

La valutazione del Rischio da RSLR in Versilia

Marco Fulvio Nisi¹, Pierluigi Aminti², Luigi E. Cipriani³, Mauro De Donatis⁴, Saverio Devoti¹, Massimo Gabellini¹, Giuliano Gallerini⁴, Enzo Pranzini⁵, Lorenzo Rossi⁵ e Sergio Silenzi¹

¹ICRAM - Istituto Centrale per la Ricerca Scientifica e Tecnologica Applicata al Mare,
Via di Casalotti 300, 00166 - Roma. m.nisi@icram.org; paleoclima@icram.org.

²Dipartimento di Ingegneria civile, Università degli Studi di Firenze,
Via Santa Marta 1, 50126 - Firenze. aminti@dicea.unifi.it.

³Regione Toscana, Dip. Politiche territoriali ed ambientali, Via di Novoli 26, 50127 - Firenze.

⁴Dip. Scienze ambientali, Campus scientifico Università di Urbino, 61029 - Urbino.

⁵Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze,
Via Jacopo Nardi 2, 50132 - Firenze. epranzini@unifi.it.

Riassunto

Per la valutazione degli impatti sul territorio versiliese dei vari fenomeni potenzialmente dannosi, direttamente od indirettamente connessi alla risalita relativa del livello marino (RSLR), è stato applicato l'approccio metodologico descritto in Silenzi et al. (questo volume). La struttura di questa metodologia può essere riassunta in quattro fasi: 1) la valutazione della Suscettibilità Integrata, cioè della propensione del territorio a subire tutti i fenomeni indotti dalla RSLR, stimata attraverso la distribuzione areale di parametri predisponenti e/o mitiganti; 2) la modellizzazione dei cambiamenti fisiografici futuri del territorio; 3) la valutazione della Pericolosità dei fenomeni in funzione delle loro dimensioni spaziali e temporali; 4) la stima del Rischio come funzione della Pericolosità e del valore economico degli Elementi esposti.

Queste fasi sono state gestite in ambiente GIS, in sinergia con programmi di calcolo dedicati ad un modello di regressione costiera.

Il metodo è stato applicato, attraverso un accordo di programma fra ICRAM e Provincia di Lucca, su tre diversi scenari (ottimistico, intermedio e pessimistico) e su tre periodi di previsione (anno 2025, 2050 e 2100). La scelta di periodi di previsione più brevi di 100 anni è finalizzata a mettere a disposizione dei decisori utili indicazioni per una corretta gestione del territorio.

I risultati ottenuti appaiono significativi: entro l'anno 2100 vaste aree della pianura versiliese potrebbero trovarsi sotto il livello medio del mare e, quindi, essere fortemente sensibili all'erosione accelerata della spiaggia, all'ingressione del mare in aree depresse, all'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi alluvionali.

Parole chiave: pianura della Versilia, regressione costiera, rischio, applicazione delle linee guida.

Abstract

The methodological approach described by Silenzi et al. (this volume) was applied to the Versilian area to evaluate the impact of phenomena which, directly or indirectly linked to sea level rise (RSLR), are considered as potentially dangerous. The structure of this method can be summarized in four phases: 1) the evaluation of the Integrated Susceptibility, i.e. of the territory's tendency to be affected by all RSLR induced phenomena, estimated through the distribution of the mitigating and/or predisposing parameters; 2) the modelization of the future physiographic changes in the territory; 3) Hazard evaluation in function of the

phenomena's spatial and temporal dimensions; 4) the Risk assessment as a function of Hazard and of the economical value of the exposed elements.

These phases were managed with GIS, in synergy with calculation programmes dedicated to a coastal regression model.

The method was applied thanks to an agreement between Icram and the Province of Lucca, on three different scenarios (optimistic, intermediate and pessimistic) and for three prediction periods (year 2025, 2050 e 2100). The chosen prediction periods are shorter than 100 years in order to provide the decision makers with useful information for correct management of the territory.

The obtained results are significant: by the year 2100, wide areas of Versilian plain might be under sea level and they might therefore forcedly undergo accelerated beach erosion, sea ingression in depressed areas and increase in flooding frequency and intensity.

Key-words: *Versilian plain, relative sea-level rise Risk, guideline application.*

L'innalzamento relativo del livello del mare in Versilia

I fattori che rappresentano condizione necessaria affinché sussista, in un certo territorio, un rischio da innalzamento del livello del mare sono connesse a due fenomeni di tipo geologico e/o climatico: l'eustatismo e la subsidenza. Pertanto, qualsiasi valutazione di tale rischio deve partire dalla quantificazione, a scala locale e rispetto al periodo previsionale prescelto, della somma di queste due componenti: tale somma da l'innalzamento "relativo" del livello del mare, cioè la reale aliquota di abbassamento del suolo rispetto al mare.

Analisi della subsidenza

Per arrivare ad una stima della subsidenza della piana, data la mancanza di livellazioni di precisione recenti per buona parte dell'area considerata, sono stati acquisiti dati attraverso:

- analisi di sondaggi geognostici;
- analisi della bibliografia esistente;
- misure dirette degli abbassamenti del suolo dei settori più subsidenti.

La Pianura pisano-versiliese è stata interessata dal Pleistocene medio all'attuale da movimenti negativi (Bartolini et al., 1982). Lo sprofondamento dell'area è confermato dall'esistenza di un sistema di faglie orientate NW-SE al piede delle Alpi Apuane, e SW-NE (linea Meloria-Bientina) che bordano il margine meridionale della pianura, attive dal Pleistocene superiore all'attuale (Cantini et al., 2001). La struttura, evidenziata dall'opposizione di minimi e massimi delle anomalie gravimetriche di Bouger, avrebbe ribassato tutta l'area costiera a nord di Livorno (Fig. 1). Contemporaneamente alla subsidenza tettonica, avrebbe agito anche una notevole subsidenza diagenetica (Mazzanti, 1995); questa sarebbe dovuta alla compattazione del grande spessore di depositi quaternari presenti nel sottosuolo della pianura. Inoltre, le attività antropiche del secolo scorso (bonifiche, estrazione di sedimenti, ecc.) hanno provocato i forti abbassamenti del piano campagna.

Tongiorgi (1978) ricostruisce la tendenza della subsidenza geologica a partire dal limite Pliocene-Quaternario determinando uno sprofondamento di circa 1 mm/anno. Tale variazione sul lungo periodo è confermata da dati archeologici: un insediamento preistorico rinvenuto nei pressi di Massarosa, risalente al 500 a.C., mostra uno sprofondamento relativo, rispetto al livello del mare, valutabile tra i 140 e i 180 cm (Tongiorgi, 1978); tenendo conto delle variazioni del livello del mare verificatesi nell'arco di tempo considerato, si avrebbe quindi un valore degli sprofondamenti effettivi di poco inferiore ad 1 mm/anno.

Uno studio comparato tra dati stratigrafici e misure geodetiche è stato effettuato solo nella Pianura di Pisa (Galleri Fancelli, 1978; Palla et al., 1976), mentre, per quanto riguarda la Versilia, si dispone di valori puntuali (vedi Cavazza et al., 1985) rilevati presso località sottoposte a cospicui emungimenti idrici o a opere di bonifica.

La bonifica, divenuta sistematica solo agli inizi del '900, ha interessato gran parte della Pianura versiliese, provocando i cospicui costipamenti dell'area che comprende i Comuni di Viareggio, Massarosa, Pietrasanta e Camaiore dove i terreni sono costituiti da uno strato superficiale di natura torbosa spesso fino a 10 m; il corrispondente bacino di bonifica si estende dai piedi delle Alpi Apuane fino al mare ed è limitato a sud dal Lago di Massaciuccoli, a nord dall'abitato di Marina di Pietrasanta (Auterio et al., 1978).

Lo studio sulla subsidenza nel comprensorio del Consorzio di Bonifica della Versilia realizzato da Auterio et al. nel 1978, limitatamente all'area ricadente nei comprensori della bonifica di Massarosa e di Ponente, analizza gli abbassamenti del suolo emersi dal confronto fra diversi rilievi topografici relativi agli anni 1928/35 e 1971. Tale studio indica dei cedimenti molto variabili, con valori massimi superiori ai 2 m. Alcune considerazioni, testimoniano tuttavia che il fenomeno di subsidenza era certamente più esteso di quanto rilevato, fino a comprendere le aree limitrofe caratterizzate da analoghe situazioni litostratigrafiche ed interessate dalle stesse cause naturali ed artificiali attivanti o acceleranti il fenomeno stesso: presenza di terreni compressibili, abbassamento di falda dovuto alla bonifica con impianti idrovori e, almeno in parte, anche alle estrazioni di sabbie silicee. I costipamenti, che sono proseguiti nel tempo in misura sempre più ridotta, hanno portato il piano campagna ad abbassarsi in modo differenziale, assumendo un andamento simile all'orizzonte di sabbia silicea sottostante i sedimenti torbosi.

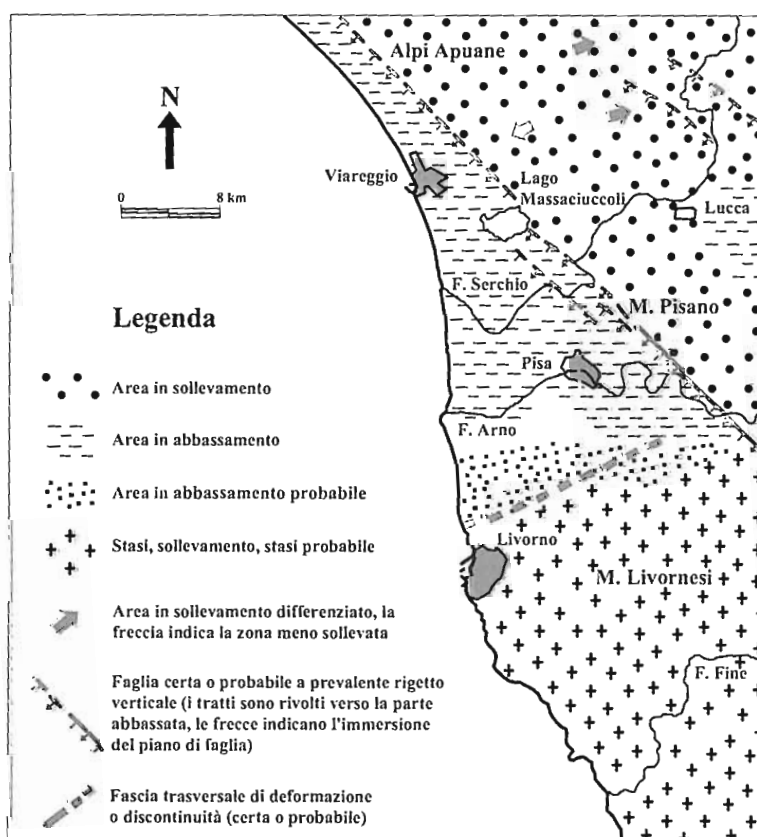


Figura 1 - Carta neotettonica dell'area in studio relativa all'intervallo Pleistocene medio - Olocene (da Bartolini et al., 1982, modificata).

I costipamenti medi e massimi nei comprensori di Massarosa e di Ponente, risultano comunque minori di quelli manifestatisi nel bacino di Massaciuccoli.

L'ordine di grandezza di 1cm/anno proposto da Palla et al. (1976) per alcune zone della Pianura Pisana conferma sostanzialmente il valore medio di 2m/100 anni per i fenomeni di massimo costipa-

mento avvenuti in Versilia a partire dagli inizi del secolo (Auterio et al., 1978).

Dal 1978 ad oggi sono stati effettuati ulteriori studi per meglio definire l'estensione e l'entità del fenomeno. Caroti (2000) illustra l'analisi svolta per avanzare ipotesi sull'evoluzione della subsidenza lungo una linea di livellazione di particolare interesse.

Lo studio dei dati rilevati per il caposaldo di Migliarino Pisano, per 24 anni (dal 1975 al 1999), ha messo in evidenza che il movimento verticale relativo si è comunque conservato negativo nell'arco temporale indicato.

Dai valori ottenuti fino al 1994 si poteva attendere nel 1999 un valore di poco superiore a -50 mm, ritenendo tale andamento come ragionevole dimostrazione di un tipico fenomeno di cedimenti in esaurimento. Il valore misurato nel 1999 pari a -36 mm, ha reso necessaria la ricerca di una diversa interpretazione logica dell'andamento nel tempo della subsidenza locale. L'analisi del gradiente di movimenti ha posto in evidenza una variazione di tendenza a cavallo degli anni 91-93. In tali anni si è riscontrata una notevole diminuzione degli emungimenti dalla falda; per cui il progressivo innalzamento può fornire la giustificazione del rigonfiamento del terreno che avrebbe subito la massima depressione nel 1990. Sulla base di questa interpretazione e, tenuto conto delle ipotesi relative alle cause che stanno provocando il rigonfiamento riscontrato, tale flesso dovrebbe indicare una tendenza all'esaurirsi del fenomeno.

I dati di Caroti (2000) portano ad importanti considerazioni riguardo l'andamento degli abbassamenti del suolo della zona di Migliarino Pisano; essi necessitano però di ulteriori campagne di livellazioni, con maggiore estensione verso nord (bacino Massaciuccoli) per confermare il trend rilevato dagli anni '90 ad oggi e verificare che tale andamento non è limitato all'area di Migliarino ma si possa estendere all'intera piana.

Oltre all'analisi degli studi pregressi si è provveduto ad un rilevamento del fenomeno per l'intero Bacino del Massaciuccoli, misurando l'entità dell'abbassamento del piano campagna in corrispondenza di abitazioni, silos, ponti ecc. edificati a cavallo degli anni 40' e 50' (Fig. 2).

A partire da tali dati puntuali, e da quanto noto in letteratura, sono state successivamente tracciate le curve isocinetiche dell'abbassamento del suolo, negli ultimi 50 anni circa, che evidenziano l'entità dei cedimenti differenziali dei vari settori del Bacino, e le isopache dello strato torboso (Fig. 3).

Dall'esame di tale figura si nota come le isocinetiche dei costipamenti seguano sostanzialmente le isopache della torba, mostrando chiaramente che esiste un rapporto diretto tra potenza dei terreni organici e abbassamenti del suolo.

Ad integrazione dei dati misurati sono state prese in esame le stratigrafie di vari sondaggi e, soprattutto, le indicazioni ottenute dal sondaggio ENEA (vedi Devoti et al., questo volume; Nisi et al., questo volume) basate su analisi paleoambientali e radiometriche e su considerazioni di neotettonica costiera (Antonioli et al., 2000; Nisi, 1999; Nisi et al., 2003). In particolare, dei campioni di *C. coespitosa* prelevati a -70 m s.l.m. sono stati riferiti ad una antica linea di costa tirreniana (M.I.S. 5.5, 125.000 anni B.P.). Assumendo che la tettonica abbia agito in maniera costante dal M.I.S. 5.5. ad oggi, l'entità della subsidenza geologica subita dalla Pianura versiliese a partire dal Tirreniano risulterebbe quindi di circa 77 m in 125.000 anni, con un rateo valutabile in 0,62 mm/anno (Nisi et al., 2003).

Questo tasso di subsidenza ben si accorda con le osservazioni di Cantini et al. (2001) ed è peraltro congruente con il rateo di abbassamento di 1 mm/anno indicato da Tongiorgi (1978) come il massimo valore ipotizzabile per i fenomeni di tettonica negativa occorsi alla pianura a partire dal limite Pliocene-Quaternario.

I risultati delle altre radiodazioni, effettuate su vari resti conchigliari, frustoli vegetali e torba, congiuntamente all'analisi degli ambienti di sedimentazione, hanno inoltre consentito di costruire una curva di risalita relativa del mare durante l'Olocene (Fig. 4) (Antonioli et al., 2000; Nisi, 1999).

La curva risulta essere in buon accordo con altre curve sperimentali per gli ultimi 10.000 anni B.P. (Bard et al., 1996; De Muro e Orrù, 1998); in particolare si è evinta una sostanziale coincidenza con

la curva di Alessio et al. (1996) nel tratto riferibile ai primi 8.000 anni B.P.

Tali riscontri conducono ad ulteriori considerazioni di carattere tettonico: la Pianura pisano-versiliese dovrebbe considerarsi essenzialmente stabile a partire dall'Olocene e quindi pressoché priva di subsidenza tettonica e/o diagenetica; quindi la subsidenza i cui ratei sono stati in precedenza stimati, dovrebbe essere stata attiva solo durante il Pleistocene superiore.



Figura 2 - Particolare degli effetti dell'abbassamento del suolo presso l'idrovora di Massaciucoli e presso le fondazioni di un fienile edificato nel 1951 in prossimità della fattoria La Fagianella.

Per quanto concerne la discrepanza riscontrata con la curva eustatica di Alessio et al. (1996) relativamente al periodo compreso tra 8.000 e 10.500 anni B.P. è da rimarcare che tale curva non considera gli effetti della glacio-idroisostasia connessi all'ultima deglaciazione (eventualmente combinati ad effetti di isostasia da carico, termoisostasia, tettonica verticale ai bordi delle placche ecc.).

Al contrario è ormai acclarato che tutte le aree costiere risultano interessate, anche se in modo diverso, da movimenti verticali causati da questi fenomeni (Pirazzoli, 1993; Clark et al., 1978; Lambeck, 1990; Lambeck, 1993; Lambeck e Johnston, 1995; Pirazzoli et al., 1997).

D'altro canto, i dati del sondaggio Enea concordano perfettamente con la curva di risalita del livello del mare valida per la Versilia proposta da Lambeck et al. (in stampa), proprio sulla base del modello glacio-idro-isostatico. Anche questa evidenza confermerebbe, comunque, la sostanziale stabilità tettonica della pianura nel corso degli ultimi 10.000 anni.

Se si considera la Pianura versiliese stabile a partire dall'Olocene, la velocità dello sprofondamento del settore, ricavato dalla datazione della *C. coespitosa*, aumenterebbe a circa 0,67 mm/anno, ma i fenomeni di subsidenza si sarebbero esauriti circa 10.000 anni fa.

Valori adottati per la subsidenza

L'assenza di una rete attiva di monitoraggio topografico, o di altre metodologie per una determinazione accurata ed attendibile dei tassi di subsidenza, implica l'impossibilità di applicare un modello che simuli l'evoluzione del fenomeno nel tempo ed avere una zonazione più dettagliata dei tassi di abbassamento locale. Il lavoro di Caroti (2000) ha segnalato per l'area di Migliarino Pisano una tendenza alla riduzione del fenomeno di abbassamento del suolo e che questo andamento potrebbe essere estrapolato all'intera area analizzata, viste le similari condizioni stratigrafiche. Questo comportamento può essere in parte riconducibile alle trasformazioni socio-economiche in atto negli ultimi anni, quando aree a prevalente indirizzo agricolo sono divenute aree a prevalente uso turistico e terziario; la trasformazione ha comportato la diminuzione dello sfruttamento delle risorse idriche sotterranee con un parziale recupero dell'abbassamento del suolo. Data la mancanza di livellazioni recenti e ripetute nel tempo per gran parte dell'area in studio, nel presente lavoro sono stati considerati i tassi di subsidenza senza prendere in considerazione il trend positivo determinato dalla Caroti.

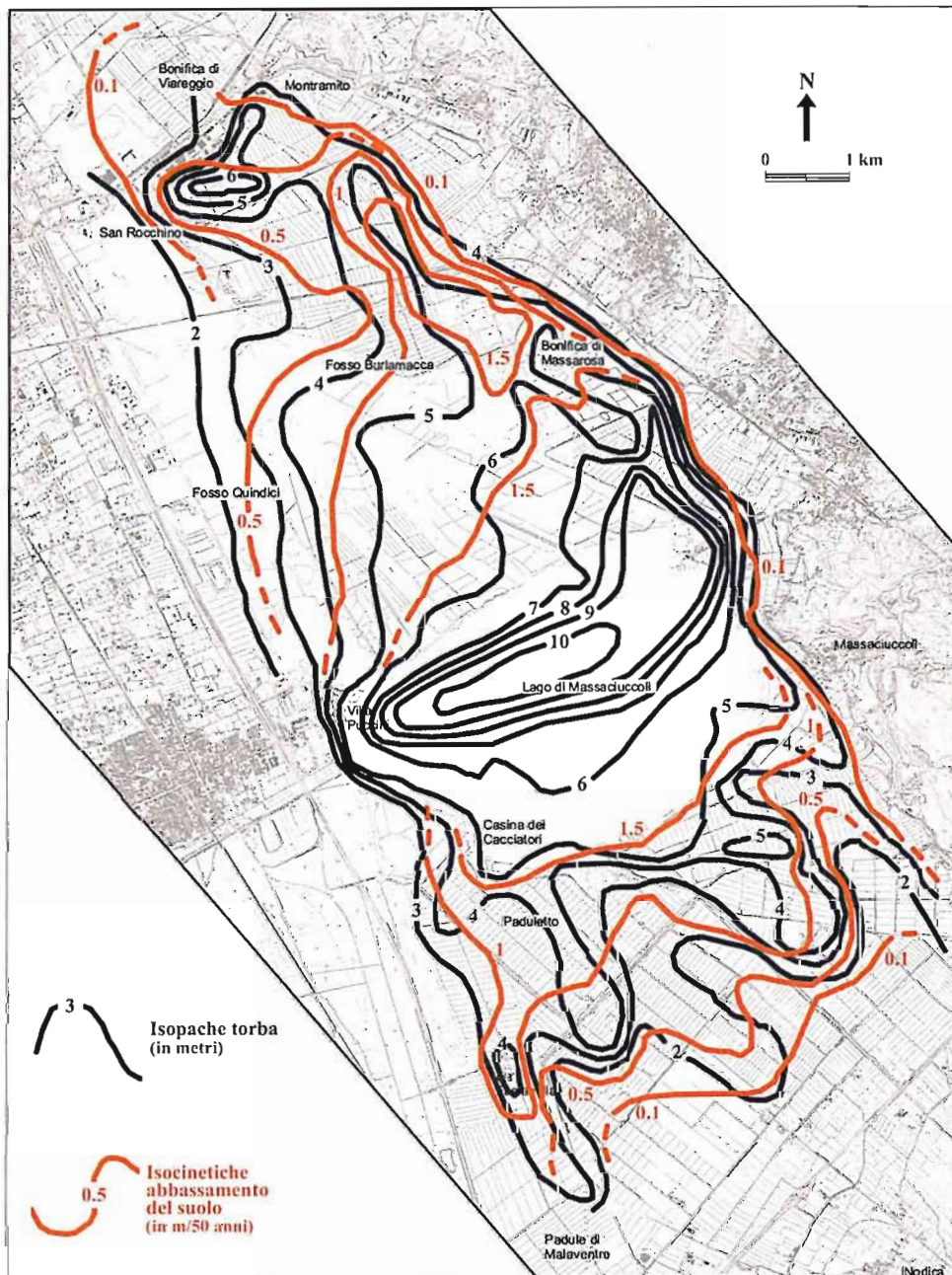


Figura 3 - Rapporto tra gli spessori della copertura torbosa superficiale e gli abbassamenti del suolo degli ultimi 50 anni nel Bacino del Massaciuccoli.

Mediando i dati relativi soprattutto alle misure di Palla et al. (1976) e dell'Atlante delle Spiagge (Foglio 104 Pisa), per gli archi temporali uguali o simili, si giunge alla conclusione di considerare per tutta l'area valori di 2 mm/anno ad esclusione del bacino di Massaciuccoli per il quale viene attribuito il valore di 7 mm/anno.

Per la previsione dei cambiamenti fisiografici futuri, indotti dalla risalita relativa del livello marino, l'abbassamento della topografia versiliese è stato quindi effettuato tenendo presente che esistono 2 aree a subsidenza differenziale (Tab. 1).

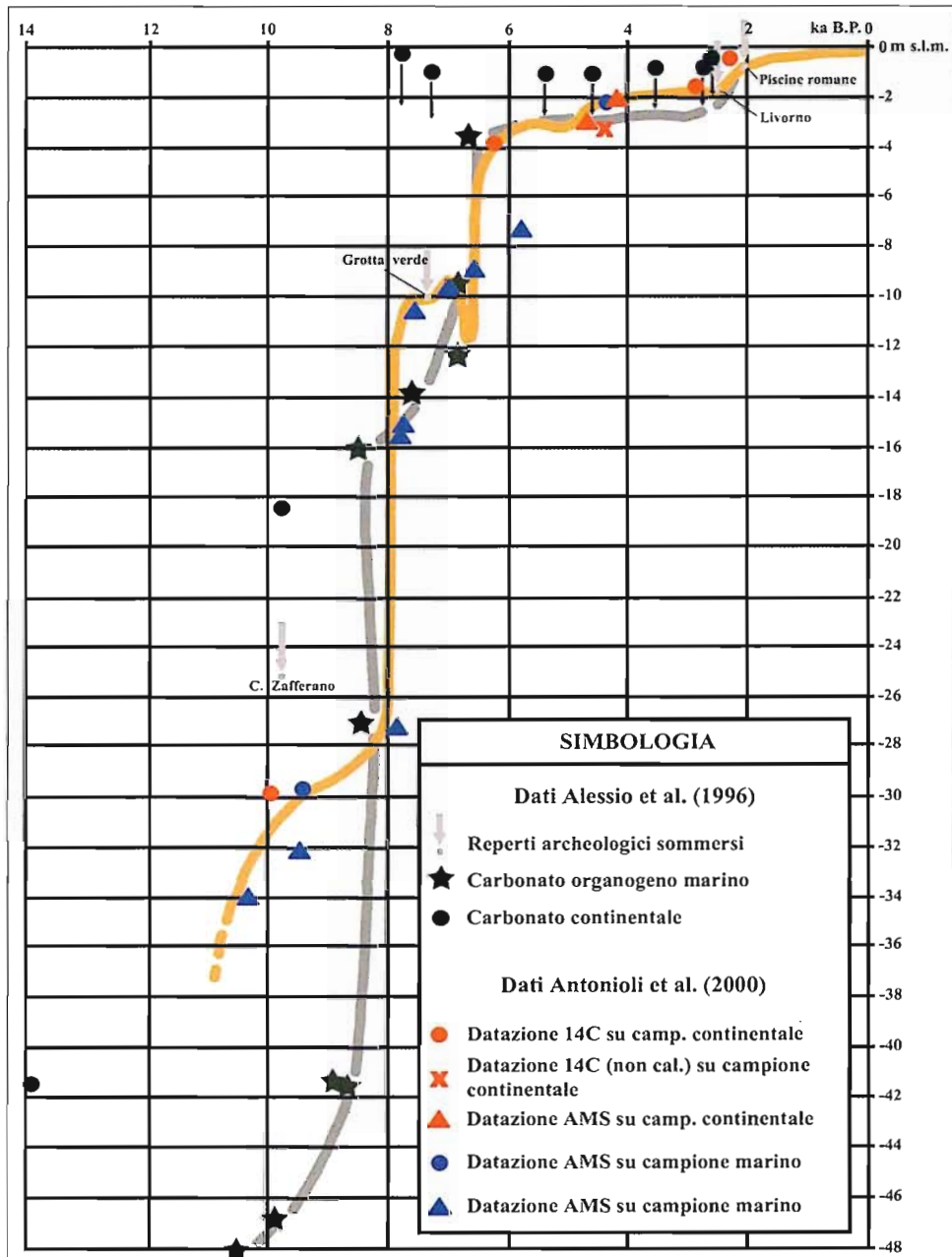


Figura 4 - Curve di risalita del livello del mare durante l'Olocene; in grigio la curva di Alessio et al. (1996), in giallo la curva di Antonioli et al. (2000).

Tassi di risalita relativa del livello del mare

Circa le cause, le metodologie di studio e le entità previste per l'innalzamento eustatico nel corso del secolo attuale, si è diffusamente discusso nel lavoro di Silenzi et al. (questo volume).

I numerosi studi di previsione degli impatti dovuti al SLR (Sea Level Rise) sulle coste, realizzati in Italia o a livello internazionale, considerano valori di innalzamento del mare molto diversi tra loro. Questo perché talvolta vengono utilizzati valori di variazione globale del livello marino, a volte valori locali calcolati per la regione indagata. Inoltre, le stime di variazione di SLR variano con il raffinarsi dei modelli.

Tabella 1 - Valori adottati per la subsidenza della Piana versiliese.

	Subsidenza (cm)	
	Area costiera ed esterna al bacino di Massaciuccoli (2 mm/anno)	Area del bacino di Massaciuccoli (7 mm/anno)
Anno 2025	5 cm	17,5 cm
Anno 2050	10 cm	35 cm
Anno 2100	20 cm	70 cm

In base ai record di innalzamento del mare proposti dall'ultimo rapporto IPCC (2001), sono stati estrapolati i centimetri di SLR previsti per l'anno 2025, 2050 e 2100. Per ognuno di questi periodi sono stati considerati, inoltre, tre diversi valori afferenti rispettivamente ad uno scenario ottimistico, intermedio e pessimistico (Tab. 2). Il rapporto IPCC (2001), infatti, prevede per il secolo attuale, un trend minimo e uno massimo di innalzamento eustatico. Lo scenario ottimistico di ogni intervallo di predizione qui considerato, è quello caratterizzato dal minor valore di crescita eustatica; così lo scenario pessimistico è quello caratterizzato dal maggior valore possibile di crescita eustatica; di conseguenza, lo scenario intermedio presuppone un innalzamento del livello del mare compreso tra i due estremi. Sommando i ratei di SLR della Tabella 2 a quelli di subsidenza differenziale descritti in precedenza, si ottengono, per la piana versiliese, i valori di innalzamento relativo del livello marino riportati nelle Tabelle 3 e 4, afferenti rispettivamente al Bacino di Massaciuccoli e al settore costiero a questo esterno.

Tabella 2 - Valori minimi, medi e massimi di innalzamento del mare adottati per gli anni 2025, 2050 e 2100.

	Innalzamento del Livello Medio Marino Globale		
	Scenario ottimistico (centimetri)	Scenario intermedio (centimetri)	Scenario pessimistico (centimetri)
Anno 2025	3	8	14
Anno 2050	5	18	31
Anno 2100	9	48	88

Tabella 3 - Valori minimi, medi e massimi di RSLR previsti per gli anni 2025, 2050 e 2100 nella zona del Bacino di Massaciuccoli.

	RSLR Bacino di Massaciuccoli		
	Scenario ottimistico (centimetri)	Scenario intermedio (centimetri)	Scenario pessimistico (centimetri)
Anno 2025	20,5	25,5	31,5
Anno 2050	40	53	66
Anno 2100	79	118	158

Tabella 4 - Valori minimi, medi e massimi di RSLR previsti per gli anni 2025, 2050 e 2100 nella zona costiera esterna al Bacino di Massaciuccoli.

	RSLR Settore Costiero		
	Scenario ottimistico (centimetri)	Scenario intermedio (centimetri)	Scenario pessimistico (centimetri)
Anno 2025	8	13	19
Anno 2050	15	28	41
Anno 2100	29	68	108

Suscettibilità

La Suscettibilità (S) rappresenta la propensione di un settore di territorio a subire e/o contrastare l'insorgenza di un particolare fenomeno potenzialmente distruttivo.

La metodologia per la determinazione della Suscettibilità integrata da RSLR è basata sull'individuazione dei principali parametri predisponenti i vari possibili fenomeni indotti dalla rimonta marina (regressione della linea di riva, ingressione del mare in aree depresse, aumento della frequenza e della gravità delle esondazioni fluviali, creazione di zone endoreiche con difficoltà di drenaggio e ristagno di acque superficiali, salinizzazione e/o emersione della falda superficiale, ecc.).

Attraverso la spazializzazione e l'assegnazione, in ambiente GIS, di pesi e punteggi a parametri predisponenti di ordine geologico, geomorfologico, idrologico, idrogeologico e di uso del suolo, la piana versiliese è stata suddivisa in Unità Territoriali Omogenee (U.T.O.), cioè in porzioni elementari di territorio in cui i singoli parametri possono considerarsi costanti.

In pratica, a partire dai dati territoriali di base, viene determinato un indice rispetto a ciascun parametro; un valore composito viene poi generato sovrapponendo i vari indici. Gli indici sono rappresentati da numeri interi e sono raggruppati in vari intervalli definiti dalla crescente influenza che ogni parametro può avere sulla predisposizione di un'area all'insorgere di un fenomeno.

Dalla sovrapposizione delle varie U.T.O. scaturiscono le Carte di Suscettibilità della piana versiliese, una per ogni periodo di predizione; le carte riportano, quindi, la zonazione delle aree in cui il RSLR e i fenomeni dannosi ad essa connessi, hanno maggiore o minore attitudine a verificarsi. Per ogni periodo di predizione la Suscettibilità sarà anche funzione dell'eventuale variabilità nel tempo dei parametri predisponenti; nel caso della Versilia tale variazione è dovuta al parametro "soggiacenza della falda superficiale".

I metodi parametrici per la valutazione di suscettibilità o di vulnerabilità conoscono vasta applicazione in numerosi contesti geologico-ambientali, idrogeologici, geomorfologici, ecc. Il principio che informa i diversi tipi di sistema parametrico (sistemi a matrice, sistemi a punteggio semplice, sistemi a punteggi e pesi) è simile: vengono, innanzi tutto, selezionati i parametri sui quali si ritiene di basare la valutazione di suscettibilità o vulnerabilità; a ciascun parametro, suddiviso per intervalli di valori e/o per tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio arbitrario crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva. I punteggi attribuiti non esprimono un valore assoluto, ma piuttosto un valore relativo in grado di discriminare una classe più predisponente dell'altra. Questo anche perché nel raffronto di fattori diversi, ciascuno dei quali è in genere misurabile e dimensionabile con scale e unità di misura diverse, si attribuisce al singolo fattore un valore simbolico uniforme che permette di parametrizzarlo rispetto al contesto che si sta analizzando.

Secondo tale approccio, il risultato algebrico che si ottiene esprime un valore numerico attribuito ad una certa zona del territorio esaminato che presenta caratteristiche omogenee rispetto a quel parametro, e che così individua una zona a più alta o a più bassa suscettibilità rispetto alle aree limitrofe.

Dopo aver attribuito a ogni classe di ciascun tema/parametro valori variabili, e una volta utilizzata la tecnica GIS dell'*overlay* tra i vari parametri, i valori risultanti definiranno un certo numero di classi rispettando l'omogeneità utilizzata in fase di assegnazione dei punteggi. La loro distribuzione, ottenuta a seguito del computo finale, non rappresenta una variabilità di una famiglia di valori reali, ma il risultato campionato di temi cartografici.

Quindi, la classificazione finale si esplica non dalla distribuzione spaziale dei dati o dalla loro densità o distribuzione statistica, ma solo e soltanto da una rigida e semplice equa distribuzione per ottenere una uniforme rappresentazione di tutti i valori possibili. Nelle applicazioni GIS questa tecnica di classificazione prende il nome di *equal range*, poiché si originano classi di uguale ampiezza di valori.

U.T.O. per grado di erodibilità delle litologie

L'erodibilità e la degradabilità delle litologie affioranti nel settore di indagine, in funzione dei fenomeni innescabili dalla risalita del livello del mare, è data dalla sovrapposizione di caratteristiche geologico tecniche (coesione, grado di addensamento, tipo di cemento e/o matrice, ecc.) e il tipo di copertura legato all'utilizzo del suolo.

La rappresentazione grafica delle litologie è stata effettuata utilizzando dati provenienti dai rilevamenti di campagna integrati dalla cartografia tematica disponibile e da dati geotecnici bibliografici. I terreni rilevati vengono raggruppati in classi litologiche omogenee in funzione della loro resistenza relativa all'erosione, ottenendo in tal modo degli areali sufficientemente estesi da essere facilmente rappresentati.

La suddivisione delle litologie in fortemente, mediamente e debolmente erodibili (Tab. 5) è legata ad una classificazione in depositi clastici sciolti; depositi debolmente cementati; rocce litoidi e depositi cementati e/o coesi.

Tale strato informativo è stato sovrapposto all'uso del suolo, che rappresenta un fattore di moltiplicazione per le influenze sull'erodibilità dei sedimenti dovute ai diversi tipi di copertura e di utilizzo del territorio.

I vari tipi di copertura sono riferiti ad *N* macrounità che racchiudono utilizzi del suolo assimilabili; ad esempio: una unità per tutte le infrastrutture, una per i centri produttivi e le abitazioni, una per le aree a pascolo, a brughiera e cespuglieto, a vegetazione sclerofila, a vegetazione boschiva e arbustiva rada, ecc.

La scelta di fattori moltiplicatori compresi tra 0,25 e 1,75 è stata adottata al fine di poter restituire gli effetti protettivi (fattori minori di 1) o peggiorativi (fattori maggiori di 1) rispetto alla erodibilità dei sedimenti dovuta alle loro caratteristiche intrinseche.

Dal prodotto dei punteggi iniziali (Tab. 5), relativi alla litologia, per i fattori di moltiplicazione (Tab. 6) si ottengono quindi un numero finito di punteggi finali (sempre esclusivamente relativi alla categoria "erodibilità"). Si tratta in tutto di 15 valori compresi tra 0,25 e 5,25.

La normalizzazione di tali valori in 1 = bassa suscettibilità, 2 = media suscettibilità e 3 = alta suscettibilità è stata eseguita adottando il criterio illustrato nella Tabella 7.

In tal modo le litologie con coperture urbane continue risulteranno, a prescindere dalle loro caratteristiche intrinseche di erodibilità, sempre in una classe di bassa suscettibilità all'erosione, quelle con boschi da bassa a media, quelle con aree verdi attrezzate e con vegetazione prativo-arbustiva da bassa a media, quelle con aree coltivate a prato-oliveto da bassa ad alta, le lagune da media (prevalente) ad alta, le cave da media ad alta (prevalente), le spiagge-dune e i greti dei corsi d'acqua sempre in alta suscettibilità.

Tabella 5 - Classificazione delle litologie in base alla resistenza all'erosione; per le sigle delle litologie vedi Nisi et al. (questo volume) e la legenda della carta geologica allegata.

Suscettibilità Geolitologica		
Denominazione delle categorie	Sigle delle litologie	Punteggio
Litologie fortemente erodibili	Ss, Dg	3
Litologie mediamente erodibili	Sd, Sr, Fl, PlB	2
Litologie debolmente erodibili	Sb, PlC, PlA, Al, Cgs	1

U.T.O. per permeabilità delle litologie

La permeabilità rappresenta un parametro mitigante per il territorio rispetto a fenomeni alluvionali e/o di ristagno di acque meteoriche; inoltre influenza la ricarica e l'eventuale contaminazione da parte di acque salmastre.

Le classi di permeabilità sono state suddivise in base ai valori del coefficiente di permeabilità riscon-

trati in campagna o da dati bibliografici.

Dal momento che le rocce incoerenti o non consolidate rappresentano la quasi totalità delle formazioni generalmente riscontrabili in una piana costiera, sono state considerate tre classi di permeabilità (Tab. 8):

1) 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.

2) 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.

3) 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.

L'assegnazione di punteggi di permeabilità ai terreni della piana versiliese è riportata nella Tabella 9.

Tabella 6 - Pesi assegnati alle classi di Uso del Suolo, appositamente ricampionate, per determinare l'effetto conservativo o peggiorativo che il tipo di copertura opera sull'erodibilità.

Tipo	Peso	Punteggio Finale
Spiagge, dune, sabbie e ciottolami dei greti.	1,75	1,75
		3,5
		5,25
Aree estrattive.	1,5	1,5
		3
		4,5
Lagune e paludi interne.	1,25	1,25
		2,5
		3,75
Aree occupate in prevalenza da seminativi semplici e complessi, seminativi arborati, vigneti, oliveti, prati stabili.	1	1
		2
		3
Aree a pascolo naturale, brughiere e cespuglieti, vegetazione sclerofila, vegetazione boschiva e arbustiva rada e/o in evoluzione.	0,75	0,75
		1,5
		2,25
Aree verdi urbane, aree sportive e ricreative.		
Boschi di conifere, boschi misti, fustaglie di latifoglie.	0,50	0,5
		1
		1,5
Tessuto urbano, aree produttive e commerciali, reti stradali e ferroviarie, aree portuali, aeroporti.	0,25	0,25
		0,5
		0,75

Tabella 7 - Normalizzazione dei punteggi in base agli intervalli scaturiti dalla moltiplicazione dei punteggi assegnati alle classi di erodibilità per i pesi assegnati alle classi di Uso del suolo.

Normalizzazione in Classi di Erodibilità		
Intervalli	Punteggi normalizzati	Classi di suscettibilità' all'erosione
0,25 - 1,25	1	Bassa
1,5 - 2,5	2	Media
3,0 - 5,25	3	Alta

Tabella 8 - Classi di permeabilità, in funzione del coefficiente di permeabilità (K), utilizzate per l'indicizzazione delle litologie nel layer della Suscettibilità Geolitologica.

K (m/s)	$K \geq 10^{-4}$	$10^{-4} > K > 10^{-8}$	$K \leq 10^{-8}$
Classe di permeabilità	ALTA	MEDIA	BASSA

Tabella 9 - Classificazione delle litologie in base alla permeabilità; le sigle sono relative alla legenda della carta geologica; vedi Nisi et al. (questo volume).

Suscettibilità Geolitologica		
Denominazione delle categorie	Sigle delle litologie	Punteggio
Litologie ad elevata permeabilità	Ss, Dg, Sd, Cgs	2,5
Litologie a media permeabilità	Sr, Fl, Sb	2
Litologie a bassa permeabilità	Al, PlA, PIB, PIC	1,5

U.T.O. per Classi Altimetriche

L'assetto altimetrico della piana è stato considerato come elemento predisponente l'erosione, l'ingressione marina ed i possibili fenomeni di allagamento.

Per poter valutare questa caratteristica fisiografica è stato elaborato un DTM sulla base di dati cartografici forniti dalla Regione Toscana. Il grado di definizione del DTM è legato alla densità di punti quotati per Km², che in limitati settori della piana è risultato insufficiente.

Dato l'assetto altimetrico della fascia costiera, la UTO per Classi altimetriche è stata suddivisa in tre classi:

- Minore di 2 metri s.l.m.
- Compreso tra 2 e 5 metri s.l.m.
- Maggiore di 5 metri s.l.m.

Una volta elaborato, tale parametro è stato intersecato con la Carta delle U.T.O. per propensione alla modificazione ambientale (vedi sotto). Questa operazione è risultata necessaria per mettere in risalto le aree maggiormente depresse. Il procedimento adottato è stato quello di assegnare dei pesi moltiplicatori alle classi altimetriche individuate dall'elaborazione del DTM; rispettivamente pari a 2x per le aree minori di 2 m s.l.m., 1x per le aree con quote comprese tra 2 e 5 m s.l.m. e 0,5x per le aree con quote maggiori di 5 m s.l.m.

U.T.O. per Propensione alla modificazione ambientale

La suscettibilità alla modificazione geologico-ambientale è stata definita come la propensione di un elemento morfologico ad essere ingredito o sommerso dal mare e/o alluvionato come conseguenza della risalita del livello marino.

Le morfologie rilevate sono state accomunate secondo la loro propensione a subire tali fenomeni in conseguenza della prevista RSLR.

Tale propensione, determinata dalle caratteristiche fisiografiche, ambientali e paleoambientali delle varie forme è intersecata allo strato informativo delle U.T.O. per Classi altimetriche.

L'intersezione tra le due unità territoriali consente di pesare la reale propensione alla modificazione delle varie forme della piana.

Il risultato dell'intersezione tra i due temi è stato classificato secondo tre intervalli rappresentanti la bassa, la media e l'alta suscettibilità alla modificazione (Tab. 10 e 11).

U.T.O. per Dinamica della Spiaggia

Il fattore dinamica della spiaggia viene considerato un elemento di forte peso nella propensione all'erosione costiera in condizioni di RSLR.

In base alle caratteristiche del tratto di litorale analizzato, per definire delle classi omogenee, sono state considerate le dinamiche a grande scala distinguendo la tendenza all'arretramento, alla stabilità o all'avanzamento della spiaggia.

Altri parametri, come la pendenza del litorale o le dinamiche a carattere locale, non sono stati trattati in questa fase, in quanto sono considerati nel modello di regressione costiera applicato (vedi nel seguito).

Tabella 10 - Punteggi assegnati alla carta delle U.T.O. per propensione alla modificazione ambientale.

Tipo Di Forme	Punteggi
Forme suborizzontali o depresse (ad es. paleolagune, paleomeandri, paleostagni, canali abbandonati, alvei e spiagge attuali)	3
Forme marine o di transizione rilevate (ad es. cordoni dunari relitti o attuali)	2
Forme continentali rilevate (ad es. conoidi, rilievi pedemontani ecc.)	1
Forme antropiche (aree urbanizzate con elementi di continuità, network viario, opere di difesa litoranea ecc.)	1

Tabella 11 - Intervalli di suscettibilità geomorfologica ricavati dall'intersezione tra classi altimetriche e la carta delle U.T.O. per propensione alla modificazione ambientale.

Suscettibilità Geomorfologica	
Intervalli	Suscettibilità delle morfologie alla modificazione ambientale
0 - 2	Bassa
2 - 4	Media
4 - 6	Alta

Il tratto di litorale in studio, si estende per circa 28 km tra la foce del torrente Cinquale e quella del fiume Serchio. La spiaggia compresa tra la foce del Cinquale e il Porto di Viareggio è in avanzamento, con un tasso medio compreso tra 0 e 1 m/anno. Anche la spiaggia del settore che va dal Porto di Viareggio a Marina di Vecchiano è in avanzamento, ma con un tasso medio compreso tra 2 e 3 m/anno. La spiaggia compresa tra Marina di Vecchiano e la Macchia di San Rossore è invece in arretramento, con un tasso medio maggiore di 3 m/anno.

Per l'omogenizzazione della tendenza della costa esaminata, è stato pertanto assunto il seguente criterio:

- Settore A (foce del Cinquale - Marina di Vecchiano): spiaggia in avanzamento; punteggio: 1.
- Settore B (Marina di Vecchiano - Macchia S. Rossore): spiaggia in arretramento; punteggio: 3.

U.T.O. per Alluvioni e/o Ristagni

Per stimare la suscettibilità del territorio rispetto a fenomeni d'inondazione, sono state perimetrare le aree interessate da significativi fenomeni di esondazione e/o ristagno individuate attraverso analisi storica. Le fonti dei dati sono state, principalmente, la Carta delle Aree inondabili della Regione Toscana (1998) e la Carta della Fragilità Idraulica della Provincia di Lucca (2000).

In base alla qualità dei dati disponibili è stato suddiviso il territorio rispetto alle aree interessate da fenomeni ricorrenti, occasionali ed eccezionali e/o in funzione delle altezze d'acqua registrate.

Non avendo dati sufficienti ed omogenei riguardanti i tempi di ritorno delle alluvioni, non è stato possibile effettuare una zonazione di questo parametro che fosse variabile nel tempo e quindi avere una maggiore distinzione nei tre periodi di predizione.

Di conseguenza per valutare la suscettibilità della piana rispetto a fenomeni di inondazione, vengono riportate le aree interessate da significativi fenomeni di esondazione e/o ristagno, individuate attraverso l'analisi storica, unitamente alle aree inondate negli anni 1991-92-93 e 1996. L'insieme di questi dati ha permesso di perimetrare quelle zone che saranno più facilmente interessate dai fenomeni (Tab. 12).

Tabella 12 - Punteggi assegnati alla Suscettibilità per Alluvioni e/o Ristagni.

Suscettibilità Idrologica	
Denominazione delle categorie	Punteggio
Aree interessate da eventi alluvionali e/o ristagni	3
Aree non interessate da eventi alluvionali e/o ristagni	1

U.T.O. per Soggiacenza della falda

Un importante elemento idrogeologico, considerato come parametro predisponente, è rappresentato dalla soggiacenza dell'acquifero freatico, definita come la profondità della superficie piezometrica rispetto al piano di campagna.

Operando l'approssimazione di considerare l'acquifero omogeneo ed isotropo, in condizioni di risalita accelerata del livello del mare potrebbe infatti verificarsi l'emersione della falda (vedi Silenzi et al., questo volume). La U.T.O. per soggiacenza della falda deriva dalla sottrazione algebrica del modello digitale della superficie piezometrica dal modello digitale del terreno. 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 quello che scaturisce dall'approssimazione per eccesso della somma tra il SLR e quello di subsidenza media della piana, entrambi riferiti, per il principio di precauzione, allo scenario pessimistico dell'anno 2100. Il valore di soggiacenza considerato limite è pertanto pari a 1,5 m. Lo stesso valore, moltiplicato secondo opportuni pesi moltiplicatori, è stato utilizzato per gli altri periodi di predizione. I moltiplicatori sono, in tal caso, funzione percentuale del rapporto tra il RSLR previsto per l'anno 2100 e il RSLR previsto per i gli anni 2025 e 2050 (Tab. 13). Da queste elaborazioni si arriva ad una carta di soggiacenza per ogni periodo di predizione; ogni carta riporta la perimetrazione delle zone con soggiacenza maggiore o minore/uguale a 1,5 m.

Sono ad alta suscettibilità di emersione della falda quelle aree caratterizzate da soggiacenza minore/uguale a 1,5 m; a bassa suscettibilità quelle con soggiacenza maggiore di 1,5 m.

Tabella 13 - Punteggi assegnati alla Suscettibilità Idrogeologica per i tre intervalli di predizione.

Suscettibilità Idrogeologica			
Denominazione categorie	Punteggio Anno 2100	Punteggio Anno 2050	Punteggio Anno 2025
Aree caratterizzate da falda con soggiacenza \leq 1,5 m	3	1,59	0,48
Aree caratterizzate da falda con soggiacenza $>$ 1,5 m	1	0,53	0,16

Suscettibilità Integrata

La Suscettibilità Integrata del territorio versiliese viene calcolata attraverso l'intersezione dei vari strati informativi U.T.O. (Tab. 14), per mezzo di una funzione del tipo:

$$\sum_{UTO=1}^6 \text{Punteggio UTO } i * \text{Peso UTO } i$$

Il valori compositi così ottenuti vengono ricampionati secondo tre classi pari a: bassa, media e alta suscettibilità (Tab. 15); tramite una vestizione automatica sono state quindi redatte le carte di Suscettibilità integrata per gli anni 2025, 2050 e 2100.

Tabella 14 - Riepilogo sintetico delle U.T.O. considerate e dei fenomeni potenzialmente dannosi connessi a tali caratteristiche territoriali.

U.T.O.	Fattore	Effetto Dannoso Potenziale
Erodibilità delle litologie	Geologico	Regressione costiera Erosione fluviale Erosione diffusa
Permeabilità delle litologie	Geologico	Ristagni Difficoltà di drenaggio
Uso del Suolo	Antropico	Moltiplicatore fenomeni di erosione del suolo
Propensione alla modificazione ambientale	Geomorfologico	Ingressione marina Alluvionamenti Erosione
Altimetria	Orografico	Moltiplicatore fenomeni di modificazione ambientale
Dinamica della spiaggia	Geomorfologico	Erosione costiera accelerata
Alluvioni e ristagni	Idrologico	Aumento di frequenza ed intensità delle inondazioni
Soggiacenza della falda	Idrogeologico	Emersione della falda superficiale

Tabella 15 - Classi di Suscettibilità ricampionate per i tre periodi di predizione.

Classi di Suscettibilità Ricampionate			
	Bassa	Media	Alta
Suscettibilità 2025	10 - 20	20 - 30	30 - 40
Suscettibilità 2050	10 - 20	20 - 30	30 - 40
Suscettibilità 2100	10 - 20	20 - 30	30 - 40

La cartografia prodotta mostra che per tutti i tre periodi di predizione l'area a maggiore suscettibilità è, ovviamente, la fascia costiera che comprende la spiaggia e il primo cordone dunare, soprattutto in quei tratti non urbanizzati. La presenza lungo costa di insediamenti urbani non caratterizzati da soluzione di continuità rappresenta invece un elemento di protezione della linea di riva, ma causa un ulteriore deficit sedimentario che aggrava i processi erosivi sulle aree limitrofe. La fascia retrodunare risulta a media suscettibilità, essendo caratterizzata da basse elevazioni e litologie favorevoli a ristagni di acqua. In tale settore si assiste però ad una espansione delle aree con alta suscettibilità in funzione dell'aumento del periodo di predizione; questo perché mentre gli altri parametri in gioco possono essere considerati sostanzialmente invariabili nel tempo, almeno alla scala secolare, il valore critico di soggiacenza diviene sempre più influente all'aumentare dei valori di RSLR. Dall'analisi delle carte (Fig. 5) risulta evidente come determinati parametri di suscettibilità si oppongano in modo rilevante alla regressione della linea di riva, come per esempio i sistemi dunari relitti o gli stessi centri urbani; le aree maggiormente sensibili risultano invece le aree depresse e quelle di foce.

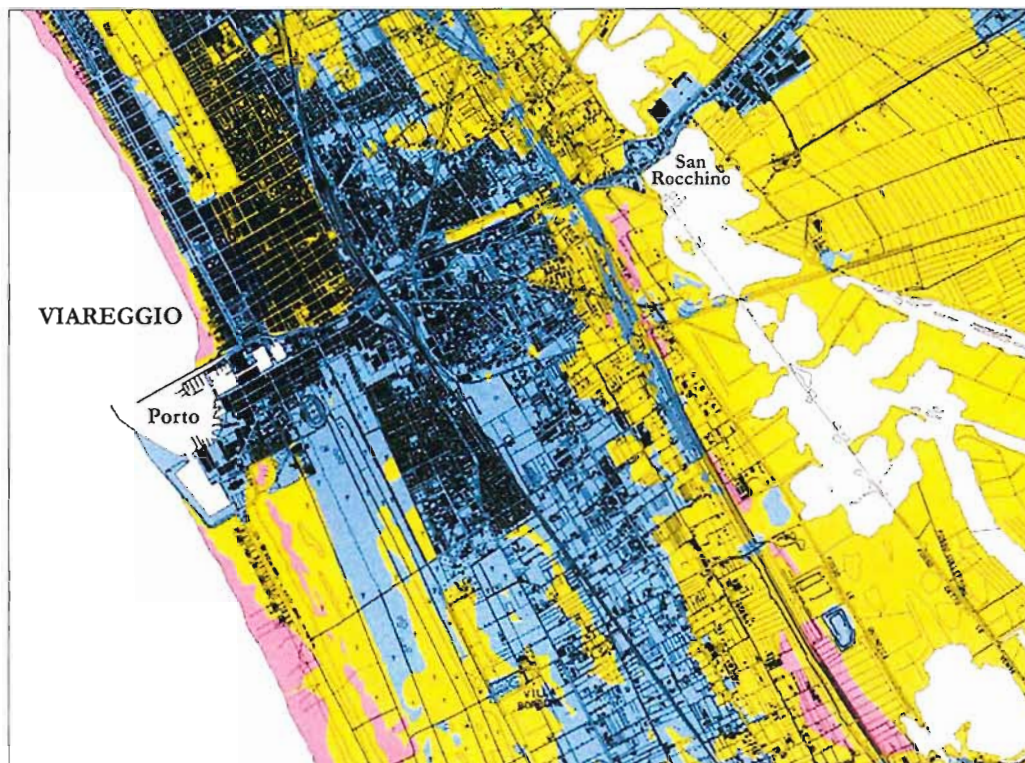


Figura 5 - Stralcio della Carta di Suscettibilità per l'anno 2100 in scala 1:25.000 (area di Viareggio). In rosa: settori ad alta suscettibilità; in giallo: settori a media suscettibilità; in azzurro: settori a bassa suscettibilità.

Scenari futuri

Per la valutazione degli impatti diretti della RSLR sulla piana versiliese, si è operata una modellizzazione dei futuri assetti fisiografici e altimetrici dell'area. In linea generale la RSLR comporterà un arretramento della linea di riva lungo la fascia costiera ed un'ingressione del mare in quelle aree che, per le modifiche morfologiche del territorio, risulteranno ubicate sotto gli 0 m s.l.m. ed in comunicazione diretta con questo.

Le aree che risulteranno sotto il livello del mare, ma protette da barriere naturali e/o antropiche, potrebbero essere comunque colpite da frequenti eventi meteomarinari, alluvionamenti, esondazioni, ristagni d'acqua, progredazione del cuneo salino, emersione della falda superficiale, 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.

La modellizzazione delle possibili variazioni fisiografiche del territorio prevede, in particolare, la determinazione delle future linee di riva (e, quindi, la perimetrazione delle aree sommerse dal mare) e delle isoipse 0 m s.l.m. (sviluppo di eventuali aree al di sotto del livello del mare in settori emersi) secondo tre diversi scenari denominati. Scenario ottimistico, intermedio e pessimistico (rispettivamente connessi ad una minima, media e massima risalita del livello del mare) per ogni periodo di predizione. L'elaborazione del modello, quindi, è incentrata sul calcolo di un DTM predittivo dei tre scenari per gli anni 2025, 2050 e 2100 (complessivamente 9 determinazioni analitiche) tenendo conto delle previsioni di innalzamento del livello del mare e dei ratei di subsidenza differenziale.

Tale elaborazione consta, per ogni periodo di predizione, delle seguenti differenti operazioni:

- 1) abbassamento globale del DTM applicando il valore Eustatismo + Subsidenza regionale;
- 2) abbassamento localizzato del DTM applicando solo i differenti tassi di subsidenza locale opportunamente decurtati del valore di subsidenza regionale (solo nelle aree interessate);
- 3) individuazione della posizione dei nuovi punti a quota 0 m s.l.m.;
- 4) applicazione del "Bruun Rule of Erosion" (vedi Silenzi et al., questo volume) per la quantificazione della regressione futura dei profili di spiaggia; interpolazione dei punti quota 0 m s.l.m. relativi ai profili elaborati per l'estrazione delle previste nuove linee di costa. Questa operazione consente al sistema di calcolare, in automatico, i tassi di regressione costiera, la superficie di spiaggia erosa e il volume di sedimento perso per i vari scenari di uno stesso periodo di predizione;
- 5) intersezione tra le linee di costa e le isoipse 0 m s.l.m. e redazione delle carte degli Scenari Futuri. Ogni carta è relativa ad un anno di predizione e riporta tre diversi scenari (ottimistico, intermedio e pessimistico).

La base topografica utilizzata è la C.T.R. della Regione Toscana in scala 1:10.000; i prodotti cartografici sono restituiti in scala 1:25.000. La previsione della regressione costiera sulla base del "Bruun Rule of Erosion" è calcolata per mezzo del programma di calcolo automatico denominato "SeaLevel" (vedi Silenzi et al., questo volume), sviluppato ed adattato all'area in studio dall'equipe dei professori Enzo Pranzini (Università di Firenze - Dipartimento Scienze della Terra) e Pierluigi Aminti (Università di Firenze - Dipartimento Ingegneria). Il modello matematico di questo programma è basato su una modifica della regola di Bruun (Pranzini e Rossi, 1995) che tiene conto sia della superficie di retrospiaggia che di quella prossima alla profondità di chiusura dei sedimenti.

Il programma richiede come dati di input le funzioni matematiche della spiaggia emersa di retroduna e del profilo attivo di costa, la profondità di chiusura, i valori di SLR e di subsidenza, l'anno di predizione e la percentuale di sezione, ove sia stato possibile calcolarla, costituita da sedimenti fini e/o sedimento consolidato e/o budget sedimentario.

Tra i risultati, il programma fornisce, per un dato periodo di predizione, l'arretramento dei singoli profili di spiaggia, la superficie di spiaggia erosa, l'altezza e la nuova posizione della duna.

Espressione matematica dei profili di spiaggia e profondità di chiusura

La descrizione matematica dei profili di spiaggia è stata realizzata utilizzando due polinomiali del tipo: $y = D + Ax + Bx^2 + Cx^3 + \dots + Nx^n$ dove D è l'altezza della duna, e A, B, ..., N sono variabili risultanti da interpolazione (Pranzini e Rossi, 1995; Aminti et al., 2001).

Le profondità di chiusura per i tre periodi di predizione (Tab. 16) sono state ottenute utilizzando l'equazione di Hallermeier (1978) e i dati raccolti dall'ondametro di La Spezia del Servizio Mareografico Nazionale (SIMN) ubicato a 43°55.7' N - 9°49.6' W, su una profondità d'acqua di 70 m. Le analisi statistiche sono state effettuate con dati acquisiti tra il 1989 e il 2000, assumendo per l'altezza d'onda significativa H_s una distribuzione di Weibull. Il relativo periodo T_s è stato ottenuto dalla correzione empirica $T_s = 4.04 H_s^{0.5}$ per l'ondametro di La Spezia; tali parametri sono stati ricavati per i tempi di ritorno di 25, 50 e 100 anni. I ratei di subsidenza e d'innalzamento eustatico inseriti nel programma "SeaLevel" e nelle operazioni generali sul DTM, sono quelli discussi in precedenza.

Risultati dell'elaborazione

Nelle Tabelle 17, 18 e 19 sono riportati i risultati del programma "Sea Level" sui profili elaborati.

Per ottenere il massimo dettaglio possibile nella stima della regressione costiera sono stati inizialmente processati 24 profili, circa 1 profilo ogni km di costa.

Tali sezioni sono comprese tra la batimetrica -50 m e l'isoipsa corrispondente ad una distanza pari a 4 km nell'entroterra.

Tabella 16 - Altezza d'onda significativa per tempi di ritorno di 25, 50 e 100 anni e corrispondenti profondità di chiusura.

	Altezza d'onda significativa	Profondità di chiusura stimata
Anno 2025	7.08 m	-13.1 m
Anno 2050	7.87 m	-14.5 m
Anno 2100	8.42 m	-15.5 m

Tabella 17 - Elaborazione "Seal Level" per l'anno 2025. Legenda: HDR=Altezza duna rilevata; HDN=Altezza nuova duna; SD=Arretramento duna; SE= Superficie erosa; R=Arretramento linea di riva; O=Scenario ottimistico; M=Scenario intermedio; P=Scenario pessimistico.

Anno 2025					
Profilo/Scenario	HDR (m)	HDN (m)	SD (m)	SE (m ²)	R (m)
2 / O	2	1	6	54	12
2 / M	2	1	7	70	16
2 / P	2	1	11	102	23
3 / O	2	1	18	221	25
3 / M	2	1	24	288	33
3 / P	2	1	35	420	48
5 / O	2	1	16	201	26
5 / M	2	1	20	262	34
5 / P	2	1	34	383	50
6 / O	2	1	15	243	28
6 / M	2	1	20	315	36
6 / P	2	1	30	460	54
9 / O	2	1	20	214	28
9 / M	2	1	27	279	36
9 / P	2	1	39	407	53
10 / O	2	1	12	212	28
10 / M	2	1	15	275	36
10 / P	2	1	23	402	53
12 / O	3	2	11	180	24
12 / M	3	2	14	234	32
12 / P	3	2	21	342	47
15 / O	2	2	3	14	7
15 / M	2	2	4	19	9
15 / P	2	1	6	27	13
19 / O	4	3	9	109	16
19 / M	4	3	12	142	21
19 / P	4	3	17	207	32
24 / O	5,5	5	10	167	19
24 / M	5,5	5	13	217	24
24 / P	5,5	4	19	316	36

Tutti i profili sono stati successivamente espressi in forma polinomiale. L'elaborazione finale è stata possibile su 10 profili (n° 2,3,5,6,9,10,12,15,19,24), quantità che ha consentito comunque un buon grado di interpolazione.

I punti relativi all'arretramento della linea di riva così calcolati sono stati riportati sul DTM e successivamente interpolati per la ricostruzione delle nuove linee di riva teoriche previste per ogni periodo di predizione.

Contemporaneamente all'abbassamento del DTM per i tre diversi valori di RSLR, sono state costruite le nuove isoipse 0 m s.l.m. della piana (anche queste afferenti ai tre periodi di predizione); dall'intersezione delle isoipse 0 m s.l.m. e le relative linee di riva teoriche sono state costruite le linee di riva effettive e le aree interne sotto il livello del mare per ogni scenario di risalita relativa del mare e per ogni periodo.

Tabella 18 - Elaborazione "Sea Level" per l'anno 2050. Legenda: HDR=Altezza duna rilevata; HDN=Altezza nuova duna; SD=Arretramento duna; SE= Superficie erosa; R=Arretramento linea di riva; O=Scenario ottimistico; M=Scenario intermedio; P=Scenario pessimistico.

Anno 2050					
Profilo/Scenario	HDR (m)	HDN (m)	SD (m)	SE (m ²)	R (m)
2 / O	2	1	33	439	45
2 / M	2	1	64	817	86
2 / P	2	1	96	1195	127
3 / O	2	1	45	648	56
3 / M	2	1	85	1203	106
3 / P	2	1	126	1788	156
5 / O	2	1	30	461	52
5 / M	2	1	66	860	98
5 / P	2	1	98	1255	145
6 / O	2	1	25	390	44
6 / M	2	1	48	725	83
6 / P	2	1	73	1053	124
9 / O	2	1	43	473	54
9 / M	2	1	82	883	103
9 / P	2	1	121	1287	151
10 / O	2	1	22	404	49
10 / M	2	1	43	750	93
10 / P	2	1	66	1091	138
12 / O	3	2	21	369	45
12 / M	3	2	21	369	45
12 / P	3	2	62	999	126
15 / O	2	2	3	14	7
15 / M	2	1	8	19	19
15 / P	2	1	13	60	28
19 / O	4	3	13	166	24
19 / M	4	3	24	305	45
19 / P	4	3	37	440	67
24 / O	5,5	5	14	254	28
24 / M	5,5	4	28	465	53
24 / P	5,5	4	42	677	78

Infine sono state redatte le Carte degli Scenari futuri per il 2025, 2050 e 2100. Ognuna di tali carte riporta l'andamento delle previste linee di riva, e delle aree depresse della piana, in funzione di una minima, media e massima RSLR. Sono state calcolate, inoltre, le stime circa il futuro deficit sedimentario del litorale versiliese (Tab. 20).

Tabella 19 - Elaborazione "Seal Level" per l'anno 2100. Legenda: HDR=Altezza duna rilevata; HDN=Altezza nuova duna; SD=Arretramento duna; SE= Superficie erosa; R=Arretramento linea di riva; O=Scenario ottimistico; M=Scenario intermedio; P=Scenario pessimistico.

ANNO 2100					
Profilo/Scenario	HDR (m)	HDN (m)	SD (m)	SE (m ²)	R (m)
2 / O	2	1	81	1068	105
2 / M	2	1	204	2498	253
2 / P	2	1	300	3899	409
3 / O	2	1	83	1264	104
3 / M	2	1	208	2865	255
3 / P	2	1	300	4654	410
5 / O	2	1	52	884	99
5 / M	2	1	129	2066	240
5 / P	2	0	226	3113	407
6 / O	2	1	67	1083	108
6 / M	2	1	177	2553	263
6 / P	2	0	300	4085	443
9 / O	2	1	83	914	104
9 / M	2	1	205	2090	254
9 / P	2	1	300	3238	410
10 / O	2	1	50	865	104
10 / M	2	0	135	1978	253
10 / P	2	0	262	3117	424
12 / O	3	2	48	826	97
12 / M	3	1	126	1890	236
12 / P	3	1	225	2926	388
15 / O	2	1	74	734	88
15 / M	2	1	179	1704	211
15 / P	2	1	293	2729	343
19 / O	4	3	24	313	45
19 / M	4	3	71	1096	131
19 / P	4	3	103	1113	182
24 / O	5,5	4	28	484	53
24 / M	5,5	3	71	1096	131
24 / P	5,5	3	122	1701	216

I tre Scenari

L'analisi delle Carte degli Scenari futuri mostra come la risalita relativa del livello del mare in Versilia possa provocare un cospicuo arretramento della linea di riva e una altrettanto importante estensione delle aree depresse.

In particolare, per il 2025, si prevede una regressione media della costa compresa tra 21 e 41 m. Que-

sta potrebbe regredire maggiormente nei seguenti tratti:

- 1) settore compreso tra Fiumetto e Focette;
- 2) litorale di Lido di Camaione;
- 3) spiaggia di Viareggio, settore a ridosso del molo nord del porto;
- 4) zona contermina alla foce del Serchio.

La superficie di spiaggia persa potrà variare tra $0,6 \times 10^6$ e $1,5 \times 10^6$ m², mentre il volume di sabbia erosa passa da $4,0 \times 10^6$ m³ per lo scenario ottimistico a $8,0 \times 10^6$ m³ per quello pessimistico.

L'incremento dell'estensione delle aree depresse si verificherà essenzialmente nell'area del Bacino di Massaciuccoli. Tale aumento appare sensibile, ma non mostra significative differenze rispetto ai tre diversi scenari di RSLR.

Tabella 20 - Stima dell'arretramento medio della spiaggia versiliese, della superficie persa e del volume di sedimento eroso per i diversi scenari relativi ad ogni periodo di previsione.

Potenziale Deficit Sedimentario del litorale connesso al RSLR (estensione longitudinale del litorale versiliese considerato: 28 km)				
Periodo previsione	Scenari futuri	Arretramento medio spiaggia (m)	Superficie di spiaggia persa (m²)	Volume di sedimento eroso (m³)
Anno 2025	Scenario minima RSLR	21	$0,6 \times 10^6$	$4,0 \times 10^6$
	Scenario media RSLR	28	$1,0 \times 10^6$	$5,0 \times 10^6$
	Scenario massima RSLR	41	$1,5 \times 10^6$	$8,0 \times 10^6$
Anno 2050	Scenario minima RSLR	41	$1,2 \times 10^6$	$9,0 \times 10^6$
	Scenario media RSLR	73	$2,2 \times 10^6$	15×10^6
	Scenario massima RSLR	144	$3,7 \times 10^6$	24×10^6
Anno 2100	Scenario minima RSLR	91	$2,5 \times 10^6$	24×10^6
	Scenario media RSLR	221	$6,0 \times 10^6$	61×10^6
	Scenario massima RSLR	364	$9,0 \times 10^6$	96×10^6

Nell'anno 2050 la regressione media della linea di riva potrebbe variare tra 41 e 144 m. Il fenomeno sarà particolarmente spinto in tutta la zona ubicata a nord del porto di Viareggio dove, nel caso si verifichi lo scenario pessimistico, il mare supererà gli stabilimenti balneari, arrivando a lambire (e in alcuni punti a toccare) la strada litoranea e le abitazioni più vicine all'attuale linea di costa. Anche dal fosso della Bufalina alla foce del Serchio l'ingressione del mare appare significativa.

La superficie di litorale perso potrebbe essere di $1,2 \times 10^6$ m² per lo scenario ottimistico, di $2,2 \times 10^6$ m² per l'intermedio, e di $3,7 \times 10^6$ m² per il pessimistico; il volume di sabbia erosa potrebbe raggiungere un massimo di 24×10^6 m³.

Le aree interne che risulteranno sotto il livello del mare si andranno ulteriormente allargando, questa volta mostrando incrementi sensibilmente diversi in funzione dei tre scenari di RSLR. Queste differenze risultano particolarmente marcate tra Pietrasanta e Lido di Camaione, nell'area produttiva ubicata ad est di Viareggio e nel settore sud-occidentale dell'area in studio (Villa Salviati - Macchia di S. Rossore).

Lo scenario del 2100 (vedi allegato cartografico) si presenta particolarmente critico: la regressione media della linea di riva potrebbe raggiungere un massimo di 364 m; la superficie di spiaggia persa sarebbe compresa tra $2,5 \times 10^6$ m² e $9,0 \times 10^6$ m²; il volume dei sedimenti erosi dalla fascia costiera oscillerebbe tra 24×10^6 m³ e 96×10^6 m³. A nord del porto di Viareggio, nello scenario pessimistico, tutta la spiaggia attuale sarebbe sommersa e, nel centro abitato, il mare potrebbe raggiungere sia gli

isolati litoranei sia i quartieri orientali; una profonda insenatura sembrerebbe aprirsi tra Marina di Pietrasanta e Le Focette, arrivando fino a 2 km dalla costa.

A sud del porto la regressione della linea di riva dovrebbe essere più contenuta, ma sempre cospicua, fino alla foce del Serchio. In quest'ultimo settore, sempre secondo lo scenario pessimistico, si potrebbe verificare la modificazione più significativa, con una vera e propria ingressione del mare all'interno del Bacino di Massaciuccoli.

In tale caso si formerebbe un'estesa laguna la cui sponda orientale correrà lungo la base dei conoidi pedemontani, quella occidentale interesserà le zone più interne di Viareggio e Torre del Lago, quella settentrionale passerà 3 km a nord di S. Rocchino, quella meridionale arriverà a lambire Migliarino Pisano. La laguna si presenterà frastagliata e caratterizzata dalla presenza di numerosi isolotti; la lama d'acqua potrebbe raggiungere l'altezza di pochi decimetri lungo le sponde e di alcuni metri nel settore centrale, attualmente già in parte occupato dal Lago di Massaciuccoli.

Va sottolineato che quella appena descritta è una situazione puramente teorica, in quanto non contempla la risposta idrodinamica e sedimentaria del Fiume Serchio che, con ogni probabilità dovrebbe impedire lo sfondamento da parte del mare.

Ciò nonostante le aree depresse della piana subirebbero un sensibilissimo aumento: limitati settori depressi verrebbero a crearsi al margine nord dell'area in studio, maggiori estensioni presenterebbero invece le depressioni ubicate tra Marina di Pietrasanta, Lido di Camaiore e Cavezzano.

A sud del fosso dell'Abate tutta l'area dell'ipotetica laguna risulterebbe comunque abbondantemente al di sotto del livello del mare e, quindi fortemente esposta a ripetute alluvioni e/o progradazione del cuneo salino.

Pericolosità Specifica

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

I periodi di tempo in cui si intende operare la valutazione di Hs sono, rispettivamente, 25, 50 e 100 anni. La probabilità di occorrenza del fenomeno è rappresentata dalla probabilità che si verifichi uno dei tre scenari (ottimistico, intermedio e pessimistico) determinati dal modello di abbassamento del DTM e da quello di regressione costiera.

E' opportuno ricordare, infatti, che lo scenario pessimistico è legato al verificarsi del massimo tasso di RSLR previsto, e quindi presenta la minima probabilità di occorrenza. Lo scenario intermedio, funzione del medio tasso di RSLR previsto presenta, conseguentemente, una probabilità di occorrenza intermedia. Infine, lo scenario ottimistico, legato alla minima RSLR, è anche quello che presenta la massima probabilità di occorrenza.

Come già discusso, i tre diversi scenari, associati ad un singolo periodo di predizione, compongono la Carta degli Scenari futuri per quell'arco di tempo. Tale carta riporta l'andamento delle tre possibili nuove linee di riva e la perimetrazione delle corrispettive aree ubicate sotto il livello del mare (discriminando così quali potrebbero essere sommerse dal mare e quali potrebbero essere potenzialmente inondate).

Ognuna delle Carte degli Scenari futuri redatta presenta, in pratica, una serie di aree concentriche delimitate dalle nuove linee di riva e dalle nuove isoipse 0 m s.l.m.

Attraverso l'assegnazione di opportuni punteggi a queste aree (Tab. 21), in funzione della reciproca probabilità di occorrenza, si ottiene una 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 quei settori raggiunti dall'ingressione del mare (settori di pertinenza marina) o a quelle zone che saranno altimetricamente sotto il livello marino ma non raggiunte da questo (settori di pertinenza continentale).

Pertanto, per le aree di pertinenza marina, il maggiore punteggio di Hs è stato assegnato alle zone interne alla linea di riva dello scenario ottimistico; il punteggio medio di Hs riguarda quelle zone comprese tra la linea di riva dello scenario ottimistico e quella dello scenario intermedio; un basso punteggio di Hs è stato associato alle zone comprese tra la linea di riva dello scenario intermedio e quella dello scenario pessimistico. Il minor punteggio di Hs, infine, è stato riferito alle aree sempre al di sopra del livello del mare per qualsiasi scenario, cioè a quelle aree esterne allo scenario pessimistico. Analogo procedimento è stato adottato per le aree di pertinenza continentale.

Tabella 21 - Classi e punteggi di Pericolosità specifica assegnati alle aree sempre emerse, alle aree depresse, e alle aree interessate dall'ingressione marina secondo i diversi scenari di RSLR. Le classi e i punteggi non variano in funzione del periodo di predizione.

Settori di pertinenza marina			Settori di pertinenza continentale		
Tipo	Punteggio	Classe	Tipo	Punteggio	Classe
Aree sempre emerse	10	Molto Bassa	Aree sempre emerse	10	Molto Bassa
Aree comprese tra le linee di costa dello scenario pessimistico ed intermedio	30	Bassa	Aree depresse comprese tra l'isoipsa 0 m s.l.m. dello scenario pessimistico e intermedio.	20	Bassa
Aree comprese tra le linee di costa dello scenario intermedio e ottimistico.	40	Moderata	Aree depresse comprese tra l'isoipsa 0 m s.l.m. dello scenario intermedio e ottimistico.	30	Moderata
Aree comprese nella linea di costa del solo scenario ottimistico.	50	Alta	Aree depresse comprese nella isoipsa 0 m s.l.m. del solo scenario ottimistico	40	Alta

Pericolosità Integrata

La Pericolosità Integrata (H) 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 l'accezione di Varnes e IAEG (1984).

La stima della Pericolosità Integrata da RSLR si basa sulla sovrapposizione della Suscettibilità del territorio con la Pericolosità specifica, attraverso l'intersezione, per analisi topologica, dei relativi strati informativi.

Questo approccio è teso a quantificare l'effettiva possibilità che diversi settori costieri possano realisticamente subire o contrastare l'occorrenza di vari fenomeni dannosi connessi al RSLR (arretramento della linea di costa, ingressione marina, aumento della frequenza e intensità degli eventi meteomarinari estremi, creazione di aree endoreiche, impaludamenti, esondazioni fluviali, emersione e/o salinizzazione della falda superficiale, ecc.).

La somma dei punteggi di Hs ed S, che segue lo stesso criterio per ogni periodo di predizione, è mostrata in forma grafica nell'abaco di Figura 6.

Sugli assi delle ordinate si hanno i punteggi di Pericolosità specifica, che rappresentano i valori d'ingresso per il calcolo della Pericolosità Integrata: sull'asse di sinistra quelli relativi alle aree di pertinenza marina (che possono variare tra 30 e 50), sull'asse di destra quelli afferenti alle aree di pertinenza continentale (che variano tra 20 e 40); per le aree sempre al di sopra del livello del mare, per qualsiasi

scenario, il valore d'ingresso è sempre 10.

Sulle rette oblique sono invece riportati i valori di Suscettibilità, variabili tra 10 e 30.

La proiezione sull'asse delle ascisse dell'intersezione dei punteggi di Hs e S restituiscono quindi i punteggi di H, cui sono associate 6 classi di pericolosità (Tab. 22). Ad esempio, un'area risultante di pertinenza marina con alta Pericolosità specifica (area sommersa dal mare in caso di minimo RSLR, punteggio Hs = 50) e caratterizzata da alta Suscettibilità (punteggio S = 30), risulterà in estrema Pericolosità Integrata (punteggio finale 80); un'area di pertinenza continentale con alta Pericolosità specifica avrà, invece, un valore di ingresso pari a 40 e, se fosse caratterizzata anche da alta Suscettibilità avrebbe un punteggio finale di 70 ricadendo, quindi, nel campo di alta (e non più di estrema) Pericolosità Integrata; un'area sempre emersa per qualsiasi scenario (punteggio Hs = 10) potrà ricadere in classi di Pericolosità Integrata che variano da molto bassa a bassa (punteggi da 10 a 40) in funzione della Suscettibilità di quella porzione di territorio. Sulla base di tali classi sono state redatte tre Carte di Pericolosità Integrata, una per ogni periodo di predizione.

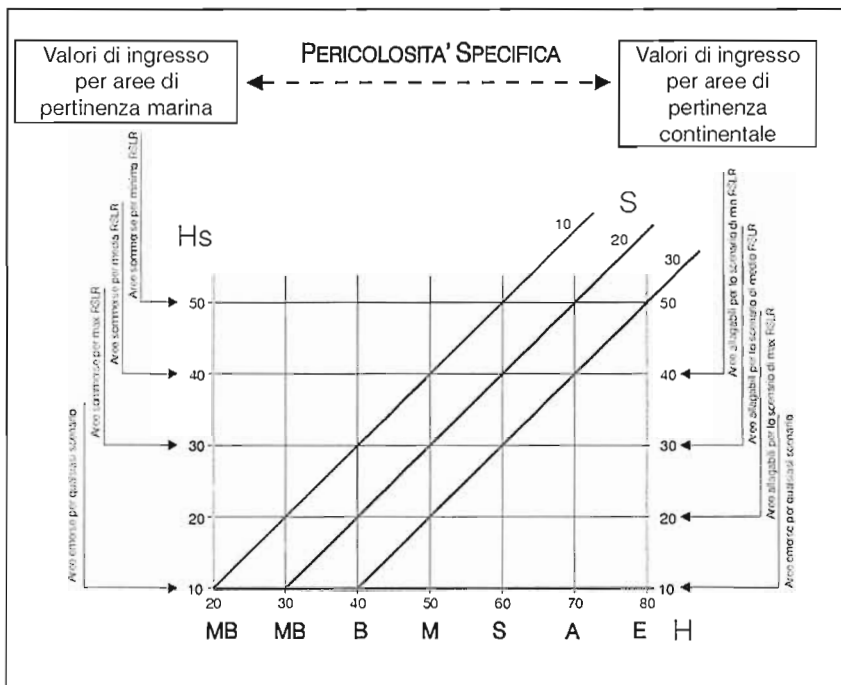


Figura 6 - Abaco per il calcolo della Pericolosità Integrata.

Tabella 22 - Punteggi e Classi di Pericolosità Integrata da RSLR per i diversi settori della pianura versiliese.

Pericolosità Integrata anno 2025, 2050 e 2100			
Settori di pertinenza marina		Settori di pertinenza continentale	
Punteggio	Classe	Punteggio	Classe
20 – 30	Molto bassa	20 – 30	Molto bassa
40	Bassa	40	Bassa
50	Moderata	50	Moderata
60	Sensibile	60	Sensibile
70	Alta	70	Alta
80	Estrema	-----	

La Carta di H per l'anno 2025 mostra che la maggior parte della piana costiera presenta un valore di Pericolosità Integrata molto basso. Il territorio ad elevata pericolosità per RSLR è limitato ad una ristretta fascia della spiaggia posta a nord del porto di Viareggio; a sud del porto questa classe riguarda settori ancora più modesti e la restante porzione di spiaggia è caratterizzata sostanzialmente da pericolosità da molto bassa a bassa. Il risultato scaturisce dal fatto che l'erosione della spiaggia a nord del porto sarà in parte sfavorita dall'esistenza di un insediamento urbano continuo e quella a sud (per altro in avanzamento fino alla foce del Serchio con tassi di 2-3 m/anno) dalla presenza di un sistema dunare ancora in buono stato di conservazione. A sensibile pericolosità appare buona parte del Bacino di Massaciuccoli e la zona denominata "Macchiola di Pietrasanta".

Queste aree non saranno direttamente vulnerate dal mare, piuttosto potrebbero essere ripetutamente allagate in virtù della loro bassa classe altimetrica, del basso valore di soggiacenza e delle litologie poco permeabili che ivi sussistono. Il settore del Paduletto, tra il Fosso Motrone e quello dell'Abate, presenta pericolosità da bassa a sensibile; anche qui, oltre ad una elevata Pericolosità specifica, sussistono fattori predisponenti rappresentati da bassa altimetria e soggiacenza, eventi alluvionali storici, litologie poco permeabili e paleomorfologie lagunari. Per l'anno 2050 la situazione risulta già sensibilmente peggiorata. Le modificazioni maggiori riguardano la spiaggia, soprattutto a nord del porto di Viareggio. Qui la pericolosità da ingressione del mare varia da moderata ad estrema e coinvolge tutto l'arenile e gli stabilimenti balneari. Le aree a sensibile pericolosità del Bacino di Massaciuccoli e della "Macchiola di Pietrasanta" denotano un netto incremento. Per l'anno 2100 la situazione si presenta critica (vedi allegato cartografico). Tutta la spiaggia a nord di Viareggio è in estrema pericolosità da ingressione marina e la probabilità che il mare sommerga i primi 400 m dalla riva risulta da moderata ad alta; inoltre sussiste una moderata possibilità che il mare ingredisca l'area del Paduletto, zona che comunque mostra un'elevata pericolosità da allagamento. Anche la spiaggia a sud del porto rientra ormai nelle classi di estrema o alta pericolosità, in particolar modo in prossimità della foce del Serchio. Proprio quest'ultimo settore suggerisce, però, un'importante considerazione: mentre la modellizzazione relativa allo scenario pessimistico dell'anno 2100 prevedeva che il mare avrebbe allagato la zona contermina al fiume ed ingredito tutto il Bacino di Massaciuccoli, la Carta della Pericolosità Integrata ci dice che tale evento presenta una bassa probabilità di occorrenza; nell'area compresa tra Macchiola di Pietrasanta e Villa Salviati, infatti, le caratteristiche territoriali rilevate dovrebbero agire come parametri mitiganti e conferire al settore una suscettibilità medio-bassa. In ogni caso tutto il Bacino di Massaciuccoli ricadrebbe in sensibile Pericolosità Integrata per fenomeni di alluvionamento, emersione e salinizzazione della falda superficiale; alcune aree del settore occidentale del bacino arriverebbero ad una pericolosità estrema.

Rischio relativo da RSLR

Il Rischio da RSLR in aree di piana costiera è stato definito come la perdita attesa in conseguenza della risalita relativa del livello medio del mare. Tale perdita (proprietà, infrastrutture, attività economiche, ecc.) 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).

Gli elementi esposti sono stati definiti in base alle classi di utilizzo del suolo riscontrabili nella Carta Uso del Suolo elaborata nel presente lavoro. Per la stima del rischio i vari utilizzi del suolo sono stati suddivisi in 5 classi mostranti valori economici confrontabili.

Tali valori vengono espressi in termini relativi, cioè in percentuale rispetto al valore della classe di uso del suolo di maggior pregio nell'area versiliese, e rappresentano dei pesi moltiplicatori nell'analisi di rischio (Tab. 23).

La sovrapposizione della carta di Uso del Suolo così ricampionata e le carte di Pericolosità Integrata permette la redazione delle Carte del Rischio relativo da RSLR per gli anni 2025, 2050 e 2100. Il prodotto dei punteggi relativi alle Classi di Pericolosità Integrata (H) per i pesi connessi all'Uso del Suolo forniscono le classi di Rischio relativo riportate in Tabella 24.

Tabella 23 - Valori economici indicizzati degli elementi a rischio in Versilia.

Tipo di uso suolo	pesi
Zone umide	0,01
Boschi, Vegetazione naturale, Spiagge	0,09
Terreni agricoli	0,19
Aree produttive e Infrastrutture	0,63
Tessuto urbano e Spiagge attrezzate	1

Tabella 24 - Punteggi e classi di Rischio relativo da RSLR in Versilia.

Punteggi finali	Classi di Rischio
0-16	Molto Basso
16-32	Basso
32-48	Medio
48-64	Elevato
64-80	Estremo

Analizzando le carte si nota che, se le più recenti previsioni di innalzamento del livello marino dovessero risultare affidabili, la perdita economica in Versilia, legata ai danni alle infrastrutture e ai centri urbani e all'erosione di cospicui settori di spiaggia attrezzata, sarebbe elevatissima.

In particolare, per l'anno 2100, tutta la spiaggia versiliese risulta a rischio estremo, mentre un rischio da medio ad elevato interessa le zone litoranee abitate di Vittoria Apuana, Forte dei Marmi, Marina di Pietrasanta, Lido di Camaiore e Viareggio (vedi allegato cartografico).

Questo rischio estremo è legato sia all'elevatissimo valore economico della spiaggia sia alla regressione potenziale media della linea di costa, che passa dai 21 m dello scenario ottimistico per l'anno 2025 fino ai 364 m dello scenario pessimistico per il 2100.

Nelle aree interne della piana il rischio da RSLR è generalmente basso o molto basso ad eccezione dei settori orientali di Lido di Camaiore. Anche ampie porzioni delle aree retrodunari versiliesi risultano altamente vulnerabili sia all'alluvionamento sia all'ingressione marina e agli eventi meteomarini.

In queste aree sussistono alcuni modesti settori a rischio da basso ad elevato dove valori medio-alti di Pericolosità Integrata si sovrappongono ad aree abitate (Massarosa, Montramito), industriali, commerciali, o a importanti infrastrutture come la linea ferroviaria e la rete autostradale.

Considerazioni conclusive

E' stata sviluppata una metodologia per una gestione integrata delle aree costiere in previsione dei futuri assetti paesaggistici connessi ai cambiamenti climatici, compatibile con le esigenze di pianificazione territoriale della Pubblica Amministrazione. L'approccio metodologico si è avvalso di una fase di sviluppo concettuale/strategico (vedi Silenzi et al., questo volume) seguita dall'applicazione su un sito pilota (Piana della Versilia) esemplificativo delle diverse problematiche presenti lungo le coste basse nazionali.

Il modello, sviluppato mediante G.I.S., permette potenzialmente: 1) di effettuare previsioni su qualsiasi arco temporale; 2) di considerare parallelamente diversi scenari di previsione di risalita del livello del mare scaturiti da modelli climatici; 3) di modificare in tempo reale il database e di poter, al contempo, creare nuovi livelli informativi; 4) di integrare le caratteristiche intrinseche del territorio (idro-geo-morfologiche, idrologiche, topografiche, ecc.) con i suoi usi e quindi con la componente antropica; 5) di reperire le informazioni necessarie con diversi gradi di accuratezza e, in relazione a

questi, di pesare le diverse informazioni contenute; 6) di catalogare e reperire i dati di cui al punto precedente attingendo dalle collezioni locali (cioè in possesso delle stesse Amministrazioni) e di elaborarli con esigue risorse economiche; 7) di avere uno strumento efficace nella descrizione del territorio ed implementabile sulla base delle esigenze locali.

La possibilità di potere agire a livello locale deriva dalla capacità del sistema di considerare dati normalizzati come definizione finale di ogni livello informativo realizzato. L'applicazione del modello nella piana versiliese, particolarmente vulnerabile agli effetti della RSLR, ha permesso la determinazione dei futuri assetti del territorio, della sua suscettibilità, delle pericolosità e del rischio. Il set cartografico così prodotto consta di 4 carte di base (rilevamenti), di 7 carte U.T.O. e di 5 carte derivate per ogni intervallo di predizione (anno 2025, 2050, 2100), per un totale di 26 tematismi (Fig. 7).

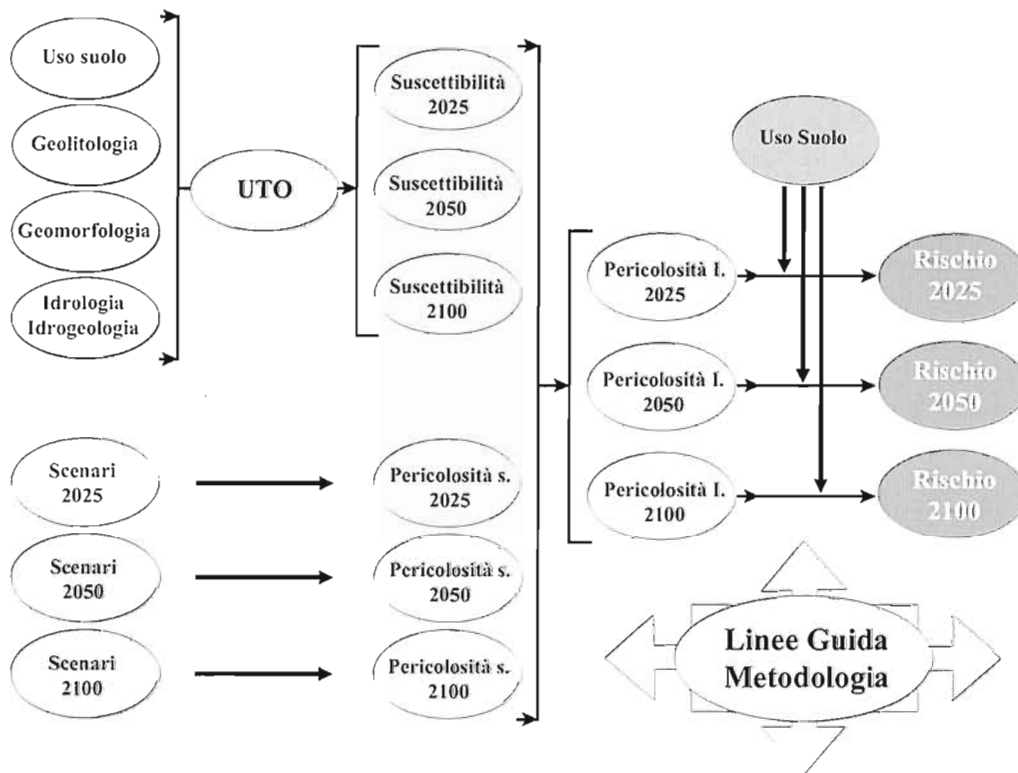


Figura 7 - Riassunto della cartografia prodotta per la valutazione del Rischio da RSLR in Versilia.

I risultati hanno evidenziato come la regressione potenziale media stimata della linea di costa (364 m nello scenario pessimistico per il 2100) è assolutamente rilevante. In particolare, l'area turistica di Viareggio sembrerebbe sottoposta ad elevata probabilità di sommersione, a meno di notevoli interventi preventivi. Inoltre, ampie porzioni delle aree più interne della piana potrebbero essere raggiunte dal mare o subire fenomeni di allagamento. È importante, però, sottolineare che le Carte degli Scenari futuri non rappresentano l'esatta geografia versiliese del futuro ma degli scenari ipotetici dei quali si è valutata la reale probabilità di occorrenza, sulla base delle varie caratteristiche territoriali rilevate.

L'applicazione della metodologia in Versilia ha presentato dei limiti, alcuni intrinseci alle modellizzazioni, altri afferenti alla sola area di studio. Le previsioni di innalzamento del livello del mare, infatti, appaiono ancora dubbie. Basti pensare che le prospettive dei primi anni '80 paventavano un sollevamento compreso tra 0,56 e 3,45 m entro l'anno 2100; tali affermazioni sono state smentite dai fatti e si è assistito ad una revisione verso il basso delle stime. Inoltre, i margini di incertezza delle previsioni

più recenti sono ancora elevati, tanto da risultare dello stesso ordine di grandezza delle variazioni stesse, mentre gli effetti locali, generalmente trascurati, rischiano di essere predominanti. Anche le modellizzazioni inerenti la regressione della linea di costa sotto la forzante della variazione eustatica devono essere prese con cautela e, possibilmente, calibrate sui cambiamenti già occorsi al litorale nell'ultimo secolo. Generalmente tali modellizzazioni non descrivono, in modo quantitativo, quale possa essere, ad esempio, l'impatto delle aree litorali densamente urbanizzate o della futura evoluzione delle dinamiche naturali sul riequilibrio dei profili di spiaggia.

Nel caso specifico della piana versiliese, l'affidabilità dei risultati diminuisce soprattutto con l'aumentare dell'arco temporale di previsione. Questo è dovuto essenzialmente ai valori di subsidenza per compattazione dei terreni proiettati in archi temporali maggiori di 25 anni; tali valori, infatti, rappresentano un'importante aliquota nei tassi totali di RLSR, ma scaturiscono da dati non sufficienti a costruire una curva di esaurimento del fenomeno in funzione degli spessori di sedimento. Manca, ad esempio, una rete di monitoraggio topografico attiva per una determinazione attendibile dei tassi di subsidenza. Inoltre, le evidenze a disposizione non consentono un approccio statistico agli eventi estremi collegati al SLR e al loro impatto sulle opere antropiche, alla caratterizzazione geomorfologica dell'ambiente costiero, né una *back-analysis* per l'uso del suolo. Infine la valutazione economica oggettiva dei beni a rischio si è basata su una relativizzazione degli stessi, escludendone il valore assoluto, la rilevanza naturalistica, storica e culturale.

Anche tenendo conto dei suoi limiti il metodo seguito, esportabile alle altre piane costiere italiane, può essere facilmente perfezionabile con nuove informazioni e fornire, tramite opportune calibrazioni, adeguate risposte alle problematiche elencate. D'altro canto, il principio di precauzione ci suggerisce di valutare i cambiamenti partendo dalle peggiori condizioni che si possono verificare, per non sottostimare i fenomeni naturali e/o antropici dannosi.

La metodologia rappresenta, quindi, uno strumento in grado di considerare un elevato numero di parametri in gioco, soprattutto nella stima della Pericolosità da RSLR. Essa, quindi, può proficuamente essere utilizzata nell'ambito dell'applicazione sul territorio dei piani di Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC), contribuendo agli obiettivi fondamentali del sistema, quali il miglioramento della qualità della vita delle comunità dipendenti da risorse marine, preservando gli aspetti naturalistici, mantenendo i livelli di funzionalità e di qualità desiderati e, infine, riducendo a livelli accettabili i costi relativi ai potenziali rischi.

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.
- Alessio M., Allegri L., Antonioli F., Belluomini G., Improta S., Manfra L. e Preite Martinez M. (1996) - *La curva di risalita del mare Tirreno negli ultimi 43 Ka, ricavata da datazioni su speleotemi sommersi e dati archeologici*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 52: 261-276.
- Antonioli F., Improta S., Nisi M.F., Puglisi C. e Verrubbi V. (2000) - *Nuovi dati sulla trasgressione marina olocenica e la subsidenza della pianura versiliese (Toscana Nord-Occidentale)*. Atti del Convegno: "Le Pianure: Conoscenza e Salvaguardia. Il contributo delle scienze della terra", Regione Emilia-Romagna, 8/10 Novembre 1999. Pp. 214-218.
- Auterio M., Milano V., Sassoli F. e Viti C. (1978) - *Fenomeni di subsidenza nel comprensorio del consorzio di bonifica della Versilia*. Atti del Convegno: "I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo", 9-10 Novembre 1978, Pisa. Pp. 65-82.
- Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G. e Rougerie F. (1996) - *Deglacial sea-level record from Thaiti corals and the timing of global meltwater discharge*. Nature: 382, 241-244.
- Bartolini C., Bernini M., Carloni G.C., Costantini A., Federici P.R., Gasperi G., Lazzarotto A., Mar-

- chetti G., Mazzanti R., Papani G., Pranzini G., Rau A., Sandrelli F., Vercesi P.L., Castaldini D. e Francavilla F. (1982) - *Carta Neotettonica dell'Appennino settentrionale. Note illustrative*. Boll. Soc. Geol. It., 101: 523-549.
- Braaf R., Henderson-Sellers A., Holland G. e Howe W. (1995) - *Climate change prediction, impact evaluation and integrated assessment*. Proceedings of the Users Climate Change Predictions Experts Workshop, Sydney. Pp. 56.
- Cantini P., Testa G., Zanchetta G. e Cavallini R. (2001) - *The Plio-Pleistocene evolution of extensional tectonics in northern Tuscany, as constrained by new gravimetric data from the Montecarlo basin (Lower Arno Valley, Italy)*. Tectonophysics, 330: 25-43.
- Caroti G. (2000) - *Considerazioni sui movimenti verticali nell'area di Pisa*. Atti della 4ª Conferenza Nazionale Asita, Genova 3-6 Ottobre 2000. Pp. 523-526.
- Cavazza S., Celestre P., Gandolfi G., Mazzanti R., Megale P.G., Milano V., Paganelli L. e Palla B. (1985) - *Foglio 104 Pisa*. In: Atlante delle Spiagge Italiane. Dinamismo - Tendenza evolutiva - Opere umane. Progetto finanziato Difesa del Suolo, Sottoprogetto Dinamica dei Litorali, C.N.R., S.EL.CA. Firenze.
- Clark J., Farrel W.E. e Peltier W.R. (1978) - *Global Changes in Postglacial Sea Level: A Numerical Calculation*. Quaternary Res., 9: 265-287.
- De Muro S. e Orru' P. (1998) - *Il contributo delle beachrock nello studio della risalita del mare. Le beachrock post - glaciali della Sardegna Nord - orientale*. Il Quaternario, 11 (1): 19-39.
- Galletti Fancelli M.L. (1978) - *Ricerche sulla subsidenza della pianura pisana. Analisi polliniche di sedimenti quaternari della pianura costiera tra Pisa e Livorno*. Boll. Soc. Geol. It., 97: 197-245.
- 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.
- IPCC (2001) - *WGI Third Assessment Report. Summary for Policymakers, Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginevra, 13-16 Febbraio 2001.
- Hallermeier R.J. (1978) - *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*. 16th Coastal Eng. Conf. Pp. 1493-1512.
- Lambeck K. (1990) - *Glacial rebound, sea level change and mantle viscosity*. Q. J. R. Astron. Soc., 31: 1-30.
- Lambeck K. (1993) - *Glacial rebound of the British Isles, II. A high resolution, high precision model*. Geophys. J. Int., 115: 960-990.
- Lambeck K., Antonioli F. e Silenzi S. (in stampa) - *Sea Level change along the italian coast over the past 10,000 yrs*. Quaternary Science Reviews.
- Lambeck K. e Johnston P. (1995) - *Land subsidence and sea level change: contributions from the melting of the last great ice sheets and the isostatic adjustment of the Earth*. Proc. Fifth Int. Symp. Land Subsidence, Rotterdam. Pp. 3-18.
- Mazzanti R. (1995) - *Revisione e aggiornamento sui movimenti tettonici deducibili dalle dislocazioni nei sedimenti pleistocenici ed olocenici della Toscana costiera*. Studi Geologici Camerti, Volume Speciale 1995/1, Pisa. Pp. 509-521.
- Nisi M.F. (1999) - *Eustatismo ed evoluzione paleogeografica tardo quaternaria del litorale pisano-versiliese nel settore compreso tra Antignano e Viareggio*. Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Roma La Sapienza, A.A. 1998/1999. Pp. 240.
- Nisi M.F., Antonioli F., Dai Pra G., Leoni G. e Silenzi S. (2003) - *Coastal deformation between the Versilia and the Garigliano plains (Italy) derived from the elevations of the Last Interglacial Higestand data*. Journal of Quaternary Science, 18: 709-721
- Palla B., Cetti T., Poggianti M., Mengali E. e Bartolini A. (1976) - *I movimenti verticali del suolo nella Pianura pisana dopo il 1920 dedotti dal confronto di livellazioni*. Provincia e Comune di Pisa, pp.

15-35.

Pirazzoli P.A. (1993) - *Global sea-level changes and their measurement*. Global Planet. Changes, 8: 135-148.

Pirazzoli P.A., Mastronuzzi G., Saliege J.F. e Sanso P. (1997) - *Late Holocene emergence in Calabria, Italy*. Marine Geology, 141: 61-70.

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.

Provincia di Lucca - Settore pianificazione urbanistica e territoriale (2000) - *Carta della Fragilità Idraulica, ambito della Versilia*. Piano territoriale di Coordinamento 2000.

Regione Toscana - Dipartimento Ambiente (1998) - *Carta delle aree inondabili*. Aggiornamento al 1996.

Tongiorgi M. (1978) - *La subsidenza nelle basse pianure dell'Arno e del Serchio: una prima valutazione quantitativa dei fenomeni osservati in rapporto ai problemi della difesa del suolo*. Atti del Convegno: "I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo", 9-10 Novembre 1978, Pisa. Pp. 7-14.

Varnes D.J. e IAEG Commission on Landslide (1984) - *Landslide Hazard Zonation-a review of principles and practice*. UNESCO. Pp. 63.

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