

Valutazione quantitativa del rischio per Tsunami nell'ambito della cooperazione internazionale

Alfio Bernardo (*), Stefano Campus (**), Luca Mensio (***)

(*) Ingegnere, Prep Consulting, calle 27 de Febrero 5, San Cristóbal, Repubblica Dominicana,

alfio.bernardo@prepconsulting.net

(**) Ingegnere, Torino, skampus@libero.it

(***) Geologo, Torino, lucamensio@libero.it

Riassunto

Negli ultimi anni, le iniziative delle organizzazioni internazionali in materia di protezione dagli effetti dei pericoli naturali si sono spostate dalla semplice risposta agli eventi alle attività di prevenzione e previsione. La geomatica è pertanto entrata a pieno titolo nelle analisi di pericolosità e rischio, dato il significato “spaziale” che tali concetti rivestono. Ciò si traduce nell'utilizzo di strumenti GIS, ad esempio per la modellazione di fenomeni naturali ed antropici potenzialmente pericolosi e le relative rappresentazioni sintetiche (allestimenti cartografici). Il presente lavoro sintetizza un'esperienza di valutazione del rischio per Tsunami in due Municipi della Repubblica Dominicana, effettuata nel 2012 nell'ambito di un progetto di cooperazione finanziato dal Dipartimento di Protezione Civile dell'Unione Europa. Lo scopo del progetto era la produzione di cartografia di rischio utile per successive fasi di programmazione degli interventi di protezione e/o riduzione del rischio stesso. Tutto il processo produttivo (calcolo della pericolosità attraverso modellazione dello Tsunami, stima della vulnerabilità, calcolo del danno e del rischio e relativi elaborati cartografici) è stato elaborato in ambiente GIS Open e i dati utilizzati, quando non rilevati direttamente *in situ*, derivano da banche dati open disponibili in Rete.

I risultati ottenuti indicano chiaramente da un lato la sostenibilità tecnica ed economica di progetti eseguiti con software GIS open, ormai maturo per applicazioni di alto contenuto tecnico, e dall'altro la sostanziale affidabilità di dati di base liberi (DTM, batimetrie ecc), la cui accuratezza permette sicuramente di eseguire analisi ad una scala adatta a successive azioni di programmazione.

Abstract

In recent years, the initiatives of international organizations in the field of protection against the actions of natural hazards have shifted from simply responding to events, to prevention and prediction. Geomatics is therefore fully entered in the analysis of hazard and risk, for example GIS tools used for the modeling of natural and man-made threats.

This paper summarizes an evaluation of Tsunami risk in two municipalities in the Dominican Republic, carried out in 2012 as part of a cooperation project funded by the Department of Civil Protection of European Union. The purpose of the project was to produce risk maps useful for the subsequent phases of planning of protection measures and / or risk reduction.

The entire production process (Tsunami hazard assessment, vulnerability assessment, calculation of the damage and the risk, and related maps) was prepared in an open source and free GIS software and the data used, when not produced directly *in situ*, are derived from open databases available on the Web. Obtained results clearly indicate the technical and economic viability of projects carried out with the help of open source GIS software, useful for applications of high technical content, and the substantial reliability of free basic data (DTM, bathymetry etc.), whose accuracy definitely allows to perform analysis at a suitable scale for subsequent land planning actions.

1. Introduzione

Nel primo semestre del 2012, le Organizzazioni Non Governative (ONG) *Plan República Dominicana* (Plan RD), *Asamblea de Cooperación Por la Paz* (ACPP) e *l'Instituto de Acción Comunitaria* (IDAC), con il finanziamento della Direzione Generale per gli Aiuti Umanitari e Protezione Civile dell'Unione Europea (DG ECHO) hanno promosso attività di analisi e mappatura del rischio sismico e per tsunami in alcune comunità urbane di cinque municipi, ubicati nella costa meridionale della Repubblica Dominicana.

Tali attività si inseriscono nell'ambito del progetto "*Ciudades dominicanas se están preparando*" – "*Reducción de riesgos urbanos y conciencia de amenazas sísmicas*". L'obiettivo generale è quello di produrre mappe di pericolosità, vulnerabilità, danno e rischio per Terremoto e Tsunami dei settori in urbani cui è attuato il progetto, in base alle quali stabilire piani di mitigazione strutturale o indiretta (piani di emergenza, evacuazione) e nuovi criteri di pianificazione territoriale.

In particolare, in questa memoria, saranno illustrate le attività relative al rischio Tsunami svolte dal gruppo consultore Prep Consulting, incaricato del progetto.

2. Approccio metodologico

Nel linguaggio comune si parla spesso di *disastro naturale* e *prevenzione disastri*. Ma che cosa è un disastro? Esso si può definire come un evento eccezionale che supera le normali capacità di risposta e di far fronte che un'organizzazione o una società è in grado di sostenere (Alexander, 2002). Si va quindi dalla situazione che riguarda un ambito ristretto di spazio ed elementi coinvolti (un incidente stradale, un singolo crollo di massi) sino a quegli eventi la cui intensità e diffusione spaziale può essere gestita solo con la partecipazione di autorità nazionali o internazionali, come ad esempio lo Tsunami del 26 dicembre 2004.

Ciò che porta dunque al verificarsi di un disastro è una combinazione tra l'evento pericoloso e le sue conseguenze, qualora si verifichi in zone antropizzate. Per questo motivo, negli anni, sono stati introdotti anche nel campo della prevenzione e previsione dei pericoli naturali, i concetti di pericolo, pericolosità, vulnerabilità, danno e rischio, mutuati dall'ambito dell'ingegneria industriale. Il *rischio* è la probabilità che si verifichino conseguenze negative per la vita umana, per i beni e le risorse, per le attività economiche e per l'ambiente, derivanti dall'interazione tra l'evoluzione di eventi naturali e le attività umane. Con il termine *pericolosità* si intende invece la probabilità che un fenomeno (pericolo) di una certa intensità si verifichi in una certa area in un determinato periodo di tempo. La *vulnerabilità*, invece, misura il grado di perdita di un elemento a rischio, a causa dell'impatto con un fenomeno naturale di una data intensità. In forma descrittiva, si può intendere il rischio come la combinazione tra pericolosità, vulnerabilità e valore degli elementi esposti. In forma analitica, il rischio è definito dalla [1], dove R è il Rischio [\$], H è la Pericolosità [-], D è il Danno [-], V è la Vulnerabilità [-] ed E è il Valore degli elementi esposti o a rischio [\$].

$$\begin{aligned} R &= H \cdot D \\ D &= V \cdot E \end{aligned} \quad [1]$$

Il presente lavoro ha mantenuto come principio ispiratore il concetto di *analisi quantitativa di rischio*, comprendente le seguenti fasi:

- analisi di pericolosità,
 - ✓ previsione della tipologia (ovvero la risposta alla domanda *cosa?*);
 - ✓ previsione spaziale (ovvero la risposta alla domanda *dove?*);
 - ✓ previsione temporale (ovvero la risposta alla domanda *quando?*);
 - ✓ previsione della intensità (ovvero la risposta alla domanda *quanto?*);
- identificazione e valutazione degli elementi a rischio (persone, beni, ecc.);
 - ✓ previsione degli elementi esposti e del relativo danno atteso (ovvero la risposta alla domanda *quali* elementi?
- valutazione della vulnerabilità e del danno atteso;
- definizione quantitativa del rischio.

Nel seguito, tutte le analisi si riferiscono esclusivamente al *rischio strutturale*, cioè alla componente del rischio che attiene alla capacità di perdere funzionalità ed essere danneggiato degli edifici presenti nella zona di studio (resistenza), tralasciando la componente di perdita relativa alle persone.

Lo studio di rischio ha riguardato l'analisi di 11 comunità appartenenti ai municipi di Barahona, Villa Central, Guayacanes e San Pedro de Macorís, ubicate sulla costa meridionale dell'isola di Española nel territorio della Repubblica Dominicana (Figura 1).

La superficie totale delle comunità è circa 2.5 km² ma ovviamente l'analisi di pericolosità per Tsunami è stata estesa ad un tratto di costa significativo: circa 17 km per Barahona e Villa Central, 20 km circa per Guayacanes e 16 km circa per e San Pedro de Macorís.

3. Calcolo della Pericolosità

Uno Tsunami è un anomalo moto ondoso del mare costituito da una serie di onde generate usualmente da una perturbazione che comporti uno spostamento improvviso di una grande massa d'acqua quale, per esempio, un terremoto sottomarino, una frana, un'eruzione vulcanica sottomarina o un impatto meteoritico. Di solito si genera in mare aperto, dove l'onda rimane poco intensa e poco visibile e concentra la sua forza in prossimità della costa, quando l'onda si solleva e si riversa più o meno nell'entroterra. Il moto ondoso "ordinario" è caratterizzato da un periodo (intervallo di tempo tra due onde successive) usualmente compreso tra 5 s e 20 s, mentre la lunghezza d'onda (distanza tra due picchi successivi) è generalmente compresa tra 100 m e 200 m. In confronto, le onde di Tsunami, durante il moto in mare aperto, hanno un periodo dell'ordine di 1-2 h, una longitudine che può arrivare anche a 100 km e un'ampiezza non superiore a 20-30 cm. La velocità di propagazione di un'onda di Tsunami supera le centinaia di chilometri all'ora in mare aperto e, per il principio di conservazione dell'energia, in corrispondenza della linea di costa, l'ampiezza dell'onda passa dalle poche decine di centimetri sino ad alcuni metri.

Il modello di propagazione di un'onda di Tsunami adottato per creare diversi scenari di pericolosità è stato implementato in ambiente GIS open source (QGIS e SAGA), utilizzando l'approccio deterministico semplificato in Federici et al. (2006) e Cannata et al. (2008), cui si rimanda per gli approfondimenti teorici e le semplificazioni assunte dagli Autori.

Le relazioni che governano il fenomeno sono (Figura 2):

$$R_u = H + z_{\max} \quad [2]$$

$$H = H_0 \cdot \left(\frac{h_0}{h}\right)^4 \quad [3]$$

dove:

- R_u (*runup*): massima risalita verticale dell'onda rispetto alla riva
- z_{\max} : massimo soprizzo raggiunto dall'acqua rispetto all'altezza d'onda, funzione solo dell'inclinazione della linea di costa;
- H : altezza d'onda a riva;
- H_0 : altezza d'onda nel punto in cui si è generata;
- h_0 : profondità del mare nel punto in cui si è generata l'onda;
- h : profondità del mare in corrispondenza della costa;
- V_c : volume cinetico;
- V_p : volume potenziale.

Osservando le equazioni [2] e [3], si può notare che l'altezza massima in corrispondenza della linea di costa (*runup*) sia funzione dell'altezza d'onda incidente a riva e della pendenza del tratto di costa dove l'onda va a impattare.

Operativamente, il modello *raster* implementato è basato sul calcolo cella per cella del *runup*, in corrispondenza della linea di costa, e della successiva propagazione dell'inondazione nell'entroterra territorio. Per ottenere scenari di pericolosità differenti ad intensità crescente, sono stati ipotizzati tre scenari (Tabella 1).

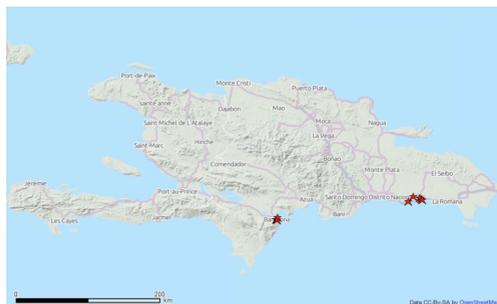


Figura 1. Ubicazione, in rosso, dei siti di studio (base Open Street Map).

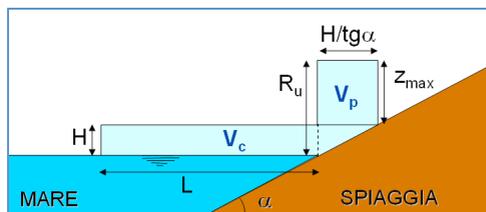


Figura 2. Schematizzazione del fenomeno di runup (Federici et al., 2006).

Parametri		Barahona	Guayacanes	San Pedro de Macoris
H ₀ [m]	Scenario 1			
	0.10			
	Scenario 2			
	0.20			
	Scenario 3			
	0.30			
h ₀ [m]	4900			
h [m]		9.70	3.40	1.00

Tabella 1. Parametri relativi ai tre scenari di pericolosità.

Per l'applicazione del modello, sono stati utilizzati i seguenti *dataset*, tutti reperiti liberamente in Rete, a causa della non disponibilità di dati di maggior dettaglio:

- un modello digitale integrato delle altezze e delle batimetrie, ottenuto dalla fusione del modello delle terre emerse ASTER a risoluzione 0.0002° (circa 30 m) e il modello batimetrico GEBCO a risoluzione 0.008° (circa 900 m) (Figura 3). Tale modello integrato è stato utilizzato per il calcolo della pendenza della linea di costa;
- linea di costa ad alta risoluzione (GSHHG), resa disponibile dal NOAA.

Inoltre, tutti gli allestimenti cartografici prodotti sono basati sul servizio Google Map, poiché non erano disponibili ortofoto e la Carta Ufficiale della Repubblica Dominicana non è adatta ad essere usata come sfondo a causa della scala di rappresentazione (1:50'000) e a causa dell'eccessiva presenza di colori e simbolismi che non permettono di distinguere dati tematici sovrapposti.

Per tutti e tre gli scenari si è ipotizzato un unico punto tsunami-genico, che corrisponde ad un terremoto che potrebbe avere luogo nella cosiddetta *Trinchera de los Muertos*, luogo di faglie geologicamente attive (Figura 4).

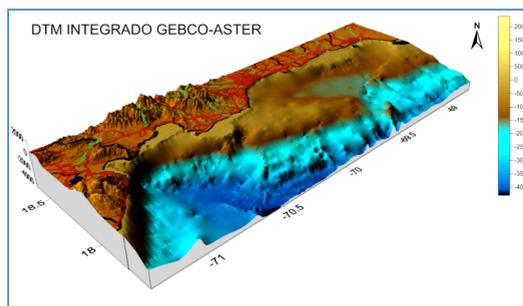


Figura 3. Modello digitale del terreno ASTER (30 m) integrato con il modello batimetrico GEBCO (900 m).

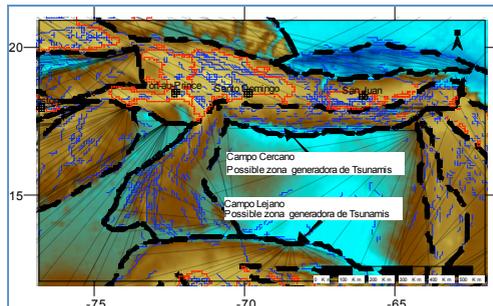


Figura 4. Sistemi di faglia della regione caraibica. L'origine del terremoto di progetto è lungo il Campo cercano (French & Schenk, 2004).

Il calcolo del campo di inondazione è stato eseguito confrontando, nel generico *pixel*, la quota del *runup* dell'onda, esteso mediante interpolazione IDW, con la quota dello stesso *pixel* fornita dal DTM. Se la differenza tra *runup esteso* e DTM è positiva, il *pixel* viene considerato inondato e gli è assegnato il valore di tale differenza, che rappresenta l'altezza dell'acqua, mentre ai *pixel* caratterizzati da differenza negativa viene assegnato il valore 0 (*non inondato*). Di seguito, sono riportate alcuni esempi dei risultati ottenuti (Figura 5).

Gli scenari di inondazione costituiscono il primo “ingrediente” per il calcolo del rischio e corrispondono agli scenari di pericolosità, H , nella equazione [1]. Non è stato possibile tenere conto della componente temporale della pericolosità (tempo di ritorno o frequenza dell'evento) a causa dell'esiguità della serie storica documentata di Tsunami nel mar dei Caraibi.

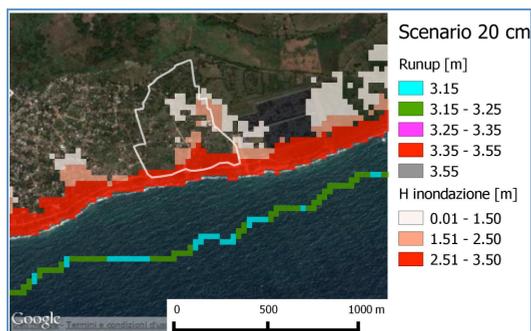


Figura 5. Esempio di risultato dell'analisi di pericolosità. Runup sulla linea di costa e corrispondente area inondata per lo scenario di 20 cm di altezza iniziale dell'onda.

4. Analisi della Vulnerabilità

La risposta degli elementi esposti ad un evento potenzialmente dannoso è funzione del tipo di pericolo e della sua intensità. La vulnerabilità indica dunque il grado di perdita di un certo elemento a rischio, a causa dell'impatto con un fenomeno naturale di data intensità. Essa è espressa in termini qualitativi o quantitativi in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è funzione dell'intensità del processo agente e della tipologia dell'elemento a rischio.

È possibile, ed in certi casi necessario, distinguere il tipo di perdita cui è soggetto un elemento a rischio: si parla infatti di *vulnerabilità sociale* (perdita di vite umane), *strutturale* (resistenza meccanica agli effetti di una sollecitazione indotta da un pericolo), *economica* (perdite economiche dirette ed indirette) ecc. Nel presente studio, si è prestata specifica attenzione alla valutazione della vulnerabilità degli edifici.

Uno Tsunami può danneggiare gli edifici in modo diverso e i principali indicatori di vulnerabilità devono tenere conto di:

- resistenza intrinseca degli edifici e delle loro caratteristiche;
- vicinanza alla linea di costa;
- altezza dell'onda che colpisce l'edificio;
- caratteristiche delle aree intorno agli edifici.

Pochissimi di questi parametri possono essere misurati e descritti *in situ* alla scala di ogni edificio su un'area vasta. Ciò che viene normalmente utilizzato per stimare la vulnerabilità è un criterio che valuta il grado di perdita diretta che può subire un edificio, funzione dell'altezza della colonna d'acqua che raggiunge l'edificio e delle sue caratteristiche strutturali. Si assume cioè che il livello di perdita dipende dal tipo di edificio e dall'altezza dell'inondazione.

La classificazione è stata effettuata sulla base dei risultati del Progetto SCHEMA (Tinti et al., 2011), individuando sul campo cinque classi di edifici (Tabella 2). Associando tali classi alle

tipologie costruttive ed accorpare opportunamente le classi simili, sono state individuate tre classi di vulnerabilità alle quali assegnare tutti gli oltre 4500 edifici rilevati.

La mappatura è avvenuta mediante rilevamento GPS, ispezione visiva dell'edificio e contestuale assegnazione dell'edificio considerato ad una delle classi di vulnerabilità stabilite. Si è trattato quindi inizialmente di una rappresentazione puntuale della vulnerabilità, a partire dalla quale è stato necessario passare ad una informazione di tipo spaziale diffuso. Dal punto di vista applicativo, questo passaggio è stato effettuato tramite l'applicazione del metodo dei poligoni di Thiessen ai punti-edificio (Figura 6).

Avendo a disposizione le curve di vulnerabilità, è stato possibile per ogni scenario di pericolosità calcolare uno scenario di perdita, ottenuto applicando le funzioni analitiche riportate in Figura 7.

Classe edificio	Tipologia strutturale
A	Totalmente in legno
B	Legno con pareti in muratura
C	Legno con cemento e/o blocchetti
D	Muratura (mattoni/blocchetti)
E	Cemento armato (con o senza pareti di muratura)

Tabella 2. Classificazione degli edifici in funzione della tipologia.

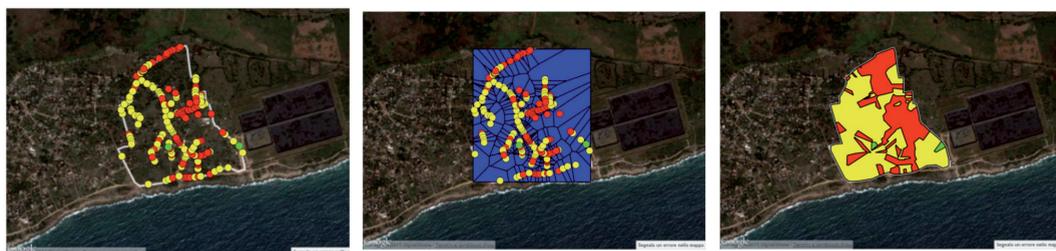


Figura 6. Passaggio da vulnerabilità puntuale a vulnerabilità areale attraverso i poligoni di Thiessen.

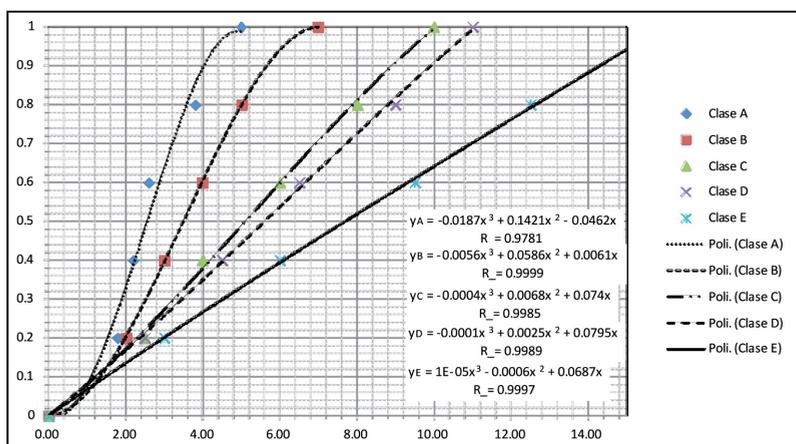


Figura 7. Calcolo della vulnerabilità. In ascissa, altezza acqua in metri (Pericolosità), in ordinata, grado di perdita (curve di vulnerabilità decrescente da A ad E) (Tinti et al., 2011, ridisegnata).

5. Stima del valore degli elementi a rischio

Una volta valutati gli scenari di perdita, si è reso necessario stimare i costi al metro quadro degli edifici in funzione della tipologia costruttiva. La maggioranza delle comunità in cui si è operato non

è soggetta a pianificazione urbanistica strutturata, ma piuttosto si è in presenza di quella che viene definita *architettura informale*. Ciò comporta la mancanza di un mercato delle costruzioni tradizionale e dunque di imprese di costruzioni cui poter ricorrere per avere una stima dei costi, ma ci si è rivolti a *maestri d'opera* che nel caso di edificio di modesto impegno statico provvedono a realizzare direttamente il *progetto*.

I costi unitari di costruzione sono riportati nella Tabella 3 e si riferiscono alla tipologia di edifici di cui alla Tabella 2.

Tipologia edificio	Municipio/Comunità	
	Guayacanes, San Pedro de Macorís [USDS/m ²]	Barahona/Villa Central, Las Salinas [USDS/m ²]
A, B, C	55.00	6.41
D	85.00	7.70
E	1500.00	15.38

Tabella 3. Stima dei costi di costruzione di un edificio in funzione della tipologia costruttiva.

5. Calcolo del rischio

Come riportato nell'equazione [1], il rischio è il prodotto del danno per la pericolosità. Pertanto, è stato moltiplicato il *raster* della pericolosità per il *raster* della vulnerabilità per il valore degli edifici esposti (Figura 8).

È importante sottolineare che il rischio è diverso da zero solo per quegli elementi (o più precisamente per quelle celle) che ricadono entro l'area inondata: se non c'è pericolosità il rischio è zero. Poiché gli scenari di pericolosità calcolati sono tre, corrispondenti a tre livelli crescenti di severità dell'evento, sono stati calcolati tre scenari di danno e quindi si avranno tre scenari di rischio.

Dimensionalmente, il rischio è espresso in termini economici (dollari americani), poiché nella formula del calcolo del rischio, il fattore *valore degli elementi a rischio* è l'unico con una dimensione, mentre *pericolosità* e *vulnerabilità* sono indici compresi tra zero e uno.

6. Considerazioni finali

Al termine del Progetto, sono stati allestiti oltre cento cartogrammi in formato A3 riguardanti, per ogni comunità, la pericolosità, la vulnerabilità, il danno atteso e il rischio. Tale documentazione dovrebbe costituire il punto di partenza per la predisposizione di piani di mitigazione del rischio, anche se una vulnerabilità talmente alta, unita all'esiguo costo di costruzione degli edifici, porterebbe a considerare il trasferimento degli edifici come opzione economicamente più redditizia. Inoltre:

- ✓ è stata eseguita un'analisi di rischio completa secondo la definizione classica in [1];
- ✓ tutte le basi dati utilizzate e non prodotte entro il progetto (come il censimento degli edifici) sono pubbliche ed accessibili gratuitamente (DEM, Batimetria, Linea di Costa, Google Maps, Open Street Map). Chiaramente la qualità dei risultati risente della qualità dei dati di input.
- ✓ il modello di simulazione adottato è di facile da implementare in ambiente GIS e fornisce risultati coerenti se utilizzati alla scala di pianificazione e programmazione.
- ✓ è stato utilizzato solo software, geografico e non, libero e/o open source dimostrando che tali strumenti sono ormai così robusti e stabili da poter sostituire il software proprietario.

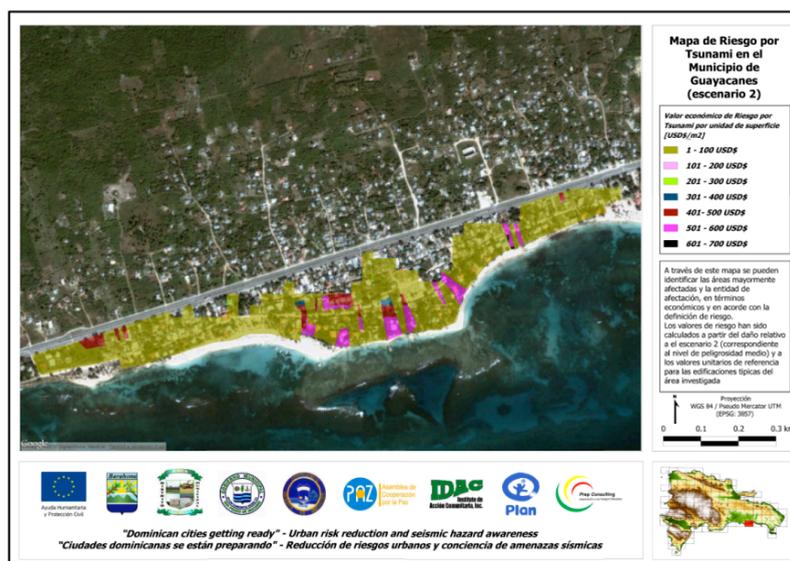


Figura 8. Mappa di rischio.

7. Bibliografia

- Alexander D. (2002), *Principles of emergency planning and management*. Oxford University Press.
- ASTER-https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_overview
- Cannata M., Federici B., Molinari M., (2008), “Carte di inondazione dovute a tsunami mediante il GIS GRASS: applicazione all’isola di St. Lucia, Caraibi”, *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, n. 1, pp. 9-20.
- Federici B., Bacino F., Cosso T., Poggi P., Rebaudengo Landò L., Sguerso D., (2006), “Analisi del rischio tsunami applicata ad un tratto della costa ligure”. *Geomatics Workbooks*, n. 6, pp. 1-19, Politecnico Milano-Polo Como, <http://geomatica.como.polimi.it/workbooks>
- French C., Schenk J., (2004), *Map Showing Geology, Oil and Gas Fields, and Geologic Provinces of the Caribbean Region*, U.S. Geological Survey Open-File Report OFR-97-470-K.
- GEBCO-General Bathymetric Chart of the Oceans, <http://www.gebco.net>
- GSHHS-A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>
- Tinti S., Tonini R., Bressan L., Armigliato A., Gardi A., Guillande R., Valencia N., Scheer S., (2011), *Progetto SCHEMA. Manuale per scenari di pericolosità e di danno in caso di tsunami*, JRC

8. Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato realizzato con il contributo finanziario della Commissione Europea, attraverso la Direzione Generale per gli Aiuti umanitari e la Protezione civile (DG ECHO), che non è responsabile per le opinioni contenute in questo documento e non riflette la posizione ufficiale dell’Unione. Gli Autori ringraziano le ONG Plan República Dominicana, Asamblea de Cooperación Por la Paz (ACPP) e l’Instituto de Acción Comunitaria (IDAC) per avere accordato il permesso di pubblicare dati derivanti dal Progetto.