

La valutazione del rischio da risalita relativa del livello del mare (RSLR) nelle pianure costiere.

Aspetti concettuali ed ipotesi di linee guida

Sergio Silenzi, Saverio Devoti e Marco Fulvio Nisi

ICRAM – Istituto Centrale per la Ricerca Scientifica e Tecnologica Applicata al Mare,
Via di Casalotti 300 - 00166 Roma. s.silenzi@icram.org.

Riassunto

Allo scopo di fornire alla Pubblica Amministrazione ed ai decision-makers uno strumento efficace e scientificamente esatto, ma al contempo gestibile ed economicamente attuabile per operare scelte mirate nella gestione della fascia costiera, viene di seguito elaborato un percorso metodologico per valutare le criticità in atto, in funzione dei cambiamenti climatici.

Tale percorso, affrontato sotto forma di Linea Guida, si esplica attraverso il confronto fra le caratteristiche intrinseche della costa e la previsione degli scenari futuribili.

La metodologia permette di valutare, attraverso elaborazioni GIS, sia le cause determinanti le variazioni del livello marino (cambiamenti climatici globali; subsidenza) e della linea di costa (dinamiche sedimentarie; erosione), sia gli effetti di queste sulla conformazione del territorio, mediante la definizione dei parametri predisponenti la reazione del territorio stesso.

Fra questi ultimi vi sono gli Aspetti Geologici, Geomorfologici, Idrologici ed Idrogeologici, l'Uso del Suolo. Integrando tali parametri predisponenti agli Scenari Futuri, la metodologia permette di valutare la Pericolosità Specifica (effetti sul territorio delle cause determinanti) e la Pericolosità Integrata (elaborazione numerica dell'interazione fra gli effetti sul territorio connessi alle cause determinanti e la reazione connessa ai parametri predisponenti). Attraverso l'integrazione fra uso del suolo e pericolosità integrata viene suggerita l'elaborazione degli scenari di Rischio (perdita economica sulla base della stima del valore relativo dei diversi usi del suolo). Tale approccio potrà consentire l'adeguamento dei piani regolatori già esistenti e/o la valutazione di strategie di adattamento rispetto a fenomeni potenzialmente dannosi e connessi alle variazioni relative del livello del mare.

Parole chiave: risalita livello mare, rischio, pianure costiere.

Abstract

In the present work, a methodological pathway was developed to assess risk in function of climatic changes in coastal areas. This was done with the aim of providing Public Administrations and decision makers with an efficient, scientifically exact and affordable instrument for aimed and successful coastal management.

Such a method, used as a guideline, is performed by comparing the intrinsic coastal characteristics with the predicted possible future scenarios.

This methodology allows the evaluation, through GIS elaboration, of both the causes determining sea level changes (global climate changes, subsidence) and coastline variations (sedimentary dynamics, erosion) and of the effects that these factors have on the territory's structure. The evaluation is possible thanks to the identification of the parameters predisposing the territory's reactions.

These parameters are linked with Geological, Geomorphological, Hydrological and Hydrogeological aspects and with aspects pertaining to Land Use. By integrating these predisposing parameters, the method allows to evaluate the Specific Hazard (effects of the determining causes on the territory) and the Integrated Hazard (numeric elaboration of the interaction between the effects of the determining causes on the territory and the territory's reaction to the predisposing parameters). Through the integration between Land Use and Integrated Hazard, a Risk scenario can be elaborated (i.e. economic loss on the basis of the estimate of the relative value of different Land Uses). This approach will permit the adjustment of the already existing zoning regulations and/or the assessment of strategies of adaptation to potentially dangerous phenomena which can result from relative sea level variations.

Key-words: coastal plains, sea-level rise, risk assessment, guideline.

Introduzione

La zona costiera riveste un'importanza centrale per l'economia, l'ambiente e la cultura italiane. La peculiare complessità geomorfologica, unitamente al rapido sviluppo delle infrastrutture e degli insediamenti produttivi, ha comportato un forte incremento nella vulnerabilità dei litorali, testimoniato, ad esempio, dall'alta percentuale di spiagge in erosione (oltre il 23%; dati Legambiente, 2003). Agli aspetti di urbanizzazione e di uso del territorio, si sono sovrapposti negli ultimi decenni gli effetti dei cambiamenti climatici, sia naturali che indotti. I fenomeni correlati all'arretramento della linea di costa mettono in grave pericolo gli ambienti naturali, le attività economiche che si svolgono su di essa, la sicurezza delle opere pubbliche e delle infrastrutture.

Le nuove tendenze della ricerca, coerentemente con la comprensione di quelle che sono le normali dinamiche naturali (in cui coesistono ciclicità degli eventi e normali alterazioni degli equilibri su scala locale e regionale), tendono ad affrontare i fenomeni erosivi senza tuttavia contrastarli, in un quadro generale di riequilibrio delle situazioni naturali al contorno.

Queste ricerche, inoltre, sono mirate a minimizzare l'impatto sull'ambiente nel reperimento delle risorse, tendendo a stimare, e quindi a gestire nel modo corretto i fattori impattanti. Questi ultimi, infatti, sono spesso superiori ai benefici che la risorsa può apportare, come può avvenire nel prelievo di sedimenti in cave a terra. In tale quadro si evince come nelle aree di piana costiera, dove è forte l'interazione con gli eventi meteomarinari, sia necessario adeguare i piani di sviluppo territoriale alle futuribili variazioni fisiografiche e ambientali connesse anche ai cambiamenti climatici globali (innalzamento del livello dei mari, aumento degli eventi estremi, ecc.) e agli assetti geologici in senso lato (subsidenza, morfologie depresse, ecc.), che agiranno come un significativo forzante nella definizione degli assetti costieri. La fruibilità della fascia costiera risente perciò dell'esigenza pressante, ma ancora non pienamente attuata, di una corretta programmazione e gestione che possa preservare tanto l'ambiente quanto le attività e le risorse che vi si trovano.

Risulta perciò evidente l'utilità di difenderne, preservarne e migliorarne le risorse, coniugando criteri economici, ecologici e culturali; in altre parole applicare ai litorali una Gestione Integrata della Zona Costiera. Le indicazioni della EU sulle strategie per ICZM (Integrated Coastal Zone Management, ICZM; website <http://europa.eu.int/comm/environment/iczm/home.htm>) già nel programma 1996-1999, prevedevano di individuare “..technical information about sustainable coastal zone management, and Stimulate a broad debate among the various actors involved in the planning, management or use of European coastal zones.”, portando, fra l'altro, nel 2002 la commissione a finanziare il progetto EU-ROSION (website www.euroSION.org). Quest'ultimo prevede l'individuazione di raccomandazioni sulla gestione sostenibile dell'erosione costiera, concernenti anche le prospettive di lungo termine, quali quelle correlate ai cambiamenti climatici. Similmente, anche la Regione Emilia Romagna si è dotata nel 2002 di un progetto (Progetto GIZC; Redazione del Piano di difesa della costa nell'ambito del Piano di Gestione Integrata della Zona Costiera) che consiste nell'elaborazione di linee guida per la gestione costiera. In tale progetto i cambiamenti climatici futuribili, descritti nella scheda dal titolo

“Difesa della Costa, dell’assetto geomorfologico in relazione anche al rischio da Ingressione Marina”, vengono trattati come un aspetto decisivo nella gestione del patrimonio costiero. Si rafforza, perciò, la necessità in ambito nazionale ed europeo di elaborare delle strategie di pianificazione in grado di fornire ai decisori, una volta individuate le varie criticità in atto su un territorio, lo strumento più idoneo per la prevenzione e la mitigazione dei rischi.

Gli obiettivi principali del progetto di ricerca a cui è dedicato questo volume consistono nel dotare la Pubblica Amministrazione di uno strumento rapido, economico, efficace e versatile, ma scientificamente corretto, per:

- Caratterizzare il territorio costiero nei suoi molteplici aspetti (fisici, geologici, biologici, antropici).
- Individuare le criticità in atto sulle fasce costiere (sia indotte da cause naturali sia dovute a forzanti antropiche).
- Definire e perimetrare le Pericolosità ed il Rischio Integrato (come ad es. quello da risalita del livello marino, quello dovuto a sversamenti, a eventi meteomarinari estremi, alla costruzione di nuove infrastrutture, alla pressione turistica, ecc.).
- Realizzare e/o supportare una pianificazione della fascia costiera (non solo in chiave conservazionistica ma anche, e soprattutto, tesa a migliorare la fruibilità del territorio e quindi all’economia delle regioni costiere).
- Progettare azioni e strumenti per la mitigazione degli impatti connessi ai vari fenomeni dannosi (ad es. difesa della linea di costa, movimentazione dei fondali, bonifiche, riqualificazione del sistema dunare, contenimento inquinamento, ecc.) ed il ripristino di ambienti litoranei e marini su una fascia territoriale di così elevato valore produttivo quale quella italiana.

Gran parte di questi obiettivi sono stati elaborati e considerati nell’Ipotesi di Linee Guida per la previsione di Pericolosità e Rischio Integrato in aree costiere di seguito presentata, ed applicata alla piana pilota della Versilia. Questo approccio ha trovato massimo riscontro nella Pubblica Amministrazione attraverso un accordo di programma fra Icram e Provincia di Lucca: quest’ultima si è avvalsa dell’esperienza metodologica elaborata dall’Icram e qui presentata per aggiungere tale valore di capacità di programmazione (costantemente aggiornabile) ed il relativo database alla gestione del proprio territorio, in ordini di grandezza temporali (25, 50 e 100 anni) tali da permettere una prevenzione dai rischi analizzati sul lungo periodo, risparmiando potenzialmente quelle risorse altrimenti impiegate nella gestione delle emergenze ambientali.

Aspetti concettuali: le definizioni di Suscettibilità, Pericolosità, Vulnerabilità e Rischio

Gli studi inerenti la valutazione e la gestione dei rischi naturali hanno avuto un’accelerazione nel decennio tra il 1990 ed il 2000, designato come Decennio Internazionale per la Riduzione dei Disastri Naturali dalla 42^a Assemblea Generale delle Nazioni Unite. A tal fine sono stati sperimentati, in tutto il mondo, numerosi approcci per la costruzione di carte di pericolosità e di rischio, strumenti essenziali per una corretta gestione del territorio da parte di tecnici e decisori.

A causa dell’enorme mole di metodologie proposte, e nonostante il lavoro di numerose commissioni scientifiche internazionali, non si è ancora giunti ad un’univoca definizione dei concetti di suscettibilità, vulnerabilità, pericolosità, rischio, ecc.; terminologie spesso erroneamente interpretate o utilizzate a seconda dei diversi ambiti di applicazione.

Viene di seguito riassunta, con lo scopo d’inquadrare concettualmente la problematica sul rischio da ingressione marina, una rassegna delle definizioni proposte da alcuni lavori significativi, tra cui quello dell’UNESCO (Varnes e IAEG, 1984), organismo che ha tra i propri compiti istituzionali la mitigazione dei danni causati da eventi naturali estremi e la riduzione del rischio ad essi connesso. Queste definizioni hanno un carattere generale e valgono per ogni tipologia di fenomeno di instabilità potenzialmente distruttivo, inclusa l’accelerazione dell’innalzamento del livello del mare prevista per il prossimo secolo.

Suscettibilità (Susceptibility, S):

- Propensione di un settore di territorio all'insorgenza di un determinato fenomeno potenzialmente distruttivo per la concomitanza di determinate condizioni fisiche (Brabb, 1984; Carrara et al., 1995).

Pericolosità (Hazard, H):

- Probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area (Varnes e IAEG, 1984).

- Probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità, si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area. In questa accezione la Pericolosità viene riferita in termini di probabilità annuale ed ad una data intensità (Canuti e Casagli, 1996).

- Magnitudo, frequenza e severità di un evento potenzialmente distruttivo (Chapman, 1994).

- Combinazione della probabilità di occorrenza di un fenomeno e della sua severità meccanica e geometrica (Perrot, 1988; DRM, 1990).

- Probabilità di occorrenza di un fenomeno distruttivo in un determinato intervallo di tempo (Einstein, 1988).

- Prodotto della magnitudo di un determinato fenomeno potenzialmente dannoso per la sua probabilità di occorrenza (Fell, 1994).

Intensità (Intensity, I):

- Severità geometrica e meccanica del fenomeno potenzialmente distruttivo. Può essere espressa in una scala relativa oppure in termini di una o più grandezze caratterizzanti il fenomeno come la sua velocità, il suo volume, la sua energia, la sua estensione, ecc. (Fell, 1994; Canuti e Casagli, 1996).

- Localizzazione nello spazio e caratterizzazione geometrica e meccanica del fenomeno potenzialmente distruttivo (Einstein, 1988).

Elementi a rischio (Element at risk, E):

- Popolazione, proprietà e attività economiche a rischio in una data area (Varnes e IAEG, 1984).

- Popolazione, proprietà, attività economiche, servizi pubblici e beni ambientali a rischio in una data area (Canuti e Casagli, 1996).

Valore degli elementi a rischio (Worth of element at risk, W):

- Valore economico o numero di unità relative ad ognuno degli elementi a rischio in una data area; tale valore è funzione del tipo di elemento a rischio $W=W(E)$ (Canuti e Casagli, 1996).

Vulnerabilità (Vulnerability, V):

- Grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità, espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) (Varnes e IAEG, 1984); la Vulnerabilità può essere considerata, inoltre, come una funzione dell'intensità del fenomeno distruttivo e della tipologie dell'elemento a rischio $V=V(I;E)$ (Canuti e Casagli, 1996).

- Entità delle perdite attese, espressa in termini monetari, nel caso di un evento con pericolosità ed intensità fissata (Panizza, 1988; Del Prete et al., 1992).

- Valore economico, espresso in termini monetari, degli elementi esposti ad una potenziale minaccia (Braaf et al., 1995; Greve et al., 2000).

Danno potenziale (Potenzial worth of loss, W_p):

- Entità potenziale delle perdite nel caso di un evento con intensità fissata; può essere espresso come numero o quantità di unità esposte oppure in termini monetari. Per una tipologia di elemento a rischio e per una data intensità del fenomeno, il danno potenziale è dato da $W_p = W(E) V(I;E)$ (Canuti e Casagli, 1996). Questa definizione di danno potenziale corrisponde a quella di Vulnerabilità di molti Autori francesi.

Rischio (Risk, R):

- Perdita attesa come conseguenza di un determinato fenomeno distruttivo, calcolata combinando la

pericolosità del fenomeno e la vulnerabilità del territorio, espressa in termini monetari (Panizza, 1988; Del Prete et al., 1992).

- Caratterizzazione delle conseguenze del fenomeno potenzialmente distruttivo espressa dal prodotto della pericolosità per il danno potenziale $R = HW_1$ (Einstein, 1988), dove il danno potenziale è espresso in funzione degli elementi a rischio e della vulnerabilità secondo Varnes e IAEG (1984), mentre la pericolosità è espressa nell'accezione di Einstein (1988).

- Perdita attesa in conseguenza di un fenomeno distruttivo espressa come funzione della probabilità di occorrenza del fenomeno e della esposizione degli elementi a rischio (Braaf et al., 1995; Van Dissen e Mc Verry, 1994; Mitchell e Eriksen, 1992).

- Perdita attesa (vite umane, proprietà, attività economiche, ecc.) in conseguenza ad una determinata pericolosità naturale; è espresso come una funzione della Pericolosità H (nell'eccezione di Chapman, 1994) e della Vulnerabilità V (nell'eccezione di Braaf et al., 1995) su di un tempo t: $R=f(H,V,T)$ (Greve et al., 2000).

Rischio specifico (Specific Risk, R_s):

- Grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale, è espresso dal prodotto HV (Varnes e IAEG, 1984).

- Grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di una data intensità, espresso in termini di probabilità annua; per un dato elemento a rischio e per una data intensità, il rischio specifico è il prodotto $R_s(I;E) = H(I) V(I;E)$ (Canuti e Casagli, 1996).

- Combinazione tra la probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente dannoso e la vulnerabilità del territorio, espressa dal prodotto $R_s = PV$ (Fell, 1994).

Rischio totale (Total Risk, R_T):

- Numero di perdite di vite umane, numero di feriti, di danni alle proprietà e di interruzione delle attività economiche atteso in conseguenza di un determinato fenomeno distruttivo; può essere espresso dal prodotto $R_T = HVE = R_s E$ (Varnes e IAEG, 1984).

- Valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e alle attività economiche in seguito ad un particolare evento naturale; viene espresso in termini di costo annuo o in quantità di unità perse in un anno ed è rappresentato dal prodotto

- $R_T(I;E) = R_s(I;E)W(E)$ (Canuti e Casagli, 1996).

Nel tentativo di seguire e proporre una procedura *standard* per la valutazione del Rischio da RSLR (Relative Sea Level Rise) per le aree costiere italiane, sono state adottate nel presente lavoro quelle definizioni, e quindi i significati concettuali, che hanno incontrato il consenso più ampio in seno alla comunità scientifica, riassunte nella Tabella 1.

Percorso metodologico generale per la valutazione del rischio da RSLR

Con riferimento alle definizioni riportate nella Tabella 1, la valutazione del rischio da RSLR elaborata in questo lavoro è schematizzata in Figura 1 ed esplosa nel Percorso Metodologico della Tavola 1 allegata che, in particolare, permetterà di seguire con dettaglio il percorso metodologico proposto nei successivi capitoli; tale approccio, elaborato in ambiente GIS, si esplica attraverso due percorsi paralleli: l'uno correlato all'*Analisi del territorio* (elaborati D, UTO, S nell'elenco, in Figura 1 e nella Tabella 1) e l'altro connesso alla *Previsione dei cambiamenti fisiografici* futuribili (Cd ed F, Hs) che, "integrati" fra loro, permettono la valutazione della *Pericolosità Integrata* (H) e quindi del *Rischio* (R) da RSLR:

Analisi del territorio

Rilevamenti (D): acquisizione di dati territoriali, relativi alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, paleoambientali, idrologiche, idrogeologiche e di uso del suolo.

Unità Territoriali Omogenee (UTO): spazializzazione dei parametri predisponesti (PP) la suscettibilità del territorio agli effetti indotti dal RSLR.

Suscettibilità (S): valutazione della propensione del territorio al dissesto attraverso l'attribuzione di opportuni punteggi e pesi moltiplicatori ai singoli PP (metodo parametrico).

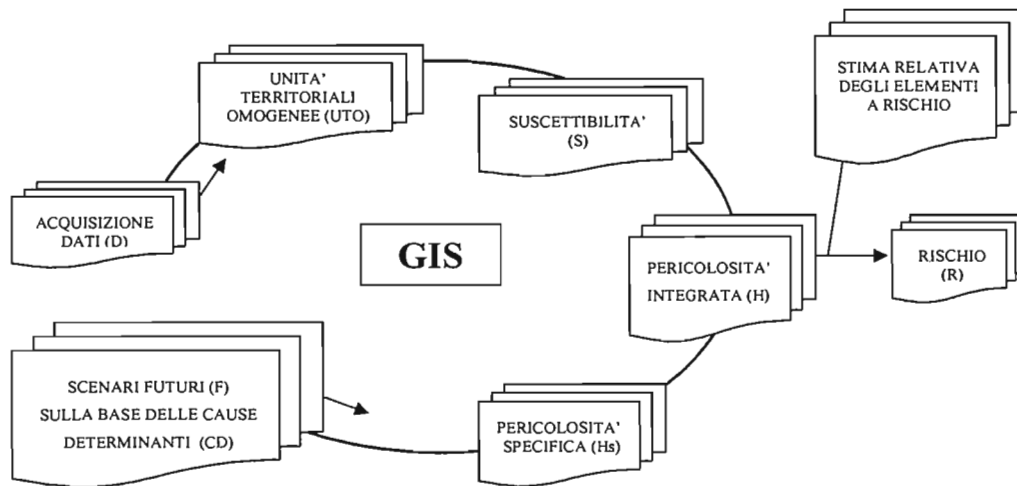


Figura 1 - Schema metodologico sintetico per la valutazione del Rischio da RSLR.

Tabella 1 - Definizioni di Suscettibilità, Pericolosità e Rischio adottati nella valutazione del Rischio da RSLR.

Termini	Definizioni	Riferimento Bibliografico
Suscettibilità Parziale	Propensione di un settore di territorio all'insorgenza di un singolo fenomeno potenzialmente distruttivo in relazione alla risalita del livello del mare.	Brabb, 1984 Carrara et al., 1995
Suscettibilità Integrata	Propensione di un settore di territorio all'insorgenza di tutti i possibili fenomeni distruttivi legati alla risalita del livello del mare. E' ottenuta dalla sommatoria delle Suscettibilità parziali.	Brabb, 1984 Carrara et al., 1995
Pericolosità Specifica	Probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area.	Varnes e IAEG, 1984
Pericolosità Integrata	Probabilità che una serie di fenomeni potenzialmente distruttivi si verifichino in un dato periodo di tempo ed in una data area.	Varnes e IAEG, 1984
Vulnerabilità	Valore economico, espresso in termini monetari, degli elementi esposti ad una potenziale minaccia.	Braaf et al., 1995 Greve et al., 2000
Rischio	Perdita attesa in conseguenza della risalita relativa del livello medio del mare; è espressa come funzione della Pericolosità Integrata, e del valore, espresso in termini economici relativi, degli elementi esposti alla potenziale minaccia.	Braaf et al., 1995 Greve et al., 2000

Previsione dei cambiamenti fisiografici

Scenari Futuri (F): modellizzazione del futuro assetto fisiografico ed altimetrico dell'area costiera, finalizzato alla determinazione delle future linee di costa e delle isoipse 0 m slm (sul livello del mare), elaborato secondo tre diversi scenari previsti dalle *Cause Determinanti (Cd)* le variazioni relative del livello del mare (sollevamento marino, subsidenza, riequilibrio del profilo della spiaggia emersa e sommersa, etc.), a loro volta derivati dall'applicazione degli effetti sul territorio (elaborazione DTM, Digital Terrain Model, e modello di Bruun); gli scenari sono rispettivamente di massima, minima e intermedia previsione d'innalzamento del mare.

Pericolosità Specifica (Hs): attribuzione di punteggi di pericolosità ai diversi scenari in funzione della reciproca probabilità di occorrenza.

Pericolosità integrata e rischio da RLSR

Pericolosità Integrata (H): intersezione tra Pericolosità specifica e Suscettibilità per la valutazione della probabilità di occorrenza di tutti i possibili fenomeni potenzialmente dannosi connessi al RSLR; la Pericolosità Integrata risulterà dalla sovrapposizione di informazioni ottenute dalla elaborazione degli Scenari Futuri (Pericolosità specifica), integrata alle informazioni dedotte dall'analisi dei PP la Suscettibilità del territorio.

Rischio (R): individuazione di aree ad "omogeneo valore di rischio" tramite l'intersezione di punteggi di Pericolosità Integrata e quelli relativi al valore degli elementi a rischio; questo valore viene espresso in termini economici relativi (indicizzati rispetto ad un valore massimo), dei beni esposti alla potenziale minaccia. Ciò permetterà di caratterizzare quanto sensibile potrà essere il sistema in funzione di un determinato uso del suolo.

L'approccio metodologico esposto è stato sperimentato su tre diversi periodi di predizione (anno 2025, 2050, 2100); tale scelta è stata dettata dalla finalità stessa dello studio che, come già espresso, vuole rappresentare uno strumento di gestione del territorio sul medio e lungo periodo, ma potrà essere estesa ad archi temporali più brevi, incontrando la necessità per il decisore di conoscere quella che sarà la situazione del territorio nel futuro più prossimo.

Tutte le fasi della metodologia sono gestite attraverso un sistema GIS (Geographical Information System) che permette:

- Acquisizione e georeferenziazione di dati topografici e batimetrici.
- Acquisizione, georeferenziazione, spazializzazione e sovrapposizione dei dati territoriali rilevati (*Rilevamenti - D; Unità Territoriali Omogenee - UTO*).
- Costruzione di un modello digitale del terreno (DEM) per la determinazione dei cambiamenti batimetrici e la previsione degli scenari futuri (*Scenari Futuri - F*).
- Creazione di una banca dati.
- Attribuzione di pesi e punteggi ad ogni elemento del database, ed integrazione degli strati informativi tramite funzioni di intersezione e/o sovrapposizione (*Suscettibilità - S; Pericolosità specifica - Hs; Pericolosità Integrata - H; Rischio - R*).
- Redazione di cartografia tematica di sintesi.

Va sottolineato come la metodologia presentata è formulata per minimizzare le spese di acquisizione dati, permettendo di avvalersi delle migliori informazioni disponibili, eventualmente implementabili da acquisizioni dedicate. L'utilizzo parziale di dati non dedicati può essere compensato dall'attribuzione di opportuni pesi ai livelli informativi che ne derivano.

Un esempio può essere costituito dalle curve relative di sollevamento del livello del mare su scala locale: seppure il miglior approccio metodologico deriverà dal confronto di dati calibrati (calcolo dell'errore nell'attribuzione cronologica, altimetrica, ecc.) provenienti da sondaggi geognostici profondi con quelli formulati da curve glacio-idro-isostatiche, un record di risalita del livello marino riconosciuto valido a scala regionale può, se applicato ad aree con minima tettonica (ad es. la Toscana settentriona-

le, ma non la Calabria), fornire dati utili, a cui affiancare valutazioni sui tassi di subsidenza naturale ed indotta sulla specifica area.

Rilevamento dei parametri predisponenti

Per stimare la propensione di una fascia costiera a subire, amplificare o contrastare gli effetti connessi alla risalita relativa del mare, vanno analizzate quelle peculiarità naturali ed antropiche del territorio che possono rappresentare dei fattori predisponenti.

Le caratteristiche territoriali, individuate come Parametri Predisponenti la Suscettibilità al RSLR, sono rappresentati da elementi di carattere geologico-tecnico, geomorfologico, idrologico, idrogeologico e di uso del suolo (Tab. 2). I PP vengono spazializzati attraverso l'analisi dei dati ricavati sia dai rilevamenti (Geologico, Geomorfologico, Idrologico, Idrogeologico, di Uso del Suolo), sia dall'acquisizione ed elaborazione di dati fisico-ambientali (dinamica della spiaggia, tipi di copertura, aree alluvionate o sede di ristagni).

In linea generale i rilevamenti devono possedere le caratteristiche di un grado di dettaglio minimo, di completezza e di uniformità; la completezza sottende il rilevamento di tutti i PP principali, più gli eventuali fattori locali.

Tabella 2 - Elenco sintetico dei principali Parametri Predisponenti (PP) la suscettibilità del territorio al RSLR di origine naturale e/o antropica.

Carattere	Tipo	Descrizione
Geologico-tecnico	Erodibilità delle litologie	Le litologie affioranti sono raggruppate in funzione delle loro caratteristiche litologiche e litotecniche.
	Permeabilità delle litologie	Le litologie affioranti sono raggruppate in funzione del loro coefficiente di permeabilità (K).
Geomorfologico	Morfologie con propensione alla modificazione ambientale	Propensione delle unità morfologiche all'ingressione marina, all'allagamento e all'alluvionamento.
	Dinamica della spiaggia	Tendenza alla progradazione, alla regressione o alla stabilità della linea di costa.
	Altimetria	Suddivisione dell'area in studio per classi altimetriche.
Idrologico	Aree interessate da alluvioni e/o ristagni	Individuazione, tramite analisi storica, delle aree inondate o soggette a fenomeni di ristagno.
Idrogeologico	Soggiacenza critica della falda superficiale	Suddivisione dell'area in studio in base al valore di soggiacenza critica della falda come funzione dei tassi di RSLR.
Uso del Suolo	Tipo di copertura	Suddivisione in classi di uso del suolo, con particolare riferimento alle aree antropizzate e alle tipologie di copertura.

Rilevamento geologico

In questo studio il rilevamento geologico è finalizzato sia alla redazione di una Carta geolitologica sia di una Carta geomorfologica, dalle quali verranno estrapolati i relativi Parametri Predisponenti; il rilevamento geologico risulta pertanto complementare sia ai caratteri litotecnici sia agli elementi geomorfologici.

Il rilevamento geologico deve risultare esaustivo delle seguenti caratteristiche:

- Distinzione litostratigrafica e morfologica dei corpi rocciosi, definiti in base alle caratteristiche litologiche riconoscibili in superficie (e sottosuolo).
- Evoluzione geologica dell'area in esame, con particolare riferimento alle fasi marine e continentali quaternarie.
- Analisi di dettaglio dei paleoambienti deposizionali che si sono succeduti nell'evoluzione dell'area.
- Ricostruzione dei rapporti cronostratigrafici, geometrici, tettonici e giaciture delle litologie che costituiscono il settore.
- Caratterizzazione degli aspetti litotecnici secondo parametri relativi alla composizione, al grado di cementazione o compattezza, tipo di stratificazione, stato di fratturazione e degradazione.

Sulla base delle caratteristiche dell'area indagata verranno individuate quelle variabili che, direttamente o indirettamente, hanno un'influenza sull'evoluzione del territorio connessa sia alla risalita del livello marino, sia ai fenomeni ad essa correlati. Le variabili litologiche derivate dal rilievo geologico, integrato dalla raccolta dei dati geotecnici disponibili, permetteranno di definire e delimitare sotto il profilo litotecnico i terreni che manifestano comportamento meccanico omogeneo; pertanto, le unità che presentano caratteristiche tecniche comuni, indipendentemente dalla posizione stratigrafica e dai relativi rapporti geometrici, andranno raggruppate in apposite unità territoriali, e saranno cartografate secondo i caratteri influenti il RSLR.

Rilevamento geomorfologico

Il Rilevamento geomorfologico, integrato con i dati scaturiti dal Rilevamento geologico, è finalizzato alla redazione di una Carta geomorfologica per l'individuazione dei relativi Parametri Predisponenti. In particolare, il Rilevamento geomorfologico è indirizzato al riconoscimento, sia fisiografico che genetico, di tutte le morfologie, naturali o antropiche, che possano risultare sensibili ad una modificazione sotto gli effetti dell'ingressione marina o, al contrario, che la possano contrastare.

Per modificazione ambientale si intende la propensione del territorio ad essere invasa dal mare, a subire impaludamenti, a subire fenomeni di erosione accelerata, ecc.; ad esempio:

- un cordone di dune litoranee tenderà a contrastare l'ingressione del mare, ma essendo una forma rilevata e costituita da elementi essenzialmente sciolti tenderà ad essere erosa;
- una paleolaguna, essendo una forma depressa tenderà ad essere invasa dalle acque, inoltre, la sua stessa esistenza indica che, sotto determinate condizioni di bilancio sedimentario e SLR (Sea Level Rise), quel settore costiero oggi emerso era in passato una lama d'acqua;
- un'opera antropica tenderà a contrastare gli effetti del RSLR, sia perché costituisce generalmente una barriera, sia perché sarà, verosimilmente, costantemente mantenuta e protetta.

Gli aspetti di principale interesse sono rappresentati dalle forme di erosione e di accumulo, con particolare riferimento a quelle generate da variazioni del livello del mare e/o a movimenti tettonici riconducibili all'evoluzione paleogeografica e strutturale tardo-quaternaria, dalle forme antropiche, dalle caratteristiche della linea di costa e della sua recente evoluzione, dalle classi di altimetria in cui può essere suddivisa l'area; in particolare:

- forme marine (antiche linee di riva, superfici di erosione marina, margini interni ed esterni di terrazzi marini, falesie e ripe d'erosione, ecc.);
- forme eoliche (corpi dunari e cordoni litoranei relitti, principali assi di culminazione di cordoni dunari, ecc.);
- forme di transizione (aree acquitrinose connesse ad antiche lagune o a bacini palustri e lacustri, ecc.);
- forme fluviali (conoidi di detrito, scarpate di erosione fluviale, alvei in approfondimento, alvei sopraelevati, alvei relitti con direzioni di paleodrenaggio, meandri abbandonati, ecc.);
- forme antropiche (centri urbani caratterizzati da elementi di continuità, opere di difesa litoranee,

installazioni portuali, installazioni balneari, ecc.);

- caratteri della linea di costa (coste alte, coste basse rocciose, coste basse sabbiose, pendenza dei fondali, presenza di cordoni di retrospiaggia, presenza di cordoni sommersi, ecc.);

- dinamica della spiaggia (spiaggia in avanzamento, stabile e in arretramento con i relativi tassi annui, ecc.);

- classi altimetriche (con particolare riferimento alle aree con quote inferiori a 2 m, a quelle con quote comprese tra 2 e 5 metri, a quelle con quote superiori a 5 m).

Al fine di valutare l'evoluzione e l'importanza dell'impatto antropico, in epoca storica e recente, nel rimodellamento di forme preesistenti e nella genesi di nuove, risulta essenziale anche un'analisi della bibliografia e della cartografia storica.

L'analisi e l'elaborazione dei dati inerenti le ricerche sopra sintetizzate, conduce alla redazione di una Carta geomorfologica e del relativo database.

Rilevamento uso del suolo

La diversa destinazione d'uso di parti del territorio riveste particolare importanza nella valutazione della Suscettibilità di una regione rispetto ai fenomeni di dissesto legati ad una "rapida" variazione eustatica.

Infatti, è noto che la diversa tipologia d'uso del suolo (per es.: copertura arborea, campi coltivati, aree urbane, ecc.), unitamente ai caratteri litologici, può fornire una risposta differenziale ai processi erosionali e alla permeabilità dei terreni.

Inoltre, la ricostruzione dell'evoluzione storica del territorio (*back analysis* tramite confronto con piano regolatore, analisi di foto aeree, analisi di cartografia storica), finalizzata alla valutazione dell'influenza dell'espansione urbanistico-antropica sulle caratteristiche geomorfologiche ed idrauliche del territorio, consente di evidenziare alcune modificazioni macroscopiche di carattere morfologico che determinano l'evoluzione del paesaggio (ad es. variazioni della linea di riva, evoluzione di argini e di aree alluvionali, ecc.).

Benché esistano numerose tipologie di dati disponibili nella valutazione della Suscettibilità del territorio agli effetti indotti dal RSLR saranno in primo luogo considerate, e opportunamente raggruppate tra loro, le aree a diverso uso del suolo relative al progetto UE "CORINE-Land Cover" con particolare riferimento a: spiagge, dune, greti fluviali, aree estrattive, zone umide, aree agricole eterogenee, aree incolte o abbandonate, parchi urbani, boschi, aree urbanizzate.

Rilevamento idrologico ed idrogeologico

Il rilevamento degli elementi idrologici, necessario alla valutazione della suscettibilità da RSLR, deve essere finalizzato all'acquisizione di dati inerenti tutte le aree alluvionate o con problemi di ristagno di acque superficiali, con tempi di ritorno confrontabili ai periodi di predizione richiesti.

Inoltre, si effettuerà un'analisi delle attuali frequenze di occorrenza di livelli meteomarinari estremi, per stimare la suscettibilità del territorio verso inondazioni legate alla risalita del mare.

I dati ottenuti dal rilevamento idrologico, diretto e/o integrato da dati bibliografici, risulteranno esauritivi delle seguenti caratteristiche:

- distribuzione reticolo idrografico;
- analisi estensione e ricorrenza alluvioni (esondazioni);
- inasprimento delle condizioni meteo come conseguenza del mutamento climatico;
- analisi delle altezze d'onda e analisi storica eventi di mareggiata.

Tra i principali effetti dannosi della risalita del mare in un settore di piana costiera sono annoverabili la progradazione verso terra del cuneo salino e l'emersione della falda superficiale nelle zone topograficamente depresse. Operando l'approssimazione di considerare l'acquifero omogeneo ed isotropo, in condizioni di risalita accelerata del livello del mare, potrebbe verificarsi l'emersione della falda nelle

aree in cui la superficie piezometrica risulti ad una profondità inferiore rispetto a quella considerata critica.

Tale valore critico deve essere adottato in congruità al principio di precauzione, ovvero alla necessità di valutare una pericolosità o un rischio naturale nell'ipotesi che si verifichino le peggiori condizioni possibili.

Il rilevamento idrogeologico per la suscettibilità da RSLR andrà finalizzato, quindi, all'acquisizione delle seguenti informazioni:

- la definizione di massima delle tipologie degli acquiferi esistenti;
- la descrizione delle caratteristiche di permeabilità;
- l'analisi delle isoiete finalizzata alla determinazione della ricarica degli acquiferi costieri;
- la ricostruzione della superficie piezometrica media, da effettuarsi sfruttando dati relativi a campagne di misurazione effettuate ex novo o da dati derivati da bibliografia esistente;
- l'andamento della soggiacenza della falda superficiale, calcolata in base alla superficie di morbida nell'anno idrologico in cui si è registrata la massima escursione di livello;
- le caratteristiche del cuneo salino, come: equilibrio dinamico interfaccia acqua-dolce/acqua-salata, bilancio idrogeologico e determinazione della ricarica degli acquiferi costieri connessa al fenomeno di intrusione, ecc.

Determinazione di unità territoriali omogenee per parametri predisponenti (UTO)

L'insieme dei caratteri fisici e antropici predisponenti la suscettibilità del territorio, individuati attraverso i vari rilevamenti, identifica le variabili da analizzare.

Per favorire tale analisi si provvede alla spazializzazione delle variabili in Unità Territoriali Omogenee (UTO). Questa procedura, comune nelle analisi di Rischio, permette di ottenere degli areali sufficientemente estesi da essere facilmente rappresentati quantitativamente.

UTO per erodibilità delle litologie

La stima del grado di erodibilità e degradabilità delle litologie affioranti nei settori di indagine, in funzione dei fenomeni innescabili dalla risalita del livello del mare, scaturisce dalla sovrapposizione delle caratteristiche geologico tecniche (coesione, grado di addensamento, tipo di cemento e/o matrice, ecc.) con il tipo di copertura legato all'utilizzo del suolo.

La rappresentazione grafica delle litologie è effettuata utilizzando dati provenienti dai rilevamenti di campagna integrati dalla cartografia tematica disponibile. I terreni rilevati vengono raggruppati in classi litologiche omogenee in funzione della loro risposta all'erosione. La parametrizzazione numerica delle caratteristiche di erodibilità dovrà avvalersi di un parere esperto capace di confrontare fra loro le diverse litologie presenti: non vengono pertanto suggeriti in questa sede valori di riferimento. Tale strato informativo dovrà essere sovrapposto all'uso del suolo, che rappresenterà un fattore di moltiplicazione per considerare le influenze sull'erodibilità dei sedimenti dovute ai diversi tipi di copertura e di utilizzo del territorio. I vari tipi di copertura saranno pertanto riferiti ad *N* macrounità che racchiudono utilizzi del suolo assimilabili; ad esempio un'unità per tutte le infrastrutture, una per i centri produttivi e le abitazioni, una per aree a pascolo, a brughiera e cespuglieto, a vegetazione sclerofila, a vegetazione boschiva e arbustiva rada, ecc. La scelta di fattori moltiplicatori, applicati alle diverse unità d'uso del suolo, è stata adottata al fine di poter restituirne gli effetti protettivi (o peggiorativi) rispetto all'erodibilità dei sedimenti, dovuta alle loro caratteristiche intrinseche. I punteggi totali così ottenuti, saranno normalizzati in tre classi di suscettibilità (Tab. 3).

Tabella 3 - Classi di Suscettibilità rispetto all'erosibilità delle litologie.

Denominazione delle categorie	Indice	Classi di suscettibilità
Litologie fortemente erodibili	A	Alta suscettibilità
Litologie mediamente erodibili	B	Media suscettibilità
Litologie debolmente erodibili	C	Bassa suscettibilità

UTO per permeabilità delle litologie

La permeabilità rappresenta l'incidenza del territorio ad attenuare o accentuare fenomeni alluvionali e/o di ristagno; inoltre influenza la ricarica e l'eventuale contaminazione degli acquiferi da parte di acque salmastre.

Le classi di permeabilità saranno suddivise in base ai valori del coefficiente di permeabilità di Darcy (K) tipici per i diversi tipi di serbatoio (formazioni litostratigrafiche) riscontrabili in campagna. Il serbatoio, che rappresenta la trama solida di un acquifero entro cui l'acqua si immagazzina e circola, è condizionato essenzialmente dalle dimensioni e dalle interconnessioni dei vuoti, distinti in pori e fessure, che caratterizzano rispettivamente il mezzo poroso e il mezzo fessurato. I due tipi di vuoti permettono di distinguere quindi due grandi categorie di serbatoi:

- *le rocce incoerenti o non consolidate* come le ghiaie, le ghiaie sabbiose, le sabbie, le sabbie argillose, le argille sabbiose, i silt e le argille, caratterizzate esclusivamente da porosità e quindi da una permeabilità primaria;

- *le rocce compatte fessurate o consolidate*, caratterizzate generalmente da fessurazione e quindi da permeabilità secondaria, e più raramente da una coesistenza di pori e di fessure; queste rocce possono quindi possedere sia una permeabilità primaria sia una permeabilità secondaria.

Nella Tabella 4 sono riportate alcune caratteristiche dei sedimenti sciolti tra cui il coefficiente *K* proprio di alcune granulometrie peculiari.

La Tabella 5 mostra la relazione tra i valori del coefficiente di permeabilità, ripartiti in una gamma continua, e la granulometria dei sedimenti sciolti; i limiti che separano terreni a diverso grado di permeabilità sono puramente convenzionali.

Dal momento che le rocce incoerenti o non consolidate rappresentano la quasi totalità delle formazioni generalmente riscontrabili in una piana costiera, sulla base dei valori di *K* indicati nelle tabelle sono state considerate tre classi di permeabilità (Tab. 6):

- i terreni ad alta permeabilità, la cui granulometria prevalente rientra nei campi della ghiaia e della sabbia, o gli ammassi rocciosi compatti caratterizzati da elevata fessurazione. Tali terreni sono quelli che presentano un coefficiente $K \geq 10^{-4}$ m/s;

- i terreni a media permeabilità, la cui granulometria prevalente rientra nei campi della sabbia molto fine e della sabbia siltosa, o gli ammassi rocciosi compatti caratterizzati da media fessurazione. Tali terreni sono quelli che presentano un coefficiente $10^{-4} > K > 10^{-8}$ m/s;

- i terreni a bassa permeabilità, la cui granulometria prevalente rientra nei campi del silt sabbioso, del silt e dell'argilla, o gli ammassi rocciosi compatti sostanzialmente privi di fessurazione. Tali terreni sono quelli che presentano un coefficiente $K \leq 10^{-8}$ m/s.

UTO per classi altimetriche

L'assetto altimetrico di una piana costiera viene considerato come elemento predisponente l'erosione, l'ingressione marina ed i possibili fenomeni di allagamento.

La valutazione di questa caratteristica fisiografica si avvale di DTM ad elevata definizione. Il grado di definizione del DTM è legato alla densità di punti quotati per Km² che, in alcuni settori, potrebbe risultare modesta e/o insufficiente.

Tabella 4 - Valori di diametro efficace (d_{10}), di porosità (n), di porosità efficace (n_e) e del coefficiente di permeabilità (K) (da Castany, 1994; modificata).

Tipi di sedimenti	d_{10} (mm)	n (%)	n_e (%)	K (m/s)
Ghiaia media	2.5	45	40	3×10^{-1}
Sabbia grossa	0.250	38	34	2×10^{-3}
Sabbia media	0.125	40	30	6×10^{-4}
Sabbia fine	0.09	40	28	7×10^{-4}
Sabbia molto fine	0.045	40	24	2×10^{-5}
Sabbia siltosa	0.005	32	5	1×10^{-9}
Silt	0.003	36	3	3×10^{-8}
Silt argilloso	0.001	38	-	1×10^{-9}
Argilla	0.0002	47	-	5×10^{-10}

Una soluzione al problema potrebbe essere rappresentata dall'esecuzione di un volo a grande scala (1:1000 - 1:2.000) eseguito lungo la zona costiera (ed eventualmente esteso alle zone di pianura retro-dunali), con la restituzione dei soli punti quotati; questi ultimi potrebbero essere integrati con i dati dei rilievi in scala al 5.000 degli uffici cartografici regionali.

In ogni caso, dato il generale assetto altimetrico delle piane costiere italiane e l'entità di SLR previsto per il prossimo secolo, la UTO per Classi altimetriche dovrebbe prevedere almeno tre classi (Tab. 7).

Tabella 5 - Valori del coefficiente di permeabilità in funzione delle granulometrie (da Castany, 1994; modificata).

K (m/s)		10^1	10^{-2}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7} 10^{-9}	10^{-9}	10^{-11}
Granulometria	Omogenea	Ghiaia		Sabbia		Sabbia fine		Silt	Argilla	
	Varia	Ghiaia grossa e media	Ghiaia e sabbia	Sabbia e argilla Sabbia e limi						
Grado di permeabilità		Elevata				Bassa			Nulla	
Tipi di formazioni		Permeabili				Semi-permeabili			Impermeabili	

Tabella 6 - Classi di permeabilità, in funzione del coefficiente di permeabilità K , utilizzabili per l'indicizzazione delle litologie.

K (m/s)	$K \geq 10^{-4}$	$10^{-4} > K > 10^{-8}$	$K \leq 10^{-8}$
Classe di permeabilità	Alta	Media	Bassa

Tabella 7 - Classi altimetriche e relativa Suscettibilità.

Classe altimetrica	Classe di Suscettibilità
< 2 m	Alta
2 - 5 m	Media
> 5 m	Bassa

UTO per propensione alla modificazione ambientale

Le morfologie rilevate saranno accomunate secondo la loro propensione ad essere ingredite dal mare o a subire fenomeni di allagamento in conseguenza alla prevista RSLR (Tab. 8).

Tabella 8 - Tipologia delle forme costiere e relative classi di Suscettibilità.

Tipo di forme	Classi Suscettibilità
Forme suborizzontali o depresse (ad es. paleo-lagune-meandri-stagni, canali abbandonati, alvei e spiagge)	Alta Suscettibilità
Forme marine o di transizione rilevate (ad es. cordoni dunari relitti o attuali)	Media Suscettibilità
Forme antropiche (aree urbanizzate con elementi di continuità, network viario, opere di difesa ecc.)	Da Media a Bassa Suscettibilità
Forme continentali rilevate (ad es. conoidi, rilievi pedemontani ecc.)	Bassa Suscettibilità

Tale propensione, determinata sulle caratteristiche fisiografiche e ambientali della varie forme, oltre che sulla presenza di strutture antropiche, sarà intersecata allo strato informativo delle UTO per Classi altimetriche. L'intersezione tra le due unità territoriali consente di pesare la reale propensione alla modificazione delle varie forme della piana, soprattutto lungo settori costieri dove occorre un'alta variabilità morfologica e dove, perciò, le sole classi altimetriche non sono sufficienti a descrivere nel dettaglio la predisposizione del territorio ad essere ingredito-allagato-eroso dal mare.

UTO per dinamica della spiaggia

La tendenza all'arretramento, alla stabilità o all'avanzamento della spiaggia viene considerato un elemento di forte peso nella propensione all'erosione costiera per RSLR.

Il numero di classi in cui suddividere le UTO per dinamica della spiaggia risulta subordinato alla quantità e alla qualità dei dati a disposizione, nonché dal numero di anni per i quali si disponga dei rilievi. Il caso ottimale è quello in cui i dati siano adeguati per discriminare, con un buon grado di approssimazione, i diversi tassi di variazione di più settori di spiaggia, calcolati su un periodo almeno decennale.

In caso contrario si suggerisce di considerare anche per queste UTO tre sole classi (rispettivamente associabili ad una bassa, media e alta suscettibilità territoriale):

- spiaggia in avanzamento;
- spiaggia stabile;
- spiaggia in arretramento;

UTO per alluvioni e/o ristagni

Per stimare la suscettibilità del territorio rispetto a fenomeni d'inondazione, saranno perimetrare le aree interessate da significativi fenomeni di esondazione e/o ristagno individuate attraverso analisi storica. Tale analisi deve essere condotta sulla base di tempi di ritorno confrontabili a quelli di predizione.

In base alla qualità dei dati disponibili, si opererà una suddivisione della UTO rispetto alle aree interessate da fenomeni ricorrenti, occasionali ed eccezionali e/o in funzione delle altezze d'acqua registrate (Tab. 9).

Tabella 9 - Classi di Suscettibilità rispetto ai fenomeni d'inondazione.

Categorie	Classi di Suscettibilità
Aree caratterizzate da ricorrenti fenomeni di alluvionamento e/o ristagno	Alta
Aree caratterizzate da occasionali fenomeni di alluvionamento e/o ristagno	Media
Aree caratterizzate da eccezionali fenomeni di alluvionamento e/o ristagno	Bassa
Aree non caratterizzate da fenomeni di alluvionamento e/o ristagno	Molto bassa

UTO per soggiacenza della falda

Questa UTO deriva dalla sottrazione algebrica del modello digitale della superficie piezometrica dal DTM. In pratica il valore attribuito ad ogni cella della carta della soggiacenza è il valore in quota assoluta del terreno, diminuito del valore in quota assoluta della superficie piezometrica. Viene scelto come valore critico di soggiacenza della falda (Z_c) quello corrispondente alla somma tra il SLR e la subsidenza media della piana (entrambi riferiti, per il principio di precauzione, allo scenario pessimistico dell'anno 2100).

Assegnando opportuni pesi moltiplicatori, lo stesso valore sarà utilizzato per i più brevi periodi di predizione. I pesi moltiplicatori saranno, in tal caso, funzione percentuale del rapporto tra il RSLR previsto per l'anno 2100 e il RSLR previsto per i periodi più brevi.

Si considereranno quindi ad alta suscettibilità di emersione della falda quelle aree caratterizzate da soggiacenza inferiore al valore critico; a bassa suscettibilità quelle con soggiacenza maggiore (Tab. 10).

Tabella 10 - Classi di Suscettibilità in funzione della possibilità di emersione della falda per SLR.

Categorie	Classe di Suscettibilità
Aree caratterizzate da falda con soggiacenza $\leq Z_c$	Alta Suscettibilità
Aree caratterizzate da falda con soggiacenza $> Z_c$	Bassa Suscettibilità

Assegnazione di Pesi e Punteggi

I metodi parametrici per l'assegnazione dei punteggi possono essere ricondotti essenzialmente a tre tipologie: a matrice, a punteggio semplice e a punteggi e pesi (Civita, 1994).

Tutti e tre sono accomunati dallo stesso principio, consistente in un primo vaglio dei parametri sui quali si ritiene di basare la valutazione del problema. A ogni parametro, suddiviso per intervalli di valori o/e per tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio arbitrario, crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva.

I metodi a punteggi e pesi più evoluti introducono una o più linee di pesi, cioè un moltiplicatore a gamma fissa per ciascun parametro di base considerato, che amplifica il punteggio attribuito al parametro stesso in misura preordinata. Ciò allo scopo di evidenziare l'importanza di uno o più parametri nel definire la suscettibilità verso particolari fenomeni.

Per mezzo di analisi discriminante (riferimenti bibliografici sull'Analisi discriminante in Greene e Rayens, 1989; Brown et al., 1999; Bioinfort webpage), o di regressione logistica, verrà quindi co-

struita una funzione od equazione contenente le diverse variabili analizzate, ognuna delle quali con coefficienti (pesi) tali da predire al meglio l'appartenenza di ciascun elemento ad una classe di suscettibilità. Se i modelli in questione risulteranno sufficientemente aderenti alla realtà fisica che è alla base della suscettibilità dell'area in esame, l'importanza (peso) di ogni fattore (parametro predisponente) nel dare luogo a condizioni di dissesto, verrà direttamente espressa dai coefficienti dell'equazione di regressione o della funzione discriminante.

Questo approccio evita sia valutazioni soggettive, la cui validità dipende essenzialmente dal grado di conoscenza delle caratteristiche territoriali dell'area in studio, sia l'utilizzo di schemi predefiniti che, sebbene possano avere validità generale, non sono necessariamente applicabili ovunque.

L'indicizzazione dei vari parametri naturali che caratterizzano la suscettibilità, obbliga spesso ad un eccesso di soggettività che, seppur efficace in ambito descrittivo, non rafforza la necessità di una trattazione numerica adeguata alle aspettative richieste. Si può comprendere come sia vincolante la scelta dei parametri da elaborare, che va effettuata tenendo conto delle situazioni che si incontrano nella zona indagata.

L'uso di strumenti informatici (GIS) ha oggi permesso di limitare il margine di errore che si commetteva con le procedure tradizionali manuali. Infatti, i precedenti modelli di analisi della pericolosità più utilizzati sono di tre tipi e sono rappresentati da:

- applicazioni esclusivamente grafiche, con sovrapposizione di carte tematiche;
- metodi grafico-analitici, con definizione di indici personalizzati;
- interpretazioni grafico-analitiche, con definizione degli indici derivati direttamente da calcoli sui parametri rilevati.

Come si intuisce, vi è un graduale potenziamento dei caratteri quantitativi e si passa da una trattazione quasi schematica ad una molto selettiva e restrittiva, che trova nell'indipendenza degli indici un'esattezza prossima alla realtà.

Fra le trattazioni più complete ed esaurienti, in termini di correttezza degli indici, vi è quella proposta da Guida et al. (1978) nella quale viene introdotto un modo analitico (seppure arbitrario come indicato dagli Autori stessi) con cui pervenire agli indici, incondizionato da valutazioni dettate esclusivamente da studi ed esperienze personali e derivante dalla sola applicazione di relazioni areali tra i parametri.

Vengono poste in rapporto le aree omogenee di ogni singolo parametro con le aree effettivamente in dissesto, ottenendo in modo proporzionale sia la definizione dei singoli indici, sia la loro distribuzione nelle categorie finali di dissesto. Ragionando in questo senso si evita di commettere l'errore di effettuare una prima sommaria distinzione per quanto riguarda gli intervalli degli indici, privilegiando invece un'applicazione che tenga conto, in primo luogo, dei valori dimensionali delle aree, per poi pervenire alle loro relazioni espresse numericamente.

Questa peculiarità è molto discriminante perché evita il procedimento di taratura del metodo a secondo dell'area, e consente una distribuzione delle classi di dissesto in termini di effetti reali che possono avere i vari parametri.

Gli indici sono rappresentati da numeri interi, e sono raggruppati in vari intervalli definiti dalla presunta, crescente influenza che ogni parametro può avere sulla predisposizione di un'area all'innescio del fenomeno.

Il metodo adottato nella valutazione della presente metodologia, applicata alla Piana pilota della Versilia, è una variante di quello proposto da Guida et al. (1978). In particolare, sono state prese in considerazione diverse tipologie di dati morfometrici, geologici ed antropici, che incidono variamente sulla dinamica costiera.

Essendo i dati di natura disomogenea, la fase principale del lavoro è consistita nel calcolo di indici normalizzati relativi a ciascun parametro adottato. A partire dalle carte di base, sono stati calcolati gli indici rispetto a ciascun parametro; un valore composito viene poi generato sovrapponendo i vari

indici per ottenere la carta della suscettibilità.

Per i pesi, i punteggi e l'esplicazione delle valutazioni applicate nei diversi casi, si veda il lavoro relativo alla Valutazione del Rischio da RSLR in Versilia di Nisi et al. in questo volume. Si sottolinea come l'elaborazione degli indici in piane diverse si deve avvalere di un controllo da parte di esperti; quest'ultimo permetterà di valutare le singole peculiarità, a cui si potrà proficuamente affiancare un'analisi statistica multivariata dei singoli indici esaminati, come quelle proposte da Dal Cin e Simenoni (1994) e di Townsend e Flemming (1994).

Redazione della Carta di Suscettibilità Integrata (S)

La Suscettibilità è stata definita come la propensione di un settore a subire e/o contrastare l'insorgenza di un determinato fenomeno potenzialmente distruttivo.

La metodologia per la determinazione della Suscettibilità da RSLR è basata sull'individuazione dei principali PP i possibili fenomeni dannosi, indotti dalla risalita del mare.

Verificata, tramite l'analisi del territorio, la sussistenza dei principali PP e l'eventuale presenza di ulteriori parametri di carattere locale, si procede alla loro spazializzazione.

La spazializzazione consiste nel cartografare, attraverso tecniche GIS (acquisizione, trattamento ed elaborazione dei dati), tutte quelle microaree dove i singoli PP si mantengono costanti. Queste aree sono state definite, appunto, Unità Territoriali Omogenee per PP (UTO).

Successivamente vengono assegnati dei punteggi e/o dei pesi moltiplicatori ad ognuno dei PP spazializzati e, tramite la formulazione di una opportuna funzione, le singole UTO vengono sovrapposte tra loro per l'individuazione della Suscettibilità del territorio.

La Suscettibilità integrata sarà quindi data, in ognuna delle microaree, dalla sommatoria dei punteggi assegnati ai singoli PP, esistenti nella stessa microarea. Da questa elaborazione si otterrà la carta della Suscettibilità Integrata relativa al periodo di predizione richiesto.

Pericolosità specifica (Hs)

Valutazione degli scenari futuri

In linea generale, l'innalzamento relativo del livello del mare comporterà un arretramento della linea di riva sulla fascia costiera; a ciò si affiancherà un'ingressione di quelle aree che, per le modifiche morfologiche del territorio, risulteranno ubicate sotto gli 0 m s.l.m ed in comunicazione diretta con il mare (Tab. 11).

Tabella 11 - Principali effetti dannosi sul territorio in relazione alle modificazioni morfologiche connesse alla variazione relativa del livello del mare.

	Fascia costiera	Aree depresse comunicanti con la nuova linea di riva	Aree depresse protette; aree sopra 0 m s.l.m.
Effetto dannoso	Arretramento della linea di riva	Ingressione marina	Aumento di alluvionamenti, esondazioni, ristagni
Modificazione morfologica	Spostamento verso terra del limite del territorio colpito da mareggiate	Spostamento verso terra del limite del territorio colpito da mareggiate	Progradazione del cuneo salino in falda

Le aree sotto il livello del mare, ma protette da barriere naturali e/o antropiche, potrebbero essere comunque colpite da frequenti alluvionamenti, esondazioni, ristagni di acque superficiali, progradazione del cuneo salino, ecc.; analoghi fenomeni, seppur meno frequenti e con minor intensità, potrebbero interessare le aree di piana costiera caratterizzate da elevazioni di pochi metri sopra il livello marino e da un assetto morfologico sfavorevole (bassa pendenza, presenza di corsi d'acqua, ecc.).

Operazioni generali sul DTM

La valutazione degli scenari futuri prevede la modellizzazione del previsto assetto fisiografico e altimetrico dell'area costiera in studio, finalizzata alla determinazione delle linee di riva e delle isoipse 0 m slm (aree emerse ma sotto il livello del mare) per tre diversi scenari; questi ultimi, indipendentemente dal periodo di predizione considerato, vengono denominati scenario ottimistico, intermedio e pessimistico.

I tre scenari sono funzione della probabilità di occorrenza del fenomeno, rispettivamente:

- scenario pessimistico = massima RSLR = minima probabilità di occorrenza;
- scenario intermedio = media RSLR = intermedia probabilità di occorrenza;
- scenario ottimistico = minima RSLR = massima probabilità di occorrenza.

Pertanto, per ognuno dei tre scenari di uno stesso intervallo di predizione, viene determinata la nuova linea di riva; la perimetrazione delle future aree ubicate sotto il livello del mare, permette di individuare quali fra queste saranno invase dalle acque e quali potrebbero subire solo gli effetti indiretti della risalita marina.

Tale procedimento consta delle seguenti operazioni, gestite in ambiente GIS (Tab. 12):

- Creazione di un DTM a scala di dettaglio dello stato attuale del territorio; tale DTM potrebbe derivare dai dati dei rilievi in scala al 5.000 disponibili dagli uffici tecnici regionali, eventualmente integrati con voli dedicati.
- Abbassamento globale del DTM applicando i valori Eustatismo + Subsidenza regionale (complessivamente tre determinazioni analitiche per ogni periodo di predizione).
- Abbassamento localizzato del DTM applicando solo gli eventuali tassi di subsidenza locale opportunamente decurtati del valore di subsidenza regionale (solo nelle aree interessate).
- Individuazione della posizione dei nuovi punti a quota zero metri slm per ognuno dei tre scenari di uno stesso periodo di predizione.
- Interpolazione dei punti quota 0 m slm relativi ai profili di spiaggia elaborati dal programma "Sea-Level" o da software analoghi (vedi paragrafo successivo) per l'estrazione delle nuove linee di costa. Questa operazione consente al sistema di calcolare i tassi di regressione costiera, lo spostamento e la modificazione morfologica dei cordoni dunari, la superficie di spiaggia erosa e il volume di sedimento perso per i vari scenari di uno stesso periodo di predizione. Per ogni anno di predizione saranno individuate tre possibili linee di riva in funzione della massima, media e minima risalita relativa del livello del mare.
- Intersezione tra le linee di costa e le isoipse 0m slm e redazione delle carte degli Scenari Futuri. Ogni carta è relativa ad un anno di predizione e riporta i tre diversi scenari (ottimistico, intermedio e pessimistico). Per ogni scenario sarà tracciato, quindi, l'andamento della nuova linea di riva, la perimetrazione delle aree depresse potenzialmente invase dal mare e quella delle aree depresse ma separate dal mare ad opera di barriere naturali e/o antropiche.

Regressione della linea di riva

La regressione della linea di riva è calcolata sulla base del *Bruun Rule of Erosion*. Secondo Brunn (1962) l'innalzamento del livello del mare provoca un'erosione delle spiagge molto più spinta rispetto a quella dovuta ad una mera trasgressione geometrica. Infatti, anche modeste entità di RSLR indurranno il profilo di spiaggia a migrare verso terra (Fig. 2); questa evoluzione riguarda sia la spiaggia emersa sia la spiaggia sommersa, dalla "profondità di chiusura" a tutto il profilo attivo.

Tabella 12 - Principali operazioni sul DTM.

Operazioni	Risultati	Prodotti
Abbassamento virtuale del territorio di un'aliquota pari alla somma di eustatismo e subsidenza. Per ogni anno di predizione si effettuano tre elaborazioni in funzione della minima, media e massima risalita del livello del mare.	Costruzione delle future isoipse 0 m slm sia sulla costa sia nelle aree interne della piana.	Perimetrazione di aree poste sotto il livello del mare secondo uno scenario ottimistico, intermedio e pessimistico.
Modellizzazione dell'arretramento della linea di riva e dei cordoni dunari. Per ogni anno di predizione si effettuano tre elaborazioni in funzione della minima, media e massima risalita del livello del mare.	Costruzione della futura linea di riva e della posizione e altezza dei cordoni dunari.	Perimetrazione delle aree inondate dal mare, per il solo effetto di regressione costiera, secondo uno scenario ottimistico, intermedio e pessimistico.
Intersezione, per ogni anno di predizione, delle tre serie di linee di riva (scenario ottimistico, intermedio e pessimistico) con le relative tre serie di isoipse 0 m slm (scenario ottimistico, intermedio e pessimistico).	Costruzione di tutte le aree invase dal mare e di quelle ubicate sotto il livello del mare ma protette.	Redazione, per ogni anno di predizione, di una Carta degli Scenari futuri. Ogni carta rappresenterà un preciso anno di predizione e riporterà le linee di riva e le isoipse 0 m slm di tutti e tre gli scenari (ottimistico, intermedio e pessimistico).

La *Bruun Rule of erosion* è stata testata, interpretata e modificata da molti Autori (vedi Aminti et al. 2001; Bartolini et al. 1989; Bruun 1983, 1988; Dean 1990; Dean 1991; Dean e Maumeyer 1983; Dubois 1977; Dubois 1992; Everts 1985; Healy 1991; Leatherman 1990; Rosen 1978; Schwartz 1967; Pranzini e Rossi 1995) e necessita di opportune modifiche rispetto alle diverse condizioni contingenti. Il modello generale si basa sui seguenti assunti:

- l'erosione della porzione superiore della spiaggia si traduce in uno spostamento verso terra dell'intero profilo;
- il materiale eroso dalla porzione superiore della spiaggia è uguale in volume alla quantità di materiale deposto sul fondale di *nearshore*;
- la risalita del fondale di *nearshore*, come conseguenza di tale deposizione, è equivalente alla RSLR, quindi è mantenuta una profondità d'acqua costante nell'area (Schwartz 1967).

Sotto queste ipotesi la regressione della linea di riva (R) è data da:

$$R = (XS)/(B+h) \quad (1)$$

Dove X è la lunghezza del profilo attivo, S il RSLR, B l'altezza delle dune, h la profondità di chiusura del profilo.

La profondità di chiusura è la minima profondità d'acqua alla quale non si verificano cambiamenti misurabili nell'elevazione del fondale, e rappresenta una separazione tra la zona di trasporto attivo *cross-shore* di sedimenti e una zona più profonda di negligenza movimentazione (Birkemeier 1985).

Un approccio empirico per la sua determinazione è basato sull'analisi di dati batimetrici, effettuati in stagioni diverse e in diversi anni. Un approccio matematico, basato sull'analisi di dati meteomarini, è dato dalle relazioni:

$$d_c = (1.5 \approx 2) 1.75 H_s - 57.9 (H_s^2/gT_s^2) \quad (\text{Birkemeier 1985}) \quad (2)$$

$$d_c = 2.28 H_s - 68.5 (H_s^2/gT_s^2) \quad (\text{Hallermeier 1978; Nicholls et al. 1996, 1998a}) \quad (3)$$

dove H_s è l'altezza d'onda significativa locale, T_s il periodo ad essa associato e g l'accelerazione gravitazionale.

Il profilo di spiaggia può essere approssimativamente descritto dalla forma generale $h(y) = AX^m$ (Bruun 1962, 1988; Dean 1991); dove $h(y)$ è la profondità alla distanza X dalla linea di costa; A è un parametro che dipende dalla granulometria del sedimento e m è una costante.

Per un miglior *fitting* dei profili reali con la loro descrizione matematica Pranzini e Rossi (1995) e Aminti et al. (2001) utilizzano una polinomiale del tipo:

$$y = d + Ax + Bx^2 + Cx^3 + \dots + Nx^n \quad (4)$$

dove d è l'altezza della duna, e A, B, \dots, N sono variabili risultanti da interpolazione.

Il Bruun-Rule presenta alcuni limiti (Fig. 2):

- non considera la rampa di sedimenti in formazione nella porzione finale del profilo (Krauss 1992);
- non considera l'erosione della parte basale della duna ed il suo conseguente collasso (Dolotov 1992);
- non consente di determinare esattamente il volume (i) di sedimenti disponibili nella parte di profilo interna alla cresta della prima duna (Amini et al. 2001).

Non considerando questi aspetti si otterrebbe una sottostima dell'erosione, soprattutto per le previsioni a lungo termine.

Nel presente progetto si propone l'utilizzo di un programma di calcolo automatico, denominato "Sea-Level" (Pranzini e Rossi 1995; Aminti et al. 2001), per la costruzione dei futuri scenari di regressione costiera nei casi di geometria complessa della spiaggia emersa.

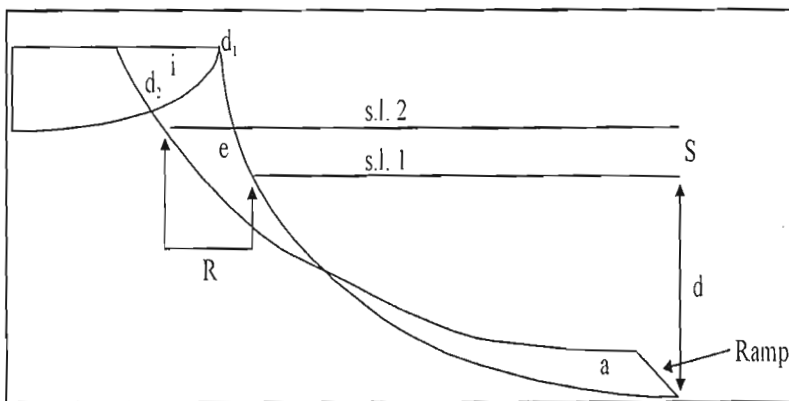


Figura 2 - Evoluzione di un profilo di spiaggia conseguente al RSLR (d : profondità limite del profilo attivo; S : RSLR; R : arretramento della linea di riva; e : superficie erosa sulla spiaggia; a : superficie d'accumulo; i : superficie erosa sulla duna; d_1 : cresta duna a s.l. 1; d_2 : cresta duna a s.l. 2; da Aminti et al., 2001).

Il programma, sviluppato in *Visual Basic*, richiede come input la descrizione del profilo per coordinate, la profondità di chiusura, i tratti di sezione costituiti da elementi fini e/o roccia che non possono produrre materiale utile all'innalzamento dei fondali, i ratei di SLR e di subsidenza (ove presenti), l'anno di predizione.

Tra i vari dati di output il "Sea Level" è in grado di fornire l'arretramento della linea di riva per un dato periodo di predizione, l'altezza e posizione della duna futura, la superficie di spiaggia erosa o depositata.

Pericolosità specifica

Per Pericolosità specifica si intende la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo, in questo caso un'ingressione marina, si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area (Varnes e IAEG, 1984).

Come sopra descritto, dall'elaborazione del DTM e dal modello di regressione costiera, vengono determinate le tre possibili nuove linee di riva e perimetrare le relative aree ubicate sotto il livello del mare (determinando quali saranno invase dal mare e quali potrebbero subire solo gli effetti indiretti della risalita marina). Queste elaborazioni rappresentano tre scenari (ottimistico, pessimistico ed intermedio) rispetto ad uno specifico intervallo di tempo.

Attraverso l'assegnazione di opportuni punteggi a questi scenari, in funzione della reciproca probabilità di occorrenza, si ottiene la zonazione di Pericolosità specifica per ogni anno di predizione, rappresentata nella relativa Carta di Pericolosità specifica. Tali punteggi sono univoci per qualsiasi periodo di previsione richiesto; essi si differenziano tuttavia a seconda che siano riferiti a quelle aree raggiunte dall'ingressione marina o a quelle aree che, pur risultando sotto il livello del mare, non saranno sommerse dalle acque; le aree ubicate sopra il livello del mare avranno invece un valore di pericolosità specifica nullo.

Pericolosità Integrata (H)

La Pericolosità Integrata è stata definita come la probabilità che una serie di fenomeni potenzialmente distruttivi si verifichino in un dato periodo di tempo ed in una data area, secondo le accezioni di Varnes e IAEG (1984) ed Einstein (1988).

Mentre le carte di Pericolosità specifica restituiscono la zonazione della probabilità di ingressione marina, in funzione della sola modellizzazione della variazione relativa di livello del mare, la Pericolosità Integrata considera da un lato tutti i possibili fenomeni dannosi indirettamente connessi alla risalita marina, dall'altro valuta l'azione mitigante o esaltante delle caratteristiche fisiche ed antropiche del territorio.

Dal confronto tra gli elaborati di Pericolosità e quelli di Suscettibilità, risulterà evidente come determinati parametri territoriali si opporranno in modo rilevante alla regressione della linea di riva e all'ingressione del mare come, per esempio, i sistemi dunari o gli stessi centri urbani; le zone maggiormente sensibili risulteranno invece le aree depresse, quelle con difficoltà di drenaggio, quelle prossime a foci fluviali, ecc.

In tal senso, quindi, le carte di Pericolosità Integrata sono finalizzate alla zonazione della probabilità che diversi settori costieri possano "realisticamente" subire l'occorrenza dei fenomeni.

Da un punto di vista operativo le carte di Pericolosità Integrata si otterranno, per ogni anno di previsione, attraverso l'intersezione per analisi topologica dei relativi strati informativi di Pericolosità specifica e Suscettibilità.

La zonazione di Pericolosità Integrata così ottenuta prevede, in linea generale, la suddivisione in più classi di pericolosità (nell'applicazione pilota alla Piana della Versilia sono state elaborate 6 classi), da estrema a molto bassa, che potranno in tal modo essere utilizzate dalle Pubbliche Amministrazioni per la pianificazione territoriale.

E' infatti questo elaborato (H) a costituire lo strumento più efficace nell'operare scelte mirate nella gestione della fascia costiera e nella predisposizione di opere di mitigazione dei cambiamenti climatici.

Rischio (R)

La differenza fondamentale fra rischio e pericolosità è che quest'ultima è relativa alla probabilità che un evento si verifichi, mentre il rischio è relativo alla probabilità che si verificheranno certe circostanze nell'ambito dell'evento. Queste circostanze sono collegate strettamente non solo al livello di esposizione, ma anche alla vulnerabilità degli elementi agli effetti dell'evento.

Le analisi di rischio seguono procedure essenzialmente finalizzate all'individuazione di quattro fattori (UNDRO, 1979) che determinano la magnitudo dell'impatto in funzione della pericolosità:

- la conformazione geografica e la severità del fenomeno;
- il numero, la distribuzione spaziale e la densità della popolazione esposta agli effetti della pericolosità.
- la vulnerabilità degli elementi a rischio;
- gli effetti delle condizioni locali nel modificare la severità dell'evento.

Numerosi studi hanno tentato di quantificare gli impatti del SLR (Fankhauser, 1994; Hoozemans et al., 1993; Leatherman e Nicholls, 1995; Nicholls e Hoozemans, 1996; Nicholls et al., 1995; Yohe et al., 1995, 1996; Yohe e Schlesinger, 1998); tali lavori spesso sono carenti da un punto di vista economico (Darwin e Tol, 2001) in quanto presentano tre limiti principali:

- i valori del territorio e dei capitali localizzati nelle aree costiere minacciati dal RSLR non sono ben noti, anche a causa della differente risposta che può dare la presenza di una protezione costiera;
- il costo diretto è solo una prima approssimazione dei beni perduti. Assumendo valori economici costanti, si trascurano gli effetti di secondo ordine, come per esempio le variazioni economiche che comporta l'evento naturale sulle attività socio-economiche;
- il costo diretto dei beni a rischio è generalmente stimato per specifiche regioni.

Il sistema di vulnerabilità è difficile da descrivere per due ragioni fondamentali: la carenza di dati, atti a descrivere i valori economici dei beni strutturali e ambientali, e l'incertezza delle future dinamiche costiere associate alle attività antropiche. Inoltre è virtualmente impossibile descrivere con nessun livello di certezza quali saranno gli impatti, e questo sia per le complesse dinamiche naturali che interessano l'evoluzione del profilo costiero, sia per la difficoltà nel definire la risposta di infrastrutture e costruzioni all'adattamento ai cambiamenti ambientali e ai forzanti socioeconomici.

Inoltre, la stima del valore economico degli elementi a rischio non è operabile per periodi troppo lunghi. Essa, infatti, appare difficoltosa già per l'anno 2100, in quanto il territorio può cambiare destinazione d'uso nell'arco di breve tempo.

In base alla zonazione di rischio è possibile suddividere il territorio in aree in cui il grado di rischio rappresenta un fattore di moltiplicazione rispetto al quale, ad esempio, calcolare i premi assicurativi per la prevenzione del fenomeno, o calcolare le percentuali di risorse da destinare alla protezione ambientale (Titus et al. 1991).

Un'altra possibile stima di perdita economica si basa sulla costruzione di una curva cumulativa, per ogni classe di rischio, in funzione dell'aumento della distanza dalla linea di riva; tale stima può essere utilizzata per ogni scenario di pericolosità (Greve et al. 2000).

L'utilizzo di indici di vulnerabilità per una valutazione dei potenziali impatti del RSLR rappresenta un'ulteriore metodologia. La definizione degli indici di vulnerabilità può essere determinata come funzione dell'erosione costiera, della variazione del livello del mare, della possibilità di temporanei e/o permanenti allagamenti del settore costiero, ecc.; oppure può essere calcolata in base all'*insularity index* = linea di costa (m)/superficie complessiva (Italia = 0.026; Gommès et al., 1988) per la densità di popolazione. La principale mancanza dell'indice di vulnerabilità così calcolato è che non prende in considerazione la distribuzione spaziale della popolazione all'interno del paese.

La necessità di costruire un database che includa le informazioni aggiornate riguardanti i valori economici dei beni strutturali e ambientali, presenti in una determinata area, risulta indispensabile per una corretta quantificazione economica dei beni a rischio. Diversi sono i dati da reperire per un'analisi di questo tipo. Per esempio sarà necessario conoscere per il settore edilizio: l'indice di fabbricabilità (= m³ edificabili) per avere un costo al metro cubo; il costo della produzione edilizia residenziale (p.es. 500-1000 euro per m³); l'indice di densità edilizia m³/m² (indici ISTAT); il prezzo dei costi per tipologia edilizia (fonti: Genio Civile; ACER Asso Costruttori Edili Roma). Per il comparto agricolo saranno necessarie le rendite catastali oppure sarà possibile valutare il danno per mancato guadagno (fonte NOMISMA - Annuario Agricoltura Italiana). Per le infrastrutture sarà necessario il costo per metro

lineare di una strada, autostrada o ferrovia.

A fronte di tali incertezze nella valutazione economica del territorio in senso lato, nel presente lavoro suggeriamo di considerare la perdita attesa (in conseguenza della risalita relativa del livello medio del mare) come funzione sia della Pericolosità Integrata, sia del valore relativo degli elementi esposti alla potenziale minaccia.

La scelta di porre l'attenzione su delle stime economiche relative, piuttosto che utilizzare dei modelli in grado di valutare sia qualitativamente che quantitativamente il danno potenziale, è stata essenzialmente dettata dalla sostanziale assenza di banche dati esaustive.

La perimetrazione di aree ad omogeneo valore di rischio si otterrà, perciò, tramite la sovrapposizione e l'analisi topologica dei livelli informativi della Pericolosità Integrata e della Carta dell'Uso del Suolo. La carta dell'Uso del Suolo dovrà essere precedentemente ricampionata secondo un opportuno numero di classi, in funzione della stima del valore economico dei beni esposti. Tale stima sarà effettuata per indicizzazione delle varie classi in relazione a quella mostrante il massimo valore monetario per unità di superficie.

A tal fine, i vari tipi di uso del suolo possono essere raggruppati in 5 macro-categorie che riguardano:

- Zone umide.
- Boschi e aree a vegetazione naturale.
- Terreni agricoli.
- Aree produttive e infrastrutture.
- Tessuto urbano e spiagge attrezzate.

All'interno di tali macro-categorie, a seconda del diverso utilizzo del suolo delle varie aree costiere, si provvederà ad individuare tutte le classi da indicizzare.

Inoltre, comparando le trasformazioni avvenute nel territorio su un arco temporale analogo agli scenari di predizione, si può formulare una classificazione di classi di persistenza dell'uso del suolo, individuando così dei pesi moltiplicativi da inserire nell'indicizzazione delle macro-categorie.

Sebbene l'approccio proposto produca una valutazione di massima, il tipo di zonazione cui si giungerà può fornire uno strumento per una rapida individuazione dei settori ad alto rischio, e dare utili indicazioni sulla consistenza delle perdite economiche (legate alla superficie di spiaggia erosa, ai danni alle infrastrutture, ai centri urbani e alle aree agricole) nel caso in cui le attuali previsioni di innalzamento del livello marino dovessero risultare verificate.

Le carte redatte potranno essere utilizzate anche per la progettazione e dimensionamento di protezioni, calcolandone il rapporto costo/beneficio come nel caso di: idrovore per il mantenimento di aree di *dryland* potenzialmente invase dalle acque; opere di difesa lungo coste protette e/o aperte; conservazione dell'attuale spiaggia tramite ripascimenti; eventuale elevazione di caseggiati ed infrastrutture, ecc. (U.S. EPA 1989).

Appare evidente che in questo approccio metodologico viene considerata la sola vulnerabilità economica del territorio, valutabile in termini monetari. Altri fattori, come ad esempio l'aspetto paesaggistico o la possibile perdita di habitat ecologici e di specie a rischio sono comunque implementabili nella modellizzazione; sembra però difficile poter inserire, in una valutazione del rischio quanto più esatta possibile, la ricaduta sul tessuto sociale.

Infine, considerando la mole d'incertezze ed approssimazioni intrinseche nella valutazione del Rischio, si evince come, in settori privi di un'adeguata copertura di dati "economici", la zonazione di Pericolosità Integrata costituisca strumento strategico efficace e bastevole per la pianificazione territoriale.

Considerazioni conclusive

L'elaborazione delle Linee Guida proposte ha avuto come scopo quello di fornire ai decisori uno strumento efficace, e scientificamente valido, utile nell'operare scelte mirate nella gestione della fascia costiera, in relazione ai cambiamenti del clima.

L'approccio proposto si basa sul trasferimento di valori scientifici (che spaziano dalla geologia all'informatica) ad un modello facilmente gestibile ed economicamente attuabile dalla Pubblica Amministrazione.

La strategia proposta si è avvalsa del confronto con le difficoltà emerse dalla propria applicazione su un'area pilota (la Versilia), in un ambito costiero vasto ed esemplificativo di molte realtà nazionali.

Fra i principali vantaggi derivabili dall'applicazione delle presenti Linee Guida vi sono:

- La facilità e l'economicità di applicazione, unitamente all'affidabilità scientifica.
- La possibilità di utilizzare dati con diversi gradi di qualità, aggiornamento ed affidabilità, sino al limite estremo nell'usufruire delle sole fonti bibliografiche, come ad es. in mancanza di strumenti per l'acquisizione originale di dati dedicati.
- L'applicabilità a qualsiasi arco temporale attraverso l'utilizzo contemporaneo di molteplici scenari di previsione.
- La modularità, e quindi la capacità di aggiornamento in tempo reale dei dati, sia relativi all'analisi del territorio sia agli scenari futuri, fra cui le curve di predizione del sollevamento del livello del mare; l'adattabilità alle esigenze locali.
- La possibilità di implementazione del modello attraverso l'aggiunta di illimitati livelli informativi.
- La capacità di valutare contemporaneamente gli aspetti fisiografici, fisici, geologici, naturalistici ed antropici integrandoli.
- La possibilità di far fronte alle necessità del territorio prima che queste diventino emergenze, abbattendo costi d'intervento nella difesa e ripristino della costa.

I risultati hanno inoltre permesso di evidenziare le criticità maggiori nell'applicazione delle Linee Guida proposte, fra cui:

- L'implementazione opportuna dell'applicazione del Bruun Rule Model, anche attraverso: la valutazione dei disequilibri sedimentari nella dinamica costiera di ogni singola area; l'influenza delle aree fortemente urbanizzate e/o aggettanti in mare sul modello; la valutazione della migliore spaziatura dei punti da inserire nel modello.
- L'inserimento dell'impatto degli eventi estremi e delle variazioni del cuneo salino, entrambe collegate al RSLR.
- L'approccio non statistico alla classificazione geomorfologica dell'ambiente costiero.
- La definizione della più opportuna spazializzazione di una rete di monitoraggio topografico attiva, utile alla determinazione dei tassi di subsidenza differenziali.
- La mancanza di una verifica del metodo, effettuata utilizzando dati certi sulle modificazioni ambientali (ad es. applicando gli scenari verificatesi del 2000 allo stato del 1950, o effettuando una back-analysis per l'uso del suolo).

Infine, appare evidente come un simile modello di programmazione possa costituire un supporto, economico e scientificamente valido, nella progettazione dello sviluppo territoriale costiero, essendo uno strumento d'indirizzo strategico nel programmare la gestione degli interventi futuri e futuribili di ripristino, difesa e mitigazione sulla costa.

Bibliografia

- Aminti P., Pranzini E. e Rossi L. (2001) - *La componente eustatica nell'erosione del delta del Fiume Volturno: previsione per l'anno 2025*. Studi costieri, 4: 43-56.
- Bartolini C., Palla B. e Pranzini E. (1989) - *Il ruolo della subsidenza nell'erosione litoranea della pianura del F. Cornia*. Studi di geomorfologia costiera: X. Boll. Soc. Geol. It., 108: 635-647.
- Bioinfort webpage: <http://www.bioinfort.unimi.it/bioinfort/bioin/biostat/analdisc.htm>.
- Birkemeier W.A. (1985) - *Field data on seaward limit of profile change*. Journal Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 111: 598-602.
- Brabb E. (1984) - *Innovative approaches to landslide Hazard and Risk mapping*. Proceedings 4th I.S.L., Toronto, Canada. Pp. 307-324.
- Braaf R., Henderson-Sellers A. Holland G. e Howe W. (1995) - *Climate change prediction, impact evalu-*

- ation and integrated assessment. Proceedings of the users climate change predictions experts workshop, Sydney. Pp.56.
- Brown P.J. Fearn T. e Haque S. (1999) - *Discrimination with many variables*. Journal of the American Statistical Association, 94: 1320-1329.
- Bruun P. (1962) - *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. Journal Waterways and Harbors Division, ASCE, 88: 117-130.
- Bruun P. (1983) - *Review of conditions for uses of the Bruun Rule of erosion*. Coastal Engineering, 7: 77-89.
- Bruun P. (1988) - *The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion of Large-Scale Two and Three Dimensional Usages*. Journal of Coastal Reserach, 4: 627-648.
- Canuti P. e Casagli N. (1996) - *Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana*. Pubbl. n°846-GNDCI. Pp. 57.
- Carrara A., Cardinali M. Guzzetti F. e Reichenbach P. (1995) - *GIS Techniques in Mapping Landslide Hazard*. In "Geographical Information System in Assessing Natural Hazard", Carrara e Guzzetti eds., Kluwer Academic Publifers, Netherlands. Pp. 135-175.
- Castany G. (1994) - *Idrogeologia. Principi e Metodi*. Pp. 243.
- Chapman D.M. (1994) - *Natural Hazards. Melbourne, Australia*, Oxford University Press. Pp.192.
- Civita M. (1994) - *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica*. Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi, N.7, pp. 344.
- Dal Cin R., e Simeoni U. (1994) - *A model for determining the classificazione vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. Journal Of Coastal Research, 10: 18-29.
- Darwin R.F. e Tol R.S.J. (2001) - *Estimates of the Economic Effects of Sea Level Rise*. Environmental and Resource Economics, 19 (2): 113-129.
- Dean R.G. (1990) - *Beach response to sea level rise*. In: "The Sea, Ocean Engineering Science", Journal Wiley e Sons eds., 9: 869-887.
- Dean R.G. (1991) - *Equilibrium beach profiles: Characteristics and application*. Journal of Coastal Research, 7: 53-84.
- Dean R.G. e Maurmeyer E.M. (1983) - *Models for beach profile response*. In: "Handook of coastal processes and erosion", C.R.C. Ed. Pp. 151-163.
- Del Prete M., Giacari E. e Trisorio Liuzzi G. (1992) - *Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata*. Pubbl. n°841-GNDCI. Pp.84.
- Dolotov Y. (1992) - *Possible Types of Coastal Evolution Associated with the Expected Rise of the World's Sea Level caused by the "Greenhouse Effect"*. Journal of Coastal Research, 7: 53-84.
- DRM-Délégation aux Risques Majeurs (1990) - *Les études préliminaires a la cartographie réglementaire des risques naturels maieurs. Secrétariat d' Etat auprès du Premier ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs*. La Documentation Française. Pp. 143.
- Dubois R.N. (1977) - *Predicting beach erosion as a function of rising water level*. Journal of Geology, 85: 470-476.
- Dubois R.N. (1992) - *A re-evaluation of Bruun's Rule and supportig evidence*. Journal of Coastal Research, 8: 618-628.
- Einstein H.H. (1988) - *Special Lecture: Landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. On Landslide, 2: 1075-1090.
- Environmental Protection Agency U.S. (1989) - *Sea Level Rise. In: Potential Impacts of Global Climate Change on the United States*. Government Printing Office, Washington D.C., EPA 230-05-89-052. Eds. Titus J.G., 7: 118-143.
- Everts C.H. (1985) - *Sea level rise and effects on shoreline position*. Journal Waterways, Port, Coastal end Ocean Engineering, ASCE, 111: 985-999.
- Fankhauser S. (1994) - *Protection vs. Retreat - The Economic Costs of Sea Level Rise*. Environment and Planning, 27: 299-319.
- Fell R. (1994) - *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canadian Geotechnical Journal, 31 (2): 261-272.
- Gommes R. du Guerny J., Nachtergaele F. e Brinkman R. (1998) - *Potential impact of sea-level rise on population and agriculture*. FAO SD-Dimensions, Rome, Special: <http://www.fao.org/sd/eidirect/EIre0045.htm>.
- Greene T. e Rayens W. (1989) - *Partially pooled covariance estimation in discriminant analysis*. Communications in Statistics, 18: 3679-3702.
- Greve C.A., Cowell P.J. e Bruce T.G. (2000) - *Application Of A Geographical Information System For Risk Assesment On Open Ocean Beaches: Collaroy/Narrabeen Beach, Sydney, Australia - An Example*. Environmental Geosciences, 7: 149-161.

- Guida M., Guida D., Iaccarino G., Lambiase S., Metcalf G., Salzano G., Vallario A., Vecchio V. e Zigari G. (1978) - *Proposta per l'elaborazione di cartografia tematica inerente alla dinamica dei versanti*. Atti 69° Cong. S.G.I Perugia, Mem. Soc. Geol. It., 19, Roma. Pp. 61-67.
- Hallermeier R.J. (1978) - *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*. 16th Coastal Eng. Conf. Pp. 1493-1512.
- Healy T. (1991) - *Coastal erosion and sea level rise*. Z. Geomorph. N.F., Supp. Bd. Pp. 15-29.
- Hoozemans F.M.J., Marchand M. e Pennekamp H.A. (1993) - *A Global Vulnerability Analysis: Vulnerability Assessment for Population*. Coastal Wetlands and Rice Production and a Global Scale (second, revised edition), Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. Pp.184.
- Krauss N.C. (1992) - *Engineering approaches to cross-shore sediment transport processes*. Proc. Short Course, design and reliability of coastal structures. Pp. 175-191.
- Leatherman S.P. (1990) - *Modelling shore response to sea level rise on sedimentary coasts*. Progress Physical Geography, 14: 447-463.
- Leatherman S.P. e Nicholls R.J. (1995) - *Accelerated Sea-Level Rise and Developing Countries: An Overview*. Journal of Coastal Research, 14: 1-14.
- Legambiente (2003) - *Mare Monstrum 2003, i numeri e le storie dell'assalto alle coste*. Ed. Legambiente. Pp. 135.
- Mitchell J.K. e Eriksen N.J. (1992) - *Effects of climate change on weather-related disasters*. In: "Confronting climate change: Risk, implications, and responses", I.M. Mintzer eds. Pp. 141-151.
- Nicholls R.J., Leatherman S.P., Dennis K.C. e Volonte C.R. (1995) - *Impacts and Responses to Sea-Level Rise: Qualitative and Quantitative Assessments*. Journal of Coastal Research, 14: 26-43.
- Nicholls R.J. e Hoozemans F.M.J. (1996) - *The Mediterranean: Vulnerability to Coastal Implications of Climate Change*. Ocean e Coastal Management, 31 (2-3): 105-132.
- Nicholls R., Birkemeier W. e Hallermeier R. (1996) - *Application of the depth of closure concept*. 245th Coastal Eng. Conf. Pp. 3874-3887.
- Nicholls R., Birkemeier W. e Lee G.H. (1998) - *Evaluation of depth of closure using data from Duck*. Marine Geology, 148: 179-201.
- Panizza M. (1988) - *Geomorfologia Applicata*. La Nuova Italia Scientifica. Pp. 341.
- Perrot A. (1988) - *Cartographie des risques de glissements en Lorraine*. Proc. 5th Int. Symp. On Landslide, 2: 1217-1222.
- Pranzini E. e Rossi L. (1995) - *A new Bruun-Ruled-based model: an application to the Tuscany coast, Italy*. Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 95, October 24-27 1995. Pp. 1145-1159.
- Rosen P.S. (1978) - *A regional test of the Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion*. Journal of Geology, 26: 7-16.
- Schwartz M.L. (1967) - *The Bruun theory of sea-level rise as a cause of erosion*. Journal of Geology, 75: 76-92.
- Titus J.G., Park R.A., Leatherman S.P., Weggel J.R., Greene M.S., Mausel P.W., Brown S., Gaunt C., Trehan M. e Yohe G. (1991) - *Greenhouse Effect and Sea Level Rise: The Cost of Holding Back the Sea*. Coastal Management, 19: 171-204.
- Townend I.H e Flemming C.A. (1994) - *Classification techniques for coastal interpretation*. Littoral 94, (Lisbon, Portugal) September 26-29. Pp. 965-979.
- Van Dissen R. e Mc Verry G. (1994) - *Earthquake hazard and risk in New Zealand*. In: "Natural hazard management workshop", A.G. Hull and R. Coory eds. Pp. 67-71.
- Varnes D.J. e IAEG Commission on Landslide (1984) - *Landslide Hazard Zonation-a review of principles and practice*. UNESCO. Pp. 63.
- Yohe G.W., Neumann J e Ameden H. (1995) - *Assessing the Economic Cost of Greenhouse - Induced Sea Level Rise: Methods and Applications in Support of a National Survey*. Journal of Environmental Economics and Management, 29: 78- 97.
- Yohe G.W., Neumann J., Marshall P. e Ameden H. (1996) - *The Economics Costs of Sea Level Rise on US Coastal Properties*. Climatic Change, 32: 387-410.
- Yohe G.W. e Schlesinger M.E. (1998) - *Sea Level Change: The Expected Economic Cost of Protection or Abandonment in the United States*. Climatic Change, 38: 447-472.
- UNDRO (1979) - *Report of the Experts. Group Meeting on Natural Disasters and Vulnerability*. Pp. 25-27.

Manoscritto ricevuto il 5/7/2003, accettato il 30/11/2003.