

## Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo

Umberto Simeoni<sup>1</sup>, Carlo Del Grande<sup>2</sup> e Giovanni Gabbianelli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara  
e-mail g23@unife.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Bologna  
Vicolo degli Ariani, 1 - 48100 Ravenna

### Riassunto

Nell'evoluzione della fascia costiera emiliano-romagnola un fattore di notevole importanza è rappresentato dagli abbassamenti di quota del territorio determinati dalla subsidenza sia naturale sia antropica. Questi, uniti al previsto innalzamento del livello del mare, determineranno non soltanto un nuovo assetto altimetrico dell'area ma incrementeranno i già consistenti arretramenti della linea di riva e provocheranno una pesante variazione della circolazione idrica dei canali e delle aree umide ad essi collegate. Lo studio condotto, partendo dai dati di quattro successive livellazioni (1984, 1987, 1993 e 1999), aggiorna l'altimetria della Carta Tecnica Regionale e propone uno scenario dell'area al 2020. Per quest'ultimo sono state sviluppate tre differenti ipotesi: tassi d'abbassamento del suolo costanti, subsidenza attenuata ed, infine, subsidenza attenuata sommata al previsto innalzamento del mare. Le simulazioni condotte pongono in rilievo un fenomeno assai preoccupante: i territori con quote sotto al livello medio marino che nel 1986 avevano un'estensione di 945 ettari (15% della fascia costiera studiata) probabilmente raggiungeranno nel 2020 un'estensione di 3.027 ha (48%). Il futuro assetto territoriale suggerisce, per l'area, la possibilità dell'intensificarsi degli eventi d'inondazione, l'amplificarsi dei fenomeni d'erosione della spiaggia, un dissesto nella circolazione idrica interna ed una maggiore intrusione d'acque salate nelle falde.

**Parole chiave:** costa, subsidenza, innalzamento del livello marino, aree umide, circolazione idrica, Adriatico

### Abstract

*In the Emilia Romagna coast line evolution a very important factor is represented from quote lowering determined by anthropical and natural subsidence that, joined to the forecasted sea level rise, will determine not only a new altimetric land setting, but an increasing of the by now, substantial coast line regression and will provoke a heavy hydraulic circulation variation of canals and humid areas. The research, starting from the data collected during four topographic surveys (1984, 1987, 1993 and 1999), updates the Regional Technical Map altimetry and proposes a scenario for 2020. With regard to the last one, three different hypothesis have been developed: constant land lowering rates, attenuate subsidence and attenuate subsidence added to the forecasted sea level rise. The conducted models simulation highlights a worrying problem: the territory under the medium sea level, of 1986, which had an extension of 945 ha (15% of the examined coastal area), will probably reach 3027 ha (48% of the examined coastal area) in 2020. The future land set suggests the possibility of flooding events intensifying; beach erosion phenomena amplifying; an internal hydraulic circulation disruption, and an increase of salt water intrusion into the ground water table.*

**Keywords:** coast, subsidence, sea level rise, humid zones, hydraulic circulation, Adriatic Sea.

## Introduzione

Le variazioni del litorale sono determinate dall'interazione tra due movimenti: uno orizzontale e l'altro verticale. Il primo, nel caso dell'Emilia-Romagna, è sostanzialmente determinato dagli apporti solidi dei fiumi distribuiti dalle correnti lungo riva, e dall'alterazione della dinamica idrosedimentaria operata dall'uomo. Poiché dagli anni '50 vi è stata una drastica riduzione dei materiali portati dai corsi d'acqua, oggi le spiagge regionali sono, per la maggior parte, interessate da evidenti fenomeni erosivi.

Il movimento verticale è, invece, legato a due principali cause: subsidenza, naturale ed antropica, e variazioni del livello marino. Mentre esistono informazioni sufficientemente accurate sull'abbassamento del territorio, quelle relative alle variazioni eustatiche sono ancor oggi incerte e, spesso, contrastanti (Pirazzoli, 2000). Queste ultime si basano su misure dirette (Emery, 1980), effettuate con mareografi e satelliti, oppure su stime indirette, dedotte analizzando le cause che possono aver variato i volumi d'acqua oceanica.

Studi condotti a tal riguardo propongono, per l'ultimo secolo, una velocità di risalita del livello medio marino di 1,1-1,5 mm/anno (Gornitz et al, 1982; Gornitz e Lebedeff, 1987; Pirazzoli, 1986) e di -0,05 e 1,35 mm/anno, valutando i dati geologici (Trupin e Wahr, 1990; Shennan e Woodworth, 1992), gli effetti dell'aumento della temperatura media globale e la conseguente variazione della densità dell'acqua oceanica (Lisitzin, 1958; Kalinin e Klige, 1978; Barnett, 1983). Le misure provenienti dai satelliti Topex-Poseidon (Cecile et al., 2001) evidenziano invece un innalzamento medio, per il periodo 1993-2000, compreso tra 0 e 5 mm/anno (Cazenave, 1999), con una forte fluttuazione dei dati specie nel periodo 1997-99 per effetto El Niño del 1997.

E' interessante ricordare come nell'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) si prevedano, per questo secolo, valori d'innalzamento del mare compresi tra 14 e 48 cm.

La riduzione del trasporto solido dei fiumi ed i forti abbassamenti avvenuti lungo la costa negli ultimi cinquant'anni (ad esempio 90-100 cm a Cesenatico, Ravenna e Codigoro) hanno reso particolarmente critica l'area litorale. A ciò vanno aggiunti gli interventi a mare che hanno modificato pesantemente, con la costruzione ed il protendimento di moli portuali e d'opere di difesa, la dinamica idrosedimentaria dando origine a fenomeni erosivi non omogenei e d'intensità, in tratti contigui, a volte molto differenti.

Scenari non certo ottimistici possono essere tracciati per il futuro a seguito della prevista accelerazione nella risalita, a livello globale, del livello marino (Steward, 1989; Simeoni e Fierro, 2001). Sommando quest'innalzamento agli abbassamenti indotti dalla subsidenza è ipotizzabile un aggravarsi delle situazioni di disequilibrio costiero nel breve-medio termine. Simulazioni condotte con i più diffusi modelli previsionali evidenziano come per il 2025 si possano ipotizzare arretramenti costieri dell'ordine dei 20-40 m. Significative indicazioni su questo fenomeno possono essere tratte dallo studio condotto sul territorio litorale ravennate (Comune di Ravenna, 1996; Simeoni et al., 1999) basato sull'estrapolazione e la proiezione delle quote di due livellazioni effettuate nel 1986 e 1992. Il territorio, che già in buona parte nel 1992 si trovava a quote inferiori del livello medio mare, continuerà progressivamente ad abbassarsi così che, nell'ipotesi più pessimistica, nel 2050 oltre il 62% raggiungerà una quota prossima allo zero. L'innalzamento del mare avrebbe conseguenze particolarmente nefaste nella zona costiera poiché le aree dunari ridurrebbero notevolmente la loro estensione: 25 % nel 1992, 14% nel 2025 e solo 8% nel 2050. La ricerca si propone di mettere in evidenza le modificazioni dell'assetto altimetrico di un tratto di costa emiliano-romagnola determinate dalla subsidenza e dall'innalzamento del livello del mare. Queste modificazioni di quota relativa tra le terre emerse ed il mare sono di notevole importanza per l'evoluzione morfologica dell'area. Esse possono determinare un incremento del rischio d'inondazione del litorale per eventi di tempesta ed acqua alta, incidere pesantemente sullo scambio idrico tra laguna e mare e, di conseguenza, sulla circolazione idrica interna alle Valli.

### Inquadramento dell'area

L'area di studio, che si estende per circa 21 km di costa (Fig. 1), riguarda un territorio di 6.250 ha compreso tra le provincie di Ferrara e Ravenna, il cui limite amministrativo è segnato dal corso del fiume Reno. L'area è situata a meridione del delta del fiume Po ed è delimitata a mare dai moli portuali di Porto Garibaldi (FE) e Porto Corsini (RA). Queste opere, interrompendo la deriva litoranea delle sabbie, possono essere considerate come limiti di un'unità fisiografica con un bilancio sedimentario autarchico e svincolato dai contributi provenienti dai tratti di costa contigui.

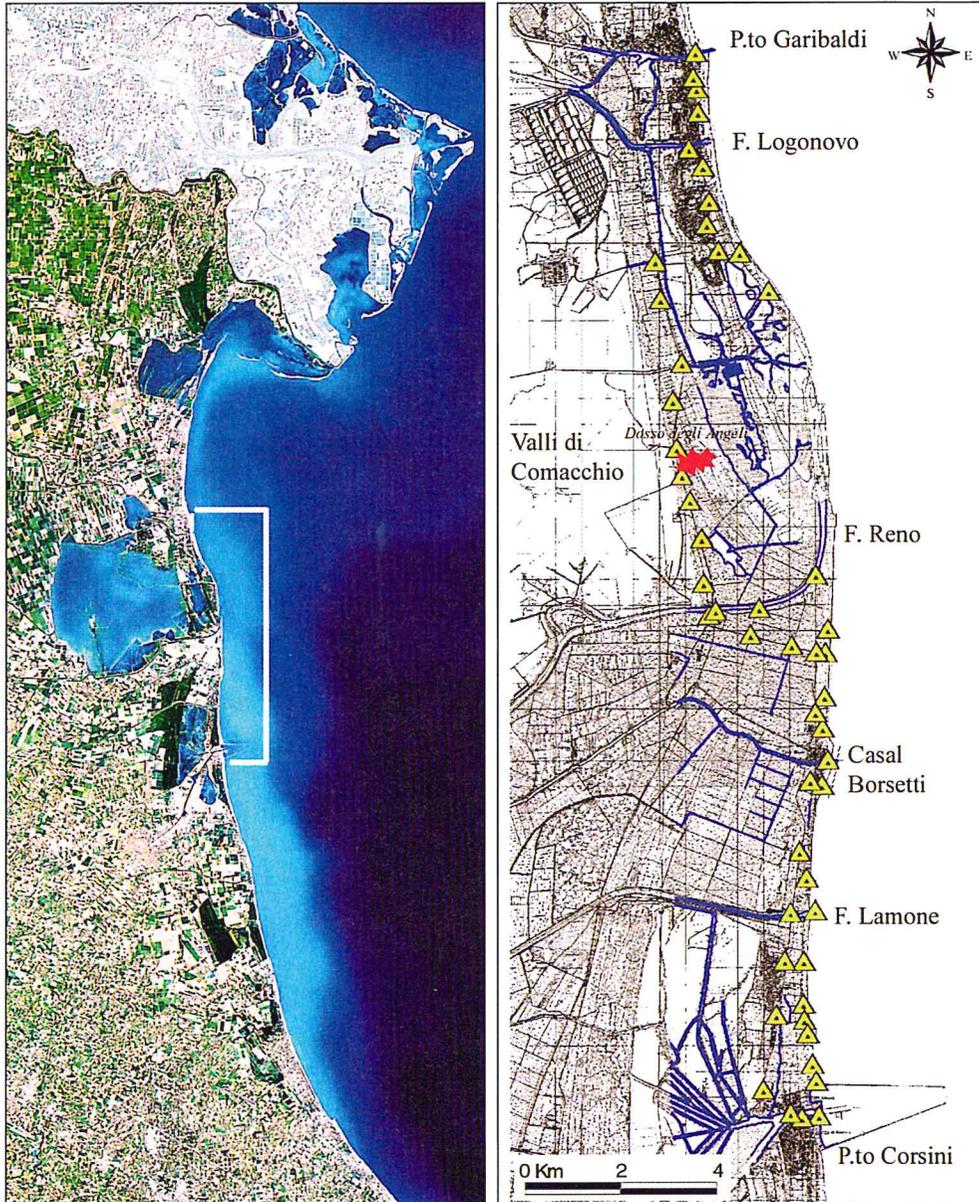


Figura 1 - L'immagine a sinistra consente d'ubicare l'area dello studio (evidenziata dal tratto bianco) posta a meridione del delta del Po e che, nell'altra, viene rappresentata con maggior dettaglio; in quest'ultima sono riportate le ubicazioni dei alcuni capisaldi di livellazione (triangoli verdi) e, in rosso, è evidenziata l'area d'estrazione del pozzo Dosso degli Angeli.

Il litorale, dove mettono foce i fiumi Reno e Lamone ed il canale Gobbino, che mette in comunicazione il mare con le Valli di Comacchio, oggi soffre, per buona parte, di un'evidente crisi erosiva (Simeoni *et al.*, 2000). Le cause vanno ricercate nelle molteplici attività che l'uomo ha intrapreso nel territorio ed hanno ridotto drasticamente le portate solide dei fiumi (Idroser, 1983): cambiamento dell'uso del suolo nei bacini, attività estrattiva dall'alveo, che ha raggiunto punte massime negli anni '60, ed opere di sbarramento costruite lungo i corsi d'acqua.

Secondo le stime Idroser (1996) l'apporto teorico a mare della frazione di fondo del Reno si è notevolmente ridotta dal 1955 (814.000 m<sup>3</sup>/anno) al 1985 (200.000 m<sup>3</sup>/anno). Successivamente, per gli interventi attuati nell'alveo (chiusura delle cave resa operativa nel 1983) e nel bacino, la portata nel 1995 è aumentata a 273.000 di m<sup>3</sup>/anno.

Lungo la costa emiliano-romagnola la marea è caratterizzata da componenti diurne e semidiurne d'intensità quasi pari; ne risulta un ciclo diurno pronunciato, fortemente distorto dalla componente semidiurna, salvo che nei periodi di quadratura. Quote del mare particolarmente elevate (Idroser, 1996) si raggiungono se ad un'alta marea astronomica si sovrappongono gli effetti di una bassa pressione atmosferica, di venti spiranti verso costa e di mareggiate particolarmente violente: ad esempio la massima quota registrata a Rimini è stata di 1,77 m sul l.m.m. nell'anno 1937.

Nello stesso studio s'ipotizza, per il litorale di P.to Corsini, valori d'innalzamento del livello medio del mare in battigia, includendo il set-up da onda, di 1,50, 1,95 e 2,45 m con tempi di ritorno di 1, 10 e 100 anni. L'indagine condotta fornisce inoltre una valutazione dell'altezza delle onde estreme che possono essere stimate tra 2,4 e 3,5 m, per eventi con un tempo di ritorno di 1 anno, tra 3,5 e 4,9 m con 10 anni e di 4,6-6,2 m ogni 100 anni.

Non va inoltre dimenticato come, negli ultimi decenni, l'evoluzione della costa regionale sia stata fortemente condizionata anche dagli accelerati incrementi della subsidenza, di per sé già naturalmente elevata in questo territorio, dovuti all'estrazione d'acque metanifere, alla bonifica di vaste aree vallive, allo sviluppo edilizio legato al boom del turismo balneare ed agli intensi emungimenti delle falde sotterranee per l'alimentazione d'attività idroesigenti. Questo fenomeno, unito ad una mancata compensazione naturale, è la causa principale dell'attuale assetto altimetrico della fascia costiera. Nei confronti delle spiagge a debole pendenza, come quelle emiliano-romagnole, la subsidenza induce non solo arretramenti della linea di riva (diversi metri a fronte d'abbassamenti di pochi centimetri) ma anche un aumento della pendenza dei fondali: in definitiva una riduzione del corpo sabbioso costiero.

Livellazioni di precisione, effettuate lungo i 130 km del litorale regionale, hanno evidenziato abbassamenti compresi tra 5 e 50 mm/anno per il quadriennio 1984-87, ridottisi a 2-36 mm/anno nel periodo 1987-93: ciò equivarrebbe ad una "perdita" in un decennio di 19-20 milioni di m<sup>3</sup> di sedimenti (Idroser, 1996).

## Metodologia

L'analisi delle variazioni altimetriche è di fondamentale importanza per lo studio del territorio costiero emiliano-romagnolo. Senza questa conoscenza valutazioni sulla vulnerabilità e sul rischio d'inondazione, a breve e medio termine, risultano incompleti e non esaustivi.

Come punto di riferimento per la ricerca condotta è stata utilizzata la Carta Tecnica Regionale (scala 1:10.000), i cui rilievi altimetrici risalgono al 1978 mentre quelli planimetrici al 1986, perché presentava un buon dettaglio e comprendeva tutta l'area in esame. Quest'ultima è stata successivamente suddivisa in celle da 50 m di lato, onde facilitare le successive elaborazioni.

Per apportare le giuste correzioni all'assetto altimetrico del territorio sono stati utilizzati i dati delle livellazioni altimetriche condotte negli anni 1978, 1984, 1986, 1993 e 1999 e forniti dall'ARPA (Fig. 1). Poiché nei rilievi condotti non sempre sono state rilevate le quote di tutti i capisaldi, per le correzioni altimetriche dell'area in esame sono state utilizzate 21 misure per il 1984, 24 per il 1986, 29 per il 1993 e 49 per il 1999. Attraverso il confronto delle quote dei capisaldi, rilevate nelle quattro levate altimetriche, è stata effettuata una verifica dell'affidabilità delle misure onde eliminare gli abbassamenti anomali, eccessivi e non giustificati. Ad esempio non sono state considerate due misure

che tra il 1993 ed il 1999 presentavano abbassamenti superiori a 30 cm, dovuti probabilmente allo spostamento dei caposaldi ubicati sulla sommità di arginature.

Le differenze altimetriche, tra le diverse misurazioni effettuate e calcolate per ogni caposaldo, suddivise per gli anni intercorsi tra una levata e quella successiva forniscono le velocità di abbassamento del suolo. Questi valori (mm/anno) sono stati successivamente interpolati utilizzando le capacità di calcolo dello Spatial Analyst, estensione del software GIS ArcView dell'Esri, ottenendo la distribuzione bidimensionale delle velocità di abbassamento del suolo su tutta l'area considerata.

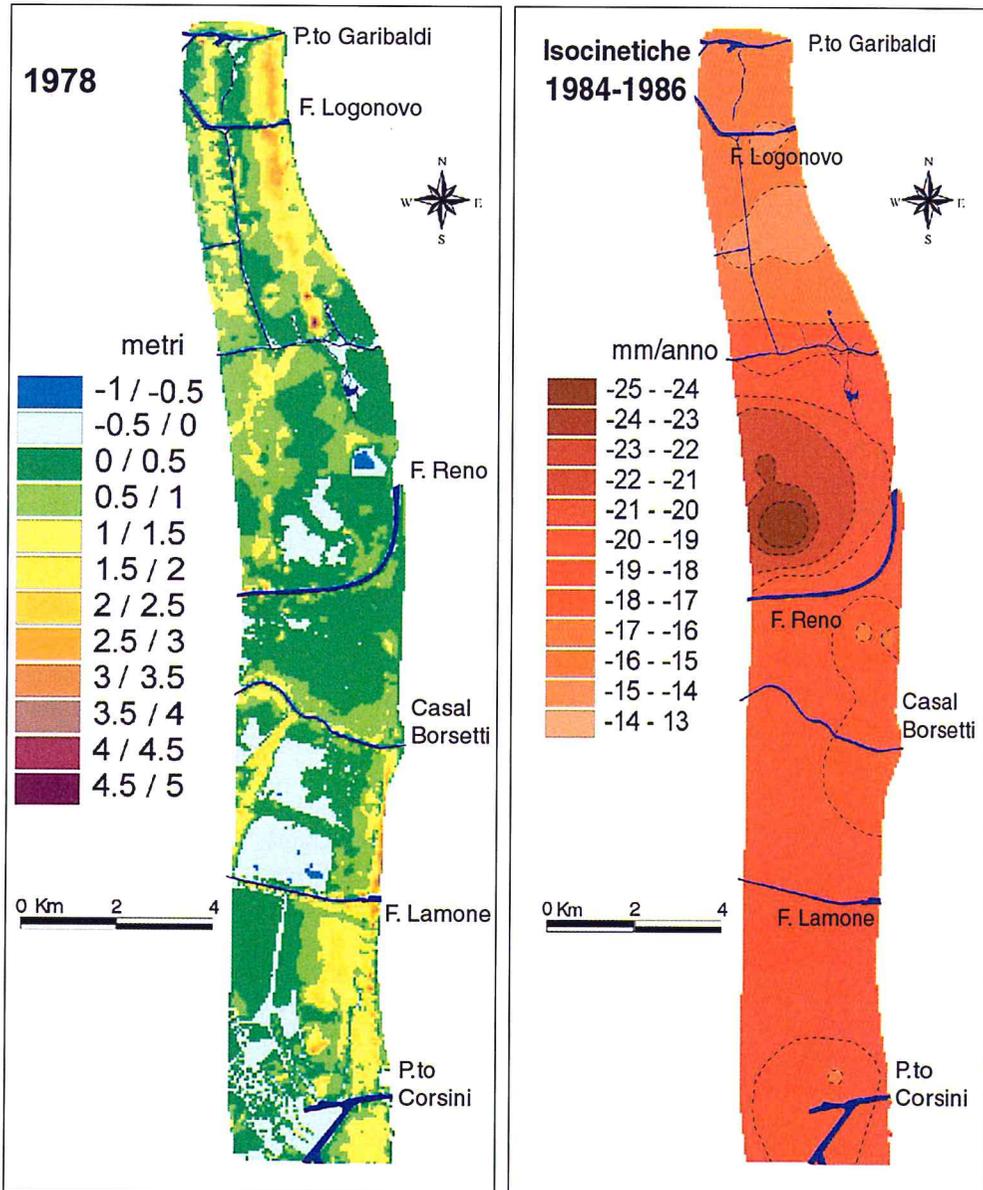


Figura 2 - Rappresentazione altimetrica del territorio al 1978 e mappa delle isocinetiche del periodo 1984-1986.

L'algoritmo scelto per l'interpolazione bidimensionale dei dati (Davis,1986) è quello di Inverse Distance to a Power (IDW). Poiché le misure altimetriche disponibili per il 1978 non sono sufficienti per costruire un modello di velocità per il territorio considerato ma risultano confrontabili con le velocità misurate nel periodo successivo (1978-1984), al dem del 1978 (Fig. 2) è stata dunque applicata la subsidenza ricavata dalle mappe isocinetiche del 1984-1986. Successivamente, per la stima degli effetti della subsidenza al 2020, le quote del modello digitale del terreno sono state "proiettate" nel tempo utilizzando i tassi di abbassamento del suolo ottenuti dalle interpolazioni spaziali.

Per una più attenta simulazione dell'abbassamento indotto dalla coltivazione del campo di gas di Dosso degli Angeli (Fig. 1), oramai esaurito, sono stati approntati due differenti scenari: nel primo sono stati utilizzati gli stessi trend di subsidenza rilevati dal confronto 1986-99 (ipotesi **A**), nel secondo, che appare più realistico, sono stati smorzati gli effetti locali generati dal campo mantenendo solo i termini di subsidenza naturale ed antropica (ipotesi **B**) dovuti all'estrazione d'acqua dal sottosuolo.

I modelli digitali del terreno, per i vari anni considerati, sono stati quindi ottenuti applicando i trend di abbassamento del suolo, forniti dalle isocinetiche, ed interpolando i dati tridimensionali utilizzando, ancora una volta, le funzioni presenti all'interno del modulo Spatial Analyst. La dimensione della cella considerata per l'elaborazione delle carte delle isocinetiche e dei modelli digitali del terreno è di 50 metri.

Infine per lo scenario altimetrico del 2020 si è cercato di valutare le variazioni di quota anche in funzione del previsto innalzamento del livello del mare sulla base dei dati previsionali presenti nell'IPCC 1996. Sono state quindi applicate opportune correzioni al modello previsionale del 2020, che considera un'attenuazione degli abbassamenti nell'area del pozzo Dosso degli Angeli (ipotesi **B**), considerando l'innalzamento del livello del mare, sull'intervallo 1986-2020, pari ad 11 cm, corrispondente al valore medio tra le tre curve proposte nel rapporto dell'IPCC (ipotesi **C**).

### **Discussione dei risultati**

La mappa delle isocinetiche riferita al periodo 1984-86 (Fig. 2) mette in evidenza come i maggiori abbassamenti del territorio siano localizzati ad ovest della foce Reno (24-26 mm/anno), in corrispondenza dell'area di influenza della stazione di pompaggio del campo a gas dell'Agip di Dosso degli Angeli. Procedendo verso nord e sud gli effetti delle estrazioni si attenuano stabilizzandosi su abbassamenti compresi tra 13 e 17 mm/anno per la parte settentrionale mentre in quella meridionale le velocità risultano leggermente più elevate (20-18 cm/anno).

Il modello digitale del 1986 (Fig. 3) evidenzia, alle estremità dell'area studiata, un assetto territoriale sufficientemente rassicurante, per la presenza di zone di retrospiaggia, sufficientemente estese, con quote sul livello del mare tra 1 e 3,5 m. Nella zona centrale, baricentrica alla foce del fiume Reno, i territori presentano mediamente quote comprese tra 0 ed 1 m, ciò priva notevolmente i territori retrostanti di una naturale difesa nei confronti dell'ingressione marina per gli eventi di tempesta ed acqua alta. Da un computo areale risulta che solo il 7.6% del territorio presenta quote al di sopra di 1,5 m, mentre circa il 15% si trova al di sotto del livello medio marino.

L'andamento degli abbassamenti evidenziato per il periodo 1986-99 è assai simile al precedente (Fig. 3). L'area compresa tra il corso del fiume Reno e del canale Bellocchio, il cui tratto terminale assume il nome di canale Gobbino, presenta le maggiori velocità subsidenziali, che sono comprese tra 13 e 19 mm/anno con punte massime nei pressi di Dosso degli Angeli. Lievi sintomi di riduzione del fenomeno sono invece evidenziati nel territorio ravennate, dove gli abbassamenti si attestano tra 9 e 13 mm/anno. Dal confronto tra il modello digitale del 1986 (Fig. 3) e quello del 1999 (Fig. 4) emergono considerazioni non certo rassicuranti: basti ricordare come le aree del territorio con quote superiori ad 1 m si riducano al 5.6%, mentre quelle al di sotto del livello marino aumentino al 28% circa. Un altro fattore di preoccupazione riguarda la distribuzione areale di quest'ultime che coprono vaste

zone a ridosso della spiaggia in prossimità della foce Reno e Gobbino. Appare altresì chiaro come i territori rilevati di retrospiaggia, ben sviluppati nel 1986, si siano notevolmente ridotti. L'elaborazione altimetrica condotta per il 2020 (ipotesi A; Fig. 5) pone in evidenza come, per il solo effetto della subsidenza ottenuto considerando lo stesso trend del periodo precedente (1986-99), le zone costiere a settentrione del Reno, già in crisi all'inizio dell'intervallo considerato, subiscano un abbassamento generalizzato, che si estende anche a sud del corso del fiume. Per quanto concerne l'area ravennate, a meridione del Reno, si può riscontrare un'estensione delle aree con quote comprese tra 0 e -0.5 metri di retrospiaggia, che però sono ancora protette da una stretta fascia di territorio tra 0.5 e 2 m di quota.

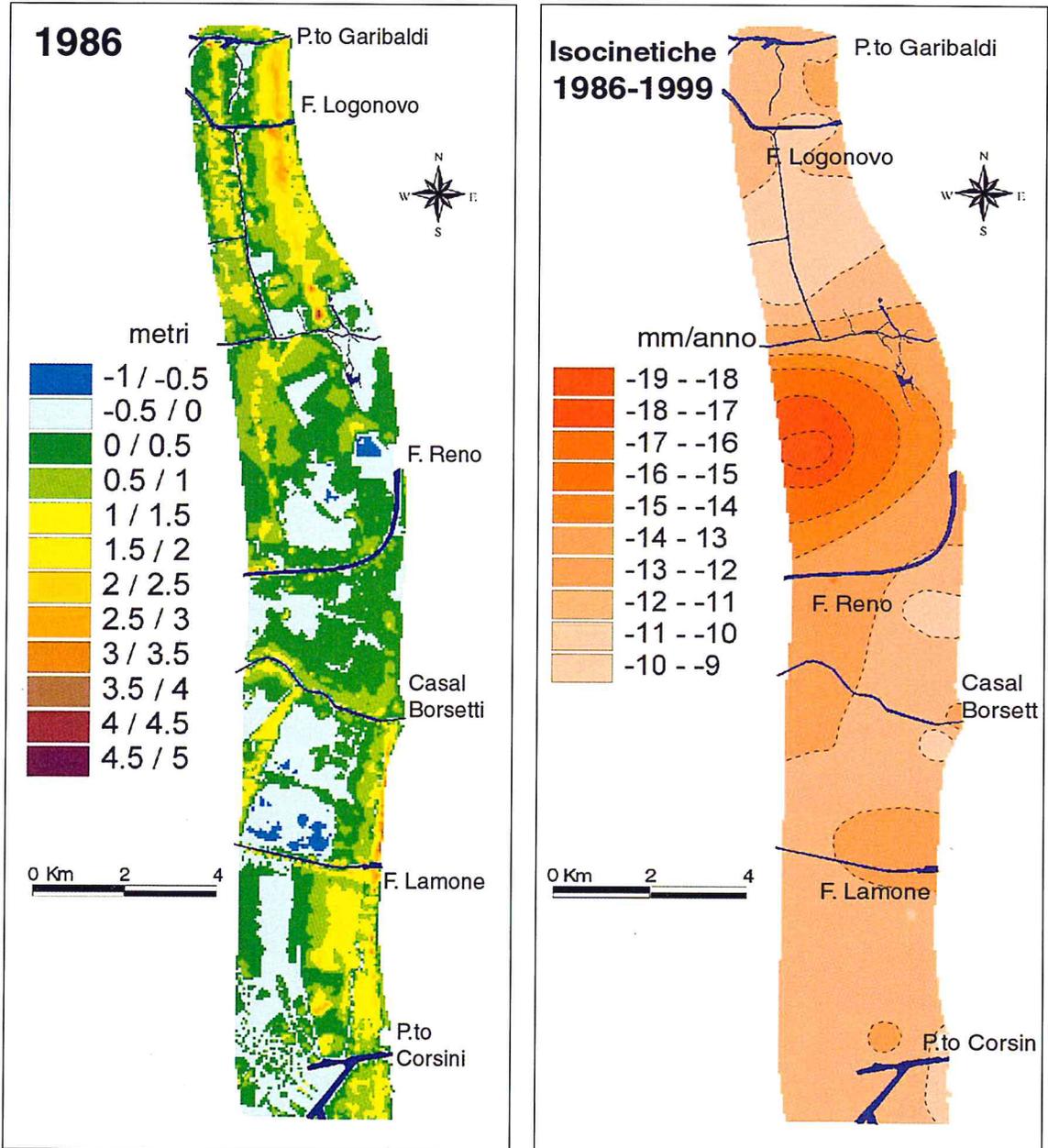


Figura 3 - Rappresentazione altimetrica del territorio al 1986 e mappa delle isocinetiche del periodo 1986-1999.

Dal confronto delle isocinetiche appare evidente come la chiusura delle estrazioni abbia comportato una riduzione localizzata negli abbassamenti del suolo: infatti mentre in prossimità del pozzo di Dosso degli Angeli venivano registrate nel periodo 1984-86 velocità comprese tra 24-25 mm/anno, in quello successivo (1986-99) si presentano valori tra 18 e 19 mm/anno che nell'ipotesi **B** del 2020 si riducono a 12-13 mm/anno (Fig. 4). In quest'ultima ipotesi le elaborazioni condotte suggeriscono che l'area interessata sia approssimativamente baricentrica al pozzo e si sviluppi con un raggio di circa 3 km.

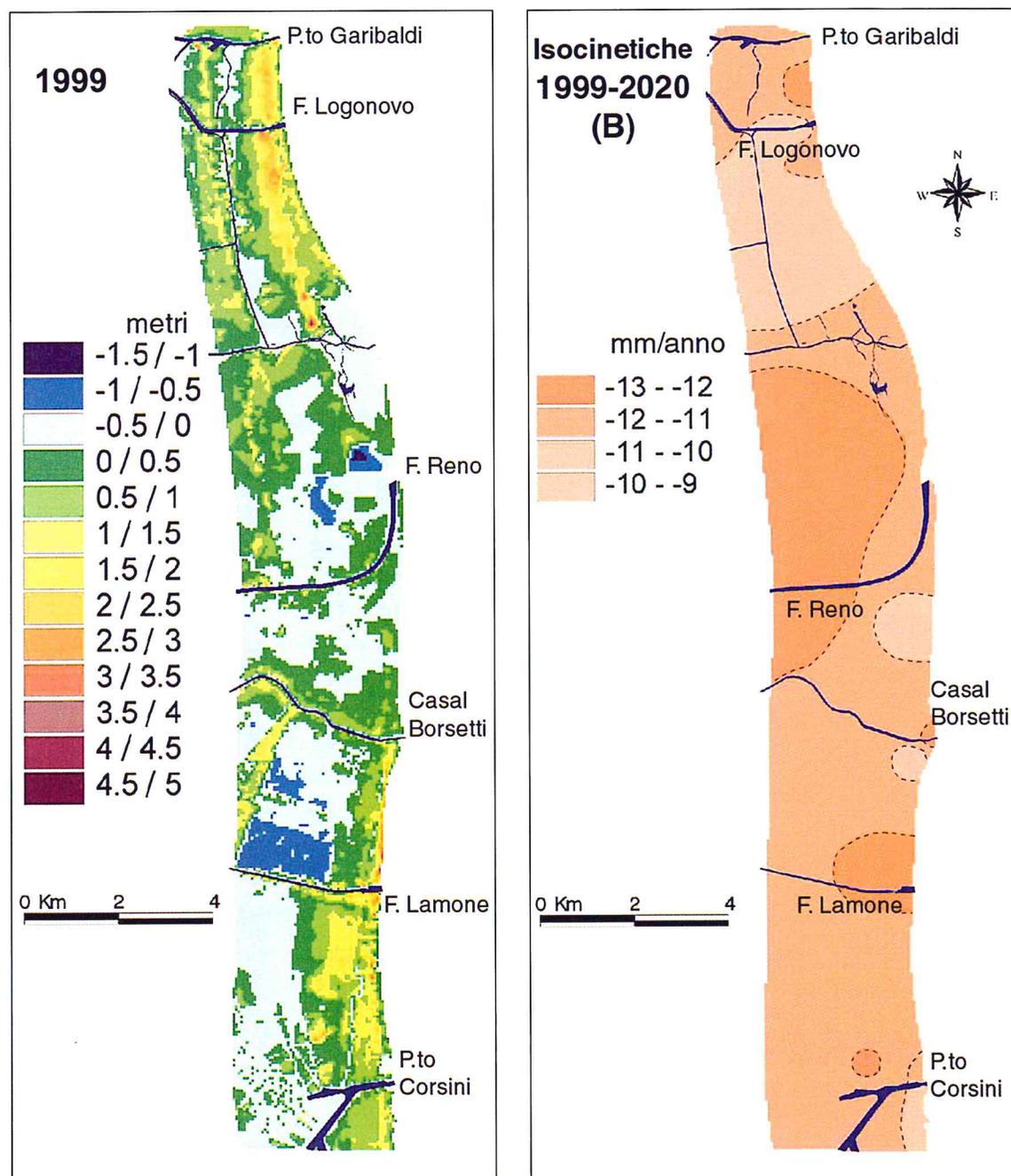


Figura 4 - Rappresentazione altimetrica del territorio al 1999 e mappa delle isocinetiche del periodo 1999-2020 ottenuta modificando i tassi d'abbassamento per effetto dell'esaurimento del pozzo Dosso degli Angeli (ipotesi B).

La successiva elaborazione altimetrica al 2020 (ipotesi B; Fig. 5) non mostra sostanziali differenze rispetto all'ipotesi A. Infatti, lungo il tratto costiero si ripropongono le stesse variazioni e solo verso l'interno si nota una parziale riduzione dei termini d'abbassamento del suolo. Ciò pone in evidenza il fatto che l'effetto subsidenziale generato dal campo a gas si esplica in un'area limitata e confinata rispetto all'estensione del territorio analizzato.

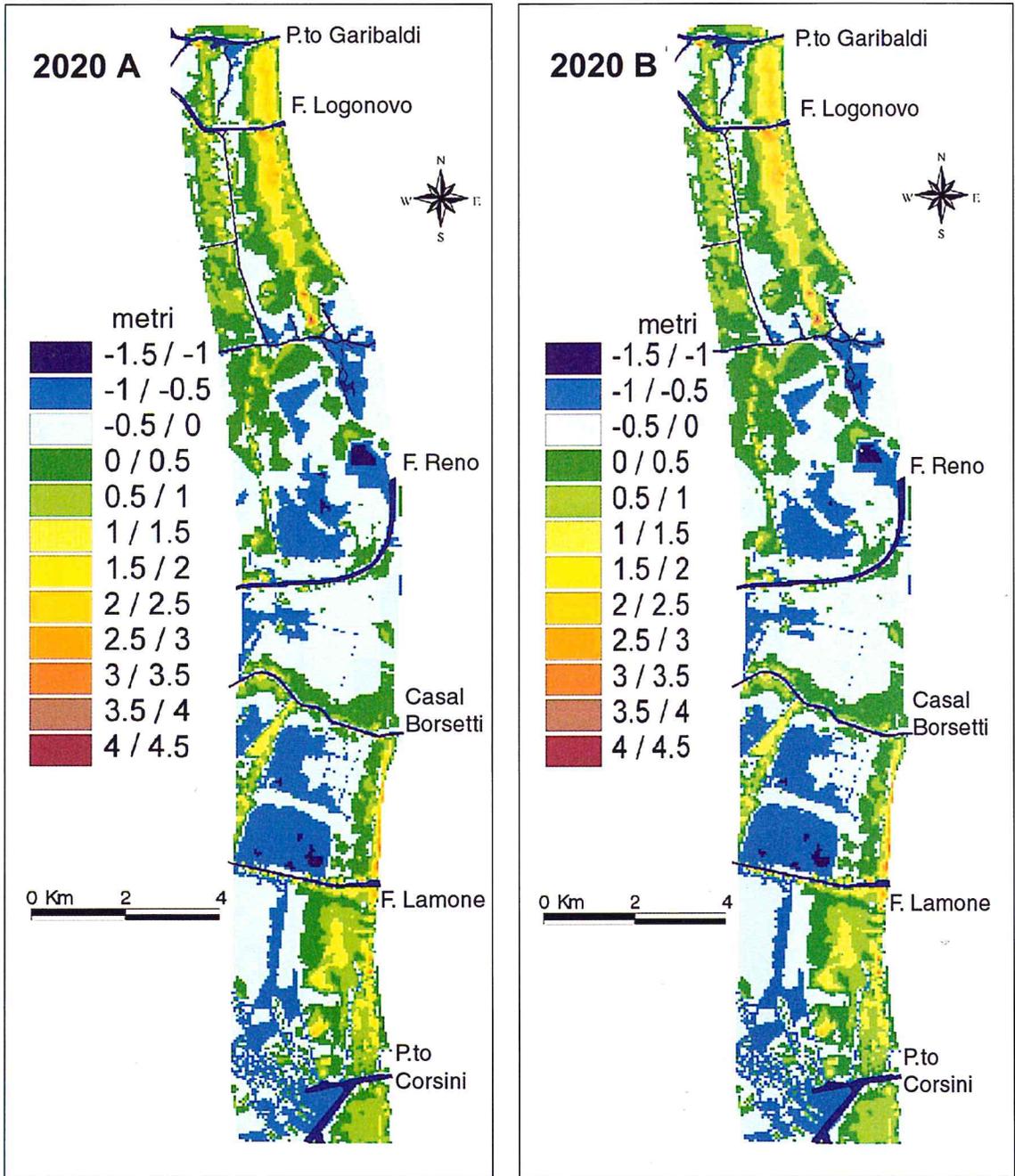


Figura 5 - Assetto territoriale al 2020 ottenuto mantenendo i tassi d'abbassamento uguali a quelli registrati nel periodo 1993-1999 (ipotesi A) e, a destra, modificando i tassi d'abbassamento per effetto dell'esaurimento del pozzo Dosso degli Angeli (ipotesi B).

La carta dell'altimetria al 2020 (ipotesi C; Fig. 6) ottenuta sommando alla precedente un contestuale innalzamento del livello marino non è particolarmente differente rispetto a quella con i soli risultati ottenuti con la sola subsidenza. Rimangono, infatti, valide le stesse considerazioni precedentemente per la zona del Reno e per Porto Corsini. Quest'ultima elaborazione, che pone in rilievo le aree con quote comprese tra -0.5 ed -1 m, evidenzia la predisposizione all'inondazione specialmente per la zona di foce Reno e di Bellocchio, mentre è meno preoccupante la situazione del settore settentrionale dell'area di studio. Da quest'ultima elaborazione si può ipotizzare che nel 2020, per effetto della subsidenza e dell'innalzamento del mare, solo il 3,4% del territorio presenterà quote superiori ad 1,5 m mentre il 48,5% sarà al di sotto di 0 m (Fig. 6).

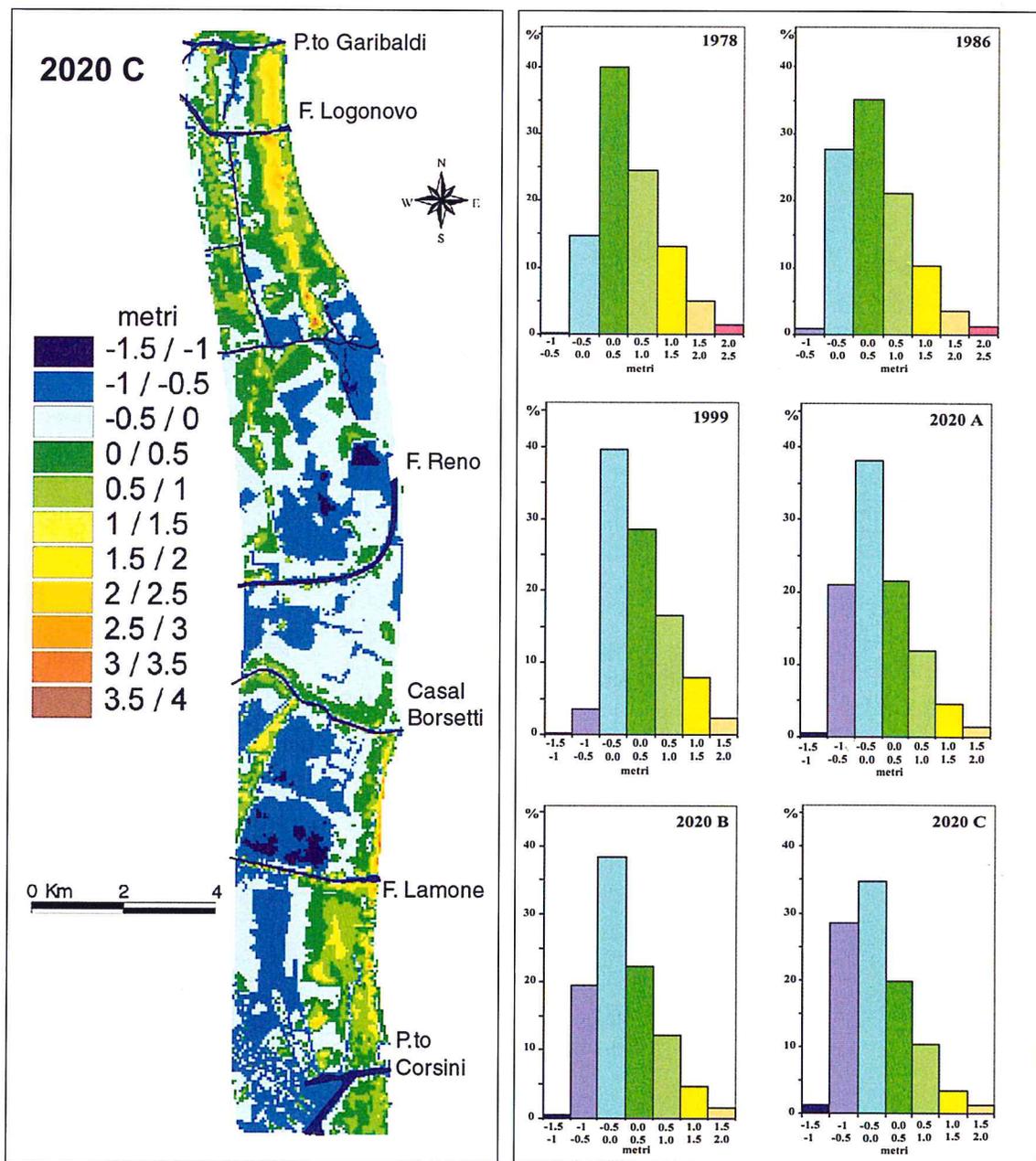


Figura 6 - Assetto territoriale del 2020 ottenuto sommando all'ipotesi B l'innalzamento del livello del mare stimato per il periodo 1986-2020 (ipotesi C); gli istogrammi evidenziano le variazioni areali, espresse in percentuali, delle classi altimetriche comprese tra 2 e -1.5 m, con intervalli di 0.5 m.

I soli termini di variazione altimetrica elaborati non sono certamente sufficienti per rappresentare correttamente l'evoluzione dell'area in esame perché non si è tenuto conto della perdita di volume di sedimento del fondale antistante. Per far ciò sarebbero stati necessari ulteriori ed onerosi calcoli predittivi dell'evoluzione della linea di costa, realizzati con il codice di calcolo LITPACK, in cui oltre ad abbassare le quote delle batimetrie dei modelli, applicando i trend subsidenziali calcolati, sarebbe stato necessario allargare le dimensioni delle griglie di calcolo, già al limite delle capacità computazionali. Ciò avrebbe consentito di valutare sia l'arretramento della linea di riva sia di ottenere una più accurata valutazione planimetrica delle aree interne allagabili.

Altresì, per predire l'evoluzione del profilo di spiaggia in funzione dell'innalzamento del mare, non è stata ritenuta percorribile l'applicazione del Principio di Bruun (1962). Infatti, non sarebbe stato utilizzato in modo conforme a quanto proposto dallo stesso autore, che pone i seguenti limiti all'applicabilità di questo modello fondamentalmente bidimensionale (Bruun, 1983; 1988): la spiaggia deve essere in uno stato d'equilibrio dinamico, dunque con variazioni cicliche (giornaliere, mensili, stagionali) ma che nell'arco dell'anno deve mantenere il proprio profilo medio (bilancio in equilibrio); il movimento dei sedimenti avviene solo in senso trasversale (lungo il profilo) sotto l'azione dell'onda.

L'impossibilità di avere dei profili con bilancio nullo, la presenza di foci fluviali e d'opere antropiche rende difficoltosa l'applicabilità del modello nell'area di studio, senza con ciò nulla togliere alla sua validità.

Pur con le dovute cautele, è possibile, anche sulla base d'esperienze pregresse condotte su aree morfologicamente simili (Simeoni *et al.*, 1999; Gonella, 1998), ipotizzare come la variazione dell'assetto altimetrico del territorio si ripercuoterà sulla circolazione idrica interna del Canale Gobbino e delle aree lagunari e paralagunari ad esso collegate, ubicate nell'area dove è più pronunciato l'effetto subsidenziale.

Poiché la circolazione idrodinamica lungo i canali è tanto più efficace quanto maggiori sono i battenti idrici, l'abbassamento del territorio ed il contemporaneo innalzamento del mare determineranno tiranti idrici più elevati degli attuali ed un miglioramento della penetrazione dell'onda di marea. Nelle aree umide (Vene ed Ancone di Bellocchio), caratterizzate da termini di deflusso propriamente bidimensionali, la subsidenza tenderà ad allargarne i loro confini, coinvolgendo nel gioco dell'immersione ed emersione, secondo i cicli di marea, aree sempre più vaste. Per garantire un'adeguata circolazione idrica di quest'ultime dovrà aumentare la capacità di trasporto dei canali. Tuttavia l'incremento incontrollato dei battenti può determinare una riduzione della velocità di penetrazione delle onde nelle zone più interne ed accrescere la quantità di sedimento depositata, determinando così l'insabbiamento dei canali. Ciò provocherà un aggravarsi dei delicati equilibri che regolano lo scambio idrico tra il mare e le aree interne, e renderà necessario garantire l'efficienza idraulica del tratto terminale e della foce Gobbino, spesso occlusi dalle sabbie trasportate dalla deriva litoranea. All'interno delle aree umide la subsidenza e la variazione eustatica determineranno una riduzione delle aree barenicole, che saranno via via sostituite da zone perennemente sommerse. Nello stesso tempo la circolazione idrodinamica di queste aree, già attualmente difficile, diventerà più problematica perché i flussi interni, non più orientati nella direzione dei canali interclusi tra le barene, tenderanno a depositare materiale trasversalmente alle direzioni di penetrazione dell'onda di marea. La ridotta movimentazione delle masse d'acqua incrementerà le zone d'acque morte favorendo la crescita eutrofica ed un generale depauperamento delle caratteristiche ambientali di queste aree umide.

## Conclusioni

Lo studio ha messo in evidenza come nell'evoluzione della fascia costiera emiliana-romagnola siano determinanti gli abbassamenti del territorio. Quest'ultimi, elaborati con opportuni modelli numerici e coerenti con quelli proposti da studi analoghi (Gabolati *et al.*, 1998), hanno consentito di proporre elaborazioni altimetriche riferite al 1986, 1999 ed al 2020. Gli scenari ottenuti evidenziano come il

previsto innalzamento del mare, nell'evoluzione di quest'area, avrà sì un peso determinante ma sarà sicuramente minore rispetto agli abbassamenti di quota, riscontrati e previsti, per il fenomeno subsidenziale del territorio.

Questi due movimenti determineranno una notevole riduzione nel bilancio delle spiagge ed un arretramento della linea di riva, poiché buona parte dei nuovi contributi sabbiosi portati dai fiumi servirà a compensare la perdita di quota dei fondali antistanti. Il danno, però, sarà molto maggiore rispetto alla perdita del solo arenile perché l'incremento delle aree depresse, in prossimità della costa, e la contemporanea riduzione dei cordoni dunari rappresentano i presupposti per sempre più frequenti ed estese sommersioni, per eventi di tempesta ed acqua alta, del territorio litorale. Questi eventi, per la natura stessa del clima meteomarinario regionale, non avranno notevole intensità e ciò fa sperare che queste possibili inondazioni provocheranno soprattutto danni materiali.

Tutto ciò assume particolare risalto alla luce dei recenti modelli previsionali che mettono in luce la possibilità dell'intensificarsi degli eventi d'inondazione che amplificheranno i fenomeni d'erosione della spiaggia e d'intrusione d'acque salate nelle falde, alterando così i delicati equilibri chimico-fisici delle acque del sottosuolo.

E' inoltre possibile che le variazioni in atto determinino una sempre più rapida occlusione del canale Gobbino, che collega il mare alle aree paralagunari e lagunari, ed una perdita d'efficienza idraulica delle zone umide. Ciò richiederà una maggiore attenzione nei confronti del sistema dei canali mareali onde mantenere un adeguato rapporto tra la loro profondità e quella delle aree umide, in modo da garantire un ricambio idrico ed una circolazione idrodinamica interna sufficienti per la salvaguardia di questi ambienti unici.

Infine, i diversi scenari proposti hanno posto in evidenza come, nella fascia costiera esaminata, la subsidenza indotta dall'estrazione di gas non sia certamente trascurabile, anche se sembra sia confinata in un'area meno estesa del previsto.

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano il dott. W. Zago, l'arch. L. Previati e il Consorzio Ferrara Ricerche per il supporto fornito. Un ulteriore ringraziamento va rivolto all'ing. M. Gonella per le fatiche discussioni, all'ing. M. Preti dell'ARPA di Bologna per i dati forniti, ai dottori A. Zamariolo ed U. Tessari per l'aiuto prestato nelle attività di campagna.

Lo studio è stato condotto nell'ambito del "Progetto Bellocchio" finanziato dal Consorzio del Parco del Delta del Po emiliano-romagnolo, e supportato dai progetti Cofin2000 e CNR-GNDICI (Linea 2, Unità Operativa 51).

### **Bibliografia**

- Barnett T.P. (1983) - *Recent changes in sea level and their possible causes*. Climatic Change, 5: 15-38.
- Bruun P. (1962) - *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. Journ. Waterways, Harbours Div., 88: 117-130.
- Bruun P. (1983) - *Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion*. Coastal Engineering, 7: 77-89.
- Bruun P. (1988) - *The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large scale two- and three-dimensional usages*. Journal of Coastal Research, 4 627-648.
- Cazenave A. (1999) - *Les variations actuelles du niveau moyen de la mer*. C.R. Acad. Sci, Paris, 329: 457-469.
- Cecile C., Cazenave A. e Le Provost C. (2001) - *Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations*. Science, 294: 840-842.
- Comune di Ravenna (1996) - *Valutazione e conseguenze delle variazioni del livello marino medio sulla costa ravennate dovute a subsidenza e ad effetti climatici*. Rapporto Tecnico, Ravenna, pp.270.

- Davis J.C. (1986) - *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, New York.
- Emery K.O. (1980) - *Relative sea levels from tide-gauge records*. Proceedings National Academy Sciences, USA, 77, 12: 6968-6972.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backer K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broker I., Christensen E.D., Elfrink B., Dante A. and Gonella M. (1998) - *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to sea level rise and natural and anthropic land subsidence*. In: CENAS, Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropic Land Subsidence, G. Gambolati (ed.), Kluwer Academic Publ., 1-34.
- Gonella M. (1998) - *Interventi di risanamento della Pialassa del Piombone e di separazione fisica delle zone vallive dalle zone portuali mediante arginatura naturale, Relazione generale*. Studio e progettazione preliminare affidati dal Comune di Ravenna, Servizio Ambiente alla società Hydrodata S.p.A. di Torino, pp. 56.
- Gornitz V. e Lebedeff S. (1987) - *Global sea-level changes during the past century*. In: D. Nummndal *et al.* (eds), Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution. Soc. Econ. Paleont. Miner., Sp. Publ. 41, pp. 3-16.
- Gornitz V., Lebedeff S. e Hansen J. (1982) - *Global sea-level trend in the past century*. Science, 215: 1611-1614.
- Kalinin G.P. e Klige R.K. (1978) - *Variation in the world sea level*. In: World Water Balance and Water Resources of the Earth. Paris, Unesco, Studies and Reports in Hydrology, 25: 581-585.
- Idroser (1983) - *Il trasporto solido fluviale nei bacini tributari dell'Adriatico*. - Regione Emilia-Romagna, Piano progettuale per la difesa della costa Emiliano-Romagnola, volume IV, Bologna, pp.429.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la Difesa dal Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna; Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp.365.
- Lisitzin E. (1958) - *Le niveau moyen de la mer*. Bull. Inf. Comité Central d'Océanogr. Et d'Etude des Côtes (COEC), 10 : 254-262.
- Pirazzoli P.A. (1986) - *Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records*. Journal of Coastal Research, 1: 1-26.
- Pirazzoli P.A. (2000) - *L'élévation récente du niveau de la mer et les prévisions pour le XXI<sup>e</sup> siècle*. In: Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer: risques et réponses. Actes du colloque d'Arles 12-13 octobre 2000, Francia, 10-13.
- Shennan I. e Woodworth P.L. (1992) - *A comparison of late Holocene and twentieth-century sea-level trends from the UK and North Sea region*. Geophysical Journal International, 109 : 96-105.
- Simeoni U. e Fierro G. (2001) - *Le delta du Po et l'élévation du niveau de la mer*. In: Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer: risques et réponses. Actes du colloque d'Arles 12-13 octobre 2000, Francia, pp. 62-65.
- Simeoni U., Gabbianelli G. e Melandri S. (1999) - *Effetti delle attività antropiche e dell'innalzamento del livello marino sull'evoluzione del litorale emiliano-romagnolo*. Atti del Congr. "Le pianure: conoscenza e salvaguardia", Regione Emilia-Romagna, Ferrara, pp. 42-44.
- Simeoni U., Anconetani P., Gabbianelli G., Gonella M., C. Del Grande, M. Pellizari, Tessari U., Zamariolo A. (2000) - *Studio dell'Ancona e delle Vene di Bellocchio, del litorale tra Porto Garibaldi e Porto Corsini: proposte di sistemazione ambientale*. Rapporto conclusivo II Fase, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara, pp.190.
- Steward R.W. (1989) - *Sea-level rise or coastal subsidence?* Atmosphere-Ocean, 27: 461-477.
- Trupin A. e Wahr J. (1990) - *Spectroscopic analysis of global tide gauge sea level data*. Geophysical Journal International, 100: 441-453.