che potrebbe essere colpita. La vulnerabilità è la misura della propensione di un elemento a subire danni: la vulnerabilità di un edificio dipende generalmente dalle caratteristiche costruttive, mentre quella di una persona dipende dalla sua capacità di reazione dipendenti dall'età, salute, ecc. Il lavoro svolto in questa tesi si è concentrato principalmente sull'applicazione di due metodi, SCHEMA e PTVA-3, per l'analisi di vulnerabilità da maremoto sulle coste del golfo di Siracusa, e sull'analisi del danno conseguente.

La zona analizzata si estende dall'isola di Ortigia fino alla zona sud del golfo: l'isola di Ortigia è l'area più antica della città e si trova nella parte nord della zona analizzata. Spostandosi verso nord-ovest, si trova la parte più recente della città con palazzi o nuove costruzioni; continuando verso sud-ovest, si trova la zona industriale e più a sud la zona di turistica.

L'approccio suggerito in SCHEMA è abbastanza semplice poiché propone una classificazione di vulnerabilità basata soltanto sull'assegnazione di una classe caratteristica ad ogni tipologia di struttura edilizia. Per l'analisi del danno invece si affianca, alle classificazioni, una matrice (matrice di danno) la quale restituisce, in base all'altezza della colonna d'acqua il relativo livello di danno (da D0 a D5).

L'approccio proposto, invece, dal PTVA-3 risulta essere molto più complicato perché richiede la valutazione di molti attributi che caratterizzano una struttura utili al calcolo del Bv (per la stima della vulnerabilità) e dell'RVI (per l'analisi del danno). In più, la valutazione di questi attributi in mancanza di dati diretti richiede assunzioni soggettive che possono influenzare i risultati finali.

Nonostante l'utilizzo di due metodi che propongono approcci e metodologie diverse i risultati ottenuti per la stima della vulnerabilità degli edifici sono simili, come appare dalle Figure 39, 41, 42 e 43.

Le mappe riguardanti l'analisi di danno ottenute attraverso il metodo SCHEMA mostrano una certa omogeneità nella distribuzione spaziale del livello di danno al contrario di quelle prodotte dal metodo PTVA-3. Si vedano in proposito le Figure 44, 45,46 e 47. Ciò è dovuto alla presenza, in quest'ultimo metodo, di tanti attributi che differenziano maggiormente le strutture analizzate, in particolare sono rilevanti la distanza dalla costa e la presenza di altri edifici o strutture a protezione di esse.

Il risultato finale di questo studio ha mostrato che la zona più vulnerabile è quella rappresentata dal foglio 6461217 (zona industriale) dovuto alla concomitanza di molti fattori negativi, come l'essere una zona piatta posizionata in parte nell'alveo dei fiumi Ciane e Anapo e l'esistenza di una baraccopoli, cioè di strutture poco resistenti.. Altre zone che si distinguono per alta vulnerabilità sono il lido che si trova al di fuori delle scogliere frangiflutti del porto piccolo (Figura 48, il numero 6), il lido posizionato sulla costa est dell'isola di Ortigia (Figura 50 e 55) e i lidi della zona sud del golfo di Siracusa (Figura 51, i punti 38 e 39, Punta Pero e il lido privato).

Parte rilevante dell'analisi è stata la field survey compiuta nella zona in esame. La field survey ha mostrato la bontà della maggior parte delle assunzioni fatte sulla base dei soli dati da immagini satellitari e cartografici, mentre quelle che hanno richiesto una variazione hanno inciso marginalmente sul risultato finale. Infatti, a seguito della survey abbiamo modificato il livello di danno di meno dell'1% delle strutture analizzate (Tabelle 16 e 17).

A dire il vero, l'utilizzo combinato delle carte CTN ad alta risoluzione (1:2000), delle immagini satellitari e delle immagini da Google street view ha reso quasi superflua la ricognizione. Tale ricognizione è stata comunque un elemento importante per le aree dove non era disponibile un abbondante numero di dati e informazioni, per controllare la presenza di strutture temporanee (per lo più estive) e per un confronto con le autorità locali (Protezione Civile) che hanno potuto indicare ulteriori fattori di rischio non deducibili dalle immagini in nostro possesso, come aree soggette a frequenti inondazioni o aree caratterizzate da una grande presenza di persone.



## **Ringraziamenti**

Vorrei ringraziare particolarmente il prof. Stefano Tinti che ha reso possibile l'esecuzione di questo lavoro di tesi. Ringrazio il dott. Gianluca Pagnoni per l'aiuto, la pazienza, e l'attenzione che ha mostrato nei miei confronti, fino all'ultimo giorno, durante il periodo di tesi. Ringrazio l'arch. Giuseppe Marziano della Protezione Civile per la disponibilità mostrata durante la field survey a Siracusa.

Vorrei ringraziare in modo speciale la mia famiglia e mia nonna che in tutti questi anni di studio mi hanno sempre sostenuto, soprattutto nei momenti più difficili, cercando in tutti i modi possibili di essere un punto di riferimento su cui fare affidamento.

Infine ringrazio Giulia C. e tutti i miei amici più cari che in questi anni bolognesi lontano da casa mi hanno fatto trascorrere degli anni indimenticabili.



## Bibliografia

- Argnani, A., Armigliato, A., Pagnoni, G., Zaniboni, F., Tinti, S., Bonazzi, C.: *Active tectonics along the submarine slope of south-eastern Sicily and the source of the 11 January 1693 earthquake and tsunami*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 1311–1319, 2012.
- Bianca, M., Monaco, C., Tortorici, L., and Cernobori, L.: *Quaternary normal faulting in southeastern Sicily (Italy): a seismic source for the 1693 large earthquake*, Geophys. J. Int., 139, 370–394, 1999.
- D’Addezio G. e Valensise G.: *Metodologie per l’individuazione della struttura sismogenetica responsabile del terremoto del 13 dicembre 1990*. In: Boschi, E., Basili, A. (Eds.), *Contributi allo studio del terremoto della Sicilia orientale del 13 dicembre 1990*. Int. Rep. 537, ING, Rome, pp. 115-125, 1991.
- Dall’Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., Dominey-Howes, D.: *A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami damage*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1557–1565, 2009.
- Dall’Osso, F., Maramai, A., Graziani, L., Brizuela, B., Cavalletti, A., Gonella, M., Tinti, S.: *Applying and validating the PTVA-3 Model at the Aeolian Islands, Italy: assessment of the vulnerability of buildings to tsunamis*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 1547–1562, 2010.
- Dominey-Howes, D. and Papatoma, M.: *Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami*, Nat. Hazards, 40, 113–136, 2007.

- Eckert, S., Jelinek, R., Zeug, G., Krausmann, E.: *Remote sensing-based assessment of tsunami vulnerability and risk in Alexandria, Egypt*, Appl. Geogr., 32, 2, 714–723, 2012.
- Guidoboni, E. e Comastri, A.: *Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean Area from the 11<sup>th</sup> to the 15<sup>th</sup> Century*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Storia Geofisica Ambiente (INGV-SGA), Italy, 2005.
- Gutscher, M.-A., Roger, J., Baptista, M.-A., Miranda, J. M., e Tinti, S.: *Source of the 1693 Catania earthquake and tsunami (southern Italy): New evidence from tsunami modeling of a locked subduction fault plane*, Geophys. Res. Lett., 33, L08309, doi:10.1029/2005GL025442, 2006.
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., Imamura, F.: *Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia*, Coastal Engineering Journal, Vol. 51, No. 3, 243-273, 2009.
- Papathoma, M. and Dominey-Howes, D.: *Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 733–747, 2003.
- Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y., and Smith, D.: *Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 377–389, 2003.
- Pettenati F., Gentile F. e Sirovich L.: *The sources of the two destructive earthquakes of 1693 retrieved by automatic inversions*, *Proceedings of the Meeting: Detailed Scenarios and Actions for Seismic Prevention of Damage in the Urban Area of Catania*, Catania, January 09-10, 2003.

- Platania G.: *Il maremoto dello Stretto di Messina del 28 dicembre 1908*, Boll. Soc.Sism. Ital. 13, 369–458 (in Italian). 1909.
- Shaw, B., Ambraseys, N. N., England, P. C., Floyd, M. A., Gorman, G. J., Higham, T. F. G., Jackson, J. A., Nocquet, J.-M., Pain, C. C., e Piggott, M. D.: *Eastern Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the AD 365 earthquake*, Nat.Geosci., 1, 268–276, doi:10.1038/ngeo151, 2008.
- Sirovich L. e Pettenati F.: *Seismotectonic outline of South-Eastern Sicily: an evaluation of available options for the earthquake fault rupture scenario*, J. Seismol., 3: 213-233, 1999.
- Sirovich L. e Pettenati F.: *Test of source-parameter inversion of the intensities of a 54,000-death shock of the seventeenth century in southeastern Sicily*, Bull. Seism. Soc. Am., 91: 792-811, 2001.
- Stiros, S. C.: *The AD 365 Crete Earthquake and Possible Seismic Clustering during the Fourth to Sixth Centuries AD in the EasternMediterranean: A Review of Historical and Archaeological Data*, J. Struct. Geol., 23, 545–562, 2001.
- Tinti, S., Maramai, A., e Graziani, L.: *The new catalogue of the Italian tsunamis*, Nat. Hazards, 33, 439–465, 2004.
- Tinti, S., Tonini, R., Bressan, L., Armigliato, A., Gardi, A., Guillande, R., Valencia, N., Scheer, S.: *Handbook of Tsunami Hazard and Damage Scenarios*, SCHEMA (Scenarios for Hazard-induced Emergencies Management), Project n° 030963, JRC 61463, EUR 24691 EN, ISBN 978-92-79-19062-9, ISSN 1018-5593, doi:10.2788/21259, 2011.
- Tonini, R., Armigliato, A., Pagnoni, G., Zaniboni, F., Tinti, S.: *Tsunami hazard for the city of Catania, eastern Sicily, Italy, assessed by means of Worst-case Credible Tsunami Scenario Analysis (WCTSA)*, Nat. Hazards

Earth Syst. Sci., 11, 1217–1232, 2011.

- Valencia, N., Gardi, A., Gauraz, A., Leone, F., Guillaude R.: *New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2835–2846, 2011.
  
- Valensise, G. e Pantosti, D. (Editors): *Database of potential sources for earthquakes of magnitude larger than M 5.5 in Italy*, Ann. Geophys., 44 (suppl. to n. 4), 175, 2001.
  
- Zollo A., Emolo A., Herrero A. e Improta L.: *Strong ground motion modelling in the Catania area associated to the Ibleo-Maltese fault system*, J. Seismol., 3: 279-288, 1999.