

# Manuale per Scenari di Pericolosità e di Danno in Caso di Tsunami

SCHEMA (Scenarios for Hazard-induced Emergencies Management),  
Project n° 030963, Specific Targeted Research Project, Space Priority

S. Tinti, R. Tonini, L. Bressan, A. Armigliato, A. Gardi, R. Guillande,  
N. Valencia, S. Scheer



EUR 24691 IT - 2011

La missione del JRC-IPSC è di fornire risultati scientifici e di dare supporto agli organi dell'UE per le attività che svolgono nel campo della sicurezza globale e nel campo della protezione dei cittadini europei da incidenti, da attacchi deliberati, da azioni fraudolente e illegali contro le politiche europee.

Traduzione curata da Roberto Tonini e Stefano Tinti, Università di Bologna

Supervisione grafica a cura di Annalisa Gardi, Geosciences Consultants, Parigi

Commissione Europea  
Joint Research Centre  
Istituto per la Protezione e la Sicurezza dei Cittadini

#### **Contatti**

Indirizzo: Prof. Stefano Tinti, Dipartimento di Fisica, Settore Geofisica, Università di Bologna, v.le Berti Pichat 8, 40127 Bologna, Italia

E-mail: stefano.tinti@unibo.it

Tel.: +39 051 209 5025

Fax: +39 051 209 5058

<http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/>

<http://www.jrc.ec.europa.eu/>

#### **Nota legale**

Né la Commissione Europea, né nessun'altra persona che agisce per conto della Commissione, è responsabile per l'uso che verrà fatto di questa pubblicazione.

***Europe Direct è un servizio per aiutarti a trovare le risposte  
alle tue domande sull'Unione Europea***

**Numero Verde (\*):**

**00 800 6 7 8 9 10 11**

(\* ) Alcuni operatori di telefonia mobile non consentono l'accesso a numeri del tipo 00 800 e queste chiamate possono essere addebitate.

Ulteriori informazioni sull'Unione Europea sono disponibili in rete.  
Per ottenerle si può consultare il sito all'indirizzo <http://europa.eu/>

JRC 61463

EUR 24691 IT

ISBN 978-92-79-19064-3

ISSN 1018-5593

doi:10.2788/22304

Luxembourg: Publications Office of the European Union

© European Union, 2011

La riproduzione è consentita solo se la fonte è citata

*Stampato in Italia*

## Ringraziamenti

*La ricerca che ha portato a questi risultati è stata finanziata dal programma FP6 (Sixth Framework Programme) della Comunità Europea con il contratto n° SST5-CT-2006-030963.*

*Gli autori ringraziano sentitamente tutte le numerose persone degli istituti o società partner del progetto che in questi ultimi anni sono stati coinvolti in un modo o nell'altro nella finalizzazione del lavoro presentato in questo manuale.*

*Un ringraziamento particolare al Dr. François SCHINDELE, esaminatore principale del progetto per conto della Commissione Europea, per i suoi commenti costruttivi durante le fasi finali di stesura.*

*La gratitudine degli autori e' inoltre rivolta al Dr. Mats LJUNGQVIST, responsabile del progetto presso la Commissione Europea, per la sua pazienza e il suo continuo incoraggiamento, fondamentali per il buon esito del progetto.*

*Buona parte del lavoro realizzato sui siti campione di Rabat (Marocco), Setubal (Portogallo), Mandelieu (Francia), Balchik (Bulgaria) e Catania (Italia) non sarebbe stata possibile senza la disponibilità e collaborazione delle autorità locali. Esprimiamo tutta la nostra riconoscenza per il loro coinvolgimento e il loro supporto nel contattare e riunire le varie persone interessate a questo studio, e anche per la loro cordiale accoglienza in occasione delle riunioni locali.*

*L'utilizzo di dati di batimetria dello SHOM (© Copyright 2008 Service Hydrographique et Océanographique de la Marine - Francia) per il lavoro riguardante il sito di Mandelieu (Francia) e' regolato dal contratto n° S/1314 BP.*

### **Autori**

Stefano Tinti, Roberto Tonini, Lidia Bressan e Alberto Armigliato: Università di Bologna, Italia

Annalisa Gardi, Richard Guillande e Nathalia Valencia: GEOSCIENCES CONSULTANTS sarl, Parigi, Francia

Stefan Scheer, Commissione Europea. Centro Comune di Ricerca, Ispra, Italia

### **Altri contributori**

Olivia Lesne, Antoine Mangin, Camille Renou e Frédéric Rouffi: ACRI-ST, Sophia-Antipolis, Francia

George Eftichidis e Vassiliki Varela: ALGOSYSTEMS, Atene, Grecia

Abderrahman Atillah, Driss El Hadani e Hicham Moudni: Centre Royal de Télédétection Spatiale, Rabat, Marocco

Adélio Silva, João Ribeiro e Paulo Leitão: HIDROMOD, Lisbona, Portogallo

Gerassimos Papadopoulos, Anna Fokaefs, Georgia Diakogianni e Tatiana Novikova: Osservatorio Nazionale di Atene, Grecia

Boyko Rangelov e Garo Mardirossian: SSRI-BAS, Bulgaria

Erhan Alparslan: TUBITAK Marmara Research Center – Earth and Marine Sciences Institute, Gebze-Kocaeli, Turchia

# Indice

Sommario .....	5
1 Introduzione .....	6
2 Scenari di maremoto: concetti e metodologia .....	7
2.1 Concetti e definizioni .....	7
2.2 Concetti base della metodologia del progetto SCHEMA .....	8
3 Scenari di pericolosità di maremoto .....	10
3.1 Selezione delle sorgenti .....	11
3.2 Modelli numerici .....	13
3.3 Dati di batimetria e di topografia.....	14
3.3.1 Integrazione tra dati topografici e batimetrici .....	14
3.3.2 Il problema delle maree.....	15
3.4 Come trattare risoluzioni diverse.....	15
3.5 Trattamento dell'incertezza.....	16
3.6 Scenari regionali di pericolosità di maremoto .....	17
3.7 Scenari locali di pericolosità di maremoto.....	18
3.8 Scenari aggregati.....	19
4 Scenari di danno da maremoto .....	20
4.1 Stima della vulnerabilità.....	20
4.2 Funzioni di danno e matrice di danno.....	22
4.3 Creazione di un inventario di edifici per gli scenari di maremoto .....	23
4.4 Inventario di ulteriori importanti elementi.....	25
4.5 Mappe di danno di maremoto .....	26
4.6 Rilevazione di altri fattori di danno.....	27
5 Conclusioni e prospettive .....	29
Bibliografia.....	31
Allegato A – Il progetto SCHEMA.....	33
Allegato B - Partners del consorzio SCHEMA .....	35
Allegato C – Sito web del Progetto SCHEMA.....	36
Elenco delle Figure .....	37
Elenco delle Tabelle.....	38

## Sommario

Il manuale sugli scenari di maremoto è il risultato del lavoro svolto nell'ambito del progetto SCHEMA (finanziato dall'Unione Europea, in un periodo di 39 mesi dal 2007 al 2010) da un Consorzio di 11 partner, guidato da Geosciences Consultants.

Il manuale è uno dei prodotti del progetto ed ha lo scopo di illustrare i concetti ed i metodi di base che sono stati elaborati ed applicati nel corso del progetto per produrre scenari utili per la stima della pericolosità e del danno derivante dall'impatto dei maremoti. Viene proposto un metodo generale che può essere facilmente adattato alle diverse necessità degli utilizzatori finali, che sono principalmente le pubbliche amministrazioni responsabili della pianificazione dello sviluppo delle zone costiere e dell'elaborazione delle strategie di protezione dai rischi naturali, così come le persone e le organizzazioni coinvolte nella gestione dei disastri e in politiche di mitigazione. La metodologia adottata nel progetto SCHEMA è stata applicata a cinque aree campione (Rabat, Marocco; Setúbal, Portogallo; Mandelieu, Francia; Catania, Italia; Balchik, Bulgaria) molto diverse l'una dall'altra, a riprova che essa è adattabile a una grande varietà di casi. Essa è stata testata con il coinvolgimento attivo degli utilizzatori finali, il che assicura che si tratta di uno strumento utile, pratico e sufficientemente flessibile da coprire le necessità delle singole località.

Nella prima parte del manuale si definiscono i concetti di "Scenario di pericolosità" e di "Scenario di danno" in caso di maremoto, così come il concetto di "Peggior scenario credibile". Quest'ultimo rappresenta il punto chiave del manuale, poiché il consorzio di SCHEMA ha scelto di adottare l'approccio del peggior scenario credibile piuttosto che quello basato su scenari risultanti da analisi probabilistiche. Il motivo della scelta è che si ritiene che non ci siano né conoscenze né dati a sufficienza per stimare la probabilità di tempi di ritorno dei maremoti, e quindi per ricavare i corrispondenti scenari.

Il metodo è brevemente illustrato nel capitolo 3, nel quale si spiega che è costituito da tre fasi principali, ognuna delle quali suddivisibile in ulteriori sotto-fasi: 1) l'elaborazione di un certo numero di scenari di pericolosità per ogni area campione, che poi vengono combinati in un singolo scenario aggregato; 2) analisi di vulnerabilità degli elementi esposti al maremoto basata su osservazioni (derivanti da campagne di misura e da interpretazione di immagini satellitari); 3) sviluppo dello scenario di danno da maremoto. La fase 1 è descritta in modo dettagliato nel capitolo 4, mentre le fasi 2 e 3 sono illustrate nel successivo capitolo 5.

Il manuale ha lo scopo di evidenziare i punti fondamentali della metodologia adottata nel progetto SCHEMA per gli scenari di maremoto, ed è perciò volutamente sintetico. Ogni dettaglio sui metodi e sulle loro applicazioni può essere trovato nei molti e dettagliati documenti (deliverables) prodotti dal consorzio durante tutto il progetto. Qui vengono illustrati solo i concetti fondamentali attraverso un numero di esempi presi dal lavoro svolto dai partner del consorzio.

Il capitolo finale del manuale guarda al futuro, con enfasi sulle prossime sfide e su come la metodologia possa essere migliorata per affrontarle. In questo contesto l'argomento principale è la multi-pericolosità o, in altre parole, come gli scenari possano essere costruiti per considerare non solo i maremoti ma anche altri fenomeni pericolosi. La sfida rimane aperta nel senso che è ormai diffusa la consapevolezza i) che questo sia un serio problema e ii) che, allo stesso tempo, non ci siano metodi generali per affrontarlo.

## 1 Introduzione

Questo manuale è uno dei prodotti del progetto europeo SCHEMA (v. l'elenco dei partner in Appendice A). Vi si descrive la metodologia elaborata nel progetto per costruire scenari di pericolosità e scenari di danno derivanti dall'impatto di maremoti ed inoltre vi si definiscono termini e concetti perché mancano standard ed un accordo unanime sulla terminologia. Il manuale è principalmente indirizzato ad amministratori locali responsabili per la protezione del popolazione da disastri naturali e per la gestione e la pianificazione del territorio, che per dovere istituzionale hanno il compito di stimare la pericolosità e il rischio associato a maremoti e di utilizzare strumenti come le mappe di inondazione e di danno. Ritieniamo infatti che per costoro sia assai utile disporre di definizioni chiare dei termini e dei concetti di base e conoscere i metodi ed i criteri attraverso i quali tali mappe sono prodotte. Il manuale, benché tratti temi specifici e tecnici, evita dettagli matematici e numerici e complessità che potrebbero rendere difficile la lettura. Tali dettagli sono forniti nei rapporti tecnici redatti durante il progetto. Inoltre il manuale privilegia l'esposizione di contenuti e idee ed è ricco di esempi che sono presi dal lavoro e dai risultati che sono stati ottenuti dai partner del progetto SCHEMA.

Il manuale comincia con un capitolo dove si introducono i concetti base di scenari di pericolosità e di scenari di danno e dove si dà spiegazione del motivo per cui il consorzio SCHEMA ha preferito l'approccio deterministico basato sul peggior scenario credibile rispetto all'altro possibile approccio basato sul calcolo delle probabilità. Nei due capitoli successivi sono descritti in dettaglio i vari passaggi della procedura per il calcolo degli scenari di pericolosità e di danno, facendo ricorso ad esempi derivanti dagli studi compiuti dai partecipanti al progetto. In questo contesto la stima della vulnerabilità rispetto al maremoto viene trattata come un passo necessario lungo il cammino per produrre scenari di danno. Nel capitolo finale viene compiuta un'analisi critica della metodologia sottolineando le prospettive 1) per applicarla ad aree geografiche diverse da quelle che è stato possibile studiare nel progetto SCHEMA, 2) per possibili miglioramenti o alternative dipendenti dalla disponibilità di dati adeguati, e 3) per affrontare la sfida dello sviluppo di scenari di multi-pericolosità.

## 2 Scenari di maremoto: concetti e metodologia

### 2.1 Concetti e definizioni

Nel campo dello studio dei pericoli naturali, con il termine “pericolo” (o fenomeno pericoloso) si intende la descrizione di un fenomeno fisico, che può essere un terremoto, un incendio, un uragano, un maremoto (tsunami), ecc. Il termine “scenario di pericolosità” si riferisce invece all’ipotesi dell’occorrenza di un fenomeno pericoloso in una specifica area e con uno specifico grado di intensità. Secondo i documenti pubblicati dall’Intergovernmental Coordination Group for the Indian Ocean Tsunami Warning System (ICG/IOTWS, 2007), uno scenario di pericolosità di maremoto viene costruito specificando le varie caratteristiche di una sorgente tsunamigenica. In altre parole, esso consiste essenzialmente di un numero di elementi che caratterizzano il terremoto tsunamigenico o la frana sottomarina nella zona sorgente. Va osservato che questa definizione non include gli effetti locali in luoghi distanti dalla sorgente colpiti dal maremoto e che non è condivisa da molti studi di scenari di maremoto che, al contrario, pongono attenzione principalmente all’impatto del maremoto nelle aree costiere. La definizione di scenario di pericolosità che è stata adottata nel progetto SCHEMA comprende la descrizione complessiva del maremoto a partire dalla fase di generazione e quindi anche la descrizione della propagazione e degli effetti locali di inondazione (elevazione massima e minima della superficie del mare: run-up e drawdown; estensione delle aree sommerse o lasciate scoperte), ed informazioni sulla distribuzione spaziale e temporale del maremoto. Questo per quanto attiene al fenomeno o processo naturale. Ma oltre a questo, proprio per soddisfare le necessità degli utenti finali, uno scenario di maremoto in SCHEMA comprende anche la descrizione dell’impatto dello tsunami su persone e beni che si trovano nelle aree costiere. Pertanto la nozione di scenario di maremoto può avere due valenze:

- lo **scenario di pericolosità di maremoto** descrive il fenomeno naturale dalla sorgente, attraverso la propagazione, fino alla costa colpita dalle onde e fornisce il livello di pericolosità per l’area esposta considerata (l’area target o area compazione).
- lo **scenario di danno da maremoto** descrive le possibili conseguenze (dannose) del maremoto, per quegli elementi esposti (persone, oggetti) specificati dagli utenti finali.

Le mappe degli scenari dovrebbero presentare gli elementi esposti nell’area colpita dalle onde e gli effetti dell’avanzamento e del ritiro del mare, insieme alla rispettiva intensità o livello del danno, sia che questo venga stimato in modo qualitativo o che venga quantificato.

La nozione di scenario di pericolosità di maremoto è generalmente associata alle caratteristiche di una singola sorgente ed al maremoto che questa può generare. Tuttavia, per molti versi può essere vantaggioso studiare la pericolosità di maremoto ottenuta da un certo numero di sorgenti, tipicamente per tutte le sorgenti tsunamigeniche che possono colpire una data area. In questo caso, è ragionevole studiare singolarmente ogni maremoto ed il suo impatto sulla costa, e poi combinare gli effetti di tutte le sorgenti in modo tale da trattare la pericolosità complessiva. Si ottiene così lo **scenario aggregato di pericolosità di maremoto**, poiché esso risulta dalla combinazione o aggregazione di singoli scenari. Spesso la sorgente che viene presa in considerazione per uno scenario individuale è la più potente che è ragionevole aspettarsi (ovvero credibile) in quella specifica regione in accordo con le conoscenze correnti del fenomeno, e quindi lo scenario corrispondente viene chiamato lo scenario peggiore credibile.

Talvolta ci sono elementi che permettono di associare un dato scenario ad una stima del periodo di ritorno. Se questo potesse essere fatto per tutta una serie di scenari, allora potrebbe essere utilizzato un approccio probabilistico e ad ogni scenario calcolato sarebbe associata una probabilità di occorrenza. L’implementazione di un approccio probabilistico comunque non sempre è possibile o conveniente. Per esempio, stimare la probabilità di occorrenza di terremoti in una data regione è fattibile se è disponibile un numero sufficiente di dati storici e strumentali e se c’è una buona conoscenza dei processi tettonici a livello locale e regionale (p.e. la velocità di convergenza delle placche litosferiche in una regione di subduzione), che spesso è il caso delle sole regioni con alta sismicità o con lunghe registrazioni di eventi sismici, favorite da un lungo periodo di civilizzazione. D’altra parte, stimare la probabilità di occorrenza per frane tsunamigeniche è piuttosto difficile o addirittura proibitivo in molti dei margini oceanici, in quanto mancano dati e manca soprattutto la conoscenza di base del processo di destabilizzazione della massa franosa. Nel progetto SCHEMA l’approccio probabilistico non è stato seguito,

perché stabilire un periodo di ritorno per un dato scenario è piuttosto arbitrario nel Mediterraneo, nell'Atlantico e nel mar Nero, a causa del numero assai ridotto di eventi, grandi o piccoli, osservati. È più opportuno considerare gli scenari più interessanti associati ad eventi del passato e potenzialmente futuri associati a diverse sorgenti tsunamigeniche, il che significa considerare un certo numero di peggiori scenari credibili, per assemblarli poi in uno scenario aggregato ed ottenere le zone di massima pericolosità.

## 2.2 Concetti base della metodologia del progetto SCHEMA

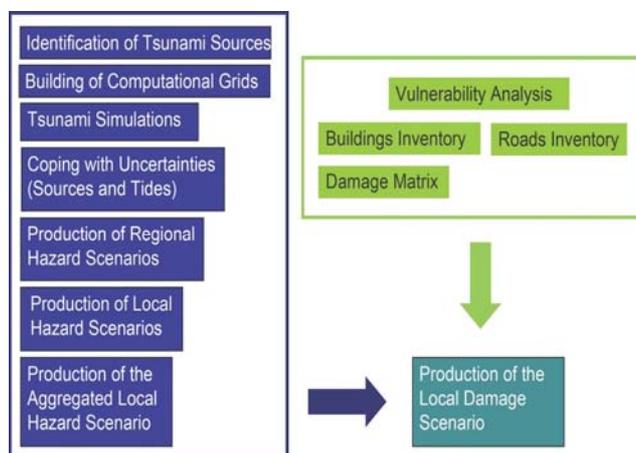
La produzione di scenari di pericolosità di maremoto e di scenari di danno da maremoto è un processo che richiede un certo numero di passaggi. In SCHEMA è stata sviluppata una procedura o una metodologia, illustrata in Figura 1, che è stata applicata alle cinque aree test trattate nel progetto (come già menzionato esse sono Setúbal, Rabat, Mandelieu, Catania e Balchik). Dal momento che le aree di studio sono state selezionate anche sulla base del criterio che esse differissero l'una dall'altra per vari aspetti (p.e. i dati di maremoto, i tipi di sorgente, gli ambienti urbani e costieri, le condizioni socialculturali), l'applicazione dello stesso metodo a tutte le aree campione ha costituito un buon test per provarne la generalità e la flessibilità.

Dallo schema di Figura 1 è chiaro che le attività racchiuse nell'area blu sulla sinistra si riferiscono alla determinazione degli scenari di pericolosità di maremoto sia a livello regionale che locale, mentre le attività nell'area verde si riferiscono all'analisi di vulnerabilità e danno, e vengono svolte solo a livello locale nelle aree campione. Entrambi i gruppi di attività sono necessari per produrre gli scenari di danno degli edifici colpiti da maremoto a livello locale.

Il processo di produrre lo scenario peggiore credibile di pericolosità comincia con l'identificazione delle sorgenti capaci di causare i maremoti più significativi nell'area di studio. Per ognuna delle sorgenti selezionate, si calcolano la generazione e la propagazione del maremoto fino all'area di studio attraverso l'uso di modelli numerici. Nell'approccio adottato in SCHEMA si è ritenuto conveniente considerare una scala regionale, maggiormente focalizzata sull'aspetto della propagazione del maremoto, ed una scala locale maggiormente incentrata sull'inondazione nell'area di studio. Si può quindi parlare rispettivamente di scenari regionali e locali.

La Figura 1 mostra uno schema della metodologia utilizzata per la produzione di scenari regionali e locali sia per i casi separati che per gli scenari combinati. Il metodo va oltre gli scenari di pericolosità e copre anche

aspetti di impatto e contromisure, che sono principalmente focalizzate sull'analisi del danno su costruzioni e strutture e sull'identificazione di vie di evacuazione e le conseguenti strategie di evacuazione.



**Figura 1:** Schema che illustra lo sviluppo della metodologia per produrre scenari di pericolosità di maremoto e scenari di danno da maremoto.

Quest'ultimo argomento viene trattato in un altro manuale (Scheer et al., 2010) che è dedicato specificatamente alla pianificazione dell'evacuazione in caso di maremoto e perciò non sarà trattato in questo documento. Per quel che riguarda l'impatto, un aspetto importante è la valutazione del danno prodotto dal maremoto alle costruzioni, che implica almeno tre passaggi: la conoscenza delle caratteristiche delle costruzioni nelle zone costiere (e la relativa classificazione); la definizione dei parametri del maremoto rilevanti per il danneggiamento degli edifici e la correlazione tra il valore dei parametri e il livello di danno (curve di fragilità, matrici di danno); la valutazione del danno prodotto dal maremoto e la conseguente produzione di mappe di danno. In questa sezione sottolineiamo il fatto che scenari e mappe di danno possono essere calcolati sia per scenari singoli che per quelli aggregati. Ad esempio, se si assume che il danno di un edificio dipenda dallo spessore del flusso d'acqua (come nel caso del progetto SCHEMA), allora la stima del danno viene effettuata considerando lo spessore del flusso, che è uno degli elementi degli scenari di pericolosità e può essere fornito, in accordo con le necessità degli utenti finali, sia per gli scenari individuali che per quelli aggregati o per entrambi.

Nei casi aggregati, è bene rilevare che la massima inondazione rispetto al suolo che viene indicata in ogni punto della mappa è di solito associata a maremoti diversi. Questo significa che il danno complessivo stimato sulla mappa non deriva da un singolo maremoto, ma è l'effetto di un "maremoto virtuale" che in ogni parte della mappa rappresenta il peggiore

caso possibile. L'influenza sul livello di danno di altri fattori (sia pertinenti agli edifici stessi, come l'orientazione rispetto alla linea di costa, il numero di piani, le caratteristiche del pianterreno, ecc., che pertinenti all'ambiente circostante, come la presenza di muri protettivi, la prossimità ad aree da cui oggetti possono essere strappati e trasportati dalla corrente del maremoto...) è piuttosto difficile da stimare e nel progetto SCHEMA essa è stata considerata solo in modo semplificato e qualitativo.

Produrre uno scenario significa non solo specificarne i passaggi e i metodi, ma anche il tipo di risultati o prodotti che vengono forniti agli utenti finali alla fine della procedura. Nel progetto SCHEMA ogni scenario viene descritto grazie ad una serie di mappe che sono elencate e descritte in Tabella 1.

**Tabella 1:** *Elenco delle mappe che caratterizzano gli scenari di maremoto nel progetto SCHEMA*

<b>Nome mappa</b>	<b>Descrizione</b>
<b>Scenari di pericolosità di maremoto regionali (sezione 3.6)</b>	Consistono in mappe di diverso tipo che mostrano la propagazione su larga scala del maremoto, tra la sorgente e l'area di studio. Comprendono i campi di elevazione del livello del mare presi a vari tempi e mappe dei tempi di propagazione.
<b>Scenari di pericolosità di maremoto locali (sezione 3.7)</b>	Le mappe locali si concentrano sull'area di studio a piccola scala, illustrando i campi di vari parametri come la massima elevazione e massima velocità, la linea di massima inondazione e di massimo ritiro. Si riferiscono a scenari individuali.
<b>Scenari aggregati (mappe locali) (sezione 3.8)</b>	Le mappe locali di uno scenario aggregato rappresentano la sintesi di tutti i risultati calcolati (od osservati) per ogni potenziale scenario tsunamigenico che riguarda la stessa area di studio, selezionando le intensità estreme di tutti gli scenari per diversi parametri (come elevazione dell'acqua, velocità delle particelle d'acqua, altezza della colonna d'acqua).
<b>Scenari di danno da maremoto (sezione 4)</b>	Basate sia su scenari individuali sia aggregati nell'area campione, queste mappe forniscono una descrizione quantitativa del livello di danno sugli edifici utilizzando le funzioni di fragilità e gli altri elementi che possono influire sull'intensità del danno (criteri secondari di vulnerabilità). Altro elemento utile alle operazioni di salvataggio può essere la stima delle strade inondate o probabilmente ostruite.

<b>Scenari di danno all'ambiente</b>	La recente esperienza del maremoto del 26 dicembre 2004 nell'Oceano Indiano ha mostrato che nelle aree inondate si possono verificare cambiamenti dell'ambiente significativi (di tipo geomorfologico, topografico, biogeochimico). Queste mappe inoltre evidenziano l'impatto atteso degli scenari di maremoto su industrie e condotte (ad esempio la contaminazione del suolo e dell'acqua causata da dispersione di inquinanti).
<b>Mappe di evacuazione</b>	Queste mappe indicano le vie più brevi per raggiungere i luoghi che sono in sicurezza a partire da ogni punto a terra che sia investito dal maremoto. Il calcolo viene fatto considerando gli scenari aggregati, che sintetizzano gli effetti di tutti i peggiori scenari credibili e che forniscono la massima estensione dell'area inondata. In tali mappe vanno inserite pertanto le informazioni sulle vie di evacuazione, sui luoghi sicuri, sui rifugi verticali e sulla posizione dei segnali di allarme e di allerta. Le mappe e le strategie di evacuazione sono argomento del manuale di SCHEMA sulle mappe di evacuazione (Scheer et al., 2010) complementare a questa pubblicazione e non saranno trattate ulteriormente in questo manuale.

### 3 Scenari di pericolosità di maremoto

Come già affermato nelle sezioni precedenti, uno scenario di pericolosità di maremoto di solito si riferisce al maremoto causato da una singola sorgente (terremoto, frana o eruzione vulcanica) di una certa grandezza o intensità. Per una data sorgente ci sono un certo numero di opzioni che possono essere considerate per la costruzione di uno scenario. Se si restringe l'attenzione all'aspetto idrodinamico del maremoto, che è quello che si intende tecnicamente per scenario di pericolosità di maremoto, gli elementi principali che formano lo scenario possono essere elencati come segue:

1. Mappa dei massimi di elevazione del mare dovuta alla propagazione del maremoto.
2. Mappe con l'elevazione della superficie del mare a tempi di propagazione specifici.
3. Mappa dei tempi di arrivo delle prime onde
4. Mareogrammi calcolati in nodi selezionati.
5. Massima estensione dell'inondazione (limite della zona inondabile).
6. Mappa della massima altezza del maremoto e altezza della colonna d'acqua nelle aree inondate.
7. Massimo ritiro del mare dalla linea di riva.
8. Mappa delle velocità massime di corrente (sia al largo che a terra).

Gli elementi degli scenari regionali sono quelli numerati da 1 a 4 nella lista qui sopra. La mappa della massima elevazione della superficie del mare (punto 1) mostra il cammino di propagazione del maremoto, che di solito è caratterizzato da una forte anisotropia, a causa del doppio effetto della geometria della sorgente (in genere con una dimensione molto maggiore dell'altra) e delle irregolarità della batimetria. Le mappe che meglio rappresentano la propagazione di maremoto sono le "istantanee" prese a tempi diversi (punto 2). Da queste si può osservare la propagazione del fronte dalla sorgente e le possibili riflessioni sulle coste. La mappa dei tempi di propagazione (punto 3) illustra le isocrone del maremoto corrispondenti a diversi tempi di propagazione, essendo ogni isocrona definita come la linea che connette tutti i punti dove il fronte d'onda principale del maremoto è arrivato nello stesso istante. I mareogrammi calcolati in punti al largo (punto 4) forniscono l'evoluzione temporale del maremoto in luoghi specifici e sono utili a stimarne la sequenza delle

onde, il periodo tipico, l'attenuazione con il tempo e la durata significativa.

Gli scenari locali includono tutti i prodotti e le mappe elencate da 4 a 8. Si può osservare che il calcolo di mareogrammi può essere svolto per gli scenari sia locali che regionali, a seconda della posizione del mareografo virtuale: se si trovano al largo lungo il percorso del maremoto, allora i mareogrammi sono elementi dello scenario regionale, mentre se i nodi sono scelti all'interno l'area campione (p.e. in un porto locale o anche a terra) sono elementi dello scenario locale. L'estensione della massima inondazione (punto 5) fornisce la massima area inondata dal maremoto, indipendentemente dal tempo di inondazione: il maremoto può inondare l'area di studio con una singola onda o una serie di onde che arrivano a tempi differenti con diverse ampiezze. La massima estensione di inondazione è l'area che risulta dalla somma di tutte le aree inondate da tutte le onde del maremoto. Le mappe dell'elevazione massima della superficie del mare e della massima colonna d'acqua (punto 6) fornisce informazioni sul più alto livello raggiunto dalla superficie d'acqua in ogni punto, e la massima altezza dell'acqua rispetto alla topografia. A terra queste due variabili sono collegate, poiché la seconda deriva dalla prima sottraendo semplicemente la quota locale del terreno. Il massimo di ritiro del mare (punto 7) fornisce la massima area che rimane a secco in mare, come risultato dell'arrivo del maremoto nella zona di studio. Ogni ventre del maremoto provoca un ritiro del mare rispetto alla consueta posizione della linea di costa, lasciando alcune aree temporaneamente prive di acqua. La somma delle aree rimaste a secco corrispondenti ai diversi ventri forma il massimo livello di ritiro. La mappa delle velocità massime di corrente (punto 8) fornisce la massima intensità della velocità orizzontale delle particelle d'acqua calcolata nell'area di studio, sia in acqua che a terra. Anche se la velocità verticale potrebbe avere un ruolo, le simulazioni di maremoto nella maggior parte dei casi trascurano la velocità verticale, utilizzando come variabile la media della velocità orizzontale lungo la colonna d'acqua, ovvero dal fondo fino al livello istantaneo del mare.

L'unica strada percorribile per studiare gli scenari di maremoto e produrre le mappe elencate è quella di usare modelli numerici per effettuare simulazioni su griglie (sia regolari che irregolari) che coprano il dominio di interesse. Molto importanti tra le altre mappe sono i campi di elevazione massima (minima) della superficie del mare nell'area di studio che per ogni

caso mostrano il massimo (minimo) livello calcolato in ogni nodo della griglia locale durante l'attacco del maremoto e che quindi sono anche utili per calcolare le linee di inondazione e di ritiro. La prima è il confine a terra tra l'area che non viene mai raggiunta dal mare e l'area che viene inondata almeno una volta dalle onde del maremoto. La seconda è il confine in mare che separa l'area che rimane sempre coperta dall'acqua e l'area che rimane a secco almeno una volta nel retrocedere della linea di costa durante il maremoto.

Quando il regime di marea è forte e ci sono differenze rilevanti tra alta e bassa marea, cose che accade più spesso negli oceani piuttosto che nei bacini e mari chiusi, gli scenari di pericolosità di maremoto possono essere costruiti distinguendo la condizione tra bassa e alta marea.

Generalmente è necessario un certo numero di sorgenti per fornire un quadro complessivo dei tanti modi con cui un maremoto può colpire un determinato luogo. Quindi per produrre lo scenario di maremoto peggiore credibile bisogna prima modellare i peggiori maremoti possibili, associati ad un numero adeguato di sorgenti, che possono colpire un luogo specifico e poi successivamente combinarli nello scenario aggregato. Il modo più ragionevole di aggregare è produrre mappe con la massima estensione di inondazione e ritiro e con le massime intensità (come l'altezza dell'inondazione e la velocità della corrente). Lo scenario risultante dovrebbe essere chiamato correttamente scenario aggregato di pericolosità di maremoto, ma spesso viene detto semplicemente scenario di pericolosità di maremoto, in quanto si suppone che il contesto possa chiarire cosa effettivamente rappresenti. La sintesi degli aggregati riguarda solo gli scenari locali, e più in specifico i prodotti compresi tra 5 e 8. Una tipica mappa di scenario di pericolosità aggregato è, per esempio, quella della massima estensione dell'area di inondazione, che è ottenuta mettendo insieme tutte le inondazioni risultanti dai singoli scenari. Questa mappa fornisce informazioni importanti per gli utenti finali, poiché divide la zona costiera in due classi distinte, l'area che non viene inondata da nessun maremoto, e quindi sicura, e l'area che può essere colpita da almeno un maremoto tra quelli ipotizzati.

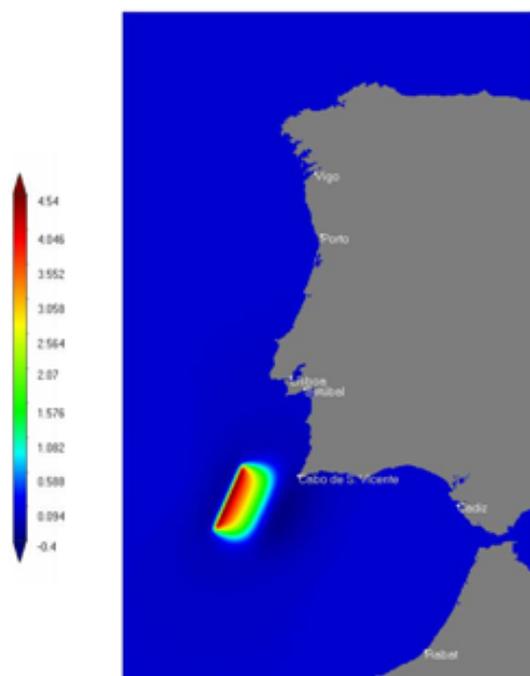
### 3.1 Selezione delle sorgenti

Il primo passo per la realizzazione di uno scenario consiste nella scelta delle sorgenti che potrebbe avere il maggiore potenziale tsunamigenico per l'area campione considerata (si veda Figura 1). Gli studi sismo-tettonici e i cataloghi di maremoto sono gli strumenti principali usati per fare uno studio di scenario peggiore di maremoto. Per le aree campione trattate in SCHEMA, un attento esame dei dati e della letteratura esistente ha fornito gli elementi per la scelta

delle sorgenti, come viene descritto in dettaglio nei rapporti scientifici prodotti dai partner del progetto. In questo manuale verrà fornita solo la lista delle sorgenti utilizzate (si veda la Tabella 2) assieme ai principali riferimenti bibliografici. Per l'area campione di Rabat, due dei tre scenari selezionati sono basati su terremoti storici: uno è basato su un'ipotesi di sorgente del maremoto che seguì il forte terremoto del 1755 (Baptista et al., 2003) mentre il secondo è il terremoto di magnitudo momento  $M_w=7.9$  avvenuto nel 1969 a sud del Gorringe Bank, al largo del Portogallo in direzione sud-ovest. Il terzo scenario consiste in un ipotetico enorme corpo di frana che potrebbe seguire ad un'eruzione del vulcano Cumbre Vieja nell'isola di La Palma nelle Canarie (Ward and Day, 2001).

**Tabella 2:** Lista delle sorgenti selezionate per SCHEMA

Area campione	Partner	Sorgente
Rabat Marocco	ACRI-ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>Potenziabile collasso del vulcano Cumbre Vieja (Ward and Day., 2001)</li> <li>Terremoto di Lisbona del 1755 (Baptista et al., 2003)</li> <li>1969 Gorringe Bank Earthquake (Gjevik et al, 1997; Guesmia et al, 1998)</li> </ul>
Setúbal Portogallo	HIDROM OD	<ul style="list-style-type: none"> <li>Terremoto di Lisbona del 1755 (Baptista et al., 2003)</li> <li>Faglia Marques de Pombal (Zitellini et al., 1999; Omira et al., 2009)</li> <li>Faglia Guadalquivir Bank (Omira et al, 2009)</li> </ul>
Mandelieu Francia	GSC, UNIBOL	<ul style="list-style-type: none"> <li>Terremoto Liguria occidentale del 1887 (UNIBOL da DISS, 2009)</li> <li>Frana di Nizza del 1979 (Assier-Rzadkiewicz et al., 2000)</li> <li>Terremoto di Boumerdes-Algiers del 2003 (UNIBOL da Delouis et al., 2003; Tinti et al. 2005)</li> </ul>
Catania Italia	UNIBOL	<ul style="list-style-type: none"> <li>Terremoto dell'arco ellenico occidentale del 365 d.C. (Papazachos, 1996; Tinti et al., 2005)</li> <li>Terremoto Sicilia orientale del 1693 (Argnani e Bonazzi, 2005)</li> <li>Ipotesi di frana della Sicilia orientale del 1693 (Armigliato et al., 2007)</li> <li>Terremoto dello Stretto di Messina del 1908 (Pino et al., 2009)</li> <li>Terremoto dello Stretto di Messina del 1908 più ipotesi di frana aggiuntiva (UNIBOL)</li> </ul>
Balchik Bulgaria	SRI-BAS, NOA-GI	<ul style="list-style-type: none"> <li>Terremoto del VI secolo d.C. (faglia con angolo di strike 40°, Ranguelov et al., 2008)</li> <li>Terremoto del sesto secolo d.C. (faglia con angolo di strike 90°, Ranguelov et al., 2008)</li> </ul>



**Figura 2:** La faglia Marques de Pombal (Omira et al. 2009), a SO di Lisbona, è stata scelta da HIDROMOD per costruire uno dei peggiori scenari credibili per l'area campione di Setúbal. In questa figura viene mostrata l'elevazione iniziale del mare.

Per l'area campione di Setúbal sono state esaminate tre faglie o sistemi di faglie al largo. La prima sorgente è la stessa scelta anche per l'area campione di Rabat ed è considerata la possibile sorgente del terremoto e maremoto di Lisbona del 1755 (Baptista et al., 2003). Le altre due sorgenti, posizionate nel Golfo di Cadice, sono state identificate attraverso complesse indagini sismo-tettoniche nella regione, che è dominata dalla convergenza tra le placche Africana ed Eurasica: queste sorgenti sono chiamate faglia Marques de Pombal (Zitellini et al., 1999) e faglia Guadalquivir Bank (Omira et al., 2009). Come esempio, la Figura 2 mostra l'elevazione della superficie del mare prodotta dallo scenario del terremoto causato dalla rottura della faglia Marques de Pombal, con parametri presi da Omira et al. (2009).

Per quel che riguarda l'area campione di Mandelieu, in Costa Azzurra, Francia, sono stati prodotti tre scenari sulla base di tre eventi tsunamigenici del passato: il terremoto ligure del 1887 (Eva e Rabinovich, 1997), la frana di Nizza del 1979 (Assier-Rzadkiewicz et al., 2000) ed il recente terremoto algerino del 2003 (Yelles et al., 2004). Due delle sorgenti sono locali, posizionate molto vicino all'area campione, mentre una è remota, dall'altra parte del bacino Mediterraneo occidentale.

Per l'area campione di Catania sono state selezionate cinque sorgenti tsunamigeniche. Una di queste, una sorgente remota, è collocata nell'arco ellenico

occidentale ed è basata sul terremoto del 365 d.C. che colpì Creta (Papazachos, 1996) e che causò un maremoto che investì le coste del Mediterraneo centrale ed orientale (Tinti et al., 2005). Le rimanenti quattro sorgenti sono basate su due eventi catastrofici locali che avvennero in Sicilia orientale e nello Stretto di Messina rispettivamente nel 1693 e nel 1908.

Per quanto riguarda Balchik, Bulgaria, la zona sorgente è stata scelta considerando principalmente il forte terremoto tsunamigenico del sesto secolo d.C. al largo della città, ma anche il più recente terremoto del 1901, che ha danneggiato Balchik, poiché si ipotizza che tali eventi condividano la stessa area sorgente. A causa delle difficoltà nel definire con precisione le caratteristiche della faglia, sono state esplorate due ipotesi diverse per l'angolo di strike, in modo da avere due diversi scenari.

A questo punto si possono fare alcune considerazioni. Primo, per tutte le aree campione è stata considerata più di una singola sorgente. Questo era atteso, dato che la maggior parte delle aree esposte possono essere colpite da grandi maremoti generati da diverse sorgenti, ma non è un vincolo del metodo. In alcuni casi speciali potrebbe essere considerata una sola sorgente importante per l'analisi. Secondo, per alcune delle aree campione sono state scelte non solo sorgenti sismiche ma anche frane, collocate sia in ambienti vulcanici che lungo margini continentali. Questo è un fattore a favore della scelta di non adottare un approccio probabilistico per la produzione degli scenari, dato che i tempi di ritorno di eventi franosi sono molto difficili da stimare. Terzo, si deve insistere sul fatto che molte sorgenti sono state scelte sulla base di eventi passati. Questo non significa che l'obiettivo dell'analisi sia la ricostruzione dei maremoti storici, ma semplicemente che i maremoti storici vengono usati come buon suggerimento per produrre gli scenari. Normalmente, per lo scenario peggiore si usa una sorgente con la maggiore intensità (cioè di magnitudo maggiore nel caso di terremoto) rispetto a quella stimata per il caso storico. Quarto, la scelta di sorgenti di maremoto è il risultato di attente considerazioni scientifiche, e ha un certo grado di arbitrarietà dato che deriva da analisi soggettive. Questo è un problema comune a molti aspetti relativi alla stima di pericolosità e può essere trattato in diversi modi. In SCHEMA il problema dell'inevitabile mancanza di obiettività nelle sorgenti degli scenari e, il che è l'altra faccia della medaglia, delle incertezze nei valori dei parametri, è stato risolto sviluppando in parallelo con gli scenari "standard" anche altri scenari "aumentati". Per essere più precisi, sono stati adottati due metodi per ottenere una sorgente "aumentata". I dettagli sulle incertezze e su come sono state introdotte e calcolate verranno descritti nella Sezione 4.3.

### 3.2 Modelli numerici

Dopo che sono state scelte le sorgenti per ogni area campione, sono state eseguite le simulazioni numeriche per tutti i maremoti corrispondenti (si veda Figura 1) ad opera dei partner del progetto con esperienza in modellazione numerica di maremoto. In Tabella 3 sono elencati i codici numerici per la simulazione di maremoti utilizzati in SCHEMA.

**Tabella 3:** Modelli numerici di maremoto utilizzati per le aree campione del progetto SCHEMA.

Partner	Nome modello	Area campione	Collegamento di griglie bidirezionale	Soluzione
ACRI-ST	TIDAL	Rabat	No	Boussinesq
HIDROMOD	MOHID	Setúbal	Si	Shallow water
GSC, UNIBOL	COMCOT, UBO-TSUFDF	Mandelieu	Si	Shallow water
NOA-GI	FUNWAVE	Balchik	Si	Boussinesq
UNIBOL	UBO-TSUFDF	Catania	Si	Shallow water

Tutti i modelli risolvono le equazioni di Navier-Stokes per la propagazione di onde marine con l'approssimazione che la velocità verticale delle particelle sia trascurabile e che le componenti della velocità orizzontale siano uniformi lungo la colonna d'acqua verticale.

TIDAL è un software per il calcolo di soluzioni a problemi inerenti i fluidi, il calore e il trasporto di massa per problemi in approssimazione d'acqua bassa. Può essere usato per simulare stati transienti o stazionari in bacini con linee di costa irregolari, con batimetrie complesse e con isole. Il bacino può includere fiumi, sorgenti, insenature, sbocchi costieri. Può anche comprendere piane costiere o mareali che possono essere temporaneamente inondate o rimanere a secco.

HIDROMOD ha simulato i maremoti utilizzando il software MOHID (si veda <http://www.mohid.com>). MOHID è un software di modellazione 3D open source, usato nella sua approssimazione 2D per le simulazioni di maremoto. Il codice è stato sviluppato da MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) all'Istituto Superior Técnico (IST) appartenente alla Technical University di Lisbona. MOHID permette di adottare una filosofia di modellazione integrata, non solo per quel che riguarda i processi (fisici e bio-geochimici), ma anche per le diverse scale (mediante griglie annidate l'una entro l'altra) e per i vari sistemi (estuari, bacini idrografici), grazie all'utilizzo di una filosofia di programmazione ad oggetti. Per lo studio di maremoti è stata utilizzata la versione di MOHID approssimata per onde lunghe (si veda Vaz et al., 2007).

Il codice numerico usato da GSC è il software ComMIT (Community Model Interface for Tsunami), basato sul modello numerico Method of Splitting Tsunami (MOST), sviluppato dal Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) degli Stati Uniti d'America (<http://nctr.pmel.noaa.gov/ComMIT>; si veda anche Titov e Synolakis, 1995).

NOA-GI ha simulato la propagazione e l'inondazione di tsunami con FUNWAVE, un modello basato sull'approssimazione di Boussinesq, che venne inizialmente sviluppato per modellare la dinamica delle onde nel passaggio da acque profonde alla costa, comprendendo la rottura delle onde ed il run-up (<http://chinacat.coastal.udel.edu/programs/funwave/funwave.html>; si veda anche Kirby et al., 1998).

Per eseguire le simulazioni numeriche per le aree campione di Catania e Mandelieu, UNIBOL ha utilizzato il codice di simulazione di maremoto UBO-TSUFDF, sviluppato in proprio, che risolve sia le equazioni lineari che non-lineari con un algoritmo di tipo leap-frog su griglie strutturate sfalsate mediante la tecnica delle differenze finite.

Tutti i codici utilizzano la tecnica di annidamento delle griglie di calcolo (Figura 7) che consente di avere diverse risoluzioni spaziali per modellare la propagazione del maremoto su scala regionale e l'impatto del maremoto su scala locale nelle aree campione: TIDAL utilizza i risultati ottenuti per la griglia meno densa come dati di ingresso per le griglie più fitte (accoppiamento unidirezionale), mentre gli altri codici utilizzano un accoppiamento completo bidirezionale tra la griglia meno densa e quella più fitta, con tecniche diverse da codice a codice.

L'insieme dei modelli utilizzati nel progetto SCHEMA elencato in Tabella 3 non copre tutti i possibili modelli per la propagazione di maremoto. Molti altri sono stati sviluppati specialmente negli ultimi anni, dopo che è cresciuto molto l'interesse sui maremoti a seguito del disastroso tsunami del 2004 nell'Oceano Indiano. Va sottolineato che il metodo utilizzato in SCHEMA non stabilisce né raccomanda un codice di simulazione per il maremoto. Viene semplicemente osservato che la modellazione di maremoto gioca un ruolo fondamentale nella procedura poiché è la base della creazione degli scenari, e quindi l'utilizzo di qualsiasi software, sviluppato in proprio o commerciale, deve essere fatto prestando attenzione ai vantaggi ed alle limitazioni del codice, con l'avvertenza che condurre simulazioni alla cieca potrebbe condurre ad anomalie irrealistiche. Un ulteriore commento è che tutti i codici di simulazione di maremoto utilizzati dai partner di SCHEMA sono stati validati su un caso comune, più precisamente calcolando la propagazione del maremoto del 2004 nell'Oceano Indiano dalla sorgente

fino all'arcipelago delle Seychelles e confrontando i risultati numerici con i dati di run-up osservati sull'isola di Praslin e con la registrazione della stazione mareografica nel porto di Pointe La Rue, sull'isola di Mahé (si veda SCHEMA Deliverable 1.3, 2008).

### 3.3 Dati di batimetria e di topografia

La propagazione del maremoto è influenzata dalla batimetria del fondale, e l'impatto del maremoto a costa è influenzato dalla topografia della costa stessa. Perciò non sorprende che i risultati delle simulazioni di maremoto dipendano dai dati di batimetria e topografia, e che un passaggio molto importante per la modellazione sia la creazione di un sistema di griglie di calcolo con una topo-batimetria adeguata. Questo sembra semplice, ma in pratica è piuttosto complicato a causa della mancanza di dati con risoluzione appropriata e del fatto che, anche quando ci sono, spesso non sono facilmente o liberamente accessibili. Negli ultimi anni, è stato fatto un grande passo in avanti grazie a progetti internazionali che hanno prodotto dei set di dati omogenei di batimetria e topografia per l'intero pianeta: p.e. GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans; <http://www.gebco.net/>) e SRTM (Shuttle Radar Topography Mission; <http://srtm.usgs.gov/>) con risoluzione rispettivamente di 30 secondi di arco e 90 m. Tale risoluzione è sufficiente per scenari di maremoto regionali (si veda Tabella 1), ma non è sufficiente per gli studi di dettaglio locali per le aree campione di SCHEMA. A questo scopo, quindi, ogni partner ha raccolto dati topo-batimetrici da diverse fonti, anche in collaborazione con le autorità locali, e successivamente ha creato griglie di calcolo attraverso opportune procedure di interpolazione e unione dei dati.

#### 3.3.1 Integrazione tra dati topografici e batimetrici

Un'ulteriore complicazione nasce da un'esigenza che è peculiare degli studi che si propongono di calcolare inondazione e run-up di un maremoto. In genere, i dati di topografia e batimetria vengono raccolti da agenzie e istituzioni diverse e processati in modo indipendente, con la conseguenza che non utilizzano lo stesso sistema di riferimento e che hanno diversi riferimenti per il livello di zero della componente verticale. Infatti, è convenzione che i dati di elevazione del suolo siano riferiti al livello del mare mediato su un lungo periodo (possibilmente di circa 18 anni), mentre la profondità del mare nelle carte nautiche è riferita al valore del livello del mare al di sotto del quale la marea scende molto raramente, ovvero al livello minimo di marea. Perciò spesso la rappresentazione della linea di costa derivante da questi diversi database non è coerente. Se

ci si limitasse a mettere insieme i due tipi di database, un transetto che attraversa la linea di costa mostrerebbe quasi sempre una discontinuità nel passaggio tra terra e mare. Quindi è necessario elaborare e validare tali dati con particolare attenzione, in modo da creare un unico coerente database topo-batimetrico nell'area di costa, là dove la risoluzione richiesta è compresa tra 1-40 m.

Un esempio di combinazione di diversi set di dati per gli scenari locali di maremoto viene fornito in Figura 3 ed in Figura 4 che si riferiscono all'area campione di Mandelieu in Francia. In Figura 3 si vede che la batimetria risulta dalla combinazione di dati GEBCO e di dati acquisiti da IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) durante una serie di campagne dati in barca condotte sia vicino a costa che al largo.

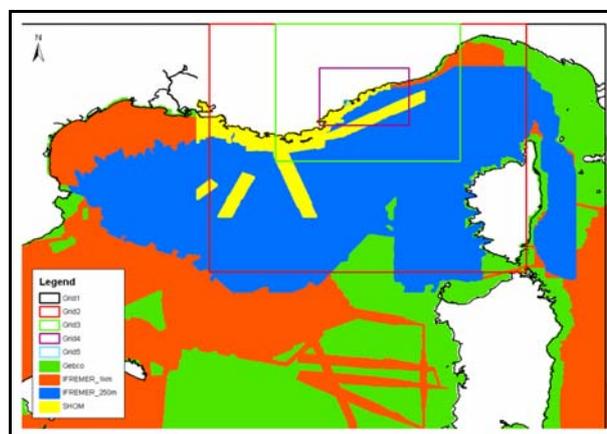


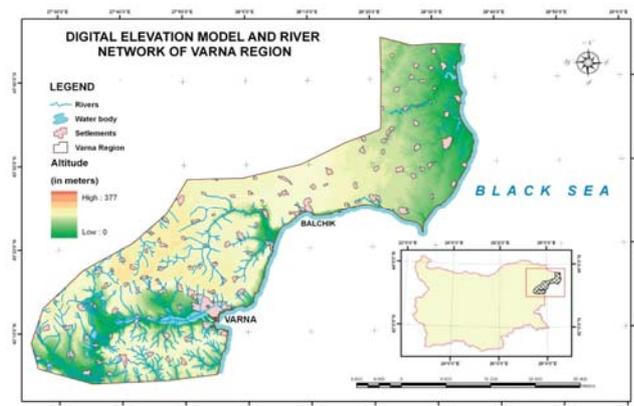
Figura 3: Dati di batimetria per l'area campione di Mandelieu raccolti da GSC. I rettangoli rappresentano i confini delle griglie di calcolo del sistema multi-griglia creato da UNIBOL per le simulazioni numeriche.



Figura 4: Esempio di linea di costa dettagliata nell'area campione di Mandelieu. La posizione della linea di costa è stata dedotta da foto interpretazione di immagini di Google Earth.

Per la topografia di Mandelieu è stato utilizzato un modello di elevazione digitale (DEM) locale molto accurato. La posizione della linea di costa, che è il confine tra il DEM e i dati marini, è stato dedotta dall'analisi di immagini di Google Earth e validata da osservazioni sul campo (Figura 4). In aggiunta, la posizione della linea di costa può essere usata come vincolo per armonizzare i dati di terra e di mare nel processo di costruzione di un solo set di dati topobatimetrici.

I DEM sono stati acquisiti dai partner di SCHEMA per tutte le aree campione. Un altro esempio viene dato in Figura 5 che mostra il DEM della regione di Varna in Bulgaria, utilizzato per l'area campione di Balchik.



**Figura 5:** Digital Elevation Model (DEM) della regione intorno a Varna, Bulgaria, inclusa la città di Balchik, selezionata come una delle aree campione di SCHEMA (disponibile grazie a SRI-BAS)

### 3.3.2 Il problema delle maree

E' banale ricordare che la posizione della linea di costa cambia costantemente a causa dei fenomeni erosivi e di deposizione costieri, delle attività umane e delle maree. In particolare, in alcune zone, le maree possono cambiare la posizione della linea di costa molto velocemente durante il giorno. Per quel che riguarda gli scenari di maremoto, le maree possono cambiare in modo significativo il livello di inondazione prodotta dal maremoto, e di conseguenza l'impatto del maremoto sulla costa ed i relativi danni. Nel progetto SCHEMA, il problema delle maree è stato affrontato considerando che nei luoghi in cui le maree sono molto forti fosse conveniente elaborare due distinti scenari di maremoto locali, uno per la bassa ed uno per l'alta marea. Dal punto di vista dello scenario peggiore credibile, comunque, lo scenario di alta marea è quello associato all'impatto maggiore ed al maggiore livello di danno atteso. Quindi, se nella fase di calcolo degli scenari di pericolosità di maremoto vengono considerati entrambi i regimi di marea, nella successiva fase di scenari di danneggiamento viene considerata solo la condizione

di alta marea. Le maree sono piuttosto deboli nel Mediterraneo e nel Mar Nero, ed inoltre non sono molto rilevanti nelle aree campione di SCHEMA che si trovano in questi due bacini, mentre sono forti nell'Oceano Atlantico. Un esempio è dato in Figura 6 per la penisola di Troia nell'area campione di Setúbal, Portogallo, dove viene mostrata l'inondazione di un'alta marea di 3.8 m.



**Figura 6:** Differenza tra la linea di costa durante l'alta e la bassa marea nella penisola di Troia nell'area test di Setúbal, come calcolato da HIDROMOD.

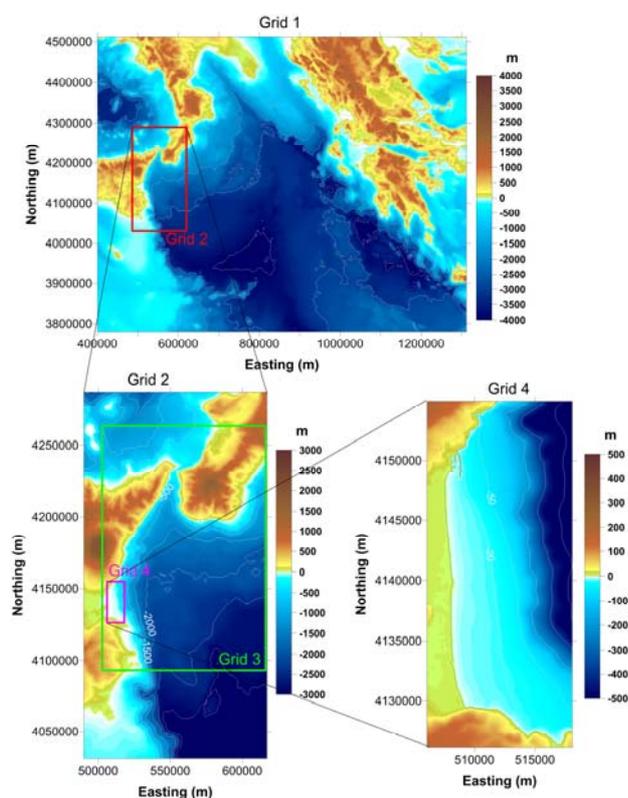
Per quanto riguarda le simulazioni di maremoto, in SCHEMA la marea viene assunta come un processo statico, in grado di cambiare il valore di riferimento del livello del mare, e perciò la quota a terra o della profondità a mare. In altre parole, una volta costruita la griglia locale per le condizioni di bassa marea, la griglia per l'alta marea può essere semplicemente ottenuta sottraendo una quantità costante a tutti i valori di elevazione per tutti i valori della griglia.

### 3.4 Come trattare risoluzioni diverse

Gli scenari di pericolosità di maremoto possono essere distinti in scenari locali e regionali come spiegato nel capitolo 3, vale a dire scenari che coprono la propagazione su grandi distanze e scenari che descrivono l'impatto del maremoto sulle strutture a terra, che è un processo tipicamente su scala ridotta. La risoluzione spaziale necessaria a rappresentare in modo adeguato l'interazione delle onde di maremoto con gli elementi locali è vincolata alla scala geometrica degli ostacoli che si vogliono considerare, mentre su larga scala è dettata dalla lunghezza d'onda del maremoto o dalla scala delle principali irregolarità del fondo marino. Se si vuole descrivere come un frangiflutti interagisce con un'onda di maremoto o come un maremoto colpisce un edificio, è necessaria un passo di griglia compreso tra 1 e 10 m, mentre in acque profonde il passo di griglia può essere tra 500 e 5000 m per

trattare la propagazione di maremoti generati da grandi terremoti.

I modelli numerici possono trattare le diverse risoluzioni in due modi diversi, cioè utilizzando una singola griglia non strutturata con risoluzione eterogenea o attraverso un certo numero di griglie strutturate interconnesse con diverse densità di nodi. Tipicamente la prima categoria è quella di griglie composte da poligoni, come i triangoli, di diversa grandezza, usati da codici basati sulla tecnica degli elementi finiti: i poligoni più piccoli sono usati per coprire le aree del dominio dove è richiesta la risoluzione maggiore. Nessun modello di questo tipo è stato utilizzato nel progetto SCHEMA. La seconda categoria copre il dominio con un numero di griglie annidate una dentro all'altra, con la meno densa che include la più fine. Questa tecnica, adottata dai modelli alle differenze finite, permette di calcolare la propagazione di onde con risoluzione crescente nel momento in cui l'onda passa da griglia meno fine a griglia più fine. Dalla combinazione di una serie di griglie si può ottenere il livello di risoluzione desiderato in una specifica area.



**Figura 7:** Sistema di quattro griglie usato da UNIBOL per coprire la regione del Mediterraneo centrale dall'Arco Ellenico occidentale (tra il Peloponneso e la parte occidentale di Creta, dove si trova la sorgente del maremoto del 365 d.C.) alla Sicilia orientale, dove si trova l'area campione di Catania.

Come spiegato in sezione 4.2 tutti i modelli usati dai partner di SCHEMA usano un sistema di griglie annidate per coprire il dominio di calcolo. Un esempio di questo annidamento viene fornito in Figura 3 dove si vede come il Mediterraneo viene coperto da un gruppo di cinque griglie, con la maggior risoluzione corrispondente a 8 m in griglia 5. Un esempio ulteriore è dato in Figura 7. Qui la regione tra la sorgente del maremoto del 365 d.C. e la città di Catania (si veda Tabella 3) viene coperta da quattro griglie, passando da un passo spaziale di 3000 m per la griglia esterna (griglia 1) fino a 40 m per la più fine (griglia 4) che comprende la città di Catania e la spiaggia a sud di Catania chiamata La Plaia, passando attraverso due griglie intermedie con passo di 1000 m (griglia 2) e di 200 m (griglia 3).

### 3.5 Trattamento dell'incertezza

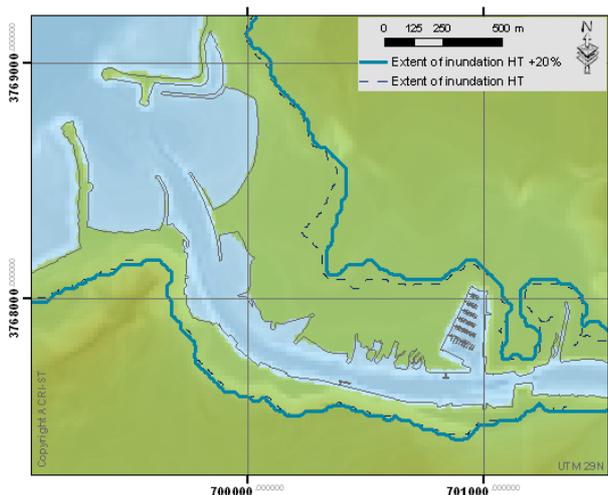
Le incertezze sui risultati di calcolo sono inevitabili e dipendono da un grande numero di fattori. Nel contesto di scenari di pericolosità di maremoto basati sul peggior caso credibile, le incertezze sono principalmente dovute alla scelta della sorgente di maremoto ed al calcolo della propagazione del maremoto. Le sorgenti sono selezionate sulla base di giudizi personali di esperti, e quindi c'è sempre un grado di incertezza legato alla soggettività: si potrebbero scegliere più sorgenti, o altre sorgenti, o la stessa sorgente con diverse intensità (minore o maggiore). La propagazione dipende dal modello di maremoto scelto, dalla qualità del modello di simulazione, e dalla qualità dei dati topo-batimetrici. Maggiori dettagli su quest'ultimo punto possono essere trovati in Gardi et al. (2011).

I modelli di simulazione usati dai partner di SCHEMA sono stati verificati mediante test classici e sono stati applicati a molti casi di simulazioni di onde lunghe. Tali modelli rappresentano lo stato dell'arte e quindi sono affidabili. I dati di topo-batimetria sono stati assemblati con grande attenzione, ma l'accuratezza media del dato è difficile da accertare e ancora più difficile è determinare la quantità del massimo errore possibile. Si consideri che la discrepanza di pochi metri nella profondità del mare ha poca influenza in acque profonde, ma diventa fondamentale nelle zone vicino alla costa e a terra, poiché può influenzare in modo significativo l'estensione dell'area inondata.

Un modo conveniente di occuparsi dell'incertezza è compiere un'analisi di sensibilità, il che significa cambiare alcuni parametri di ingresso nella procedura in modo svolgere dei calcoli con nuovi parametri ed esaminare come cambia il risultato finale. Poiché il parametro più rilevante è la grandezza della sorgente, si può restringere l'analisi solo a questo caso, per motivi di semplicità e di economia. Poiché le sorgenti utilizzate

per le aree campione di SCHEMA sono essenzialmente o terremoti o frane (si veda Tabella 3), sono state adottate due diverse strategie.

Quando il maremoto è provocato da un terremoto, è noto che il terremoto inizialmente innalza o abbassa la superficie del mare quasi della stessa quantità di cui si sposta il fondo marino. Nell'area dove il terremoto determina un abbassamento (sollevamento) del fondale, il livello dell'acqua scende (sale) e forma un ventre (cresta) al livello della superficie. La forma d'onda causata dal terremoto viene utilizzata come stato (o condizione) iniziale dell'onda di maremoto. Variare la grandezza del terremoto significa variare la grandezza dello spostamento verticale del fondale e di conseguenza l'ampiezza dell'onda iniziale del maremoto, e viceversa. Per svolgere un'analisi di sensibilità per maremoti indotti da terremoti i partner di SCHEMA hanno considerato ogni sorgente sismica di Tabella 3 ed hanno aumentato l'ampiezza del maremoto iniziale del 20%.



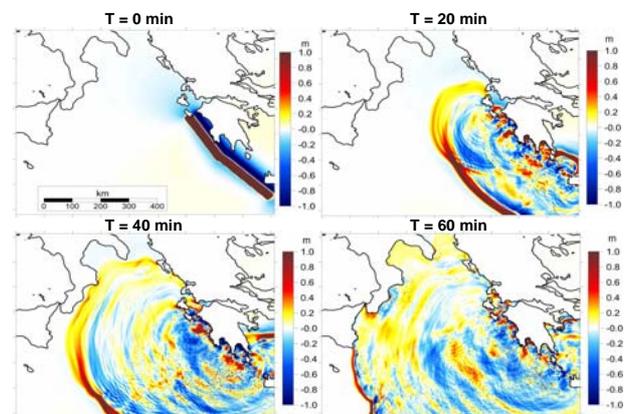
**Figura 8:** Confronto dell'estensione dell'inondazione tra scenario locale (linea tratteggiata blu scuro) e il corrispondente scenario "aumentato" (linea azzurra continua). L'esempio si riferisce all'area campione di Rabat e lo scenario è quello associato al terremoto storico di Lisbona del 1755 ed è il risultato della collaborazione tra ACRI-ST e CRTS.

Il meccanismo di generazione di un maremoto causato da una frana è più complesso di quello causato da un terremoto. Il concetto di onda iniziale di maremoto non ha più significato, poiché il maremoto viene generato durante il processo di evoluzione della frana. Si può comunque notare che l'ampiezza del maremoto è strettamente correlata allo spessore della frana e entro un certo limite si può parlare di dipendenza lineare. In analogia con il caso di sorgente sismica, quindi, l'analisi di sensibilità è stata attuata aumentando lo spessore della frana del 20%.

Lo scenario elaborato con una sorgente più intensa viene definito **scenario aumentato** mentre quello con la grandezza di riferimento viene chiamato scenario di riferimento o più spesso semplicemente scenario. Risulta evidente che l'effetto del maremoto sulla costa sarà più forte per la sorgente aumentata: la linea di inondazione si muoverà più verso l'interno, la linea di ritiro si muoverà più verso il largo, le elevazioni massime e minime della superficie del mare saranno maggiori, ecc.

### 3.6 Scenari regionali di pericolosità di maremoto

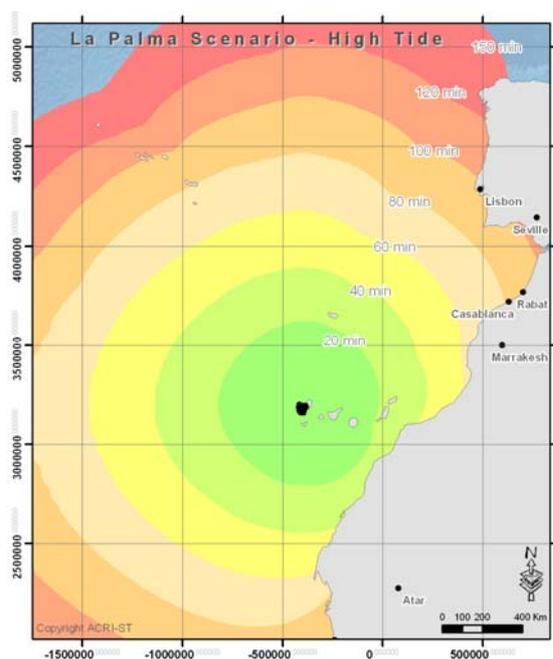
Gli scenari regionali di pericolosità di maremoto sono ottenuti attraverso simulazioni numeriche di maremoto e sono principalmente focalizzati sulla propagazione delle onde, dalle sorgenti fino in prossimità delle aree di studio specifiche. Cosa si intenda per tale tipo di scenario è indicato in Tabella 1 e specificato meglio all'inizio di questo capitolo. In questa sezione verranno forniti alcuni esempi delle mappe che contribuiscono a comporre lo scenario, mappe che sono prese dagli studi dei diversi partecipanti al progetto SCHEMA.



**Figura 9:** Istantanee della propagazione del maremoto per uno degli scenari considerati per l'area campione di Catania, basato sull'evento del 365 d.C. accaduto al largo della costa occidentale di Creta, calcolato da UNIBOL.

Le istantanee dei fronti di propagazione del maremoto sono mostrate in Figura 9. Si riferiscono al maremoto generato da una sorgente nella zona di subduzione dell'arco ellenico occidentale. Lo spostamento iniziale della superficie marina (angolo superiore sinistro) mostra che la faglia è formata da due segmenti che coprono una lunghezza superiore ai 400 km, dalla parte occidentale di Creta al Peloponneso. Il fronte principale viaggia verso SSO e impiega più di 40 min per raggiungere la Sicilia orientale e la città di Catania.

Le mappe dei tempi di propagazione sono un'altra componente dello scenario regionale di pericolosità di maremoto. La Figura 10 fornisce un esempio di questo tipo di mappe mostrando la propagazione nell'Oceano Atlantico del maremoto causato dall'ipotizzato collasso del vulcano Cumbre Vieja nell'isola di La Palma nelle Canarie. Le mappe dei tempi di propagazione danno il minimo tempo necessario al fronte del maremoto per raggiungere un luogo specifico. Tra le sorgenti prese in considerazione nel progetto SCHEMA (Tabella 2), le più lontane in termini di tempi di propagazione dalle rispettive aree campione sono la frana di La Palma per Rabat, il terremoto di Boumerdes-Algiers per Mandelieu e il terremoto dell'arco ellenico occidentale per Catania.



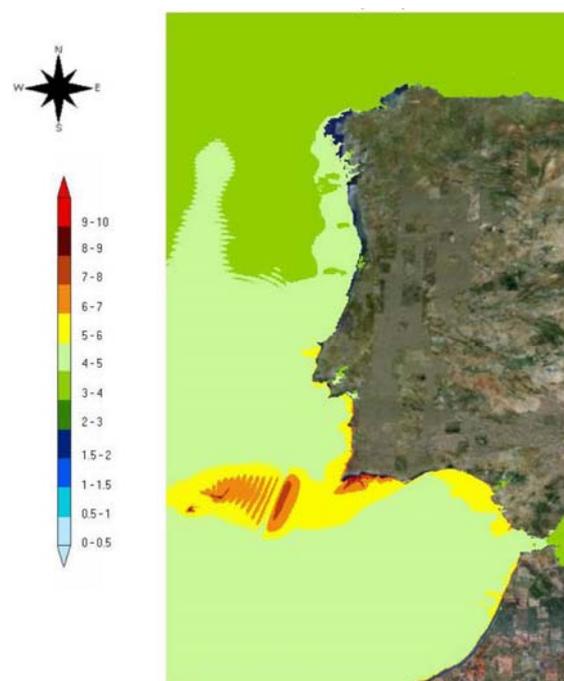
**Figura 10:** Mappa del tempo di propagazione dello scenario associato al mega-collasso del Cumbre Vieja nell'isola di La Palma, elaborato da ACRI-ST per l'area campione di Rabat. Si vede che le prime onde di maremoto raggiungerebbero Rabat in circa 90 minuti.

Le mappe con le istantanee della propagazione del maremoto devono essere completate dalle mappe delle elevazioni massime e minime della superficie del mare. Sono utili perché forniscono un'immagine immediata del cammino principale seguito dal fronte del maremoto e delle aree dove il maremoto arriva con le maggiori ampiezze e quindi con più energia. La Figura 11 si riferisce al maremoto associato alla faglia Marques de Pombal, che è una delle sorgenti scelte per l'area campione di Setúbal. Risulta chiaro che la propagazione del maremoto non è isotropa. La maggior parte dell'energia dell'onda si muove perpendicolarmente all'asse della faglia (che è approssimativamente NNE-SSO). Abbastanza presto il

fronte del maremoto subisce una forte deviazione verso Cape Saint-Vincent per effetto della batimetria. Vicino alla costa i massimi sono più alti perché il maremoto, come è noto, viene amplificato.

### 3.7 Scenari locali di pericolosità di maremoto

Gli scenari locali di pericolosità sono il passo finale di questa fase e sono centrati sugli aspetti locali delle interazioni del maremoto con la costa, specialmente per quel che riguarda i valori estremi delle grandezze idrodinamiche, come le elevazioni massime, le velocità massime della corrente, ecc. che possono servire a caratterizzare l'impatto del maremoto sugli elementi esposti.

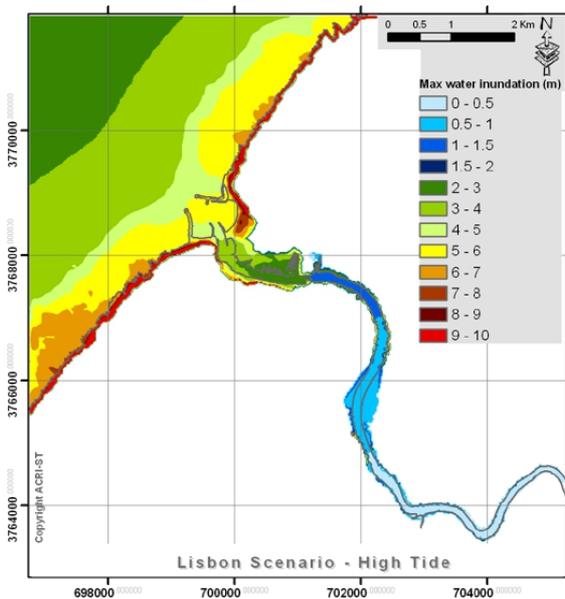


**Figura 11:** Elevazione massima della superficie del mare (in metri) per la faglia Marques de Pombal analizzata per l'area campione di Setúbal su scala regionale. I calcoli sono stati fatti da HIDROMOD, con condizione iniziale fornita da UNIBOL.

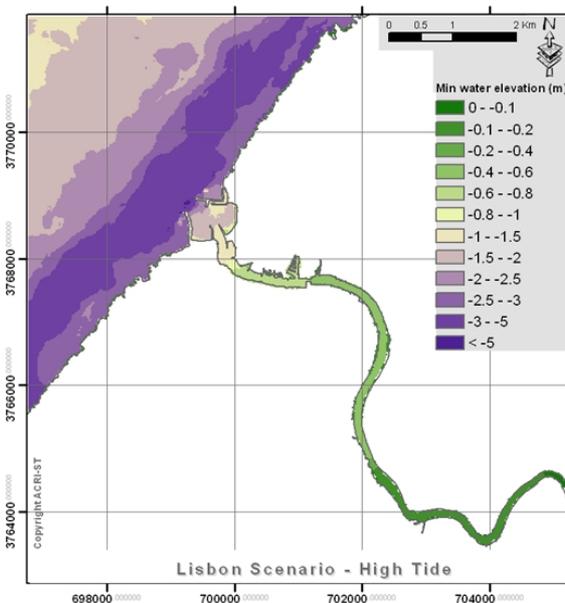
In termini di accuratezza le mappe locali sono le maggiormente sensibili ai dati topo-batimetrici ed alla risoluzione della griglia di calcolo, poiché i risultati delle simulazioni di maremoto dipendono fortemente dalla qualità delle griglie.

Le Figure 12-14 mostrano i campi di massima e minima elevazione della superficie del mare e della massima velocità della corrente nell'area campione di Rabat, calcolati per lo scenario associato al terremoto del 1755 in condizioni di alta marea (2.97 m sopra il livello minimo). Si può notare che il maremoto penetra in

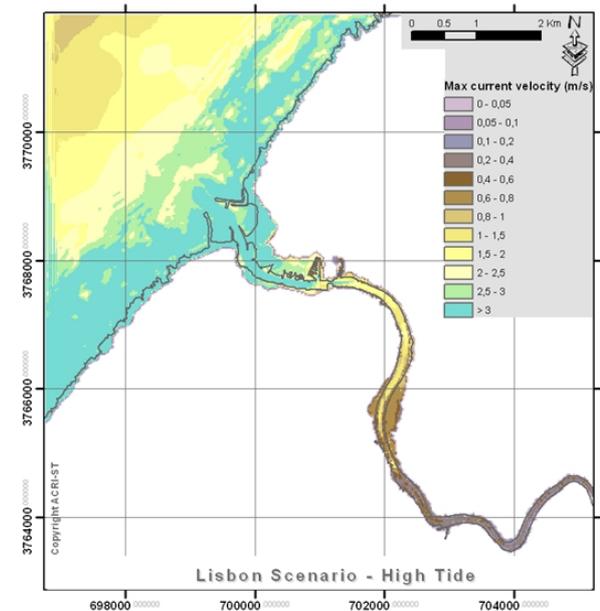
profondità nel fiume Bouregreg separando le città di Rabat (sul lato SO) e Salé (sul lato NE), nonostante il fiume sia protetto da un complesso sistema di frangiflutti. La penetrazione del maremoto lungo i fiumi è una caratteristica comune della dinamica del maremoto, tanto che spesso gli elementi e le persone disposti lungo gli argini o vicino alla bocca dei fiumi sono esposti al pericolo quanto quelli che si trovano vicino al mare.



**Figura 12:** Elevazione massima della superficie del mare per l'area campione di Rabat per lo scenario del terremoto di Lisbona del 1755, calcolata da ACRI-ST.



**Figura 13:** Elevazione minima della superficie del mare per l'area campione di Rabat per lo scenario del terremoto di Lisbona del 1755, calcolata da ACRI-ST.



**Figura 14:** Velocità massima della corrente per l'area campione di Rabat per lo scenario del terremoto di Lisbona del 1755, calcolata da ACRI-ST.

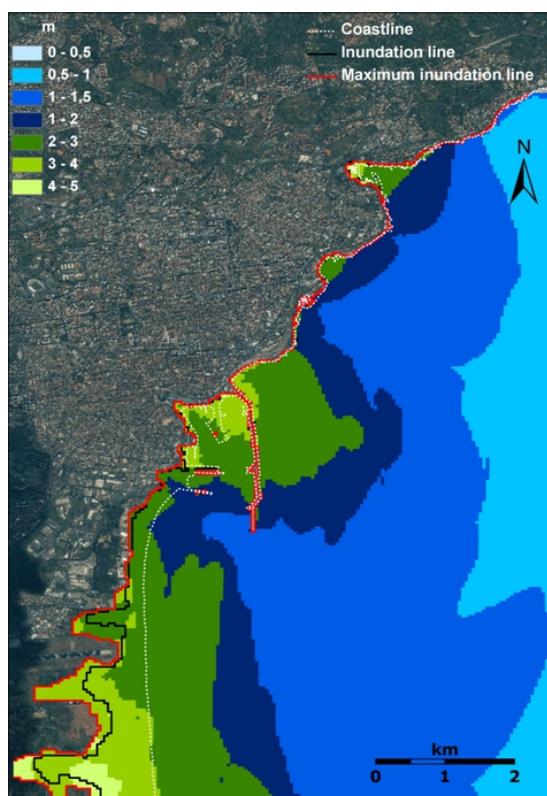
### 3.8 Scenari aggregati

Quando si applica l'approccio dello scenario peggiore credibile alla stima di pericolosità di maremoto, un passo fondamentale è la combinazione dei risultati ottenuti per le singole sorgenti di maremoto. Il risultato della combinazione è lo scenario aggregato. Il processo di aggregazione consiste nel selezionare per ogni posizione della mappa il valore estremo (il massimo o il minimo) calcolato per ogni caso individuale, come spiegato nel capitolo 3.

Un esempio di aggregazione è dato in Figura 15 che si riferisce all'area campione di Catania e mostra il campo ottenuto combinando il valore massimo di elevazione del mare calcolato per i cinque scenari esaminati per questo sito (vedi Tabella 2). La linea di inondazione è il confine della massima estensione della zona sommersa. Si può notare che la mappa aggregata spesso è dominata da un caso individuale, che in ogni punto della mappa raggiunge il massimo (minimo) valore. Questo succede, ad esempio, per l'area campione di Rabat dove lo scenario del maremoto del 1755 è di gran lunga il più forte tra quelli considerati. Le Figure 12-14 possono essere prese anche come ulteriori esempi di mappe di scenari aggregati.

## 4 Scenari di danno da maremoto

Gli scenari di danno da maremoto descrivono a scala locale le possibili conseguenze del maremoto allo stesso modo degli scenari di pericolosità di maremoto trattati nella precedente sezione. Con riferimento alle linee guida della metodologia schematizzata in Figura 1, si può notare che questa è l'ultima fase dell'analisi e deve essere preceduta dall'analisi di vulnerabilità.



**Figura 15:** Mappa aggregata dell'elevazione massima del mare calcolata per l'area campione di Catania prodotta da UNIBOL. Le linee di inondazione aggregata (nera) e la linea di inondazione (rossa) derivata dalla combinazione degli scenari aumentati sono disegnate insieme per confronto.

La prima parte di questo capitolo è dedicata a descrivere come può essere stimata la vulnerabilità degli elementi esposti al maremoto e come il livello di danneggiamento possa essere formalmente collegato al livello di pericolosità. La seconda parte, invece, è focalizzata sul modo di costruire scenari di danno da maremoto. In analogia con la definizione di scenari di pericolosità, anche per lo scenario di danno si può affermare che può essere rappresentato da una serie di mappe specifiche in cui gli elementi esposti che si

trovano nell'area sommersa, vengono mappati con l'indicazione dei rispettivi livelli di danno sia qualitativi (stimati) che quantitativi (calcolati). Queste mappe possono essere prodotte sulla base di un singolo scenario di maremoto o per lo scenario aggregato come combinazione di tutti i singoli casi. In questo approccio viene attribuito un significato più rilevante all'analisi ottenuta per lo scenario aggregato, e se non vengono fatte ulteriori specificazioni, questo viene definito **scenario di danno da maremoto**.

Un passo successivo sarebbe quello di produrre mappe di evacuazione che possono essere completate solo al completamento dell'analisi dello scenario di danno. A questo tema viene interamente dedicato un manuale specifico dove sono trattati i metodi per la creazione di mappe di evacuazione e per sviluppare strategie di evacuazione capaci di assicurare il miglior risultato in caso di maremoto (Scheer et al., 2010). Quindi l'argomento sarà toccato molto brevemente solo alla fine di questo capitolo.

### 4.1 Stima della vulnerabilità

Gli oggetti e gli elementi esposti al maremoto sono molti e appartengono a diverse categorie. Molti degli sforzi nel progetto SCHEMA sono stati indirizzati alla stima della vulnerabilità degli edifici. I maremoti possono danneggiare gli edifici in modo diverso a seconda di alcuni fattori che possono essere sintetizzati come segue:

- la resistenza intrinseca delle costruzioni dovuta alle loro caratteristiche;
- la vicinanza degli edifici alla linea di costa;
- l'altezza delle onde che colpiscono gli edifici;
- l'ambiente circostante gli edifici.

Le azioni meccaniche dirette che possono indebolire la resistenza degli edifici fino ad indurne anche il crollo totale sono secondo Yeh et al. (2005):

- le forze idrostatiche;
- le forze di galleggiamento (forze verticali);
- le forze idrodinamiche;
- le forze di sollevamento;
- l'impatto di oggetti fluttuanti e detriti e la pressione di questi oggetti;

- le forze delle onde che si infrangono.

A questa descrizione fisica basilare si può aggiungere:

- il numero totale di onde e riflussi che colpiscono gli edifici;
- la durata dell'inondazione.

Molto pochi di questi fattori possono essere facilmente determinati sul campo e descritti alla scala di ogni edificio su un'area vasta che è soggetta all'inondazione di un grosso maremoto. Questa considerazione fornisce la giustificazione di un approccio riduttivo che considera solo un sottoinsieme di questi fattori o addirittura una "dimensione" singola e misurabile del maremoto. Nella maggior parte dei metodi utilizzati, si assume che il danno diretto per uno specifico edificio sia funzione dell'altezza della colonna d'acqua che raggiunge l'edificio e delle sue caratteristiche strutturali. Si assume cioè che il livello di danno dipenda dal tipo di edificio e dall'altezza dell'inondazione.

Il primo approccio di questo tipo fu proposto da Shuto (1993) ed è stato poi usato da vari autori. L'applicazione del metodo necessita di alcuni prerequisiti, quali:

- una definizione delle tipologie standard degli edifici;
- una scala standard di danno;
- una funzione di danno per ogni tipo di edificio che relazioni danno e altezza della colonna d'acqua;
- l'inventario degli edifici.

Il primo passo consiste nell'adottare una descrizione standard dei tipi di edificio che qualifichi tutte o quasi le costruzioni sulla costa esposte al pericolo di maremoto. Dopo il maremoto del 26 dicembre 2004, diversi autori (Leone et al., 2006; Peiris, 2007; Garcin et al., 2007; Reese et al., 2007) hanno proposto tipologie di edifici con lo scopo di elaborare funzioni di vulnerabilità. La tipologia di edifici proposta in questo manuale deriva principalmente da Leone et al. (2006), ma è stata completata ed estesa per includere gli edifici presenti nelle cinque aree campione del progetto SCHEMA.

Sono state definite quattro classi principali di edifici (divise in sotto-classi) sulla base delle loro caratteristiche strutturali di resistenza, come descritto in Tabella 4:

- I. Edifici leggeri;
- II. Edifici in muratura e senza cemento armato;
- III. Edifici in cemento armato;
- IV. Altri edifici.

**Tabella 4:** Tipologia di edifici dependente dalla capacità di resistenza degli edifici.

Classe	Tipi di Edifici	Altezza e piani
I. Leggero	A1 Costruzioni leggere di legno e argilla vicine alla costa	1 piano Raramente 2
	A2 Costruzioni molto leggere prive di un vero progetto. Capanne molto rudimentali in legno, argilla e lastre di zinco	1 piano
II. Muratura, e senza cemento armato	B1 Mattoni non rinforzati, cemento, malta, pietre e muratura	Piani da 1 a 2
	B2 Costruzioni leggere e addossate l'una all'altra: legno e argilla	Piani da 1 a 2
	C1 Edifici isolati, ville: mattoni con colonne rinforzate e muratura	Piani da 1 a 2
	C2 Costruzioni in muratura fatte di pietre laviche alternate a mattoni di argilla	Piani da 1 a 2
	D Grandi ville o condomini, edifice residenziali o commerciali: calcestruzzo non rinforzato	Piani da 1 a 3
III. Cemento armato	E1 Strutture residenziali o collettive o uffici, parcheggi, scuole: cemento armato, acciaio	Piani da 0 a 3
	E2 Strutture residenziali o collettive o uffici, parcheggi, scuole, torri: cemento armato, acciaio	> 3 Piani
IV. Altri	F Porti ed edifici industriali, aviorimesse: cemento armato, acciaio	Indifferenziato
	G Edifici amministrativi, storici o religiosi	Indifferenziato

Il livello di danno degli edifici può essere classificato attraverso una scala discreta qualitativa con gravità crescente, da nessun danno al crollo totale. SCHEMA ha adottato una scala a 6 gradi, che viene data in Tabella 5, in accordo con quella proposta da Leone et al. (2010). Nella Tabella si suggerisce anche un possibile utilizzo dell'edificio nel periodo di emergenza dopo disastro (colonna 3) così come si dà indicazione dell'attesa efficacia delle tecniche di osservazione satellitare nella rilevazione e stima del livello di danno (colonna 4).

**Tabella 5:** Scala del livello di danno agli edifici.

Livello di danno	Danni alla struttura	Uso come rifugio / uso dopo la crisi	Detezione per mezzo di sistemi di Earth observation
<b>D0</b> Nessun danno	Nessun danno significativo	Rifugio / occupazione immediata	Nessun segno visibile di danni all'edificio e all'ambiente circostante. L'assenza dei danni non può essere dimostrata con le sole immagini prese dallo spazio.
<b>D1</b> Danno leggero	Nessun danno strutturale o danni minori, riparabili: <i>crepe dell'intonaco, crepe minori visibili, danni a porte e finestre</i>	Rifugio / occupazione immediata	Visibile a mala pena
<b>D2</b> Danno importante	Danni importanti, ma nessun danno strutturale: <i>spostamento fuori piano o crollo di parti di sezioni di muro o di pannelli senza compromettere l'integrità strutturale, lasciando le fondamenta parzialmente esposte.</i>	Evacuazione / inagibile, ma adatto all'occupazione dopo un restauro	Danni al tetto difficilmente visibili. Altri danni non visibili
<b>D3</b> Danno strutturale	Danni strutturali che potrebbero minare la stabilità dell'edificio: <i>spostamento fuori piano o crollo di muri, crollo parziale di pavimenti, eccessiva erosione del terreno di fondazione e crollo di sezioni di strutture</i>	Evacuazione / necessaria la demolizione poiché inagibile	Non o difficilmente visibile se i tetti sono al loro posto
<b>D4</b> Crollo parziale	Danni gravi che compromettono l'integrità strutturale, crollo parziale dell'edificio.	Evacuazione / necessaria una completa demolizione	Visibile
<b>D5</b> Crollo	Crollo totale: <i>fondamenta e piastre di fondazione visibili ed esposte.</i>	Evacuazione	Molto visibile

La Figura 16 illustra la scala di danno sviluppata da Leone et al. (2006) per classificare il danno strutturale agli edifici nella provincia di Banda Aceh (Sumatra) dopo il maremoto del 2004.

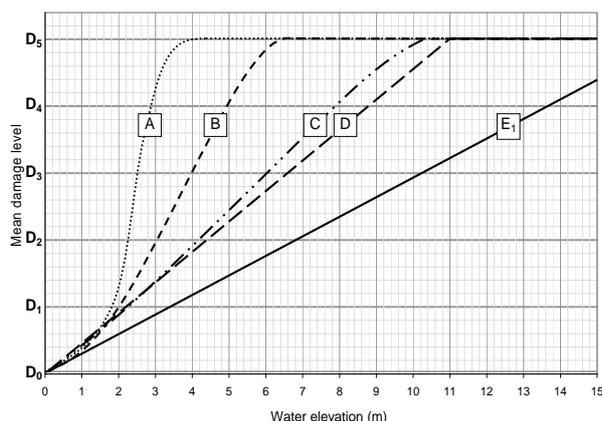


**Figura 16:** Danno strutturale agli edifici in accordo con la scala di danno sviluppata da Leone et al. (2006)

## 4.2 Funzioni di danno e matrice di danno

Un approccio per la stima della vulnerabilità degli edifici consiste nel derivare funzioni di danno empiriche partendo dalle osservazioni sul campo (Reese et al., 2007; Ruangrassamee et al., 2006; Leone et al., 2006; Peiris, 2006). Il livello di danno è messo in relazione alla sola grandezza del maremoto, attendibile e uniforme, che può essere osservata o misurata dopo ogni evento: la massima altezza della colonna d'acqua.

Le funzioni di danno proposte per gli edifici sono state elaborate da un archivio compilato nell'area sud-occidentale di Banda Aceh (Sumatra, Indonesia) che venne colpita dal maremoto dell'Oceano Indiano del 2004. Le funzioni si riferiscono solo ad edifici appartenenti alle classi A, B, C, D e E1 che hanno potuto essere verificate nell'area di studio mediante campagne di rilevazione e mediante interpretazioni di fotografie



**Figura 17:** Funzioni di danneggiamento per edifici di classe A, B, C, D, E1 ottenute da osservazioni sul campo raccolte dopo il maremoto dell'Oceano Indiano del 26 dicembre 2004, sviluppate durante il progetto SCHEMA da GSC.

Sfortunatamente, la mancanza di esempi di edifici delle classi E2, F e G nell'archivio di Banda Aceh non ha permesso di calcolare leggi empiriche del danno medio.

Le funzioni di danno sono state sviluppate da osservazioni della media pesata del livello di danno e della massima colonna d'acqua nell'area di Banda Aceh. La funzione risultante è un involucro che fornisce il livello massimo di danno (in accordo con la scala di danno in Tabella 5) che ci si aspetta in corrispondenza di un dato valore della massima colonna d'acqua del maremoto. Per tutte le curve, il danno aumenta con l'altezza della colonna d'acqua. La saturazione delle curve al livello D5, che significa crollo totale, avviene in classe A (edifici leggeri) per colonne d'acque molto più piccole rispetto a quelle di classe E (in cemento armato): circa 4 m contro più di 15 m. La Figura 17 mostra queste curve insieme per un confronto migliore. Una descrizione dettagliata del metodo e un aggiornamento delle funzioni di danno si possono trovare in Valencia et al. (2011).

Poiché la funzione di danno data sopra mette in relazione una variabile continua (la colonna d'acqua) con una variabile discreta (il livello di danno), risulta naturale che ogni livello di danno sia associato a un intervallo di valori di colonna d'acqua. Da questa considerazione il gruppo di curve mostrato in Figura 17 può essere dato sotto forma di una matrice, chiamata **matrice di danno** (Tabella 6).

**Tabella 6:** Matrice di danno adottata nel progetto SCHEMA. I valori della colonna d'acqua sono dati in metri.

Livello di danno	Valori inferiori e superiori della colonna d'acqua per ogni tipologia di edificio				
	A	B	C	D	E1
<b>D0: Nessun danno</b>	0	0	0	0	0
<b>D1: Danno leggero</b>	0 1.8	0 2	0 2.5	0 2.5	0 3
<b>D2: Danno importante (non strutturale)</b>	1.8 2.2	2 3	2.5 4	2.5 4.5	3 6
<b>D3: Danno strutturale</b>	2.2 2.6	3 4	4 6	4.5 6.5	6 9.5
<b>D4: Crollo parziale</b>	2.6 3.8	4 5	6 8	6.5 9	9.5 12.5
<b>D5: Crollo totale</b>	> 3.8	> 5	> 8	> 9	> 12.5

Le soglie sono state fissate tenendo in considerazione i peggiori scenari. Il livello di danno D0 corrisponde alle sole aree non inondate, ovvero alle aree dove il livello dell'acqua è uguale a zero. Sopra 0 m d'acqua, c'è una possibilità per gli edifici di subire almeno un danno minore. Osservando la Tabella 6 si vede che un maremoto abbastanza potente da inondare con una colonna d'acqua maggiore di 12.5 m può causare il crollo completo di tutte le costruzioni fino alla categoria E1 che si trovano sulla sua strada.

### 4.3 Creazione di un inventario di edifici per gli scenari di maremoto

La **standardizzazione della tipologia di edifici** (Tabella 4), la **standardizzazione della scala di danno** (Tabella 5) e la **standardizzazione della matrice di danno** (Tabella 6) sono tre dei quattro prerequisiti che sono elencati nella prima sezione del capitolo e che sono necessari a costruire gli scenari di danno di maremoto.

La creazione di un inventario di edifici è un lavoro molto impegnativo che può trarre grandi benefici dalla collaborazione con le autorità locali e la consultazione di archivi catastali e dati pubblici. Spesso questi dati sono forniti sotto forma di livelli tematici di database GIS, prodotti, conservati e distribuiti da istituzioni pubbliche con la responsabilità di acquisizione e cartografia di dati territoriali. Va comunque osservato che i dati ricavati da archivi pubblici, se disponibili, spesso non sono sufficienti: infatti i molti parametri necessari per caratterizzare un edificio dal punto di vista della vulnerabilità da maremoto potrebbero non

essere presenti negli archivi, il che richiede che si avvino specifiche attività di acquisizione.

In tutte le aree campione del progetto SCHEMA si è posta grande attenzione alla creazione di adeguati database di edifici con l'intento di assegnare attraverso la foto-interpretazione una classe di vulnerabilità ad ogni costruzione in accordo con tipologia di edifici adottata (vedi Tabella 4). L'analisi è ristretta alla zona costiera ed in teoria dovrebbe essere fatta solo entro le aree inondate. Comunque, poiché la massima estensione dell'inondazione si conosce solo al termine della fase di costruzione degli scenari di pericolosità di maremoto, è consigliabile effettuare lo studio in un'area più estesa che potrebbe essere determinata sulla base di sovrastime grossolane della massima altezza locale del maremoto. Per compilare l'inventario degli edifici nel sito considerato dovrebbero essere utilizzati tutti i dati possibili, completando gli archivi pubblici disponibili con immagini satellitari e con campagne dati sul campo. L'interpretazione di immagini satellitari è uno strumento potente per la classificazione di edifici nelle zone con grande densità di costruzioni, ma necessita di una validazione attraverso osservazioni a terra.

La Figura 18 è un esempio preso dall'area campione di Mandelieu fornito da GSC: lo stesso edificio attribuito alla classe B è visto da terra e identificato nell'immagine da satellite, il che permette di attribuire la stessa classe ad altre costruzioni circostanti di aspetto simile.

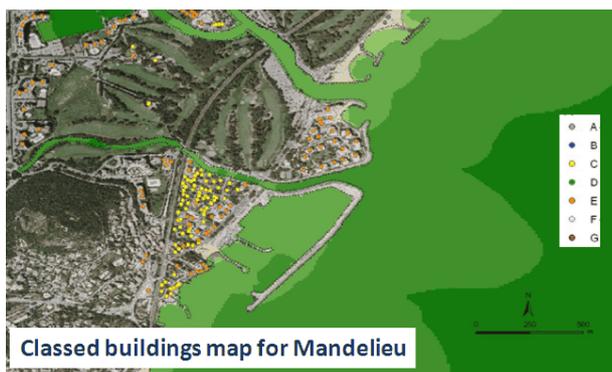
Nel successivo gruppo di Figure da 19 a 21 vengono mostrate le mappe di distribuzione dei tipi di costruzione per le aree campione di Rabat, di Mandelieu e di Balchik con lo scopo di mostrare i risultati ottenuti a livello locale. La standardizzazione della paletta di colori per i simboli (cerchi colorati) che identificano le classi di edifici favorisce il confronto tra le diverse aree campione. È importante sottolineare che il principale obiettivo di creare un inventario di edifici è quello di classificare ogni costruzione che si trova nella zona costiera esposta. Comunque, in caso di edifici addossati l'uno all'altro, come nel centro di Rabat, l'analisi di costruzioni individuali è piuttosto difficile, e la classificazione viene applicata a blocchi di edifici con caratteristiche molto simili. La densità degli edifici nei blocchi dipende dalle condizioni architettoniche urbane.



**Figura 18:** Classificazione di un edificio da immagine satellitare presa da Google Earth (sotto) validata grazie ad una foto presa durante una campagna di rilevamento (sopra) compiuta da GSC nell'area campione di Mandelieu.



**Figura 19:** Mappa della tipologia degli edifici sulle coste e sulle rive del fiume di Rabat, redatta da CRTS. Copyright Quickbird image, 2008-09-28, res: 0.63m.



**Figura 20:** Dettaglio della distribuzione degli edifici di diverso tipo a Mandelieu, mappata da GSC.

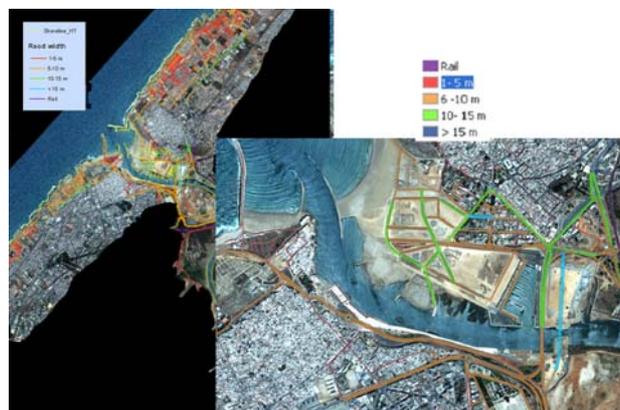


**Figura 21:** Distribuzione degli edifici per la zona portuale di Balchik, da SRI-BAS.

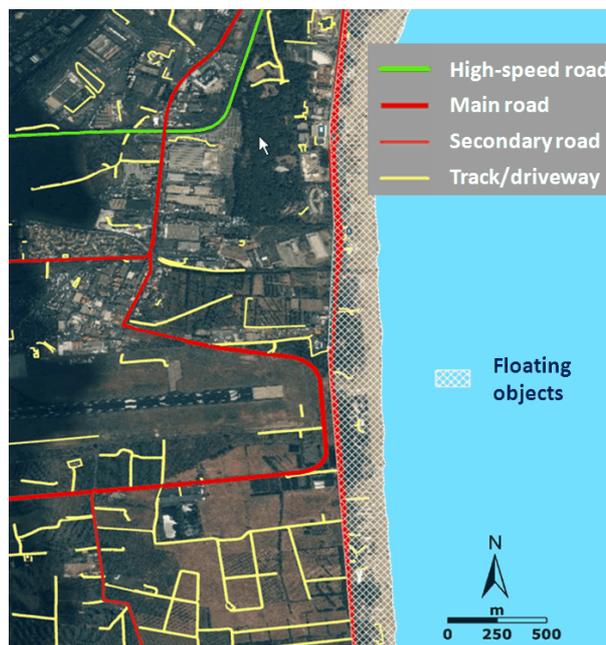
#### 4.4 Inventario di ulteriori importanti elementi

Ci sono molti altri importanti elementi, oltre a edifici e costruzioni, che contribuiscono agli effetti di danneggiamento di un maremoto. Alcuni di questi sono rilevanti perché possono aumentare le conseguenze del maremoto sugli edifici. Altri però sono importanti o perché essi stessi vulnerabili o perché, a causa della loro totale o parziale indisponibilità a seguito dell'attacco del maremoto, possono avere un forte impatto negativo sia sulla risposta a breve termine (recupero e soccorso) sia sulla ripresa a lungo termine della popolazione colpita. Nella prima categoria si possono includere tutti gli oggetti che possono essere facilmente mossi e trasportati dalle correnti del maremoto in forma di detriti galleggianti, che aumentano in modo significativo il potere distruttivo del maremoto. I principali elementi da cui possono derivare i detriti sono i veicoli a terra (ad esempio motociclette, autovetture, autocarri, rimorchi e autobus), e barche e vascelli sia leggeri che pesanti in mare. Pertanto, le aree principali di provenienza sono le strade molto trafficate ed i parcheggi che si trovano molto vicino al mare ed i porti turistici e commerciali. Poiché alcuni di questi elementi possono avere un elevato valore economico, si possono includere anche nella seconda delle categorie sopra menzionate. Oggetti

nella terza categoria sono tipicamente le reti dei servizi (come rete elettrica, telecomunicazioni, rete idrica e depositi d'acqua, rete del gas), le strutture di emergenza per la protezione civile (centri del corpo dei vigili del fuoco, ospedali e centri di pronto soccorso) e le reti di trasporto, compresi aeroporti, porti, stazioni di autobus e treni così come importanti infrastrutture come i ponti.



**Figura 22:** Classificazione delle strade basata sulla larghezza nell'area vicina alla costa e alle rive del fiume Bouregreg, area campione di Rabat (CRTS). Copyright Quickbird image, 2008-09-28, res: 0.63m.



**Figura 23:** Classificazione delle strade nella fascia costiera di La Plaia a sud di Catania. Vengono mostrate anche le zone che sono potenziale fonte di detriti galleggianti, in quanto sede di costruzioni di legno scarsamente resistenti al maremoto (UNIBOL).

Una stima quantitativa del danno provocato dal maremoto a questi ulteriori elementi è piuttosto complessa e non è stata compiuta nel progetto SCHEMA. In ogni caso, i partner in collaborazione con

gli utenti finali hanno identificato gli elementi più critici ed hanno creato mappe tematiche da sovrapporre a quelle della classificazione degli edifici. In tutte le aree campione, è stata considerata e classificata la rete stradale, mediante una classificazione basata sulla larghezza e rilevanza delle strade (da strade non asfaltate ad autostrade ad alta velocità).

Esempi di classificazione di strade nelle aree potenzialmente inondate sono forniti in Figura 22 e in Figura 23 con riferimento a Rabat e Catania rispettivamente.

#### 4.5 Mappe di danno di maremoto

Le mappe di danno sono l'elemento base di uno scenario di danno. Possono essere costruite solo dopo che le fasi per la costruzione degli scenario di pericolosità e per l'analisi di vulnerabilità siano state completate, dato che queste forniscono l'input principale secondo lo schema presentato in Figura 1. Combinando i campi aggregati dell'altezza della colonna d'acqua, risultanti dagli scenari di pericolosità di maremoto, con la distribuzione di edifici, derivante dall'inventario delle costruzioni, e facendo uso della matrice di danno, è possibile stimare il livello di danno per ogni edificio compreso nella area inondata dello scenario aggregato peggiore credibile. Questa procedura è stata applicata non solo agli scenari aggregati, ma anche a quelli aumentati, in altre parole gli scenari trattati con sorgenti aumentate, in modo da evidenziare quanto i risultati siano sensibili alla variazione nell'intensità delle sorgenti. Inoltre, tale analisi è stata effettuata anche per gli scenari individuali.

Va sottolineato che, da un punto di vista logico, gli scenari possono essere visti come livelli tematici di un sistema GIS e lo scenario aggregato è il nuovo livello risultante dalla selezione in ogni punto spaziale del livello con il caso peggiore (più grave). D'altra parte, anche le mappe risultanti dall'analisi di vulnerabilità (la distribuzione delle classi di edifici, la mappa della rete stradale, ecc.) possono essere inserite in un archivio di dati GIS nella forma di livello specifico. Incrociare le altezze della colonna d'acqua con i livelli degli edifici ed fare uso del filtro della matrice di danno per valutare il danno subito da ogni edificio, è un'operazione che può essere eseguita automaticamente in un ambiente GIS, se si sviluppano specifici strumenti informatici. Questa operazione è stata eseguita in tutte le aree campione di SCHEMA. Le Figure seguenti mostrano alcuni dei risultati del progetto. La Figura 24 mostra lo scenario di danno all'imbocco del fiume Bouregreg (Rabat). Lo scenario aggregato coincide con lo scenario associato alla sorgente del terremoto del 1755 (aumentato e in condizione di alta marea). Si noti che molte costruzioni

in zone basse e piatte risultano o gravemente danneggiate o distrutte.

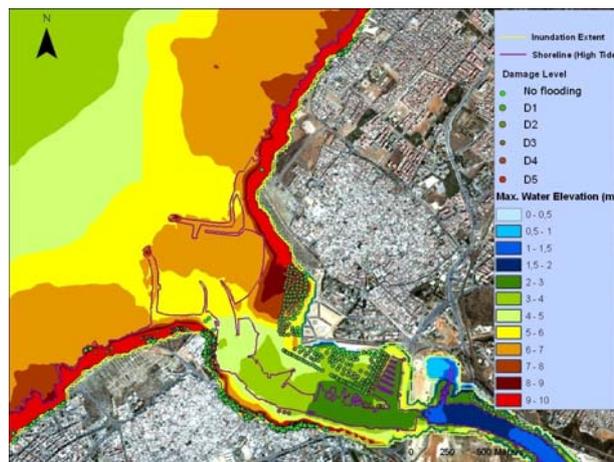


Figura 24: Particolare dello scenario di danno alla foce del fiume Bouregreg, risultato della collaborazione tra ACRI-ST e CRTS. Copyright Quickbird image, 2008-09-28, res: 0.63m.

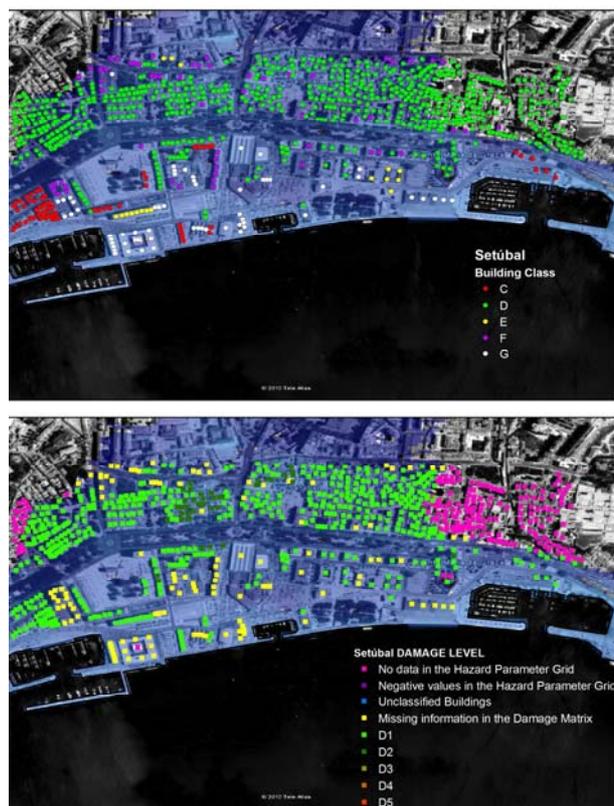
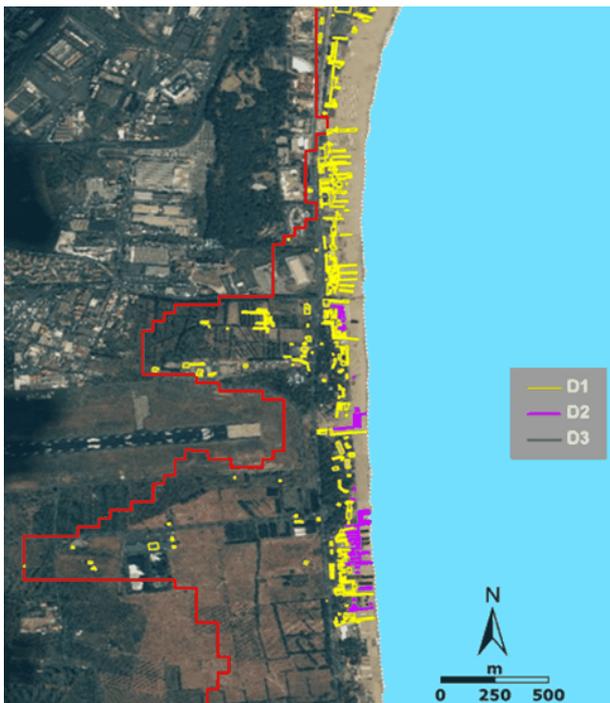


Figura 25: Distribuzione degli edifici (sopra) e scenario di danno (sotto) per il porto della città di Setúbal, calcolato da HIDROMOD. Si noti che il livello D0 è attribuito anche agli edifici di quelle classi (F e G) per le quali il livello di danno non può essere stimato dalla matrice di danno di SCHEMA.

La Figura 25 mostra sia la distribuzione che lo scenario di danno per la città di Setúbal. Anche per questa area

campione lo scenario di danno è quello associato al terremoto del 1755 in condizioni di alta marea. Si vede che il maremoto penetra fino a grande distanza nella città con altezze rilevanti della colonna d'acqua che causano un danno elevato (D3-D4) a molti edifici. È importante osservare che ci sono edifici appartenenti alle classi F e G per le quali non sono state elaborate curve di fragilità in SCHEMA e per i quali quindi non ci sono valori nella matrice di danno. La conseguenza è che non è possibile fare una valutazione dei danni per questi edifici.

La Figura 26 illustra lo scenario di danno calcolato per l'area che si trova a sud della città di Catania chiamata La Plaia (che è una famosa attrazione turistica grazie alla sua bellissima spiaggia sabbiosa). In accordo con gli studi di UNIBOL, lo scenario aggregato è principalmente dominato dallo scenario basato sul caso del terremoto del 365 d.C. nell'arco ellenico occidentale e dallo scenario costruito sul terremoto del 1908 combinato con una frana. La costa qui è abbastanza piatta ed il maremoto può penetrare per un lungo tratto dalla linea di costa.

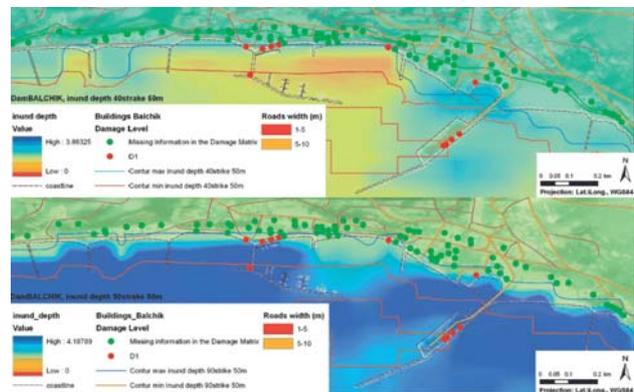


**Figura 26:** Scenario di danno aggregato calcolato nell'area di La Plaia a sud di Catania da UNIBOL per le sorgenti aumentate. La maggior parte delle costruzioni risulta essere danneggiata, ma la colonna d'acqua è troppo bassa per farli crollare.

La maggior parte degli edifici costruiti sulla spiaggia, che sono per lo più costruzioni stagionali per i turisti, risulta essere danneggiata dal maremoto.

La Figura 27 fornisce due scenari di danno distinti per le due sorgenti di terremoto scelte per Balchik. Poiché la

caratterizzazione della tettonica locale è incerta, le due sorgenti rappresentano due ipotesi di faglia per lo stesso terremoto, differendo solo per l'angolo di strike: 40° e 90°.



**Figura 27:** Scenario di danno calcolato a Balchik da SRI-BAS e NOA-GI per un terremoto locale con angolo di strike della faglia di 40° (sopra) e di 90° (sotto).

Benchè il secondo maremoto risulti essere abbastanza più forte del primo, gli scenari di danno non differiscono molto tra loro. L'impatto del maremoto sembra essere debole e solo poche costruzioni di fronte al mare vengono leggermente danneggiate.

È opportuno ricordare che per produrre mappe di danno è stato sviluppato un pacchetto software per ArcGIS (DamASCHE). Il modulo richiede tre tipi di input: un layer raster che rappresenta il parametro di pericolosità (altezza della colonna d'acqua); un layer di punti che rappresentano le posizioni degli edifici con un file che contiene informazioni sulla classe di vulnerabilità ("A", "B", "C" or "D"); e la matrice di danno. Il codice DamASCHE sovrappone i vari layer e per ogni edificio calcola l'atteso livello di danno in funzione del tipo di edificio e dell'altezza della colonna d'acqua prevista nel luogo ove l'edificio si trova.

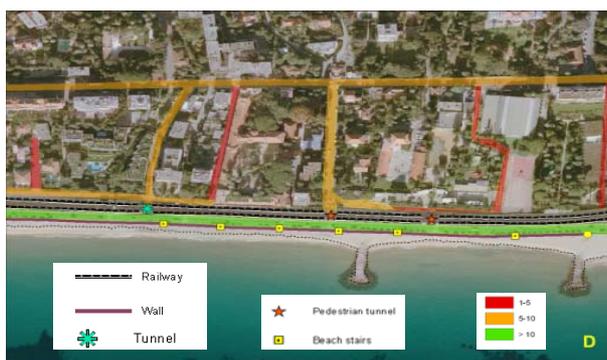
#### 4.6 Rilevazione di altri fattori di danno

Gli inventari degli edifici e le mappe del danno atteso per gli edifici non sono i soli elementi che caratterizzano uno scenario di danno, ma possono concorrere anche altri fattori. Infatti produrre scenari di danno di maremoto significa combinare i dati degli scenari di pericolosità non solo con i criteri di vulnerabilità per gli edifici, ma anche con i criteri che riguardano gli elementi esposti introdotti nella sezione 4.4 e la popolazione che regolarmente (come ad esempio i residenti e le persone al lavoro) o occasionalmente (i turisti) si trova nelle aree di costa colpite dal maremoto.

Molti fattori secondari potrebbero incrementare il livello atteso di danno per gli edifici. Uno di questi fattori è la quantità di detriti galleggianti. La fonte principale di detriti è individuabile nei parcheggi all'aperto e nei porti, da dove le correnti del maremoto possono sollevare e trasportare con violenza automobili e barche contro i muri e le colonne portanti degli edifici o perfino sui tetti. La Figura 28 mostra le aree riservate al parcheggio di auto ed i porti con barche ancorate che si trovano entro l'area inondata dal maremoto relativamente allo scenario del 1755 per Setúbal. Nelle mappe si fornisce semplicemente l'informazione che comunque non viene elaborata poiché non c'è un modo quantitativo di collegare la presenza di fonti di detriti al livello di danno dell'edificio. Si può solo affermare che il danno aumenterà, o in altre parole, che il danno calcolato solo mediante la matrice di danno potrebbe in alcuni casi fornire una sottostima del danno stesso.



**Figura 28:** Il porto ed i parcheggi individuati a Setúbal che rientrano nell'area potenzialmente inondata dallo scenario di pericolosità di maremoto (HIDROMOD).



**Figura 29:** Mappa degli ostacoli e di accessibilità per Mandelieu (GSC). Rampe di accesso alla spiaggia, tunnel pedonali sotto la ferrovia e muri lungo la spiaggia possono essere ostacoli o punti critici in caso di evacuazione.

La mappatura della rete stradale e dei potenziali ostacoli fornisce una visione immediata delle possibili interruzioni locali e dei problemi che si potrebbero incontrare in caso di evacuazione o accesso all'area colpita. La Figura 29 mostra la mappa degli ostacoli e

del sistema stradale di Mandelieu. Lo scenario di pericolosità associato al terremoto di Boumerdes-Algiers a Mandelieu non provoca una forte inondazione, ma, come provato dallo scenario di maremoto, in alcuni luoghi le strade litorali possono essere inondate e potenzialmente interrotte, cosa che è di grande importanza dal punto di vista delle operazioni di evacuazione o soccorso.

L'evacuazione potrebbe diventare critica a causa di ostacoli sulla spiaggia come rampe di accesso, tunnel pedonali, ferrovie, e muri lungo la spiaggia.



**Figura 30:** Le strade nell'area di La Plaia, Catania, mostrate insieme alla linea di inondazione (rosa) per gli scenari aggregati (risultanti dalle sorgenti aumentate). L'intero sistema principale di strade è colpito dal maremoto con la conseguenza che la spiaggia di La Plaia potrebbe essere isolata e difficilmente raggiungibile via terra dalle squadre di soccorso in caso di emergenza (UNIBOL).

La rete stradale in prossimità dell'area di La Plaia (Catania) è gravemente colpita dallo scenario aggregato di maremoto, con una penetrazione piuttosto estesa a terra (più di un 1 km). Benché non ci sia un'analisi quantitativa del possibile danno alle strade, l'estensione dell'area colpita può dare una ragionevole idea del fatto che le strade potrebbero essere interrotte in molti punti. Questo probabilmente provocherebbe che la spiaggia di La Plaia, popolata da migliaia di turisti nella stagione estiva, rimarrebbe isolata e non accessibile da terra alle squadre di soccorso.

## 5 Conclusioni e prospettive

Questo manuale ha illustrato brevemente i concetti principali di un metodo per affrontare la stima di pericolosità di maremoto e per la valutazione del danno che è alla base degli scenari, e più precisamente degli scenari peggiori credibili sia individuali che aggregati.

Si sono spiegate le ragioni del perché l'approccio basato sullo scenario peggiore credibile è da preferire a quello probabilistico, quando i periodi di ritorno delle sorgenti tsunamigeniche sono difficilmente calcolabili, cosa che si verifica quasi sempre nel caso di maremoti causati da frane. Si è puntualizzato che concetti come "credibilità" e "peggior caso" sono piuttosto soggettivi e che, inoltre, anche la selezione delle sorgenti di maremoto, che rappresenta il punto di partenza del metodo, è soggettiva.

Un modo per ridurre o per trattare la soggettività è quello di considerare un certo grado di libertà nei parametri di sorgente. Questa possibilità è stata trattata da un punto di vista leggermente diverso nel manuale, poiché è stata introdotta sotto la forma di un'analisi di sensibilità.

Uno dei capisaldi del metodo è lo sviluppo di scenari di pericolosità di maremoto, che sono ottenuti selezionando le sorgenti tsunamigeniche più importanti che caratterizzano l'area di studio selezionata, e poi eseguendo simulazioni di maremoto per calcolare l'impatto delle onde. La modellazione di maremoto è quindi uno strumento fondamentale, e questo richiede buoni modelli e buoni dati. Riguardo all'ultimo punto, è stato sottolineato che dati di topografia e di batimetria di buona qualità (in accuratezza e risoluzione) sono necessari specialmente nelle fascia costiera (sia a terra che in mare), il che di solito implica un grande sforzo per la raccolta e l'utilizzo dei dati. Il maggior interesse risiede nel calcolo del comportamento del maremoto a costa, comprendendo l'interazione con oggetti di piccola scala come banchine e frangiflutti nei porti, l'inondazione di strutture a terra, la penetrazione lungo i fiumi. Tutti questi aspetti sono trattati dai modelli di simulazione di maremoto di ultima generazione, ma tutti questi modelli hanno approssimazioni delle equazioni idrodinamiche, specialmente vicino alla linea di costa o alle zone con discontinuità o forti gradienti che necessitano di essere trattate con attenzione per evitare che anomalie prodotte dal modello vengano scambiate per effetti fisici reali.

Lo scenario di pericolosità di maremoto è stato definito attraverso i prodotti forniti dall'analisi, in forma di

mappe e grafici, distinguendo la propagazione su larga scala (scenari regionali) da quella su piccola scala (scenari locali), essendo questi ultimi i più rilevanti per la produzione di scenari di danno. Conseguente alla possibilità di definire una molteplicità di sorgenti tsunamigeniche e quindi di scenari per una data area di studio, è l'introduzione del concetto di aggregazione per combinare tutti gli scenari in uno solo. Nell'approccio del peggior scenario, l'aggregazione implica semplicemente di selezionare per ogni punto nello spazio il valore più intenso tra quelli calcolati per i vari scenari.

Il secondo caposaldo del metodo è l'analisi di vulnerabilità fatta usando immagini satellitari e campagne di rilevazione a terra. Questo è necessario per identificare gli elementi esposti al pericolo di maremoti e per definire alcune relazioni tra le caratteristiche intrinseche degli elementi ed i parametri fisici che descrivono il maremoto. Il nostro metodo mette gli edifici al centro della scena, definendo una classificazione di edifici, introducendo una scala di danno quantitativa, determinando funzioni di danno per ogni classe di edificio (oppure in modo equivalente una matrice di danno) che lega il livello di danno all'altezza della colonna d'acqua, e costruendo un inventario di tipologie di edifici nelle zone costiere grazie alla foto interpretazione.

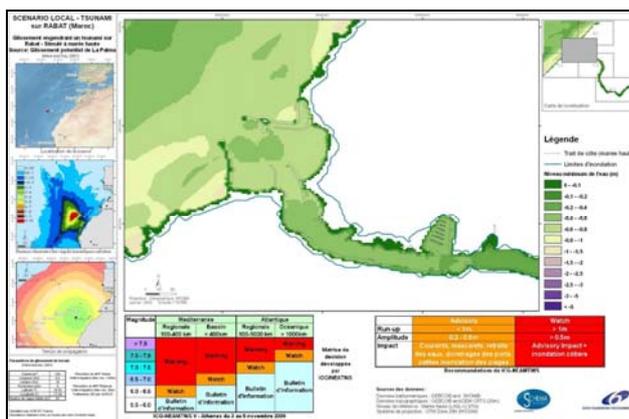
Infine, la collaborazione con gli utenti finali ha permesso di raffinare il metodo sviluppato per la stima della vulnerabilità in accordo con le loro necessità. La produzione degli scenari è stata sintetizzata in un Atlante per ogni area campione come supporto per gli enti interessati (protezione civile, autorità locali) alla gestione dello stato di crisi sia nella fase di preparazione che nella fase dell'emergenza.

Le sfide iniziano proprio da qui. Riguardano principalmente come considerare gli altri elementi vulnerabili oltre agli edifici e come considerare altri fattori in aggiunta alla colonna d'acqua per stimare meglio il danno agli edifici.

Nel manuale abbiamo fornito una prima risposta a questo problema. Ad esempio, abbiamo identificato i fattori che possono aumentare il livello di danno per gli edifici (fattori aggravanti come le fonti di oggetti mobili e galleggianti lungo il percorso fino all'edificio: parcheggi aperti e porti) aggiungendoli sulla mappa. Abbiamo identificato elementi vulnerabili strategici come reti di servizio (elettrica, idrica,...), centri di

emergenza, e reti stradali. Anche in questo caso la nostra risposta è stata di mapparli e di incrociarli con le linee di inondazione risultanti dagli scenari di pericolosità di maremoto per controllare se risultino dentro o fuori le aree inondate.

I partner di SCHEMA hanno applicato il metodo descritto ed hanno calcolato tutti gli scenari descritti nel manuale per le cinque aree campione scelte nel progetto. Un resoconto dettagliato dei vari passaggi può essere trovato nella documentazione del progetto. Qui è importante sottolineare che tra i rapporti del progetto quelli che sono di interesse per un lettore interessato ad approfondire questi argomenti sono i reporti di SCHEMA numerati da 4.1 a 4.5 che sono dedicati alle singole aree campione. Come accennato in precedenza, per ogni area campione è stato prodotto un Atlante nella relativa lingua nazionale contenente tutte le mappe di scenari di pericolosità di maremoto e di scenari di danno da maremoto. La Figura 31 mostra una pagina dell'Atlante prodotta da CRTS e da ACRI-ST per l'area campione di Rabat.



**Figura 31:** Esempio di uno scenario locale dettagliato selezionato dall'Atlante per l'area campione di Rabat. L'immagine principale (al centro) mostra il massimo ritiro dell'acqua insieme alla massima inondazione per lo scenario di La Palma. Le informazioni generali sullo scenario sono date nelle figure intorno a scala regionale insieme a tabelle con informazioni utili alle strategie di allarme.

In futuro, dovranno essere formulate risposte più complete e si dovrà sviluppare un approccio più quantitativo per tutte le categorie di oggetti vulnerabili e non solamente per gli edifici. Questo risulta piuttosto complesso perché è necessario un modello fisico di riferimento che descriva le interazioni di maremoti con tali oggetti e anche perché questi oggetti interagiranno tra loro e non solo con il flusso d'acqua.

Per quel che riguarda le persone e le perdite umane occorre fare considerazioni separate. Gli aspetti individuali e sociali di un disastro in generale, e di un maremoto in particolare, sono stati oggetto di numerosi studi specialmente dopo il maremoto del 2004 nell'Oceano Indiano, dove è stato riconosciuto che le comunità locali hanno la loro propria dimensione. Molte azioni (ripresa e risistemazione) e contromisure (sistemi di allarme di maremoto e implementazione di piani di evacuazione) non possono essere intraprese senza il diretto coinvolgimento delle popolazioni locali. Questi studi, finora, non hanno prodotto metodi pratici per determinare la vulnerabilità di individui e di comunità costiere nel loro insieme e nemmeno per definire alcune matrici di danno multidimensionali sulla base di analisi quantitative.

Un ultimo suggerimento sulla possibile futura estensione di questo metodo riguarda l'approccio multi-hazard. Uno scenario di maremoto ha spesso poco valore se esaminato da solo. Inoltre spesso un maremoto è causato da un terremoto locale, per cui l'area di studio è affetta sia dallo scuotimento sismico che dalle onde di maremoto. E gli oggetti vulnerabili, come gli edifici, devono resistere a entrambi i tipi di forze di sollecitazione. Il maremoto può colpire un edificio dopo che è stato indebolito dal terremoto e allo stesso modo una scossa di assestamento può danneggiare un edificio dopo che è stato colpito da maremoto. Il multi-hazard necessita quindi dell'utilizzo di un modello fisico più complicato e della cooperazione di diverse comunità scientifiche in studi multidisciplinari.

Queste sono le sfide per il futuro. Questi sono i problemi che gli utenti finali e la popolazione costiera esposta al rischio ci chiede di risolvere. Questi sono i problemi che ci piacerebbe risolvere.

## Bibliografia

- Argnani A., Bonazzi C., 2005. Malta Escarpment fault zone offshore eastern Sicily: Pliocene-Quaternary tectonic evolution based on new multichannel seismic data. *Tectonics*, 24, TC4009, doi:10.1029/2004TC001656.
- Armigliato A., Tinti S., Argnani A., Zaniboni F., Pagnoni G., 2007. Tsunamigenic potential of recently mapped submarine mass movements offshore eastern Sicily (Italy): numerical simulations and implications for the 1693 tsunami. IUGG XXIV General Assembly, Perugia (Italy), July 2-13 2007, Abstract JSS002-1811.
- Assier-Rzadkiewicz S., Heinrich P., Sabatier P. C., Savoye B., Bourillet J. F., 2000. Numerical Modelling of a Landslide-generated Tsunami: The 1979 Nice Event. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 1707-1727.
- Baptista M. A., Miranda J. M., Chierici F., Zitellini N., 2003. New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 333-340.
- Delouis B., e 9 co-authors, 2004. Slip distribution of the 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake, Algeria, from teleseismic, GPS, and coastal uplift data. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18607, doi:10.1029/2004GL020687.
- DISS Working Group, 2009. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2009 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Eva C., Rabinovich A. B., 1997. The February 23, 1887 tsunami recorded on the Ligurian Coast, western Mediterranean. *Geophys. Res. Letts*, 24, 2211-2214, doi:10.1029/97GL02110.
- Garcin M., Prame B., Attanayake N., De Silva U., Desprats J.F., Fernando S., Fontaine M., Idier D., Lenotre N., Pedreros R., C.H.E.R. Siriwardana, 2007. A Geographic Information System for Coastal Hazards. Application to a pilot site in Sri Lanka (Final Report). BRGM Open file BRGM/RP-55553-FR, 124 p.
- Gardi A., Valencia N., Guillaude R., André C., 2011. Inventory of the uncertainties associated with the process of tsunami damage assessment on buildings (SCHEMA FP6 EC co-funded project). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 883-893.
- Gjevik B., Pedersen G., Dybesland E., Harbitz C. B., Miranda P. M. A., Baptista M. A., Mendes-Victor L., Heinrich P., Roche R., Guesmia M., 1997. Modeling tsunamis from earthquake sources near Gorrige Bank southwest of Portugal. *Journal of Geophysical Research*, 102, C13, 27931-27949.
- Guesmia M., Heinrich P., Mariotti C., 1998. Numerical simulation of the 1969 Portuguese tsunami by a finite-element method. *Natural Hazards*, 17, 31-46.
- ICG/IOTWS, 2007. Workshop on tsunami risk assessment for the Indian Ocean, Final Report, Dubai, 4-6 October.
- Kirby J. T., Wei G., Chen Q., Kennedy A. B., Dalrymple, R. A., 1998. FUNWAVE 1.0. Fully nonlinear Boussinesq wave model, documentation and user's manual. Rep. CACR-98-06, Cent. For Appl. Coastal Res., Dep. Of Civ. and Environ. Eng., Univ. of Del., Newark.
- Leone F., Denain J. C., Vinet F., Bachri S., 2006. Analyse spatiale des dommages au bâti de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie): contribution à la connaissance du phénomène et à l'élaboration de scénarios de risque tsunami. Scientific report of Tsunarisque (2005-2006) programme.
- Leone F., Lavigne F., Paris R., Denain J-C., Vinet F., 2010. A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, doi:10.1016/j.apgeog.2010.07.009.
- Omira R., Baptista M. A., Matias L., Miranda J. M., Catita C., Carrilho L., Toto E., 2009. Design of a sea-level tsunami detection network for the Gulf of Cadiz. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1327-1338.
- Papazachos B. C., 1996. Large Seismic Faults in the Hellenic Arc. *Annali di Geofisica*, 39, 891-903.
- Peiris N., 2006. Vulnerability functions for tsunami loss estimation. First European conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, Paper number 1121.
- Pino N. A., Piatanesi A., Valensise G., Boschi E., 2009. The 28 December 1908 Messina Straits Earthquake (Mw 7.1): A Great Earthquake throughout a Century of Seismology. *Seism. Res. Lett.*, Vol. 80, 2, 243-259.

- Reese S., Cousins W. J., Power W. L., Palmer N. G., Tejakusuma I. G., Nugrahadi S., 2007. Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java-field observations after the July 2006 Java tsunami. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 7, 573-589.
- Rangelov B., Mircheva E., Lazarenko I., Encheva R., 2008. The archaeological site – possible evidence about multihazard ancient events. *Proceedings Conf. Geoarchaeology and Archaeomineralogy.*, 29-30 October 2008, Sofia, “St. Ivan Rilski” Publishing House, 347-352.
- Ruangrassamee A., Yanagisawa H., Foytong P., Lukkunaprasit P., Koshimura S., Imamura F., 2006. Investigation of tsunami-induced damage and fragility of buildings in Thailand after the December 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earthquake Spectra, Special Issue*, 22, S377-S401.
- Santos A., Martins H., Coelho H., Leitão P. C., Neves R., 2002. A circulation model for the European ocean margin. *Applied Mathematical Modelling*, 26 (5), 563-582.
- Scheer S., Gardi A., Guillande R., Eftichidis G., Varela V., de Vanssay B., Colbeau-Justin L., 2011. *Handbook on Evacuation Planning*, EUR 24707 EN, JRC61202, Luxembourg (Luxembourg): OP, 2011.
- SCHEMA Deliverable 1.3, 2008. Lessons learned from Asia aree campione (<http://www.schema.project.org/>).
- SCHEMA Deliverable 2.1, 2009. Generic aspects and rules on vulnerability evaluation: Classification of the building vulnerability as regards to tsunami hazard. Internal report.
- SCHEMA Deliverable 4.1, 2009. Development of complete approach on Rabat test site. Internal report.
- SCHEMA Deliverable 4.2, 2009. Development of complete approach on Balchik test site. Internal report.
- SCHEMA Deliverable 4.3, 2010. Development of complete approach on French test site. Internal report.
- SCHEMA Deliverable 4.4, 2009. Development of complete approach on the Setúbal test site. Internal report.
- SCHEMA Deliverable 4.5, 2009. Development of complete approach on Catania test site. Internal report.
- Shuto, N. 1993. Tsunami intensity and disasters. In: Tinti, S. (ed.) *Tsunamis in the World*, Kluwer Academic, Dordrecht, 197-216.
- Tinti S., Armigliato A., Pagnoni G., Zaniboni F., 2005. Scenarios of giant tsunamis of tectonic origin in the Mediterranean. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, 42, 171-188.
- Titov V.V., Synolakis C.E. 1995. Modeling of breaking and non breaking long-wave evolution and run up using VTCS-2. *J Waterway Port Coast Ocean Eng*, 121, 308-316.
- Tonini R., Armigliato A., Pagnoni G., Zaniboni F., Tinti S., 2011. 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.
- Yeh H., Robertson I., Preuss J., 2005. Development of Design Guidelines for Structures that Serve as Tsunami Vertical Evacuation sites. Washington division of Geology and Earth Resources, Open File Report 2005-4.
- Yelles K., Lammali K., Mahsas A., Calais E., Briole P., 2004. Coseismic deformation of the May 21st, 2003, Mw=6.8 Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13610, doi:10.1029/2004GL019884
- Valencia N., Gardi A., Gauraz A., Leone F., Guillande R. New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to Euro-Mediterranean coasts, 2011. Under revision to *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, special issue on "New developments in Tsunami science: from hazard to risk".
- Vaz N., Dias J. M., Leitão P. C., Nolasco R., 2007. Application of the Mohid-2D model to a mesotidal temperate coastal lagoon. *Computers & Geosciences* 33, 1204–1209.
- Ward S. N., Day S., 2001. Cumbre Vieja Volcano - Potential collapse and tsunamis at La Palma, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 397-400.
- Zitellini N., Chierici F., Sartori R., Torelli L., 1999. The tectonic source of the 1755 Lisbon Earthquake. *Annali di Geofisica*, 42(1), 49–55.

## Allegato A – Il progetto SCHEMA

SCHEMA rappresenta il lavoro svolto da un consorzio inizialmente composto da undici organizzazioni che si trovano non solo nell'Unione Europea, ma anche in Turchia e Marocco (si veda Appendice B). L'obiettivo principale del progetto era di dimostrare che i dati derivanti dai sistemi di osservazione della terra (Earth observation) permettono di definire una metodologia generale adatta ad aiutare gli esperti nel produrre mappe di pericolosità, vulnerabilità e danno relative all'occorrenza di maremoti (tsunami). Il progetto è stato coordinato da Geosciences Consultants (GSC), un'impresa privata francese con sede a Parigi. Il progetto è stato lanciato nell'agosto 2007 con durata fino alla fine di ottobre 2010 e finanziato dalla Commissione Europea dentro il Sesto Programma Quadro.

I punti chiave della ricerca sviluppata nel progetto SCHEMA possono essere riassunti nei seguenti punti:

- il chiarimento di concetti come vulnerabilità, pericolosità, scenario, per produrre documenti e mappe accessibili e comprensibili dagli utilizzatori finali (protezione civile, addetti alla pianificazione dell'emergenza);
- l'analisi dei limiti della modellazione numerica al fine di valutare il grado di incertezza quando il rischio viene stimato mediante modelli e non per mezzo di eventi reali del passato;
- lo sviluppo di una metodologia generale, convalidata dagli utilizzatori finali, per produrre scenari di impatto per maremoti e fenomeni collegati;
- l'estrazione di indicatori di vulnerabilità e di livelli di pericolosità, usati nella metodologia generale, da dati di Earth observation;
- una prima validazione della metodologia su casi reali come il maremoto del 2004 in Asia;
- la validazione della metodologia in 5 aree campione caratterizzate da ambienti diversi (Portogallo: Setúbal, Marocco: Rabat, Francia: Mandelieu, Italia: Catania, e Bulgaria: Balchik).

I partecipanti a SCHEMA hanno lavorato tenendo bene a mente le esigenze degli utenti finali. I benefici che possono ad essi derivare da SCHEMA sono:

1. **per le organizzazioni di sicurezza civile:** una tecnica globale ed omogenea per valutare i livelli di rischio dei maremoti e dei fenomeni

collegati basata su variabili di vulnerabilità intrinseca (altezza degli edifici, tipi di edifici, descrizione degli abitanti) e su variabili ambientali (densità di edifici per unità di superficie, larghezza delle strade, ...) e, perciò, una tecnica capace di aiutare a sviluppare misure generali di emergenza preventive.

2. **per gli addetti alla pianificazione del salvataggio:** un'approfondita e chiara descrizione delle aree accessibili in caso di evento di maremoto, per aiutare gli addetti alla pianificazione del soccorso a stabilire operazioni efficaci, valutando bene le variabili di vulnerabilità nei momenti in cui si verifica una crisi.
3. **per i responsabili della protezione civile:** una serie di raccomandazioni relative alle strategie per standardizzare la raccolta dei dati e l'esecuzione degli studi di vulnerabilità, basata su simulazioni di scenari di maremoto, che concentrano gli sforzi nella prevenzione e nella formazione della popolazione nelle aree maggiormente esposte.
4. **per le compagnie di assicurazione:** dati spaziali relativi ai massimi danni degli edifici entro le zone potenzialmente inondate, che permettono di rispondere a domande come: che livello di premio si deve fissare per l'assicurazione per danneggiamento ad edifici, per danno agli arredi ed altri beni, per l'interruzione delle attività nelle aree a rischio? Qual è il potenziale livello di richieste per un portfolio particolare di un bene assicurato in una data località?
5. **per i responsabili della pianificazione e della gestione del territorio:** l'approccio di combinare modelli, rilevazioni sul campo e valutazioni di vulnerabilità si dovrebbe usare come input nella pianificazione della gestione della zona costiera, ed anche per costruire o per modificare il costruito esistente lungo una costa esposta ai maremoti.

In previsione del conseguimento degli obiettivi del progetto, i partecipanti a SCHEMA hanno identificato sei specifici Obiettivi (Objectives) ed hanno strutturato il lavoro in altrettanti Unità dette Work-Packages (WP), come illustrato in Tabella 7. Un settimo WP riguarda il coordinamento e la gestione del progetto.

**Tabella 7:** Work Packages (WP) e Obiettivi del progetto SCHEMA.

WP	Descrizione	Obiettivi
1	Lezioni dalla ricerca in corso e dal maremoto dell'Oceano Indiano	<i>Ricavare, da studi post-disastro del maremoto del 2004 nell'Oceano Indiano, dati di input e di output necessari per modellare la pericolosità, per stimare vulnerabilità/danno e per gestire l'emergenza in caso di tsunami.</i>
2	Definizione dei requisiti per una descrizione consensuale di pericolosità, danno, vulnerabilità ed evacuazione in caso di maremoto	<i>Specificare regole consensuali per pervenire a descrizioni di scenari di pericolosità, vulnerabilità e danno utili per chi deve gestire sicurezza/aiuti, per i pianificatori del soccorso e per i politici.</i>
3	Sviluppo di una metodologia per mappare la vulnerabilità ed ideazione di un approccio per l'elaborazione di scenari di crisi in caso di tsunami	<i>Progettare e sviluppare una metodologia per elaborare scenari, in accordo con gli operatori del soccorso e della distribuzione degli aiuti.</i>
4	Creazione di scenari prototipali di eventi e piani di evacuazione nelle cinque aree campione	<i>Proporre scenari di maremoto in cinque aree campione, in zone sismiche con o senza sistemi di early warning, e predisporre schemi di evacuazione adeguati, con interventi appropriati di soccorso ed aiuto coerenti con la successione degli eventi (terremoto o frana seguiti da maremoto)</i>
5	Validazione degli scenari prototipali da parte delle autorità locali e feedback sulla metodologia di progettazione degli scenari	<i>Validare la metodologia generale per lo sviluppo di scenari mediante la revisione critica dei risultati compiuta assieme ai politici, agli operatori del soccorso e della distribuzione degli aiuti, ai responsabili della pianificazione territoriale e delle organizzazioni di protezione civile.</i>
6	Trasferimento della metodologia e disseminazione con armonizzazione delle raccomandazioni	<i>Divulgare la metodologia risultante attraverso specifici meeting e mediante il sito web del progetto.</i>
7	Coordinamento e gestione strategica	

## Allegato B - Partners del consorzio SCHEMA

Logo	Nome o sigla	Stato	Esperienza scientifica	Ruolo nel progetto SCHEMA
	GSC	Francia	Tutte le calamità naturali, valutazione di vulnerabilità, valutazione dei danni, Earth observation. Misure di mitigazione e di riduzione di vulnerabilità.	<b>Coordinatore</b> Metodologia per costruire le mappe GIS della pericolosità e del danno, lavoro sul test site francese.
	Algorithms	Grecia	GIS, gestione delle calamità naturali, valutazione del multirischio.	Divulgazione e riscontro con gli utilizzatori. Simulazione di evacuazione.
	Hidromod	Portogallo	Modellazione della propagazione dell'onda, pianificazione della risposta all'emergenza.	Modellazione di maremoti, lavoro sul test site portoghese.
	UNIBOL	Italia	Osservazioni di maremoti, meccanismo di generazione, modellazione, valutazione della pericolosità e del rischio.	Definizione della metodologia, modellazione di maremoti, lavoro sui test site italiano e francese.
	UNICOV*	Gran Bretagna	Valutazione del rischio, della vulnerabilità, della capacità, sviluppo di scenari.	Valutazione della vulnerabilità in caso di maremoto, gestione della crisi, riscontro degli utilizzatori.
	NOA-GI	Grecia	Monitoraggio di terremoti, valutazione di pericolosità sismica e di maremoto, studi sulle sorgenti sismiche e dei maremoti, modellazione di maremoti e mappatura del rischio.	Definizione della metodologia, modellazione di maremoti, lavoro sul test site bulgaro.
	CRTS	Marocco	Earth observation per la mappatura della pericolosità del Marocco, valutazione di vulnerabilità.	Valutazione della vulnerabilità, lavoro sul test site marocchino.
	ACRI-ST	Francia	Dinamica dei fluidi, geofisica, modellazione oceanica, monitoraggio e previsioni di processi ambientali, sistemi di Earth observation integrati on-line.	Definizione della metodologia, modellazione di maremoti, lavoro sul test site marocchino e in parte sul test site francese.
	SRI-BAS	Bulgaria	Earth remote sensing, sistemi di bordo, Geoinformatica.	Valutazione della vulnerabilità, lavoro sul test site bulgaro.
	JRC-IPSC	Commissione Europea	Valutazione di pericolosità e di prevenzione, valutazione di vulnerabilità, valutazione delle esigenze degli utilizzatori.	Divulgazione e riscontro con gli utilizzatori. Lavoro sui piani di evacuazione.
	TUBITAK – MRC-EMSI	Turchia	Mappatura e valutazione di pericolosità sismica e maremoti, monitoraggi di osservabili geofisici, modellazione di processi naturali.	Scambio di esperienze sul lavoro in corso relativo a terremoti e maremoti in Turchia, riscontro con gli utilizzatori locali.

\* Partner ritirato nel corso del progetto

## Allegato C – Sito web del Progetto SCHEMA

Il sito web del progetto SCHEMA si trova all'indirizzo [www.schemaproject.org](http://www.schemaproject.org). Il sito fornisce tutte le informazioni essenziali sul progetto e grazie al menu di navigazione orizzontale si può avere una visione sintetica del progetto stesso ("Project description") e dei suoi principali obiettivi ("Objectives"). Inoltre alcuni ulteriori dettagli possono essere trovati nelle pagine dedicate al piano di lavoro ("Work packages"), in quelle dedicate alle aree campione ("Test sites") e a quella dei partecipanti ("Partnership").

Grazie ad un secondo menu orientato verticalmente è possibile accedere a informazioni relative al lavoro fatto durante il progetto: la lista dei rapporti (Deliverables) finali che descrivono le attività del progetto nelle sue diverse fasi ("Publications"), la lista degli incontri organizzati per lo scambio di risultati e di

dati tra i partecipanti ("Meetings"), la lista dei lavori presentati a meeting internazionali e la lista di articoli pubblicati su riviste internazionali frutto degli sforzi dei partecipanti nel contesto del progetto SCHEMA ("Dissemination"). Un ulteriore pulsante, "News" riassume gli ultimi aggiornamenti e notizie sul progetto. L'ultima sezione, raggiungibile cliccando sul pulsante "Links", fornisce una lista di collegamenti web a progetti correlati o a siti web contenenti informazioni sugli argomenti trattati nel progetto.

L'area dedicata al Consorzio ("Consortium area") permette ai partecipanti del progetto di visitare una sezione privata in cui possono condividere dati, materiale e opinioni in via riservata.

**Figura 32:** Home page del sito web del progetto SCHEMA.



## Elenco delle Figure

Figura 1: Schema che illustra lo sviluppo della metodologia per produrre scenari di pericolosità di maremoto e scenari di danno da maremoto. ....	8
Figura 2: La faglia Marques de Pombal (Omira et al. 2009), a SO di Lisbona, è stata scelta da HIDROMOD per costruire uno dei peggiori scenari credibili per l'area campione di Setúbal. In questa figura viene mostrata l'elevazione iniziale del mare. ....	12
Figura 3: Dati di batimetria per l'area campione di Mandelieu raccolti da GSC. I rettangoli rappresentano i confini delle griglie di calcolo del sistema multi-griglia creato da UNIBOL per le simulazioni numeriche. ....	14
Figura 4: Esempio di linea di costa dettagliata nell'area dell'area campione di Mandelieu. La posizione della linea di costa è stata dedotta da foto interpretazione di immagini di Google Earth. ....	14
Figura 5: Digital Elevation Model (DEM) della regione intorno a Varna, Bulgaria, inclusa la città di Balchik, selezionata come una delle aree campione di SCHEMA (disponibile grazie a SRI-BAS). ....	15
Figura 6: Differenza tra la linea di costa durante l'alta e la bassa marea nella penisola di Troia nell'area test di Setúbal, come calcolato da HIDROMOD. ....	15
Figura 7: Sistema di quattro griglie usato da UNIBOL per coprire la regione del Mediterraneo centrale dall'Arco Ellenico occidentale (tra il Peloponneso e la parte occidentale di Creta, dove si trova la sorgente del maremoto del 365 d.C.) alla Sicilia orientale, dove si trova l'area campione di Catania. ....	16
Figura 8: Confronto dell'estensione dell'inondazione tra scenario locale (linea tratteggiata blu scuro) e il corrispondente scenario "aumentato" (linea azzurra continua). L'esempio si riferisce all'area campione di Rabat e lo scenario è quello associato al terremoto storico di Lisbona del 1755 ed è il risultato della collaborazione tra ACRI-ST e CRTS. ....	17
Figura 9: Istantanee della propagazione del maremoto per uno degli scenari considerati per l'area campione di Catania, basato sull'evento del 365 d.C. accaduto al largo della costa occidentale di Creta, calcolato da UNIBOL. ....	17
Figura 10: Mappa del tempo di propagazione dello scenario associato al mega-collasso del Cumbre Vieja nell'isola di La Palma, elaborato da ACRI-ST per l'area campione di Rabat. Si vede che le prime onde di maremoto raggiungerebbero Rabat in circa 90 minuti. ....	18
Figura 11: Elevazione massima della superficie del mare (in metri) per la faglia Marques de Pombal analizzata per l'area campione di Setúbal su scala regionale. I calcoli sono stati fatti da HIDROMOD, con condizione iniziale fornita da UNIBOL. ....	18
Figura 12: Elevazione massima della superficie del mare per l'area campione di Rabat per lo scenario del terremoto di Lisbona del 1755, calcolata da ACRI-ST. ....	19
Figura 13: Elevazione minima della superficie del mare per l'area campione di Rabat per lo scenario del terremoto di Lisbona del 1755, calcolata da ACRI-ST. ....	19
Figura 14: Velocità massima della corrente per l'area campione di Rabat per lo scenario del terremoto di Lisbona del 1755, calcolata da ACRI-ST. ....	19
Figura 15: Mappa aggregata dell'elevazione massima del mare calcolata per l'area campione di Catania prodotta da UNIBOL. Le linee di inondazione aggregata (nera) e la linea di inondazione (rossa) derivata dalla combinazione degli scenari aumentati sono disegnate insieme per confronto. ....	20
Figura 16: Danno strutturale agli edifici in accordo con la scala di danno sviluppata da Leone et al. (2006).....	22
Figura 17: Funzioni di danneggiamento per edifici di classe A, B, C, D, E1 ottenute da osservazioni sul campo raccolte dopo il maremoto dell'Oceano Indiano del 26 dicembre 2004, sviluppate durante il progetto SCHEMA da GSC. ....	23
Figura 18: Classificazione di un edificio da immagine satellitare presa da Google Earth (sotto) validata grazie ad una foto presa durante una campagna di rilevamento (sopra) compiuta da GSC nell'area campione di Mandelieu. ....	24
Figura 19: Mappa della tipologia degli edifici sulle coste e sulle rive del fiume di Rabat, redatta da CRTS. Copyright Quickbird image, 2008-09-28, res: 0.63m. ....	24
Figura 20: Dettaglio della distribuzione degli edifici di diverso tipo a Mandelieu, mappata da GSC. ....	25
Figura 21: Distribuzione degli edifici per la zona portuale di Balchik, da SRI-BAS. ....	25
Figura 22: Classificazione delle strade basata sulla larghezza della strada nell'area vicina alla costa e alle rive del fiume Bouregreg nell'area campione di Rabat (CRTS). Copyright Quickbird image, 2008-09-28, res: 0.63m. ....	25
Figura 23: Classificazione delle strade nella fascia costiera di La Plaia a sud di Catania. Vengono mostrate anche le zone che sono potenziale fonte di detriti galleggianti, in quanto sede di costruzioni di legno scarsamente resistenti al maremoto (UNIBOL). ....	25

<i>Figura 24: Particolare dello scenario di danno alla foce del fiume Bouregreg, risultato della collaborazione tra ACRI-ST e CRTS. Copyright Quickbird image, 2008-09-28, res: 0.63m. ....</i>	26
<i>Figura 25: Distribuzione degli edifici (sopra) e scenario di danno (sotto) per il porto della città di Setúbal, calcolato da HIDROMOD. Si noti che il livello D0 è attribuito anche agli edifici di quelle classi (F e G) per le quali il livello di danno non può essere stimato dalla matrice di danno di SCHEMA. ....</i>	26
<i>Figura 26: Scenario di danno aggregato calcolato nell'area di La Plaia a sud di Catania da UNIBOL per le sorgenti aumentate. La maggior parte delle costruzioni risulta essere danneggiata, ma la colonna d'acqua è troppo bassa per farli crollare. ....</i>	27
<i>Figura 27: Scenario di danno calcolato a Balchik da SRI-BAS e NOA-GI per un terremoto locale con angolo di strike della faglia di 40° (sopra) e di 90° (sotto) ....</i>	27
<i>Figura 28: Il porto ed i parcheggi individuati a Setúbal che rientrano nell'area potenzialmente inondata dallo scenario di pericolosità di maremoto (HIDROMOD). ....</i>	28
<i>Figura 29: Mappa degli ostacoli e di accessibilità per Mandelieu (GSC). Rampe di accesso alla spiaggia, tunnel pedonali sotto ferrovie e muri lungo la spiaggia possono essere ostacoli o punti critici in caso di evacuazione. ....</i>	28
<i>Figura 30: Le strade nell'area di La Plaia, Catania, mostrate insieme alla linea di inondazione (rosa) per gli scenari aggregati (risultanti dalle sorgenti aumentate). L'intero sistema principale di strade è colpito dal maremoto con la conseguenza che la spiaggia di La Plaia potrebbe essere isolata e difficilmente raggiungibile via terra dalle squadre di soccorso in caso di emergenza (UNIBOL). ....</i>	28
<i>Figura 31: Esempio di uno scenario locale dettagliato selezionato dall'Atlante per l'area campione di Rabat. L'immagine principale (al centro) mostra il massimo ritiro dell'acqua insieme alla massima inondazione per lo scenario di La Palma. Le informazioni generali sullo scenario sono date nelle figure intorno a scala regionale insieme a tabelle con informazioni utili alle strategie di allarme. ....</i>	30
<i>Figura 32: Home page del sito web del progetto SCHEMA. ....</i>	36

## Elenco delle Tabelle

<i>Tabella 1: Elenco delle mappe che caratterizzano gli scenari di maremoto nel progetto SCHEMA ....</i>	9
<i>Tabella 2: Lista delle sorgenti selezionate per SCHEMA ....</i>	11
<i>Tabella 3: Modelli numerici di maremoto utilizzati per le aree campione del progetto SCHEMA. ....</i>	13
<i>Tabella 4: Tipologia di edifici dipendente dalla capacità di resistenza degli edifici. ....</i>	21
<i>Tabella 5: Scala del livello di danno agli edifici. ....</i>	22
<i>Tabella 6: Matrice di danno adottata nel progetto SCHEMA. I valori della colonna d'acqua sono dati in metri. ....</i>	23
<i>Tabella 7: Work Packages (WP) e Obiettivi del progetto SCHEMA. ....</i>	34

**EUR 24691 IT – Joint Research Centre – Istituto per la Protezione e la Sicurezza dei Cittadini**

Titolo: Manuale per scenari di pericolosità e di danno in caso di tsunami

Autori: S. Tinti, R. Tonini, L. Bressan, A. Armigliato, A. Gardi, R. Guillaude, N. Valencia, S. Scheer

Luxembourg: Publications Office of the European Union

2011 – 42 pp. – 21 x 29.7 cm

EUR – Scientific and Technical Research series – ISSN 1018-5593

ISBN 978-92-79-19064-3

doi:10.2788/22304

**Abstract**

Il manuale sugli scenari di maremoto è il risultato del lavoro svolto nell'ambito del progetto SCHEMA (finanziato dall'Unione Europea, in un periodo di 39 mesi dal 2007 al 2010) da un Consorzio di 11 partner, guidato da Geosciences Consultants. Il manuale è uno dei prodotti del progetto ed ha lo scopo di illustrare i concetti ed i metodi di base che sono stati elaborati ed applicati nel corso del progetto per produrre scenari utili per la stima della pericolosità e del danno derivante dall'impatto dei maremoti. Viene proposto un metodo generale che può essere facilmente adattato alle diverse necessità degli utilizzatori finali, che sono principalmente le pubbliche amministrazioni responsabili della pianificazione dello sviluppo delle zone costiere e dell'elaborazione delle strategie di protezione dai rischi naturali, così come le persone e le organizzazioni coinvolte nella gestione dei disastri e in politiche di mitigazione. La metodologia adottata nel progetto SCHEMA è stata applicata a cinque aree campione (Rabat, Marocco; Setúbal, Portogallo; Mandelieu, Francia; Catania, Italia; Balchik, Bulgaria) molto diverse l'una dall'altra, a riprova che essa è adattabile a una grande varietà di casi. Essa è stata testata con il coinvolgimento attivo degli utilizzatori finali, il che assicura che si tratta di uno strumento utile, pratico e sufficientemente flessibile da coprire le necessità delle singole località.



### **Come ottenere le pubblicazioni dell'UE**

Le nostre pubblicazioni sono disponibili a pagamento alla libreria dell'UE (<http://bookshop.europa.eu>), dove si possono ordinare con un agente di vendita a sua scelta.

L'Ufficio Pubblicazioni ha una rete mondiale di agenti di vendita. Si possono ottenere i loro contatti mandando un fax al (352) 29 29-42758.

La missione del JRC è di fornire supporto scientifico e tecnico a seconda delle richieste degli utenti per la concezione, lo sviluppo, l'implementazione e il monitoraggio delle politiche europee. Al servizio della Commissione Europea, il JRC è un centro di riferimento per la scienza e la tecnologia nell'Unione. Fornendo supporto a tutti gli operatori della politica serve gli interessi comuni degli Stati Membri, rimanendo allo stesso tempo indipendente da interessi particolari sia privati che nazionali.

