

## La valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle coste: rassegna delle principali metodologie di analisi adottate in ambito nazionale ed internazionale

Saverio Devoti, Massimo Gabellini, Marco Fulvio Nisi, Sergio Silenzi

ICRAM - Istituto Centrale per la Ricerca Scientifica e Tecnologica Applicata al Mare,  
Via di Casalotti 300, 00166 Roma

### Riassunto

Negli ultimi anni il probabile riscaldamento planetario, e la conseguente crescita del livello marino, sono divenuti argomento di interesse per la comunità scientifica internazionale e di crescente preoccupazione per l'opinione pubblica. I potenziali impatti di questi fenomeni sul territorio si configurano come un rischio lento, ma difficilmente contrastabile.

Nel presente lavoro viene esaminata una breve rassegna, a scala internazionale e nazionale, delle principali metodologie usate per la valutazione della vulnerabilità delle aree costiere in seguito ai cambiamenti globali in corso. La stima di tale vulnerabilità è stata affrontata secondo approcci, scale spaziali e previsioni di innalzamento del livello del mare molto diversi tra loro; non sembra possibile, quindi, pensare ad una singola metodica applicabile a tutte le aree costiere mondiali, in quanto queste risultano estremamente diverse per morfotipi, per tassi di RSLR, per il numero e le interazioni delle forzanti in gioco, per assetto socio-economico. D'altro canto, al fine di sviluppare per tempo opportune strategie di difesa, la stima del Rischio da RSLR dovrebbe essere inclusa nei futuri piani di gestione integrata delle zone costiere. Appare quindi evidente l'importanza di una quantificazione dei potenziali scenari di impatto, valutati su di una scala regionale o locale.

**Parole chiave:** valutazione della vulnerabilità, variazioni del livello del mare, aree costiere, rassegna metodologica.

### Abstract

*In the last years, global warming and related problems such as sea level rise have become topics of interest for the international scientific community and a reason for growing worry for the public opinion. The phenomenon's potential impacts on the territory are a slow but hardly opposable risk.*

*The present work is a short review -on a national and international scale- of the main methods used for the evaluation of the vulnerability of coastal areas in relation to the global changes in action.*

*The evaluation of this vulnerability is performed through approaches, spatial scales and sea level rise predictions differing greatly from one another; it is therefore impossible to establish a single method that can be applied to all coastal areas in the world, because these are greatly diverse in terms of morphotype, relative sea-level rise (RSLR) rates, number of parameters and their interactions, socio-economical set up.*

*On the other hand, in order to develop the appropriate defence strategies on time, an evaluation of the RSLR Risk should be included in the future integrated management plans for coastal areas. The importance of a quantification of the potential impact scenarios, evaluated on a regional to local scale, is therefore obvious.*

**Key-words:** Vulnerability assessment, sea-level rise, coastal areas, methodology review.

## Introduzione

Le attuali cognizioni sulla vulnerabilità delle aree costiere all'innalzamento del livello marino (rif. e definizioni in Silenzi et al., questo volume) e al più ampio spettro dei cambiamenti climatici sono ancora incomplete, ma tutte le evidenze indicano il probabile verificarsi di impatti fortemente dannosi nel prossimo futuro. La possibilità di difesa del territorio si può avvalere della realizzazione di una rete di conoscenze adeguata, oltre che di un'attenta valutazione del rischio costiero, finalizzate a migliorare ed aggiornare le strategie di protezione e pianificazione per il contenimento dei possibili danni. Gli studi sulle pericolosità derivanti dall'erosione costiera, oltre che dai molteplici effetti primari e secondari connessi al *Relative Sea Level Rise* (RSLR), sono spesso ancora di carattere sperimentale, soprattutto in ambito nazionale, dove il problema è solo di recente divenuto di attualità.

Fino agli inizi degli anni '80 le tematiche sui cambiamenti climatici, e i loro possibili impatti, erano essenzialmente di pertinenza accademica. In seguito ad un sempre crescente interesse, sono stati elaborati numerosi modelli che hanno condotto a stime progressivamente più dettagliate.

Dall'istituzione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), nel 1988, è stato compiuto un notevole avanzamento nelle ricerche; queste hanno evidenziato che i cambiamenti climatici, durante il ventesimo secolo, sono stati più rilevanti di quanto si pensasse precedentemente: le stime per la risalita della temperatura media globale a partire dal 1900 sono passate da 0.45 °C nel 1996 a 0.6 °C nel 2001; questo effetto è imputabile, con sempre maggiore evidenza, alle attività antropiche degli ultimi 50 anni (IPCC, 2001).

Numerose sono state anche le stime di risalita eustatica per il prossimo secolo. Nel 1982 l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente degli Stati Uniti (EPA) ha sviluppato un progetto sulle possibili oscillazioni del livello del mare, risultanti dall'incremento del biossido di carbonio in atmosfera. Le prime proiezioni indicavano un innalzamento marino globale compreso tra 56.2 e 345.0 cm per l'anno 2100 (Hoffman, 1984). Tali conclusioni sono state successivamente discusse e corrette con i valori di 20 e 140 cm.

Le attuali previsioni IPCC indicano che il mare potrebbe risalire nell'arco temporale 1990-2100 di un'entità compresa tra 9 e 88 cm con un valore medio di 48 cm (Church et al. 2001). Questo innalzamento globale sarebbe dovuto sia all'espansione termica degli oceani sia allo scioglimento dei ghiacci cui, localmente, si sovrapporranno fenomeni regionali come la subsidenza costiera.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati vari approcci per valutare la sensibilità della costa alle perturbazioni climatiche, idrodinamiche ed antropogeniche; nel presente lavoro vengono presi in esame alcuni dei numerosi studi esistenti, per prospettare un quadro di sintesi delle metodologie utilizzate a scala nazionale ed internazionale, oltre che per fornire un utile elenco di fonti bibliografiche.

## Le principali metodologie internazionali

Le prime ricerche organiche sugli effetti negativi indotti dal RSLR sono state condotte da paesi particolarmente sensibili al fenomeno, come l'Olanda e gli Stati Uniti (vedi ad es. Smith e Tirpak, 1989; Titus et al., 1991), che hanno contribuito all'adeguamento delle politiche di sviluppo nazionali. Come descritto da Bijlsma et al. (1996), la risalita marina incrementa la pericolosità potenziale per le infrastrutture e per l'economia locale. Tuttavia, prevedere i meccanismi di reazione di un sistema costiero ai forzanti climatici, sia dal punto di vista naturale sia socio-economico, dipende dalle caratteristiche intrinseche del territorio: saranno perciò necessari studi calibrati a scala locale per identificare le opzioni più appropriate per l'adattamento agli scenari climatici futuribili.

Tra le numerose metodologie strutturate ed applicate per la valutazione degli impatti e della vulnerabilità territoriale al RSLR, le più diffuse risultano essere:

- 1) IPCC Common Methodology (IPCC CZMS, 1992).
- 2) South Pacific Islands Methodology (Yamada et al., 1995).
- 3) US Country Studies Methodology (Benioff et al., 1996).

4) UNEP Handbook Methodology (Burton et al., 1998); quest'ultima è uno sviluppo della metodologia implementata sulla base dell'IPCC Technical Guidelines (Carter et al., 1994; Parry e Carter, 1998).

Nel 1992, la crescente consapevolezza riguardo l'estensione delle problematiche sulle aree litorali, ha condotto il sottogruppo per la gestione della zona costiera dell'IPCC (CZMS) allo sviluppo della Common Methodology (CM) e all'elaborazione di studi regionali e nazionali sulla valutazione di impatti e vulnerabilità; le aree costiere indagate afferiscono a tre diverse tipologie:

- a carattere locale: area compresa tra 10 e più di 100 chilometri;
- a carattere regionale: intera area regionale;
- a carattere globale: intero sistema costiero mondiale.

Gli obiettivi della CM sono:

- identificare e quantificare la vulnerabilità fisica, ecologica e socio-economica ai cambiamenti globali in corso;
- comprendere come lo sviluppo antropico influisca sulla vulnerabilità;
- evidenziare le possibili azioni di mitigazione e determinarne gli effetti;
- valutare la capacità regionale di sviluppare una reazione all'interno di un esteso progetto di gestione della zona costiera.

Nella valutazione della vulnerabilità la CM considera, quindi, i potenziali impatti sulla popolazione, sull'economia, sugli aspetti ecologici, e le conseguenze sociali di questi. Il modello si basa su una previsione di aumento eustatico compreso tra 0.3 m e 1 m per l'anno 2100 ed è articolato in sette fasi principali schematizzate in Figura 1.

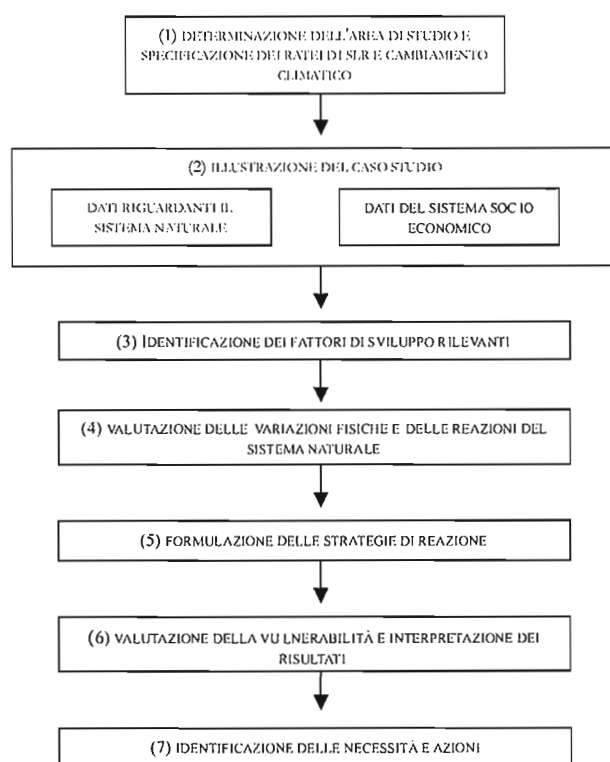


Figura 1 - Sviluppo dei sette punti principali della Common Methodology sviluppata dal Coastal Zone Management Subgroup dell'IPCC.

A partire dalla CM sono stati sviluppati analoghi approcci, applicati sia a grande sia a piccola scala, come quelli descritti in Nicholls e Leatherman (1995) e come la U.S. Country Study Methodology di Leatherman e Yohe (1996).

La CM e le metodologie correlate generano un elevato numero di dati sui possibili impatti del RSLR, ma presentano numerosi punti di debolezza; in primo luogo risultano di difficile applicazione e non sufficientemente adattabili alle differenti condizioni locali. In particolare la CM è stata considerata inadeguata per le piccole isole del Pacifico meridionale, caratterizzate da stili economici peculiari e dalla mancanza di buona parte dei dati di base, e che hanno necessitato di un approccio specifico per i territori insulari (Yamada et al., 1995).

Altri importanti limiti nell'applicabilità della CM sono risultati: la scelta di un singolo scenario di risalita del livello del mare (1 m per l'anno 2100) che può indurre ad una sovrastima degli impatti; la mancanza di dati e modelli per la risposta dei processi sedimentari locali; la politica orientata alla protezione, senza considerare un più ampio spettro di opzioni di adattamento. Fra i principali vantaggi di questo approccio vi è la capacità di evidenziare quale sarà l'estensione necessaria delle protezioni litorali; inoltre, il modello è in grado di considerare anche gli impatti indirettamente connessi al RSLR quali incremento di inondazioni e tempeste.

La UNEP Handbook Methodology (Klein e Nicholls 1998), provvede all'elaborazione delle linee guida dell'IPCC (Carter et al., 1994) in materia di vulnerabilità costiera indotta da cause climatiche, e scaturisce sia dalla sintesi delle esperienze maturate con la Common Methodology, sia dalla valutazione di ulteriori approcci (Kay e Hay, 1993; Gornitz et al., 1994; Nicholls et al., 1995; Yamada et al., 1995; Leatherman e Yohe, 1996; Otter et al., 1996). Tale metodologia è stata ampiamente applicata per identificare le popolazioni e le risorse a rischio, nonché i costi e la probabilità dei possibili responsi agli impatti avversi.

La peculiarità di questo modello è l'adattabilità ai futuribili assetti del territorio ed alle alternative di adattamento; essa incoraggia gli utenti a selezionare quegli scenari e quelle opzioni che, secondo gli obiettivi del paese in studio, sono maggiormente appropriati alla loro specifica situazione. La metodologia UNEP, perciò, si adatta alle locali configurazioni fisiografiche ed ecologiche, presentando la prerogativa di prendere in considerazione tutti i possibili effetti dovuti alla risalita del livello del mare sia di ordine bio-geo-fisico che socio-economico.

Il progetto SURVAS (Synthesis and Upscaling of Sea-Level Rise Vulnerability Assessment Studies; Survas website), affronta un quadro di analisi e sintesi di diverse metodologie, con lo scopo di strutturare una linea guida che permetta di stabilire degli standard comuni per la produzione di future valutazioni di vulnerabilità a scala nazionale e locale (Fig. 2).

Tale approccio, sviluppato utilizzando le informazioni raccolte a scala regionale e disponibile sul web, è stato pensato come uno strumento flessibile, capace di periodiche revisioni e aggiornamenti del database.

Il SURVAS individua alcuni principali obiettivi per la costruzione di modelli comuni delle stime future:

- definire la totalità degli impatti del RSLR;
- distinguere fra impatti primari (come ad es. salinizzazione, allagamenti, ecc.) e secondari (come ad es. gli impatti sulle infrastrutture e le attività economiche o la perdita di particolari ecosistemi, ecc.);
- considerare un maggiore numero di scenari di risalita del livello del mare per l'anno 2100;
- valutare la probabilità di adattamenti spontanei del territorio al RSLR;
- considerare un maggiore spettro di risposte alle mitigazioni da attuare;
- valutare gli impatti residui rispetto ad ogni singolo intervento di mitigazione;
- esaminare i margini di incertezza delle valutazioni realizzate.

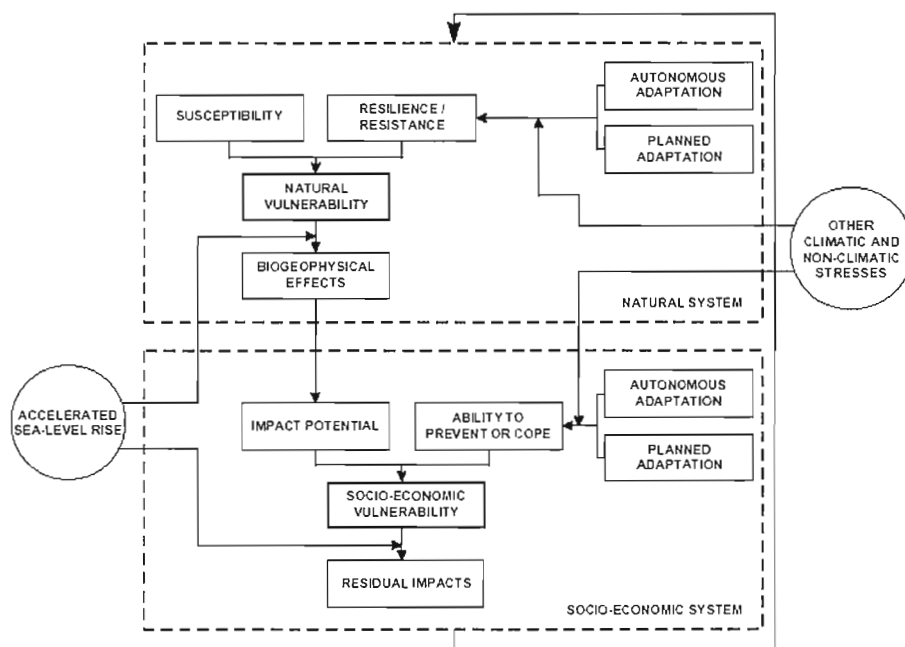


Figura 2 - Struttura teorica degli studi di vulnerabilità costiera (da Klein e Nicholls, 1998; 1999).

Uno strumento utile alla valutazione della vulnerabilità indotta dai cambiamenti globali in corso è rappresentato dall'utilizzo di geoindicatori per la determinazione e il monitoraggio dello stato della costa. Gli indicatori in questione sono rappresentati da una serie di variabili ambientali (Tab. 1), fra loro correlate, che operano su un ampio spettro di scale spaziali e temporali (Forbes e Liverman, 1996). Attraverso l'inserimento degli indicatori nella struttura di un database scaturisce inoltre la possibilità di incrementare sistematicamente le informazioni utili a mantenere sotto controllo le situazioni critiche (Gornitz et al., 1994).

Gornitz e Kanciruk (1989) e Gornitz (1990 e 1991) hanno sviluppato un database a grande scala della pericolosità costiera negli USA, con il fine di identificare le aree maggiormente vulnerabili a fenomeni di inondazione permanente, di alluvionamento episodico e d'erosione, dovuti alla risalita del livello del mare.

I dati, distribuiti su sette variabili (altimetria, litologia, morfologie costiere, subsidenza, variazioni della linea di riva, escursione di marea e massima altezza d'onda significativa), sono stati inseriti in un GIS in coperture separate; ad ognuna è stato assegnato un punteggio in una scala da 1 a 5, assumendo il valore 5 per la classe a più elevata vulnerabilità. Le coperture sono state quindi sovrapposte ed elaborate, attraverso vari algoritmi, combinando i punteggi delle variabili per ottenere indici di vulnerabilità costiera.

Un aggiornamento di questo approccio, che ne conserva la struttura di base, è stato pubblicato da Gornitz et al. (1994). Oltre ad inserire un maggiore numero di parametri, ad es. il clima meteorologico, è stata utilizzata un'analisi di regressione multipla; questa ha consentito di correlare alcune delle variabili, nonché di raggrupparle in accordo al loro contributo verso gli effetti di inondazione permanente, di inondazione periodica e di erosione potenziale. Ognuna di queste tre tipologie di eventi è stata pesata in funzione della loro importanza nella determinazione della vulnerabilità delle aree costiere alla risalita del mare.

Un ulteriore aspetto da evidenziare è la procedura utilizzata per correggere i dati di RSLR, che prende in considerazione i vari meccanismi che influiscono sulle stime. Secondo Gornitz et al. (1994) il trend di SLR, in mm/anno, per ognuna delle stazioni di misura mareale può essere espresso da:

$$SLR = SLG + I + E + Ts \quad (1)$$

dove:

SLR = curva di Sea-Level recente derivata dai dati di marea.

SLG = trend geologico (ultimi 125000 anni).

I = componente glacio-isostatica (uplift/subsidenza).

E = componente eustatica globale recente (100-150 anni).

Ts = movimenti del terreno di breve periodo, compresi i movimenti neotettonici e la subsidenza indotta dall'uomo (emungimenti di gas, di acqua, ecc.).

Tale formulazione non si discosta in termini quantitativi da quelle comunemente utilizzate, ma ha il pregio di considerare ogni aspetto qualitativo del fenomeno (compresi i trend di variabilità geologica, di risalita del livello del mare nel corso dell'Olocene e la componente isostatica che sembra avere un ruolo prevalente nel comportamento reologico dei settori costieri). La validità della metodologia espressa da Gornitz e Kanciruk (1989) e Gornitz (1990; 1991) ha dato luce a ulteriori applicazioni e modifiche. Ad esempio Huges e Brundrit (1992) impiegano gli indici di vulnerabilità espressi dai precedenti Autori su circa 300 km di costa sudafricana. L'approccio di Huges e Brundrit è finalizzato a perimetrare le aree a differente grado di rischio sulla base della localizzazione delle infrastrutture. L'indice di vulnerabilità così sviluppato consiste di una matrice tridimensionale che comprende l'ubicazione dell'area, le infrastrutture e la pericolosità dei fenomeni connessi al RSLR.

Tabella 1 - Parametri per la valutazione del rischio costiero per coste di spiagge sabbiose (da Young et al., 1996).

Parametri \ Rischio	Alto	Moderato	Basso
elevazione del sito	< 3 m	3 ÷ 6 m	> 6 m
variazione della linea di riva	erosione da bassa ad elevata	stabilità	accrescimento
spiaggia: larghezza, pendenza, spessore	stretta e piatta, sottile con fango, radici esposte	larga e piatta, o stretta e ripida	larga con berma ben sviluppata
<i>overwash</i> (tracimazione)	<i>overwash apron</i> (frequente)	<i>overwash fan</i> (occasionale)	assente
posizione del sito in relazione a <i>inlet</i> o foci fluviali	molto prossimo	a vista	distante
configurazione delle dune	assenti	basse o discontinue	alte, continue, senza varchi
morfologia della costa	concava o baia	rettilinea	convessa
vegetazione del sito	scarsa e rovinata	piante e arbusti ben sviluppati	matura, presenza di alberi, assenza di erosione
drenaggio	scarso	moderato	buono
area verso terra	laguna, palude, zona a mangrovie	piana d'inondazione, terrazzi a bassa elevazione	terraferma
protezione <i>offshore</i> naturale	nessuna, acque aperte	frequenti barre al largo	scogliera sommersa, <i>fetch</i> limitato
piattaforma <i>offshore</i>	larga e bassa	moderata	ripida e stretta

Un'altra elaborazione degli indici sviluppati da Gornitz e Kanciruk (1989) e Gornitz (1990; 1991) è stata realizzata da Daniels et al. (1992) nel sud-est degli USA, simulando tre scenari di crescita eustatica. Per ogni area in studio è stata calcolata la somma di porzioni di territorio che potrebbero essere vulnerate dall'inondazione, circoscritte in base alle loro caratteristiche altimetriche. Questo processo è stato ripetuto e pesato secondo diverse configurazioni, valutando gli effetti delle difese costiere sui processi di inondazione.

Il risultato identifica tre classi di vulnerabilità, determinate secondo lo stato di inondazione (permanente o episodica) e il grado di erosione potenziale. In una recente pubblicazione Gornitz et al. (2002) applicano un'evoluzione della già collaudata metodologia all'area metropolitana di New York. Gli Autori zonano le aree a maggior rischio in funzione dei valori economici e della densità abitativa. L'applicazione di modelli di regressione costiera e di proiezioni basate sulla correlazione tra le variazioni storiche della linea di riva e le variazioni del livello del mare a livello locale, gli permettono di stimare i quantitativi di sabbie necessari al mantenimento delle spiagge e delle aree a rischio. Tale approccio ha il pregio di utilizzare diverse stime di risalita del livello del mare integrate da modelli per la quantificazione dei fenomeni di tempesta e di uragano.

Flemming e Townend (1989) sviluppano un database per gestire circa 750 km della fascia costiera dell'est Anglia (U.K.). Il progetto è finalizzato a determinare e cartografare le variazioni lungo la linea di costa di numerose variabili (gli Autori ne impiegano ben 19) e a definire le correlazioni esistenti tra le variabili stesse e la loro influenza sulla vulnerabilità all'erosione della linea di riva. Dove necessario sono state effettuate ulteriori valutazioni per meglio definire le variabili e i forzanti dei settori costieri, attraverso la definizione delle condizioni ondometriche, del regime delle correnti, degli effetti dei venti locali su di esse, dei profili di spiaggia durante gli ultimi 10-25 anni, del massimo innalzamento del livello del mare, dei movimenti tettonici e della subsidenza. I dati scaturiti sono stati elaborati tramite un GIS, permettendo quindi al sistema di gestire strutture di informazioni sia semplici che complesse.

Huges et al. (1992) applicano un'analisi di vulnerabilità alla baia di Walvis (Namibia) utilizzando cinque categorie di impatti potenziali: 1) l'aumento dell'erosione costiera, 2) l'incidenza di inondazioni e alluvionamenti, 3) l'incremento dell'intrusione salina, 4) la risalita della tavola d'acqua, 5) l'incremento degli eventi estremi con conseguente riduzione della capacità di difesa del sistema costiero. Gli Autori si avvalgono di tre differenti scenari di risalita del livello del mare, +20, +50 e +100 cm, applicati rispettivamente alle scale temporali di 35, 90, 110 anni. A partire da questi scenari sono stati utilizzati tre modelli separati per simulare la vulnerabilità della baia. Il primo utilizza il Bruun Rule of Erosion per la modellizzazione dell'erosione costiera, applicato a 11 profili per ognuno dei tre scenari di risalita del livello del mare. Il secondo modello riguarda l'intrusione del cuneo salino all'interno dell'acquifero del litorale, per la cui modellizzazione è stata valutata la pendenza dell'interfaccia, approssimata ad una superficie piana.

Infine, è stato utilizzato un terzo modello probabilistico per analizzare le serie mareali (9 anni di osservazioni) allo scopo di calcolare delle curve del periodo di ritorno del livello medio marino. Questo metodo permette di stimare la probabilità che un certo livello d'acqua ricorra; tale probabilità è funzione di tutte le possibili combinazioni delle maree e delle ondate che potrebbero accadere a quel dato livello. Gli effetti delle inondazioni sono stati predetti assumendo che, al di sotto di -0.9 m, -1.2 m, -1.7 m di quota, l'area costiera sarà alluvionata in relazione a ognuno dei 3 scenari di livello del mare.

In ultima analisi va menzionato l'*Insularity Index* (Gommes et al., 1998) finalizzato all'applicazione nei paesi in via di sviluppo. Fine ultimo dell'*Insularity Index*, definito come il rapporto tra la lunghezza di linea di costa e la porzione di territorio sottesa, è permettere un'analisi globale e statistica su alcune criticità che potrebbero colpire la popolazione sotto condizioni di RSLR. La semplice combinazione tra *Insularity Index* e la popolazione interessata definisce un indice di vulnerabilità costiera: *Vulnerability Index = Insularity Index \* Population Density* (Tab. 2).

L'applicazione dell'*Insularity Index* presenta problemi legati alla fisiografia dei paesi, alla natura frastagliata delle coste, alla distribuzione e all'estensione delle aree di bassa pianura all'interno dei paesi considerati, alla scala alla quale la lunghezza della linea di costa viene calcolata. Questo indice è limitato dall'assunto di base che presume una distribuzione uniforme della popolazione, mentre nei paesi in via di sviluppo solitamente si registra un'insufficienza di dati dettagliati proprio sulla distribuzione spaziale di questa.

Nonostante le incertezze nell'applicazione, la metodologia è ancora ampiamente utilizzata in quanto mostra dei notevoli caratteri di semplicità e di significatività, specie se viene impiegato un metodo accurato per calcolare la lunghezza della linea di costa.

E' da rimarcare che, a prescindere dai diversi approcci descritti, la scelta di un considerevole numero di variabili può determinare un effetto opposto a quello di una maggiore precisione e dettaglio dell'indagine. L'utilizzo di analisi statistiche relativamente semplici (tipo *cluster analysis*), permette di determinare quelle variabili che hanno maggiore significato nella valutazione della vulnerabilità di una data area; consentendo di assegnare un peso diverso ad ogni parametro o associazione di parametri.

Tabella 2 - Valori del *Vulnerability Index* e dell'*Insularity Index* calcolati per alcune aree costiere (da Gommès et al. 1998).

Paesi	Insularity Index	Vulnerability Index
Libya	0.0010	0.0030
Zaire	0.000016	0.031
United States	0.0022	0.063
Sweden	0.0078	0.17
Nicaragua	0.0076	0.24
Belgium	0.0021	0.70
Italy	0.026	4.9
Netherlands	0.013	5.0
Greece	0.10	8.3
United Kingdom	0.051	12
Jamaica	0.028	21
Mauritius	0.096	52
Anguilla	0.67	77
Gaza strip	0.11	230
Singapore	0.31	1700
Tokelau	10.1	1500
Maldives	2.1	1800
Monaco	2.2	36000

### Le principali metodologie italiane

Il bacino del Mediterraneo è incluso tra le regioni più vulnerabili alle variazioni climatiche in corso, sia a causa della forte sensibilità dell'area e della limitata adozione di misure di difesa e mitigazione da parte delle diverse realtà nazionali, sia per la presenza di zone umide e di aree urbane costiere di particolare pregio storico ed artistico (Jeftic et al. 1992; Hoozemans et al. 1993; Nicholls and Hoozemans 1996; Jeftic et al. 1996).

Inoltre, visti gli esigui ratei di innalzamento eustatico previsti per il solo Mare Mediterraneo (vedi Silenzi et al., questo volume), è verosimile che l'impatto dei potenziali mutamenti climatici si esplicherà principalmente nell'intensificarsi di problematiche già esistenti, quali l'intrusione del cuneo salino, l'insufficienza d'acqua (potabile ed irrigua), l'allagamento delle piane, l'erosione costiera, la frequenza degli eventi meteo marini estremi, la desertificazione, la frequenza degli incendi.

Fenomeni di questo tipo divengono sempre più frequenti in Italia; ad esempio, dagli inizi del XX



secolo, quasi tutte le foci dei maggiori corsi d'acqua hanno mostrato una tendenza all'erosione, provocata, essenzialmente, dalla riduzione o interruzione degli apporti sedimentari alla costa (Vittorini, 1991). Questa tendenza ha influito sulle adiacenti spiagge, che appaiono sempre più vulnerabili agli eventi di mareggiata (Carbognin et al., 1995).

Gli studi relativi al rischio da risalita del livello del mare nella nostra penisola sono ridotti a poche sperimentazioni, principalmente a scala locale, realizzate prevalentemente nel settore nord Adriatico (Pirazzoli, 1991; Sestini, 1992, Bondesan et al., 1995).

Uno dei siti più vulnerabili dell'intero bacino del Mediterraneo è certamente la laguna veneta e la città di Venezia; questo a causa di peculiari caratteristiche fisiografiche e dell'immenso valore artistico e culturale. La frequenza degli eventi di acqua alta a Venezia è significativamente aumentata durante il ventesimo secolo; questo effetto appare dovuto ad una risalita relativa del livello medio del mare di ben 23 cm (Carbognin et al., 1981; Carbognin e Taroni, 1996) di cui 11 cm sono dovuti all'eustatismo mentre i restanti rappresentano il contributo della subsidenza. La perdita media in elevazione causata dalla subsidenza indotta dall'uomo, è stata infatti di 8-10 cm nella zona di Venezia e di 12 cm nell'area di Marghera (Carbognin et al., 1981). Il livello di +110 cm, definito come limite di un evento di acqua alta eccezionale, agli inizi del XX secolo aveva una frequenza di 4-5 volte per decade; attualmente si superano i 30-35 eventi per decade. Un simile andamento è stato osservato anche per gli eventi di alta marea con limite di 80 cm (Camuffo 1993). Una risalita del livello del mare di 30 cm determinerebbe un incremento della frequenza di inondazione di Piazza San Marco pari a 360 volte per anno (Francia e Juhasz, 1993; Bandarin, 1994).

Il Consorzio Venezia Nuova (1997), prendendo in esame l'area della laguna di Venezia, valuta gli effetti della possibile risalita del livello del mare e il conseguente incremento dell'erosione e sommergione di buona parte delle barene; se i presenti fattori antropici e naturali responsabili dei processi erosivi persistessero, queste potrebbero scomparire in un periodo di 30-50 anni. Lo studio ha portato anche all'identificazione qualitativa dei maggiori impatti del SLR sull'ecosistema lagunare. Questi sono definiti da:

- incremento del livello e del volume di acqua all'interno della laguna, con successiva riduzione dell'ossigenazione del fondale;
- aumento dell'altezza media delle onde generate dal vento a causa della maggiore profondità delle acque, questo effetto aumenterebbe fortemente l'erosione delle tipiche morfologie lagunari,
- crescita della salinità media e della variazione delle temperature medie della laguna come conseguenza del maggiore scambio con il mare;
- inondazione delle porzioni più basse della laguna e del bacino di drenaggio con la conseguente perdita di importanti habitat naturali e di aree occupate da attività antropiche;
- intensificazione dei fenomeni d'erosione costiera.

Sulla base degli studi condotti dal Consorzio Venezia Nuova, il Co.Ri.La., Centro per il Coordinamento delle Ricerche sul Sistema Lagunare Veneziano (1999), ha elaborato due scenari di RSLR per il periodo 1990-2100. Il primo scenario prevede un RSLR di +16.4 cm come conseguenza dell'eustatismo (+1.13 mm/anno) e della subsidenza naturale (-0.4 mm/anno), tassi simili a quelli misurati durante il ventesimo secolo. Questo scenario presuppone che l'effetto del possibile cambiamento climatico, per assumere una significativa influenza sul RSLR, non avrà luogo prima del 2100. Uno scenario più precauzionale prende in considerazione il tasso di eustatismo più elevato registrato nel XX secolo (+1.5 mm/anno a Venezia e +1.7 mm/anno a Trieste). Questo tasso, sommato al contributo della subsidenza naturale, genera uno scenario di +21-23 cm di RSLR.

Un terzo scenario prevede l'utilizzo delle previsioni dell'IPCC (1996) considerando la proiezione IS92a. Secondo tale predizione il livello del mare risalirà di 3.4 cm per il 2100, come conseguenza dell'effetto del riscaldamento globale e della subsidenza naturale. La risalita del livello del mare prevista nei tre scenari causerà un incremento nella frequenza annuale degli eventi di marea che superano

il livello di 100 cm, passando dal presente valore di 7 a 37 eventi nel caso del primo scenario, a 58 eventi nel caso del secondo scenario e 128 eventi considerando il terzo.

Il caso dell'acqua alta appare esemplificativo della complessità degli impatti del cambiamento climatico sulle aree costiere; questi sono strettamente collegati alle variazioni del livello marino, ma dipendono anche da altre variabili come la distribuzione delle pressioni barometriche, la direzione e l'intensità dei venti, la circolazione marina ecc. E' interessante notare come l'analisi sulla laguna di Venezia prenda in considerazione, per due degli scenari valutati, misure di eustatismo e subsidenza locale registrati nell'area nell'ultimo secolo ed estrapolati per il futuro. Tale approccio produce delle stime che potrebbero avere una maggiore probabilità di occorrenza rispetto al terzo scenario.

Un altro interessante lavoro è stato sviluppato dall'Università di Padova nell'ambito del progetto CENAS (*Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, 1998) per valutare la vulnerabilità del nord Adriatico connessa al RSLR (componente eustatica e subsidenza). Il CENAS compie un'analisi alla macro scala dell'area tra Monfalcone e Cattolica (Friuli ed Emilia-Romagna), con la finalità di quantificare l'arretramento della linea di costa e la conseguente inondazione delle aree che sono attualmente emerse. Un'indagine di maggior dettaglio è stata realizzata per le specifiche zone di Rimini, Ravenna e Cesenatico, con l'intento di valutare la distribuzione delle strutture di difesa esistenti e del sistema di dune, nonché di provvedere ad una analisi dell'evoluzione della morfologia costiera e del bilancio sedimentario. Sono stati elaborati vari scenari di subsidenza (Fig. 3), mentre le proiezioni dell'innalzamento del livello del mare sono riferite ai dati IPCC del 1995.

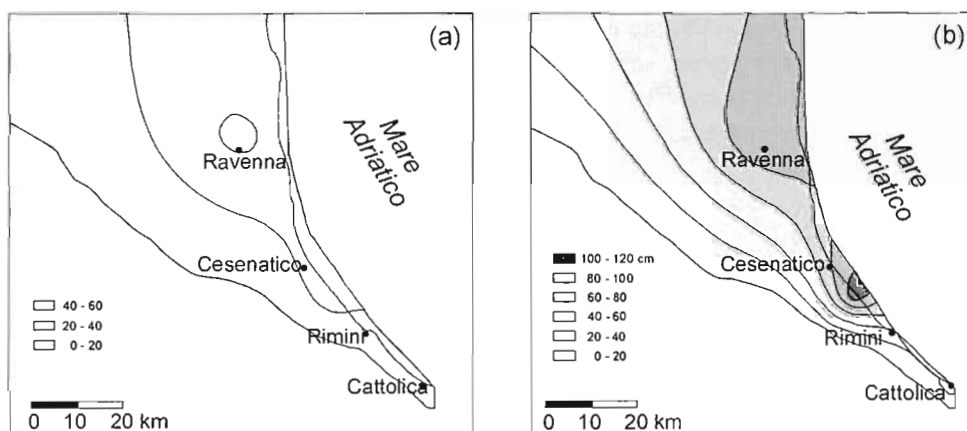


Figura 3 - Carte degli scenari di subsidenza per sfruttamento degli acquiferi simulati per l'arco temporale 1995 - 2050 secondo uno scenario ottimistico (a) e uno scenario pessimistico (b) (da CENAS, 1998).

Il progetto ha quantificato le porzioni di territorio potenzialmente affette da inondazioni temporanee per gli anni 1995, 2050, e 2100 come conseguenza dell'incremento del livello del mare, degli scenari di subsidenza futuri e di particolari eventi di acqua alta caratterizzati da differenti tempi di ritorno (1, 10 e 100 anni), (Fig. 4). Questi ultimi possono causare una temporanea risalita del livello del mare sia attraverso l'azione del vento e delle condizioni di bassa pressione, sia attraverso l'effetto del regime ondometrico in prossimità della costa; la frequenza e la magnitudo dei fenomeni dovrebbe essere influenzata dai cambiamenti climatici. Nel progetto CENAS viene, inoltre, calcolato un fattore di rischio all'inondazione associato ad ogni settore indagato. La determinazione del fattore di rischio discende dalla probabilità di occorrenza di un evento di inondazione (dipendente dal tempo di ritorno), dal valore economico e dalla vulnerabilità dell'area inondata, quest'ultima definita come danno potenziale al valore economico dell'area.

Fra i principali risultati, l'analisi di dettaglio mostra che le aree caratterizzate da un più elevato rischio

di inondazione sono quelle di Cesenatico e Ravenna, mentre nel caso di Rimini il rischio è elevato solo per la parte limitata alla spiaggia. È importante ribadire che gli impatti descritti sono considerati come potenziali.

Dal Cin e Simeoni (1994) sviluppano una classificazione delle aree costiere in funzione della loro vulnerabilità; il sistema ha lo scopo di provvedere ad una corretta gestione del territorio. Il litorale indagato è stato suddiviso in segmenti di circa 2-3 km di lunghezza. Per ogni segmento sono stati selezionati dati relativi a 15 variabili; questi sono stati acquisiti, normalizzati e sviluppati attraverso la Cluster Analysis. Sulla base delle elaborazioni statistiche, i segmenti costieri sono stati suddivisi in gruppi morfologici in funzione delle caratteristiche comuni della spiaggia.

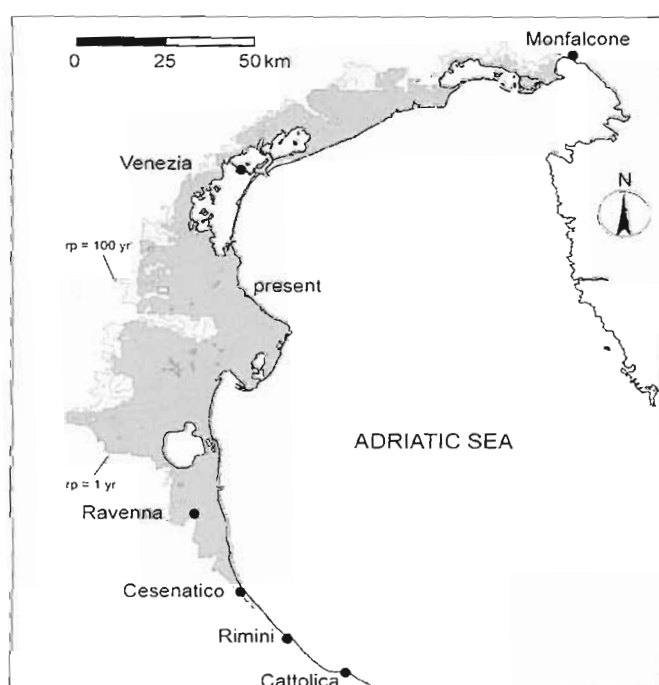


Figura 4 - Aree potenzialmente inondate con tempi di ritorno (rp) di 1 e 100 anni nell'anno 2100 e lo scenario pessimistico di subsidenza. (da CENAS, 1998).

Il primo gruppo comprende sia le spiagge ciottolose sia le spiagge sabbiose contraddistinte da bassa vulnerabilità per la presenza di strutture di difesa e di favorevoli condizioni ambientali; il secondo individua le spiagge localizzate in prossimità delle foci ed è rappresentato da un'elevata vulnerabilità dovuta all'assenza di strutture naturali o artificiali in grado di proteggerla; l'ultimo è caratterizzato da settori in cui l'energia delle onde è elevata e dove sono state realizzate strutture di difesa, ma è stata praticamente eliminata la spiaggia. I risultati dello studio sono illustrati sotto forma di diagrammi a torta, indicanti la percentuale di vulnerabilità della costa all'inondazione. Infine, l'associazione tra la vulnerabilità e il grado di antropizzazione del territorio determina una stima del rischio cui è soggetta la fascia costiera.

Una valutazione di sintesi qualitativa dei potenziali impatti del cambiamento climatico per il territorio italiano è stata realizzata dall'ENEA-Ministero dell'Ambiente. Lo studio ha evidenziato la fragilità e la vulnerabilità di alcune specifiche aree (Fig. 5). Queste includono le zone di pianura del nord Adriatico, la costa della Toscana a nord della foce dell'Arno, la zona contermine alla foce del Tevere, la porzione meridionale del Lazio e la piana del Volturno in Campania; tutti questi segmenti litorali risultano particolarmente vulnerabili, in quanto sono caratterizzati dalla presenza di un dinamico sistema costiero, soggetto a lente ma continue modificazioni morfologiche.

Un recente lavoro a carattere locale, realizzato nella Piana di Fondi dall'ENEA (Caiffa e Leoni, 2003; Antonioli et al., 2003) in collaborazione con la Fondazione Mattei, evidenzia la pericolosità presente nelle piane costiere particolarmente depresse in seguito alle opere di bonifica realizzate. Attraverso l'elaborazione di un DEM e l'integrazione di diverse informazioni territoriali, tra cui geologia e uso del suolo, sono state determinate le aree che potenzialmente ricadranno sotto il livello del mare secondo due scenari di SLR: +17 e +35 cm rispettivamente per il 2050 e per il 2100. Il DEM elaborato ha permesso di estrarre le attuali isoipse 0 m, +17 cm e +35 cm, e di conseguenza individuare le aree che saranno inondate dal mare secondo gli scenari considerati.

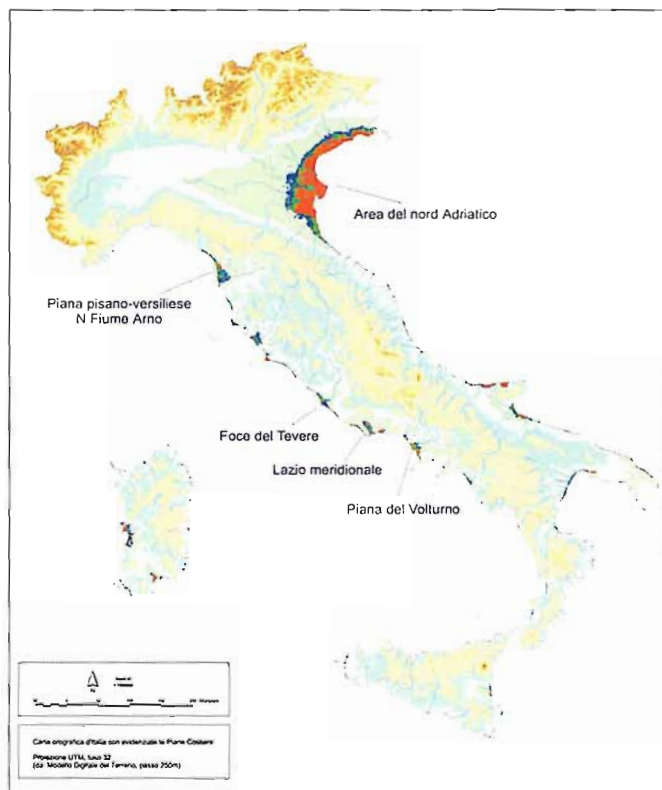


Figura 5 - Le principali aree vulnerabili al RSLR nello studio dell'ENEA-Ministero dell'Ambiente (ridisegnata da Antonioli e Leoni, 2001).

L'analisi ha indicato che le aree urbane potenzialmente sommerse saranno quattro volte maggiori rispetto a quelle attualmente sotto il livello del mare, e le aree agricole una volta e mezza. L'analisi economica per la valutazione del rischio mette in evidenza la buona adattabilità del sistema a questi cambiamenti fisiografici; Gambarelli e Gorla (2003) mettono infatti in risalto come l'attuale rete di bonifica idraulica, ben sviluppata ed efficiente, consentirebbe di avere *“costi incrementali assai minori al valore del danno potenziale”*.

### Considerazioni Conclusive

La valutazione della vulnerabilità ai cambiamenti climatici e all'innalzamento del livello del mare dovrebbe essere inclusa nel più vasto contesto della gestione integrata della zona costiera, al fine di identificare le misure appropriate e le politiche capaci di eliminarne o mitigarne gli effetti dannosi. Le esperienze maturate a livello internazionale indicano che esistono comunque delle difficoltà sia nello sviluppo degli scenari di impatto, sia nell'analisi delle relative azioni di difesa da intraprendere

(Nicholls e Mimura, 1998). I maggiori ostacoli consistono: nella conoscenza incompleta dei principali processi riguardanti il RSLR e le loro interazioni; nella scarsa disponibilità di dati relativi alle attuali condizioni dei sistemi costieri; nella difficoltà di sviluppare degli scenari futuri a scala regionale e locale; nella mancanza di appropriate metodologie analitiche per alcuni specifici impatti da RSLR. Le valutazioni di vulnerabilità esistenti, fatte salve poche eccezioni, sono basate sulla previsione di un innalzamento del livello marino globale di circa 1 m rispetto all'attuale, applicato direttamente come livello del mare relativo (Nicholls, 1995; Nicholls e Mimura, 1998). Inoltre, vengono generalmente presi in considerazione gli effetti diretti dell'innalzamento del livello del mare, come inondazioni ed erosione, mentre vengono ignorati quelli legati ai processi dinamici del sistema costiero, che potrebbero generare anche adattamenti autonomi.

Un aspetto cruciale è che, per ottenere informazioni utili alla pianificazione delle misure di difesa e mitigazione, è importante che la stima della vulnerabilità sia realizzata a scala regionale o locale. Infatti, se i cambiamenti in corso nelle varie aree del pianeta sono simili, le intensità degli impatti generati potrebbero variare a seconda delle differenti caratteristiche di vulnerabilità specifiche di ogni settore; d'altro canto, realistiche proiezioni a scala locale dei cambiamenti climatici e dell'innalzamento del livello del mare sono difficilmente disponibili. Infine è da rimarcare che le previsioni dei cambiamenti fisiografici a lungo termine si basano sulle conoscenze disponibili attualmente, che per molte aree costiere raramente sono costituite da dati ad alta risoluzione (Stive e de Vriend, 1993; Nicholls, 1993). In teoria, se fossimo in grado di identificare quei processi responsabili del rischio, potremmo poter prendere provvedimenti per evitare o mitigare gli impatti associati al rischio stesso (Hennecke et al., 1997). In pratica questo approccio non è ancora efficacemente applicabile, in quanto il rischio è determinato da un'ampia combinazione di processi che, senza un'adeguata analisi, non ne consente una precisa rappresentazione tramite modelli matematici (de Vriend, 1991; Wadge et al., 1993; Cowell e Thom, 1994). Malgrado molti centri di ricerca stiano cercando di sopperire a queste lacune (Goodess e Palutikof, 1999), le simulazioni risultano tuttora eccessivamente complesse e le informazioni sulle variabili fisiche in gioco non sono sempre disponibili.

### Bibliografia

- Antonioli F., Caiffa E., Gambarelli G., Gorla A. e Leoni G. (2003) - *Piana di Fondi: carta del rischio per la risalita del livello del mare*. In: La Risposta al Cambiamento Climatico in Italia, Ed. ENEA. Pp. 96.
- Antonioli F. e Leoni G. (2001) - Relazione tecnica per Min. Amb., Progetto 4.8. Risanamento del Territorio e delle acque, Linea 3b Pianure costiere italiane a rischio di allagamento del mare. Pp. 45.
- Caiffa E. e Leoni G. (2003) - *Contributo del GIS alla modellizzazione delle dinamiche territoriali*. Il caso studio della Piana di Fondi. In: La Risposta al Cambiamento Climatico in Italia, Ed. ENEA. Pp. 25-29.
- Bandarin F. (1994) - *The Venice project: a challenge for modern engineering*. Proc. Inst. Civ. Engrs Civ. Eng., 102: 163-174.
- Beniof R., Guil S. e Lee J. (1996) - *Vulnerability and adaptation assessment: An international handbook*. U.S. Country Studies Program. Environmental Science and Technology Library. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bijlsma L., Ehler C.N., Klein R.J.T., Kulshrestha S.M., McLean R.F., Mimura N., Nicholls R.J., Nurse L.A., Pérez Nieto H., Stakhiv E.Z., Turner R.K. e Warrick R.A. (1996) - *Coastal Zones and Small Islands*. In: Watson R.T., Zinyowera M.C. e Moss R.H. (eds.) *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses - Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. Pp. 289-324.
- Bondesan M., Castiglioni G.B., Elmi C., Gabbianelli G., Marocco R., Pirazzoli P.A. e Tomasin A.

- (1995) - *Coastal areas at risk from storm surges and sea-level rise in northeastern Italy*. Journal of Coastal Research, 11: 1354-1379.
- Burton I., Feenstra J.F., Smith J.B. e Tol R.S.J. (1998) - *UNEP Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Studies*. Version 2.0, United Nations Environmental Programme and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Camuffo D. (1993) - *Analysis of the sea surges at Venice from A.D. 782 to 1990*. Theoretical and Applied Climatology, 47: 1-14.
- Carbognin L., Gatto P. e Mozzi G. (1981) - *La riduzione altimetrica del territorio veneziano e sue cause*. Rapporto e studi dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Vol. VIII., pp. 55-83.
- Carbognin L., Marabini F. e Tosi L. (1995) - *Land Subsidence and Degradation of the Venice Littoral Zone*. Proceedings 6th Int. Symp. on Land Subsidence, The Hague, October 1995, IAHS Publ. 234, Balkema, Rotterdam. Pp. 391-402.
- Carbognin L. e Taroni G. (1996) - *Eustatismo a Venezia e a Trieste nell'ultimo secolo*. Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Tomo CLIV (1995-1996). Pp. 281-298.
- Carter T.R., Parry M.C., Nishioka S. e Harasawa H. (1994) - *Technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations*. Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, University College, London and Centre for Global Environmental Research, Tsukuba.
- CENAS (1998) - *Coastline evolution of the upper Adriatic sea due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence*. Gambolati G. (ed.), Kluwer Academic Pub., Dordrecht. Pp. 344.
- Church J.A., Gregory J.M., Huybrechts P., Kuhn M., Lambeck K., Nhuan M.T., Qin D. e Woodworth P.L. (2001) - *Changes in Sea Level*. In: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J. e Xiaosu D. (eds.) *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge. Pp. 639-693.
- CO.RI.LA. (1999) - *Scenari di crescita del livello del mare per la Laguna di Venezia*. Co.Ri.La., 1: 1-40.
- Cowell P.J. e Thom B.G. (1994) - *Morphodynamics of coastal evolution*. In: Carter R.W.G. e Woodroffe C.D. (eds.), *Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics*, Cambridge University Press, pp. 33-86.
- CVN, Consorzio Venezia Nuova (1997) - *Interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea: Studio di impatto ambientale (SIA) del progetto di massima*. Consorzio Venezia Nuova, Venezia, Italia, Aprile 1997.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1994) - *A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. Journal of Coastal Research, 10: 18-29.
- Daniels R.C., Gornitz V.M., Mehta A.J., Lee S.C. e Cushman R.M. (1992) - *Adapting to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast: the influence of built infrastructure and biophysical factors on the inundation of coastal area*. Oak Ridge National Laboratory.
- de Vriend H.J. (1991) - *Modelling in marine morphodynamics*. In: Arcilla A.S., Pastor M., Zienkiewicz O.C. e Schreffler B.A. (eds.), *Computer modelling in ocean engineering 1991*, A.A. Balkema, Rotterdam. Pp. 247-260.
- Flemming C.A. e Townend I.H. (1989) - *A coastal management database for East Anglia*. Coastal Zone 1989, Proc. 6th Symposium Coastal and Ocean Management, pp. 4092-4107.
- Forbes D.L. e Liverman D.G.E. (1996) - *Geological Indicators in the coastal zone*. In: Berger A. e Iams W. (eds.), *Geoindicators, assessing rapid environmental changes in earth system*. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. Pp. 175-192.
- Francia C. e Juhasz F. (1993) - *The lagoon of Venice, Italy*. In *Coastal zone management: selected case studies*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France. Pp. 109-134.
- Gambarelli G. e Gorla A. (2003) - *Valutazione economica degli impatti attesi dei cambiamenti climatici e dell'adattamento: il caso italiano*. In: *La Risposta al Cambiamento Climatico in Italia*, Ed. ENEA. pp. 43-70.
- 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.

- Goodess C. e Palutikof J. (1999) - *Climate change scenarios for the Mediterranean: a basis for regional impact assessment*. Paper presented at "The impacts of climate change on the Mediterranean area: regional scenarios and vulnerability assessment", Venice, Italy, 9-10 December, 1999.
- Gornitz V.M. (1990) - *Vulnerability of the East coast, U.S.A. to future sea level rise*. Journal of Coastal Research, Special Issue, N. 9: 201-237.
- Gornitz V.M. (1991) - *Global coastal hazards from future sea level rise*. Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol., 89: 379-398.
- Gornitz V.M. e Kanciruk P. (1989) - *Assessment of global coastal hazards from sea-level rise*. In *Proceedings of Sixth Symposium on Coastal and Ocean Management*. ASCE, Coastal Zone 1989, Charleston, South Carolina. Pp. 1345-1359.
- Gornitz V.M., Daniels R.C., White T.W., e Birdwell K.R. (1994) - *The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast*. Journal of Coastal Research, Special Issue, 12: 327-338.
- Gornitz V.M., Couch S. e Hartig E.K. (2002) - *Impacts of sea level rise in the New York city metropolitan area*. Global and Planetary Change, 32: 61-88.
- Hennecke W.G., Cowell P.J. e Thom B.G. (1997) - *GIS based modelling of sea-level rise impacts on food-tide deltas*. In: proceedings 7th Annual NSW Coastal Conference, Ballina, New South Wales: Ballina Shire Council. Pp. 399-408.
- Hoffman J.S. (1984) - *Estimates of future sea level rise*. In: M.G. Barth e J.G. Titus (eds.) *Greenhouse effect and Sea Level Rise*. Van Nostrand Reinhold, New York. Pp. 79-103.
- Hoozemans F.M.J., Marchand M. e Pennekamp H.A. (1993) - *A global vulnerability analysis, vulnerability assessment for population, coastal wetlands and rice production on a global scale*. Delft Hydraulics and Rijkswaterstaat, Delft and The Hague, The Netherlands, 1993.
- Huges P. e Brundrit G.B. (1992) - *An index to assess South Africa's vulnerability to sea-level rise*. South African Journal of Science, 88: 308-311.
- Huges P., Brundrit G.B. e Searson S. (1992) - *The vulnerability of Walvis Bay to rising sea level*. Journal of Coastal Research, 8: 868-881.
- IPCC CZMS (1992) - *Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea*. Report of the Coastal Zone Management Subgroup. IPCC Response Strategies Working Group, Rijkswaterstaat, the Hague.
- IPCC (1996) - *Climate Change 1995, the sciences of climate change*. In: Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A. e Maskell K. (eds.). *Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 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.
- Jeftic L., Milliman J.D. e Sestini G. (1992) - *Climate change and the Mediterranean*. Edward Arnold, London, UK.
- Jeftic L. Keckes S. e Pernetta J.C. (1996) - *Climate change and the Mediterranean, volume 2*. Edward Arnold, London, UK.
- Kay R.C. e Hay J.E. (1993) - *A decision support approach to coastal vulnerability and resilience assessment: A tool for integrated coastal zone management*. In: R.F. McLean e N. Mimura (eds), *Vulnerability Assessment to Sea Level Rise and Coastal Zone Management*. Proceedings of the IPCC/WCC'93 Eastern Hemisphere workshop, Tsukuba, 3-6 August. Department of Environment, Sport and Territories, Canberra. Pp. 213-225.
- Klein R.J.T. e Nicholls R.J. (1998) - *Coastal zones*. In: *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, J.F. Feenstra, I. Burton, J.B. Smith e R.S.J. Tol (eds.), Version 2.0, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands. 7: 1-16.
- Klein R.J.T. e Nicholls R.J. (1999) - *Assessment of coastal vulnerability to sea-level rise*. Ambio, 28: 182-187.

- Leatherman S.P. e Yohe G. (1996) - *Coastal impact and adaptation assessment*. In: Benioff R., Guill S. e Lee J. (eds.), *Vulnerability and Adaptation Assessments - An International Handbook Version 1.1*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pp. 63-76.
- Nicholls R.J. (1993) - *Coastal evolution and accelerated sea-level rise*. In: List J. (ed.), *Large Scale Coastal Behavior Conference*. U. S. Geological Survey, Reston, VA, United States. Pp. 137-140.
- Nicholls R.J. (1995) - *Synthesis of Vulnerability Analysis Studies*. In: WCC'93, *Preparing to Meet the Coastal Challenges of the 21st Century*. Proceedings, World Coast Conference, Noordwijk, Nov. 1993, Rijkswaterstaat, The Hague. Pp. 181-216.
- Nicholls R.J., Leatherman S.P. (1995) - *The Implications of Accelerated Sea-Level Rise for Developing Countries: a Discussion*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 14: 303-323.
- Nicholls R.J., Leatherman S.P., Dennis K.C. e Volonté C.R. (1995) - *Impacts and responses to sea-level rise: qualitative and quantitative assessments*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 14: 26-43.
- Nicholls R.J. e Hoozemans F.M.J. (1996) - *The Mediterranean: vulnerability to coastal implication of climate change*. *Ocean and Coastal Management*, 31 (2-3): 105-132.
- Nicholls R.J. e Mimura N. (1998) - *Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications*. *Climate research*, 11: 5-18.
- Otter H.S., van der Veen A. e de Vriend H.J. (1996) - *A methodology for the analysis of the effects of a sea level rise on the socio-economy of the Med-Deltas*. In: Capobianco M. (ed), *Impact of Climatic Change on North-western Mediterranean Deltas - Volume II: The Present and the Future Report of the final MEDDELTA workshop*, Venice, 2-6 October. Tecnomare S.p.A., Venice, 3:(1-17).
- Parry M.L e Carter T.R. (1998) - *Climatic impact and adaptation assessment - a guide to the IPCC approach*. Earthscan Publications, London.
- Pirazzoli P.A. (1991) - *Possible defenses against a sea-level rise in the Venice area, Italy*. *Journal of Coastal Research*, 7: 231-248.
- Sestini G. (1992) - *Implications of climatic changes for the Po delta and the Venice lagoon*. In: Jetic L., Milliman J.D. e Sestini G. (eds.) *Climate change and the Mediterranean*, Edward Arnold, London, UK. Pp. 428-494.
- Smith J.B. e Tirpak D.A. (1989) - *The potential effects of global climate change on the United States*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Stive M.J.F. e de Vriend H.J. (1993) - *Shoreface profile evolution on the time scale of sea-level rise*. In: List J. (ed.), *Large Scale Coastal Behavior Conference*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, United States. Pp. 189-192.
- SURVAS website: <http://www.survas.mdx.ac.uk>
- Titus J.G., Park R.A., Leatherman S., Weggel R., Greene M.S., Treehan M., Brown S., Gaunt C. e Yohe G. (1991) - *Greenhouse Effect and Sea Level Rise: The Cost of Holding Back the Sea*. *Coastal Management*, 19: 171-204.
- Vittorini (1991) - *La diminuzione del trasporto torbido nei fiumi italiani tra il periodo prebellico e quello attuale*. *Geogr. Fis. Din. Quat.* 14(2): 251-258.
- Wadge G., Wislocki A.P., e Pearson E.J. (1993) - *Spatial analysis in GIS for natural Hazard assessment*. In: Goodchild M.F., Parks B.O. e Steyaert L.T. (eds.), *Environmental modelling and GIS*, Oxford University Press, pp. 332-338.
- Yamada K., Nunn P.D., Mimura N., Machida S. e Yamamoto M. (1995) - *Methodology for the assessment of vulnerability of South Pacific island countries to sea-level rise and climate change*. *Journal of Global Environment Engineering*, 1: 101-125.
- Young R.S., Bush D.M., Pilkey O.H. e Neal W.J. (1996) - *Evaluating shoreline change and associated risk from coastal hazard: an inexpensive qualitative approach*. In: Berger A.R. e Iams W.J. (eds): *Geoindicators: assesing rapid environmental changes in earth system*. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. Pp. 193-206.

---

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