

RASSEGNA DELLO STATO DELL'ARTE SULLE RICERCHE DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE RELATIVE ALL'ULTIMO SEMICICLO CLIMATICO E SUL CONCETTO DI STABILITA' TETTONICA

F. Antonioli - S. Silenzi

ENEA Casaccia, Dipartimento Ambiente, via Anguillarese 301, S.M. di Galeria, 00060, I-Roma
antonioli@casaccia.enea.it

ABSTRACT - *Review about sea level oscillations during the last hemi cycle and tectonic stability of coastal sectors* - This paper summarizes the major contributions to understanding the sea-level oscillations during the last climatic hemicycle. More than seventy fundamental publications are reviewed bearing on the dynamics of eustatic processes and on the tectonic and isostatic behaviour of coastal sectors. The critical analysis of methodologies and results yielded by different researchers has allowed to propose a new correlation scheme for sea-level data in different parts of the world. The improvement in datation techniques and the theoretical modelling of both glacio-eustatic variations and isostatic rebounds of coastal sectors to deglaciation, have been pivotal in sea-level researches during the '70 and '80. During the last decade, the refinement of radiodating techniques has prompted the correlation of sea-level data from different parts of the world. The available data set has grown from coral reefs and morpho-depositional units such as marine terraces and transitional coastal deposits, to include oxygen-isotopic analysis of deep-sea muds, their relationships with changes of ice volumes, datation of submerged speleothems and marine biogenic overgrowths. Comparative analysis of data on relative sea-level changes in different coastal sectors has pointed out the need for evaluating the tectonic and isostatic behaviour of the investigated coastal sectors. Based on the results of our research and the review of existing literature, a new reference marker is proposed in order to allow data correlation from different coastal sectors on the ground of their tectonic and isostatic stability. Such marker is represented by the eustatic sea level related to the substage 5e. The "relative eustatic variation" during the late Pleistocene-Holocene is here defined as the sea-level change caused by water volume variation induced by climatic variation relative to the present-day sea level. Such change is deduced from geological-geomorphological indicators such as terraces and notches found in coastal areas which are proved to be stable since the "Eutyrrhenian". The rate of vertical uplift for these areas must be below 0.016 m/ka, equal to about 2 m in the last 125 ka. The difficulty in constructing provisional eustatic models is finally discussed in the light of the complexity of the process itself and of the concurrence of anthropic activity. This problem can be only alleviated by the availability of a greater number of data from tectonically stable area.

RIASSUNTO - *Rassegna dello stato dell'arte sulle ricerche delle variazioni del livello del mare durante l'ultimo semiciclo climatico e sul concetto di stabilit  tettonica* - Vengono analizzate le principali fasi del progresso scientifico nella ricostruzione delle variazioni del livello del mare nel corso dell'ultimo semiciclo climatico, ponendo in risalto la tipologia degli indicatori utilizzati ed i criteri di valutazione paleoeustatica e geocronologica nella ricostruzione degli eventi descritti da vari Autori in diverse parti del globo. Dopo aver analizzato le problematiche sul confronto fra "record" afferenti ad aree geograficamente e geologicamente dissimili, anche alla luce della diversa risposta al comportamento isostatico e tettonico, viene discussa la proposta di un criterio di valutazione dei dati che permetta di confrontare fra loro curve scaturite da settori costieri diversi del bacino del Mediterraneo.

Key words : eustatic sea level rise, last hemicycle, geological markers, tectonically stable coastal area.

Parole chiave : variazione eustatica del livello del mare, ultimo semiciclo climatico, indicatori geologici, stabilit  tettonica costiera.

1. LE PRINCIPALI TAPPE NELLA COSTRUZIONE DELLE CURVE DI VARIAZIONE DEL LIVELLO DEL MARE

A partire dagli anni '40, sono iniziate vere e proprie ricerche mirate allo studio del sollevamento recente del livello dei mari. Gli anni '50 e '60 sono stati caratterizzati dall'avvento delle tecniche di datazione con il radiocarbonio, che hanno stimolato studi in tutto il mondo con la pubblicazione delle prime curve.

Durante gli anni '70 e '80 sono stati sviluppati complicati modelli teorici che, tenendo conto degli spostamenti di grandi masse di acque e ghiacci, calcolavano gli effetti idro-isostatici sulle porzioni costiere della piattaforma continentale.

Uno dei passi fondamentali in questo settore si   comunque avuto negli anni '90 con l'approfondimento delle tecniche di datazione e soprattutto con la calibra-

zione tra le datazioni effettuate con ^{14}C e U/Th , che ha permesso di unificare in tutto il mondo datazioni spesso trattate in modo diverso. La pubblicazione nel 1991 del "World atlas of Holocene sea-level changes" di Pirazzoli, ha consentito la diffusione di decine di migliaia di dati (purtroppo non omogeneamente calibrati) in tutto il mondo. Tra le centinaia di lavori pubblicati sull'argomento sono stati selezionati quelli pi  innovativi e quelli che, oltre a fornire valori di profondit  e attribuzione cronologica, si sono posti il problema della tettonica, tentando, ove presente, una correzione.

Nel 1961 (Fairbridge)   stata pubblicata la prima curva di variazione eustatica del livello del mare nell'Olocene e nei successivi tentativi di ricostruzione dei "record", molteplici si sono dimostrati gli approcci e gli indicatori utilizzati per acquisire dati sulle variazioni eustatiche del livello marino. Obiettivo di questo lavoro   quello di sintetizzare le conoscenze relative allo studio

delle variazioni di livello del mare dal minimo eustatico dell'ultimo stadio glaciale ad oggi (da 22 ka al presente).

Tutte queste problematiche traggono origine dalla necessità di comprendere le reali conseguenze di impatto ambientale degli oceani in risalita, per le evidenti ricadute socio-economiche su tutti gli insediamenti costieri antropici.

Nel 1942 è stato istituito in Italia il piano Versiliano in seguito al rinvenimento da parte di A. C. Blanc nel 1934, in un sondaggio effettuato nella Versilia, di sedimenti marini, lagunari e lacustri attribuiti alla trasgressione marina olocenica. L'importanza del rinvenimento era costituita dallo spessore della serie (circa 90 m). Blanc (1936) propone un modello paleogeografico, utilizzando dati scaturiti dall'analisi di 5 sondaggi effettuati nell'area del lago di Massacciucoli, in cui il livello del mare ingredisce sulla Versilia depositando sedimenti in facies di transizione con continuità. I sedimenti marini attribuiti all'Olocene da Blanc hanno una potenza di quasi 90 metri. Nei sondaggi è contenuta la registrazione stratigrafica dell'avanzamento del mare, che nella sua ingressione, ha costantemente riempito la piana della Versilia mantenendo per circa 15.000 anni una soglia compresa tra l'ambiente marino costiero e quello lacustre di retroduna.

Segre (1949) ha riconosciuto nell'area compresa tra il Promontorio del Circeo e quello di Gaeta, a 110 m sotto il livello del mare, il "presunto limite della regressione post Tirreniana". Lo stesso Segre (1969) pubblica una sintesi sulla trasgressione versiliana con il contributo di numerose ricerche di geomorfologia e stratigrafia. Per primo utilizza dati relativi a campagne batimetriche ad alta definizione riconoscendo morfologie sommerse

dovute a tracce di antiche linee di riva più basse del presente. Rilievi sottomarini in scala tra il 50.000 e il 12.000 mostrano frequenza ed estensione che hanno le tracce morfologiche di dune, cordoni litoranei, barre ed interposte paleolagune, riconosciuti sulla base di saggi di fondo o carotaggi, relative alla "trasgressione Versiliana". Segre riconosce, in molte zone del Tirreno, linee di riva a -50 m, -20 m, ed una linea corrispondente alla massima trasgressione che ebbero le attuali lagune, sita tra +1 e +2. L'età della massima espansione lagunare, sulla base di dati archeologici e stratigrafici, corrispondente a circa 5000 anni fa, viene evidenziata sempre da Segre con dovizia di particolari, nel golfo di Cagliari e nel Lazio meridionale.

Nel 1961 Fairbridge pubblica una delle prime curve di risalita del livello del mare olocenico: i punti della curva sono ottenuti, per la prima volta anche con datazioni assolute al ^{14}C (fig. 1) utilizzando dati provenienti da zone stabili (che però in seguito non si sono dimostrate tali).

Shepard & Curray nel 1967 danno alle stampe un interessante lavoro che fa il punto sulle ricerche al riguardo. Gli Autori portano alcune critiche ai dati di Fairbridge e pubblicano una curva che unisce insieme datazioni riferite a diverse zone costiere del mondo. Affermano inoltre che ricerche eustatiche dovrebbero essere effettuate in aree stabili. Vengono pubblicati i risultati di datazioni di gusci di molluschi olocenici ubicati fino a +3 m e campionati in Brasile; la loro quota attuale viene però attribuita a cause tettoniche.

Nel 1955 e ancora più dettagliatamente nel 1966 Emiliani pubblica alcuni dati sulle paleotemperature. È la prima volta che si parla di rapporto isotopico tra ^{16}O

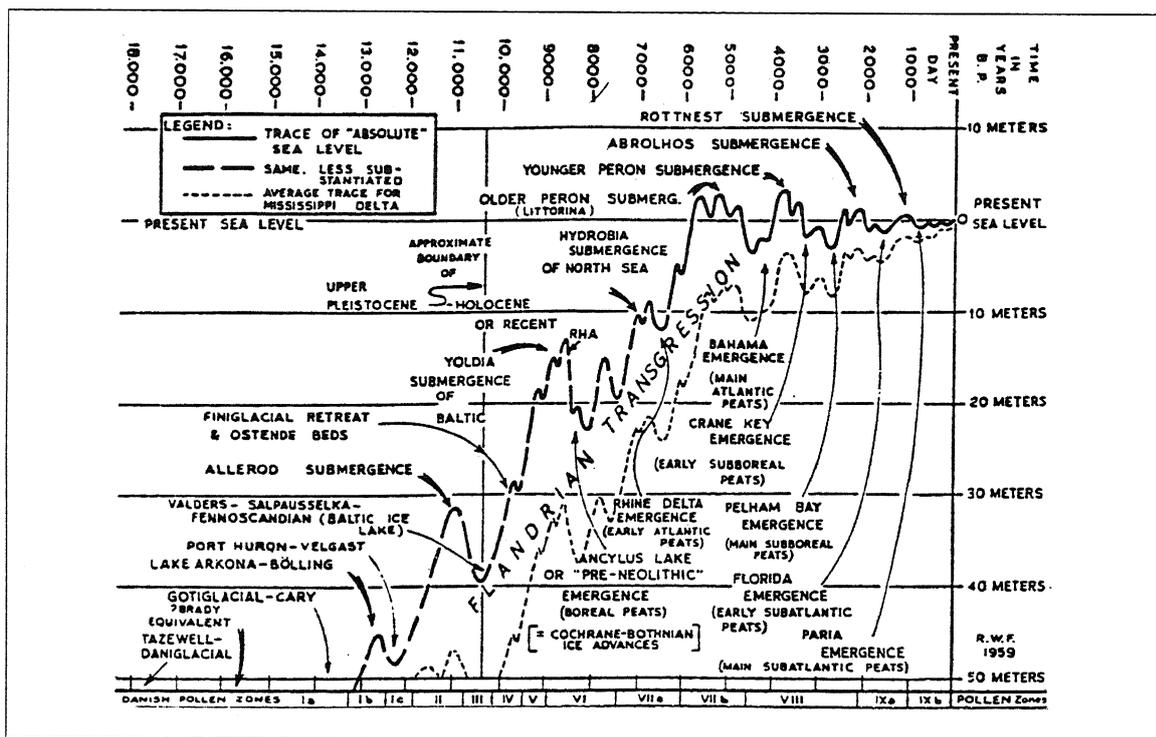


Fig. 1 - La curva di variazione del livello del mare di Fairbridge (1961). La curva, relativa agli ultimi 18 ka, è stata ottenuta attraverso indicazioni climatiche, misurazioni di linee di riva e radiodatazioni.

Sea level record by Fairbridge (1961). The reconstruction since 18 ky, is obtained by climatological evidences, sea level measurements and radiometric data.

ed ^{18}O correlando tale rapporto ad effettive variazioni di temperatura. Questi preziosi dati paleoclimatici vengono ottenuti attraverso l'analisi geochimica di sedimenti fossiliferi batiali (foraminiferi) contenuti in carote oceaniche. Successivamente questa metodologia verrà ripresa da Shakleton ed utilizzata per ricavare delle vere e proprie curve di risalita del livello del mare.

Nel 1966 infatti Shakleton, utilizzando i dati di Emiliani, calcola almeno 6°C di differenza nella *surface water* oceanica tra il periodo glaciale ed oggi; intravede anche il miglioramento climatico avvenuto 11.000 anni BP interpretandolo come rimescolamento di *ice sheet water*.

Nel 1973 Shakleton e Opdyke misurando il $\delta^{18}\text{O}$ in una carota (V28-238) contenente fanghi batiali calcarei a foraminiferi campionata sui fondali del Pacifico prossimi all'equatore, stabiliscono una relazione matematica tra il rapporto isotopico dell'ossigeno ed i volumi di acqua glaciale disciolta risalendo ad una vera e propria curva di variazione del livello marino "glacio eustatic sea level curve" relativa agli ultimi 130.000 anni (fig. 2). La curva delle paleotemperature invece inizia circa 900 ka BP (stadio 22), per giungere fino al presente.

Nel 1974 Bloom *et al.* pubblicano uno studio dettagliato sui depositi fossiliferi corallini nella Huon Peninsula (Nuova Guinea). Si tratta di una serie impressionante di terrazzi corallini sollevati fino a 600 metri di quota che si sviluppano per una estensione di circa 80 km. Sulla base di correzioni tettoniche calcolate rispetto al sollevamento - supposto costante - gli autori pubblicano una curva relativa al sollevamento del livello marino per un range temporale di circa 150 ka. L'accuratezza delle datazioni permette di stabilire che ogni terrazzo ha una variabilità di poche migliaia di anni. Per calcolare la variazione del livello del mare gli Autori hanno misurato la differenza tra l'attuale quota della scogliera datata ed il sollevamento calcolato. Utilizzando questi dati scaturisce una curva che in realtà risulta poco dettagliata per l'Olocene.

Nel 1978 Fairbanks e Mattew analizzano la composizione isotopica dell'ossigeno del corallo *Acropora palmata* campionato alle Barbados a diverse quote, gli Autori applicano la formula di Shakleton che, valutando l'andamento del rapporto isotopico dell'ossigeno, permette loro la costruzione di una curva della variazione del livello del mare compresa tra 80 e 220 ka. Gli autori sostengono che è preferibile utilizzare i coralli piuttosto che i fanghi a foraminiferi poichè la datazione su coralli risulta più precisa in quanto le analisi vengono effettuate su campioni non mescolati con altre specie.

Nel 1980 Carobene pubblica un interessante lavoro, mettendo in relazione terrazzi di abrasione marina con eustatismo e neotettonica, ed evidenziando i concetti di geometria, genesi, geologia, evoluzione e datazione di un terrazzo di abrasione marina.

Nel 1983 Aharon pubblica una curva di variazione del livello del mare basata sull'analisi geochimica di *Tridacna gigas*, campionati presso la Huon Peninsula (Nuova Guinea) analizzando sette terrazzi scolpiti a diverse quote (fig. 3). Le conseguenti variazioni del livello del mare vengono calcolate sottraendo all'attuale quota di affioramento dei coralli, il solle-

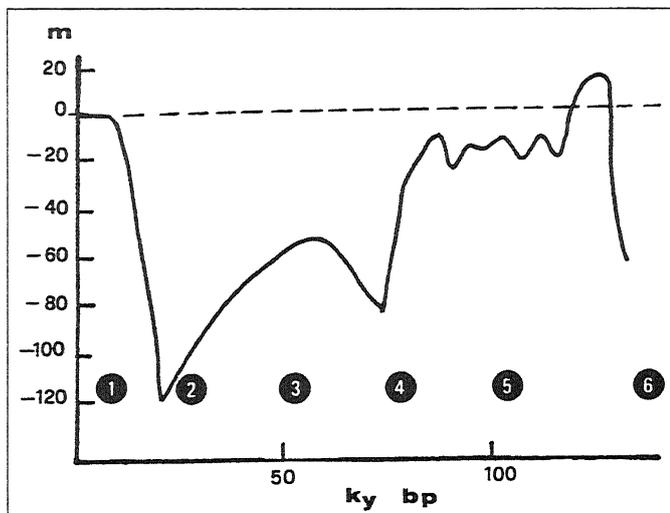


Fig. 2 - Curva glacioeustatica da 130 ka BP al presente secondo Shakleton & Opdyke (1973). I numeri cerchiati indicano la corrispondenza cronologica degli stadi isotopici 1-6.

Glacioeustatic record since 130 ky, by Shakleton & Opdyke (1973). In the background is indicated the chronological correspondence with the isotopic stages 1-6.

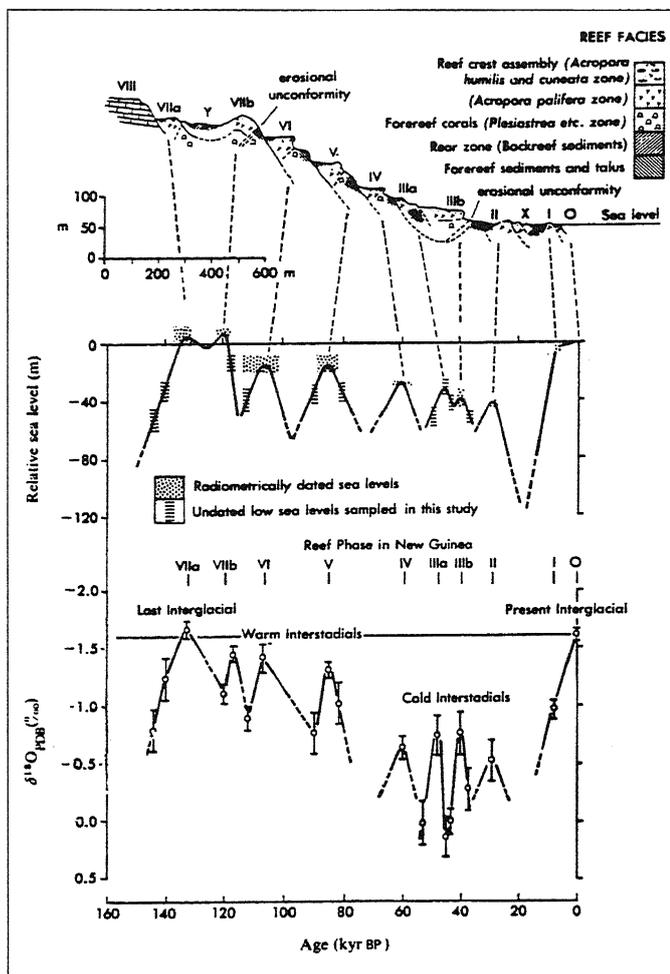


Fig. 3 - Variazioni del $\delta^{18}\text{O}$ e curva di variazione del livello del mare negli ultimi 160 ka BP secondo Aharon *et al.* (1983).

*$\delta^{18}\text{O}$ record and supporting sea level data for the past 160 ky by Aharon *et al.* (1983).*

vamento tettonico supposto come costante nel tempo (si tratta in pratica di un rifacimento migliorativo del lavoro di Bloom *et al.* 1974). La curva che ne consegue mostra pochi dati per l'Olocene.

Nel 1986 Pirazzoli pubblica un esauriente excursus relativo alla formazione di solchi di battente marini classificandoli in relazione alle condizioni tettoniche costiere, alla litologia ed all'esposizione della falesia.

Nel 1986 Chappel e Shakleton e successivamente Shakleton (1987), pubblicano ricerche migliorative rispetto alle curve del 1973, ricalcolando le variazioni del livello del mare e della temperatura. Essi affermano comunque di trovare ancora una notevole discrepanza tra i dati scaturiti dall'analisi isotopica dei coralli della Huon Peninsula e quelli provenienti dai fanghi batiali, risultando questi ultimi indicatori di clima generalmente più freddo. Tale differenza si rileva soprattutto per stadi precedenti a 50 ka. In tutte queste curve il dettaglio sull'Olocene è sempre molto basso.

Bard *et al.* (1990) effettuano datazioni incrociate U/Th e ^{14}C su carote campionate su barriere coralline depositate con continuità, provenienti dall'isola Barbados. L'intervallo cronologico copre gli ultimi 30.000 anni. Con questa basilare ed interessante ricerca, oltre che produrre una delle prime curve di risalita oloceniche veramente dettagliate, gli Autori hanno di fatto esteso nel tempo la calibrazione relativa al ^{14}C . Si rileva infatti per i primi 9000 anni un sostanziale accordo con le curve dendrocronologiche già note. Per intervalli cronologici anteriori a circa 9000 yr BP le datazioni ^{14}C risultano sistematicamente più recenti di quelle effettuate con la metodologia dell'U/Th con un massimo di differenza di 3500 anni circa 20.000 yr BP (fig. 4). Proprio l'utilizzo di una nuova tecnica di datazione "accelerator mass spectrometry" ha permesso questi risultati innovativi.

Provansal (1991), utilizzando dati archeologici e costituendo un *resumé* bibliografico relativo a datazioni ^{14}C su indicatori biologici riporta alcune curve di variazione del l.m. da 5000 anni ad oggi sulla costa della Provenza (Francia meridionale).

Nei primi anni '90 vengono condotte in tutto il mondo alcune innovative ricerche che utilizzano come indicatori gli speleotemi. Per l'analisi e la discussione di questi risultati si parlerà dettagliatamente nel lavoro Antonioli *et al.* (questo volume).

Pirazzoli (1991) pubblica un atlante con centinaia di dati relativi alla risalita olocenica del livello del mare in tutto il mondo (fig. 5). Si tratta di un lavoro estremamente interessante che sintetizza la quasi totalità delle curve disponibili sulle variazioni oloceniche del mare. I dati vengono presentati unendo insieme sia quelli provenienti da siti stabili che quelli campionati in siti con alto sollevamento tettonico o glacioeustatico. Purtroppo tutti i dati riportati non sono calibrati.

Nel 1993 Stuiver & Reimer pubblicano su Radiocarbon un lavoro che fa il punto sulla calibrazione (con allegato dischetto) per trasformare i dati non trattati in dati calibrati. Da questo momento in poi, il dettaglio e la comparabilità di datazioni ^{14}C ha subito un enorme incremento in tutto il mondo.

Laborel *et al.* (1994) pubblicano il risultato di uno studio dettagliato su piccole scogliere a *Lithophilum*, datando a diverse profondità ed in numerose sezioni tali scogliere in zona costiera del Mediterraneo Settentrionale compresa tra Barcellona, Genova e

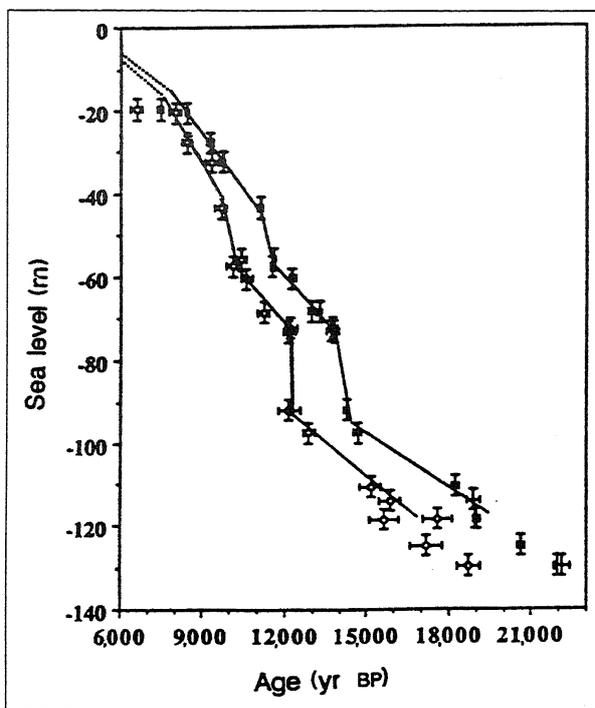


Fig. 4 - Il livello del mare durante l'ultima deglaciamento, da Bard *et al.* (1990). Vengono messe a confronto due curve relative a datazioni con U/Th (croci) e radiocarbonio (simboli aperti).

Sea-level during the last deglaciation, by Bard *et al.* (1990). Crosses correspond to U/Th ages and the open symbols to radiocarbon ages.

Bastia. Il risultato dello studio è contraddistinto dalla costruzione di diverse curve comprese tra 4500 anni BP ed il presente con profondità di campionamento massime a 1.60 metri. In nessun tratto delle costa gli autori individuano risalite oloceniche del mare sopra l'attuale.

Blanchon & Shaw (1995) valutano numerosi lavori riguardanti variazioni oloceniche del livello marino attraverso la datazione di barriere coralline e pubblicano una curva di risalita olocenica, nella quale documentano almeno 3 eventi catastrofici che, attraverso un riscontro su *Acrocora Palmata*, testimoniano un repentino innalzamento del mare accaduto durante l'Olocene con sollevamenti improvvisi di 13 m 14.2 ka BP, 7.5 m 11.5 yr ka BP e 6.5 m 7.5 yr ka BP, motivando tali eventi come conseguenza di catastrofiche rotture del *pack* antartico (fig. 6).

Bondesan *et al.* (1995) pubblicano i dati di una ricerca multidisciplinare effettuata presso il delta del Po nel mare Adriatico, in una vasta area ubicata tra Grado e Rimini. Gli autori esaminano i valori di subsidenza occorsi negli ultimi secoli e, allegando una dettagliata cartografia di numerose zone attualmente sotto il livello del mare, calcolano le aree costiere a rischio nei confronti delle variazioni del livello del mare attese nei prossimi 50 anni.

Nel corso del 1996 sono stati pubblicati alcuni lavori riguardanti studi di dettaglio di zone costiere presso Taiwan ed in Giappone. Le curve pubblicate indicano come il livello del mare durante l'ultima porzione dell'olocene (6-4 ka) abbia superato l'attuale rispettivamente di 3,5 metri (6 ka BP) presso Penghu Islands tra Cina e Taiwan (Chen & Liu 1996) e di 2,4 metri (5 ka BP) nella

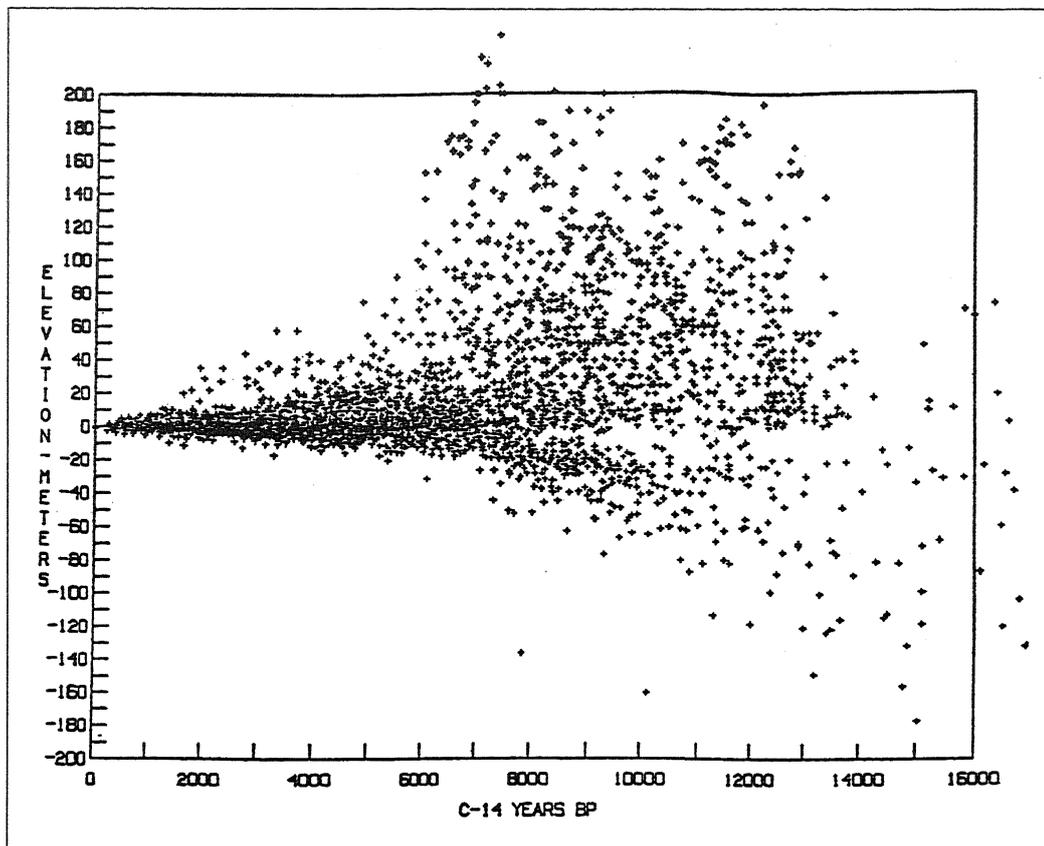


Fig. 5 - Il grafico mostra come siano incomparabili i dati relativi a variazioni del livello del mare provenienti da curve effettuate in diverse parti del mondo (Newman, 1986; fonte Pirazzoli, 1991). Appare evidente come sia necessario paragonare fra loro dati scaturiti solo da zone confrontabili, di cui si conoscano le vicissitudini tettonico-isostatiche relative al periodo di tempo considerato.

The plot shows the impossibility show a global sea level record using data of sea-level change from several sites in the world (Newman, 1986; in Pirazzoli, 1991). It is necessary to compare data coming from geological sites where the tectonic and isostatic evolution is known.

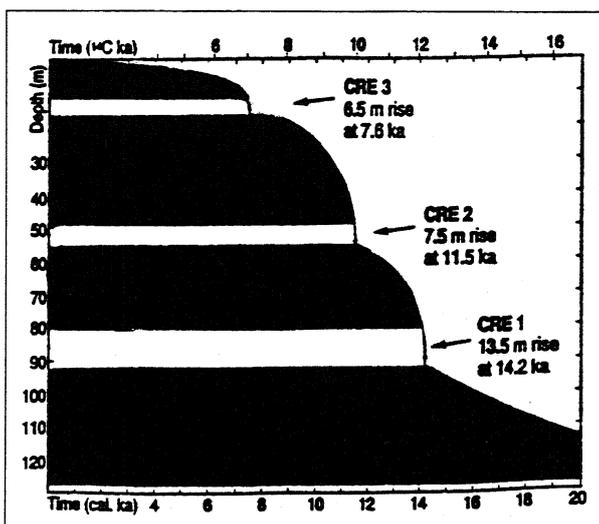


Fig. 6 - La curva di risalita del livello del mare di Blanchon & Shaw (1995). In risalto i tre eventi catastrofici individuati dagli autori.

Sea level rising by Blanchon & Shaw (1995). Three catastrophic events, individualized by Authors, are evidenced.

west coasts di Kyushu in Giappone (Yokoyama 1996) (fig. 7). Questi dati per la prima volta indicano un livello marino olocenico di qualche metro più alto dell'attuale confermato da datazioni con il radiocarbonio. Si tratta di un reale diverso comportamento relagico della crosta terrestre dovuto ad idroisostasia? Si nota, di fatto, un comportamento diverso rispetto a numerose zone note e ben studiate come il bacino del Mediterraneo od i Caraibi, dove non sono mai stati descritti depositi Olocenici datati in zone considerate stabili a quote più alte dell'attuale lm. Chappel *et al.* (1996) pubblicano un lavoro il cui titolo non lascia adito a dubbi:

"Reconciliation of late quaternary sea level derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records". In effetti per l'intervallo cronologico compreso tra 70 e 30 ka sussisteva un notevole disaccordo (fig. 8). Con un sistema più accurato di datazione le discrepanze tra i due indicatori geologici risultano decisamente attenuate.

Bard *et al.* (1996) pubblicano i dati relativi ad alcuni sondaggi eseguiti su barriere coralline fossili oloceniche a Tahiti. Ogni livello viene datato sia con la tecnica del ^{14}C AMS, che con quella dell'U/Th TIMS. Ne scaturisce una curva di risalita tra le più precise ed aggiornate a tutt'oggi esistenti, che parte da circa 14 ka BP e giunge fino al presente (fig. 9). La zona indagata risulta avere condizioni di stabilità tettonica. La curva è basata sulla datazione di *Acropora*, che si sviluppa in un range di profondità compreso tra 0 e - 5 metri. La precisione della curva, relativa alla profondità è quindi di ± 5 m.

Concludiamo questa rassegna con un dato che riprende quanto pubblicato da Segre 1969 in riferimento alla quota raggiunta dalla laguna olocenica a *Cerastodema* nella piana Pontina. Un recente studio (Alessio *et al.*, in progress) basato su datazioni al ^{14}C e precise quotazioni topografiche, rileva che la laguna olocenica non si sia spinta oltre i 6/800 metri all'interno dell'attuale linea di costa, nei pressi di Terracina; i fossili datati di ambiente lagunare si rinvergono attualmente

alla quota di circa -0.4 m dal p.c. La laguna osservata da Segre con fossili di *Cerastoderma* rinvenuti fino a +3 m, che si inoltra fino a circa 20 km all'interno della Piana Pontina è in effetti quella Tirreniana e non olocenica.

2. STABILITA' TETTONICA E VARIAZIONE EUSTATICA DEL MARE

Lo studio delle oscillazioni del livello del mare durante l'ultimo semiciclo climatico è caratterizzato da

difficoltà intrinseche relative alle metodologie di acquisizione dei dati ed alla loro valutazione. Le problematiche più consistenti nel Mediterraneo, dove il mare, di fatto, è risalito con gli stessi tassi di sollevamento in ogni località, sono connesse con la difficoltà di confrontare gli approcci metodologici fra di loro: misurazioni e datazioni su indicatori mancano spesso di calibrazioni opportune, o sono effettuate su elementi provenienti da zone diverse, con comportamento tettonico non omogeneo, o non sono note o ricostruibili le variazioni ipsometriche del livello del mare.

Mentre la confrontabilità dei dati di laboratorio e di

campagna può essere migliorata attraverso l'utilizzo di metodologie di laboratorio standardizzate e l'individuazione di indicatori geologici simili, la costruzione di curve di variazione del livello del mare confrontabili può scaturire soprattutto dall'attenta valutazione delle interazioni tettoniche che hanno caratterizzato le aree di studio, attraverso l'individuazione di un marker di riferimento tettono-eustatico.

Due scuole di pensiero si sono finora create fra chi affronta il problema del sollevamento recente del livello del mare: una considera scontato e presente su tutte le zone costiere un fenomeno di glacio (vicino a poli) e idroisostasia e ne descrive cause ed effetti o ne prende atto (es. Pirazzoli, 1991) affermando l'impossibilità di entrare troppo nei particolari. L'altra invece studia nel dettaglio singole e limitate zone costiere e ne ricava dettagliate curve di risalita, senza minimamente porsi il problema idroisostatico (per es. Bard *et al.*, 1990 e 1996).

Quella che segue è una revue bibliografica di quanto pubblicato a riguardo di *tilting* costieri interpretati come movimenti indotti da glacio e idroisostasia.

Chappell (1974) considera la risposta isostatica della Terra, indotta dai cambiamenti dei volumi di ghiaccio ed acqua nel corso del Quaternario. L'Autore individua nell'effetto idroisostatico le motivazioni di record differenti nelle curve di variazione del livello del mare provenienti da regioni diverse, dimostrando, in termini energetici, come i fenomeni legati all'idroisostasia possano avere conseguenze epirogeniche. L'Autore conclude che i fenomeni idroisostatici possono essere "potenzialmente" determinanti nello spiegare differenze, non dovute alla tettonica, nei record di curve di risalita del livello del mare provenienti da zone differenti.

Clark *et al.* (1978), ampliando e riprendendo i lavori di Walcott (1972) e Peltier (1976 a, b), applicano un calcolo numerico per valutare i cambiamenti, su scala globale, del livello relativo del mare come conseguenza della deglaciazione e delle variazioni isostatiche indotte dai cambiamenti di volume, e quindi di carico, delle coltri glaciali dell'emisfero settentrionale e delle variazioni del volume dell'acqua oceanica (fig. 10). Gli Autori arrivano così a suddividere gli oceani

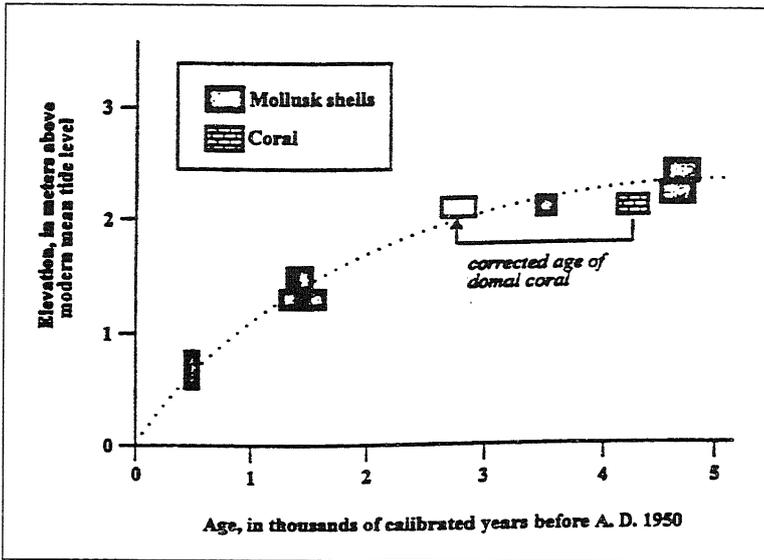


Fig. 7 - Variazioni del livello del mare da 5 ka BP al presente presso le Penghu Islands (Taiwan) secondo Chen & Liu (1996). Gli Autori individuano testimonianze di un livello relativo del mare fino a 2,5 m più alto rispetto all'attuale nel periodo considerato, ma ciò è dovuto al forte sollevamento in atto nell'area.

Sea-level changes since 5 ky in Penghu Islands (Taiwan) by Chen & Liu (1996). The record show that relative sea level rise reached about 2.5 m during middle Holocene caused by neotectonic uplift.

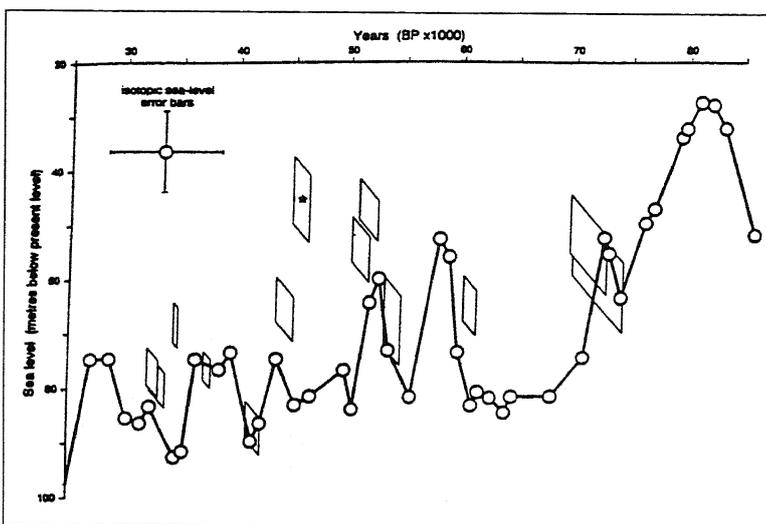


Fig. 8 - Confronto fra datazioni su terrazzi marini (trapezoidi) e ricostruzione delle variazioni del livello del mare su dati isotopici (cerchi), da Chappell *et al.*, 1996.

*Sea level estimates from terraces (trapezoidal boxes) and isotopic data (circles), by Chappell *et al.*, 1996.*

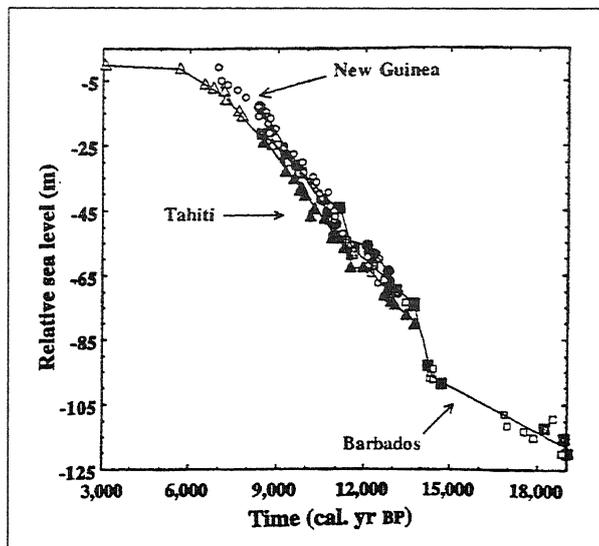


Fig. 9 - La curva estremamente dettagliata ricostruita da Bard et al. (1996) confrontando dati provenienti da tre diverse regioni con comportamento tettonico ed isostatico analogo (New Guinea, Barbados e Tahiti).

Detailed sea-level change records from regions with similar tectonical and isostatic history (New Guinea, Barbados e Tahiti), by Bard et al. (1996).

in sei zone, con diverso comportamento rispetto all'identificazione delle variazioni relative del livello del mare, caratterizzate da curve con andamento regionale peculiare, riferendosi, temporalmente, in particolare modo all'Olocene, ed assumendo l'assenza di cambiamenti eustatici negli ultimi 5 ka unitamente a una viscosità del mantello costante. Gli Autori considerano inizialmente che indicatori di antiche linee di riva coevi si trovano su quote relative differenti, indicando l'assenza di regioni stabili e concludendo che il livello relativo del mare risale disomogeneamente rispetto alle terre emerse; considerano le regioni costiere come in nessun caso stabili perchè influenzate dalle deformazioni della crosta terrestre dovute ai cambiamenti di carico isostatico, indotti dalle variazioni sia delle coltri glaciali che del volume delle acque sulle piane oceaniche limitrofe: le variazioni di carico isostatico sulle piane oceaniche inducono lo spostamento di masse di materiale sotto i continenti, con fenomeni di *tilting* lungo le fasce costiere.

Clark & Lingle (1979) considerano notevole (circa il 25% del totale) il contributo all'innalzamento del livello del mare fornito dal ritiro della coltre glaciale antartica a partire da 18 ka, ridistribuendo geograficamente, rispetto al precedente lavoro di Clark et al. (1978), le zone con curve caratteristiche di variazione di livello del mare. Gli Autori definiscono come variazione eustatica in funzione del tempo, il cambiamento di quota relativa della superficie marina dato dal rapporto fra la variazione di volume dei ghiacci nel tempo e l'area dell'oceano; viene inoltre definita come "variazione relativa del livello del mare" la variazione della distanza fra superficie e fondo del mare in una data località.

Chappell et al. (1982) riferiscono evidenze di campagna relative allo stesso evento eustatico, in grado di indicare la massima quota raggiunta dal mare durante la trasgressione olocenica ed attualmente affioranti a quote differenti, ad un livello di riferimento che varia nel-

l'ambito del North Queensland, Australia; le variazioni altimetriche dei vari affioramenti vengono riferite ad aggiustamenti idroisostatici conseguenti alla trasgressione olocenica, individuando una forte correlazione fra previsione del modello ed evidenze di terreno, senza però escludere la possibilità di movimenti tettonici locali.

Zerbini et al. (1996) mettono in risalto la suddivisione delle coste del Mediterraneo operata da Flemming & Webb (1986) e Flemming (1992), sulla base di dati archeologici. Gli Autori individuano in tale area 20 regioni, ognuna caratterizzata da propri indici medi di dislocamento verticale, affermando che la conoscenza dell'evoluzione geologica locale dovrebbe essere utilizzata nel determinare l'affidabilità dei dati mareografici, per distanze di diversi chilometri dalle stazioni di misura. Gli Autori indicano che obiettivi simili possono essere ottenuti attraverso lo studio di linee di riva quaternarie correlate tra loro sia per similitudine altimetrica che per età.

Burton et al. (1987) affermano che è possibile riferirsi a curve di variazioni del livello "relativo" del mare come effetto combinato di movimenti tettonici e variazione del livello eustatico del mare, con soluzioni valutabili solo nell'ambito di ogni singolo scenario geologico.

Emery et al. (1988) analizzando diverse stazioni mareografiche in varie parti del Mediterraneo (Spagna, Egitto, Israele, Turchia, Grecia, Jugoslavia, Italia e Francia) concludono che i record misurati sono dominati dalla tettonica, permettendo fra l'altro l'individuazione di province omogenee di ampiezza limitata, mostrando una maggiore omogeneità e stabilità apparente nel settore nord-occidentale del Mediterraneo, probabilmente a causa della distanza da margini con attività tettonica attiva. Gli Autori concludono che determinazioni circa il *trend* delle variazioni del livello del mare attraverso misure mareografiche sono suscettibili di diverse limitazioni, quali la durata delle misurazioni, l'influenza del mare e delle terre emerse.

Fletcher (1988) individua nella subsidenza, in accordo con Belknap & Kraft (1977) un ruolo fondamentale nella misurazione della velocità di risalita del livello del mare, soprattutto quando i dati provenienti da considerazioni sulla stratigrafia ed il bilancio sedimentario non tengono in dovuto conto fenomeni quali il costipamento dei materiali, la variabilità dei fenomeni di marea nel passato e movimenti crostali di diversa origine. L'Autore individua la difficoltà nell'utilizzare indicatori eustatici che siano in qualche modo soggetti a cambiamenti di quota a causa di costipamento o di rielaborazione da parte degli agenti esogeni di diversa natura. Anche Fletcher (in accordo con Morner, 1979; Smith & Dawson, 1983; Pirazzoli, 1986), ritiene che (citando Bloom, 1967; Chappel, 1974; Fairbridge, 1983) una effettiva stabilità tettonica può essere riferita solo a porzioni limitate della superficie terrestre a causa non solo di movimenti relativi fra placche, ma anche per fenomeni quali idroisostasia sulla piattaforma continentale, isostasia per carico sedimentario, soprattutto in aree con grande velocità di accumulo, glaciostasia. L'Autore inoltre ricorda che esistono una serie di fattori che comportano variazioni della superficie del mare, quali variazioni del livello geodetico del mare dovute a influenze gravitazionali, con oscillazioni di alcuni metri (Whitcomb, 1976) come risultato della redistribuzione delle maree dovuti a cambiamenti nella rotazione della Terra (Morner, 1979). Altri aspetti sono le variazioni volumetri-

che dovute ai cambiamenti termici nello strato superficiale degli oceani (Barth & Titus, 1984) ed influenze dinamiche quali vento, pressione atmosferica, cicli solari e lunari, apporto fluviale, con variazioni, comunque a breve periodo, dello stesso ordine di grandezza dei cambiamenti eustatici (Lisitzin 1974).

Secondo Fletcher (1988) ciò giustifica la diversa geometria delle curve di variazione eustatica, ma ammette al contempo che, una volta ricostruiti i fattori locali e valutato il loro effetto nello spazio, è possibile estendere i risultati, o meglio la validità dei dati, a porzioni di territorio più ampie. L'Autore osserva che in definitiva la velocità di sommersione di una data zona rappresenta la media fra l'aumento di volume delle acque e la componente verticale dei movimenti della crosta, convenendo sull'applicabilità delle curve al solo livello regionale, con prospettive di interpolazione di dati provenienti da regioni diverse.

Diversi Autori (Dai Pra & Hearty, 1988) misurando la quota di depositi Eutirreniani contenenti *Strombus bubonius*, individuano settori crostali, arealmente ben definiti, relativamente omogenei. Cosentino & Gliozzi

(1988) esaminano numerosi depositi di età eutirreniana, traendone considerazioni sulle velocità di sollevamento di diversi settori dell'Italia meridionale.

Pirazzoli (1993) afferma che è ormai largamente accettato il ruolo di fenomeni quali glacio ed idroisostasia, diversamente combinati fra loro, sulla deformazione di tutte le aree costiere negli ultimi 20 ka, unitamente a movimenti verticali di diverso tipo (isostasia da carico, termoisostasia, vulcanoisostasia, tettonica verticale ai bordi delle placche, cambiamento di densità). L'Autore osserva che tutte le aree costiere risultano non essere verticalmente stabili, ma in misura ed in modo diverso comunque interessate da tettonica con notevole influenza, sull'evoluzione, da parte dei movimenti verticali causati dall'ultima deglaciazione (fig. 10), in accordo con Clark *et al.* (1978), e quindi conclude, in accordo con altri Autori (Pirazzoli 1976,1991; Bloom, 1977) che l'interpolazione di dati relativi ai cambiamenti del livello del mare mostra curve differenti per diverse località nel mondo, avvalorando l'ipotesi che nella maggiore parte dei casi ciò sia dovuto a fenomeni isostatici, ma ammette che deviazioni dai modelli di previsione dei record

eustatici portano a considerare come complessi i fenomeni che operano in tempi e modi diversi sull'evoluzione delle coste. L'Autore osserva, comparando i dati di più di 800 curve pubblicate provenienti da varie parti del mondo, che la determinazione di una singola curva di risalita del livello del mare valida globalmente è illusoria, a qualsiasi scala di tempo di riferimento, anche a causa della mancanza di dati di riferimento in zone stabili verticalmente.

Relativamente ai dati ottenuti dalle misurazioni mareografiche Pirazzoli (1986), analizzando globalmente i dati provenienti da stazioni dislocate in varie parti del mondo, conclude che gli indici di risalita del livello del mare relativamente all'ultimo secolo non possono essere determinati attraverso la mareografia in modo semplice; le incertezze relative ai dati potranno, secondo l'Autore, essere almeno in parte risolte dall'applicazione di misure altimetriche da satellite.

Bosellini *et al.* (1994) in un breve excursus sui meccanismi di subsidenza, considerano come difficilmente calcolabile, per un certo periodo geologico, la subsidenza di un bacino, indotta anche dal solo carico idrostatico (subsidenza da carico) che lo riempie. Gli Autori affermano che la crosta partecipa al riequilibrio isostatico per carichi geostatici (carico idrostatico più quello litostatico) a partire da un minimo di 10 bar, applicato fra l'altro per un tempo sufficientemente lungo; valutano inoltre anche che la

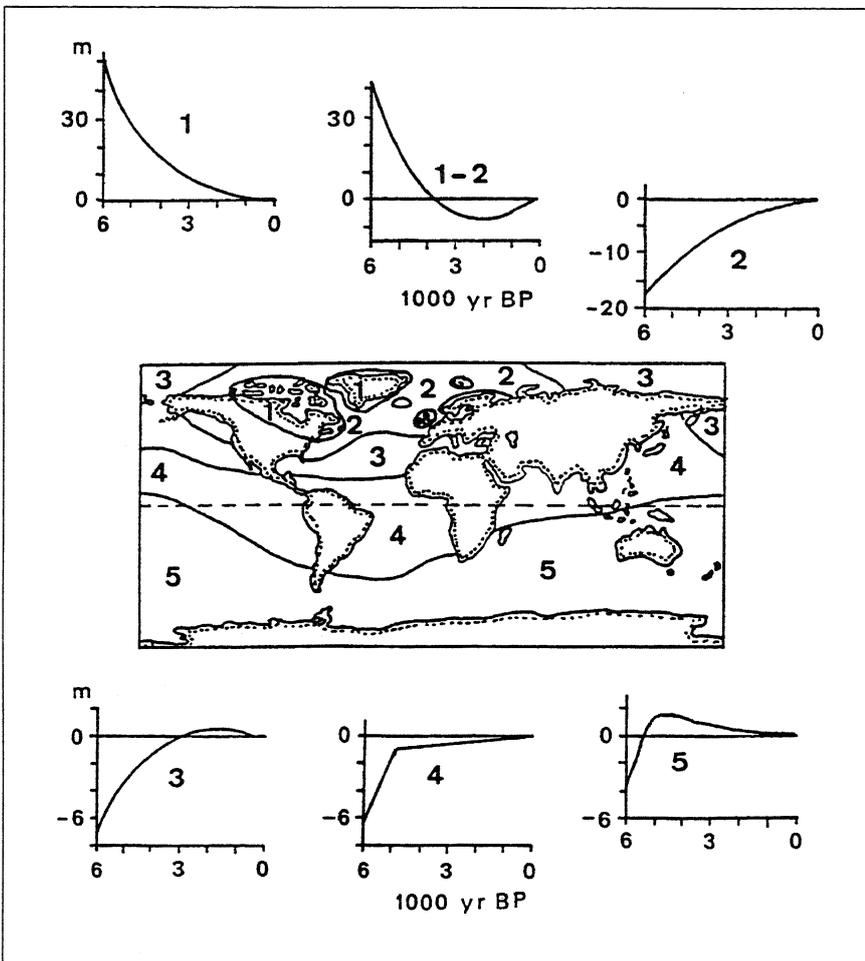


Fig. 10 - Distribuzione delle zone con diverso andamento delle curve di risalita del livello del mare negli ultimi 1000 anni, da Clark *et al.*, 1978. Gli Autori nell'elaborare tale ricostruzione considerano che da 5 ka Bp ad oggi non sia intervenuto alcun cambiamento eustatico, attribuendo le oscillazioni del livello del mare agli effetti isostatici di aggiustamento crostale conseguenti la fusione dei ghiacci wurmiani.

Distribution of the sea level zones with several rising record since 1000 yr BP, by Clark et al., 1978. The Authors assumes that no eustatic change has occurred in sea level change, but only an isostatic adjustment caused from Wurm ice sheet melting.

risposta isostatica della crosta può essere di diverso tipo, a seconda se locale, come avviene in zone fratturate, o regionale, in caso di assenza di discontinuità importanti. Gli Autori ribadiscono l'importanza di una valutazione strettamente locale per curve di variazione del livello del mare, proponendo un fattivo contributo interdisciplinare fra stratigrafia e geologia strutturale nell'ambito delle ricostruzioni.

Zerbini *et al.* (1996) rispetto alle misurazioni mareografiche rilevano che, sebbene la maggiore parte delle stazioni di misura operino da tempi sufficientemente lunghi, estrapolando i valori su scala globale, questi risentono di movimenti crostali. Lo stesso livello del mare risulta influenzato da fenomeni che si riferiscono a tempi ed aree differenti (Emery & Aubrey, 1991), quali la variazione della pressione atmosferica e del vento, la variazione delle correnti, temperatura e salinità delle acque. Essi confermano che le misure delle variazioni del livello del mare derivanti da misure mareografiche sono di difficile interpretazione, perchè influenzate da diversi fenomeni che inducono delle variazioni verticali. Gli Autori suggeriscono l'introduzione di misure indipendenti, ad esempio attraverso il sistema GPS, che possano calibrare a scala centimetrica i rilievi mareografici; individuano nella subsidenza il movimento relativo prevalente lungo le coste italiane, come causa nella determinazione di indici di risalita eustatica misurata dai mareografi, maggiore di quella eustatica assoluta. Gli Autori, in accordo con Hey (1978), indicano che diverse linee di costa quaternarie possono essere usate per determinazioni di movimenti crostali recenti, se la loro elevazione ed età sono conosciute. Gli Autori concludono che dati geologici, archeologici e mareografici valutati globalmente possano fornire indicazioni sulle variazioni del livello del mare, oltre che l'estendibilità areale delle valutazioni scaturite.

Bosi *et al.* (1996) riassumono le interazioni complesse fra fenomeni geologici ed eustatismo, sia in ambito costiero emerso che nelle aree continentali che interagiscono con il mare. Gli Autori sottolineano come, seppure sia riconosciuto nel glacioeustatismo il fattore principale delle variazioni del livello del mare durante il Quaternario, risulti difficile discriminare la componente glacioeustatica da quelle dovute alle variazioni del geoid e dai movimenti tettonici (fig. 11). In particolare per il Mediterraneo gli Autori, in accordo con Hey (1978), asseriscono che le linee di costa quaternarie corrispondenti ad antichi stazionamenti marini, "sono state tutte interessate da movimenti tettonici positivi o negativi di varia entità".

Pur se in accordo con Radke *et al.* (1988) e Pirazzoli *et al.* (1993) sulla possibilità, in aree con costante tasso di sollevamento tettonico, di poter ricavare la quota originaria di paleolinee di riva sollevate, riferendole a quella del substadio 5e, dove è assumibile un livello eustatico posto a +6 m sull'attuale (Chappel & Shackleton, 1986), Bosi *et al.* affermano che nel Quaternario, per il Mediterraneo, "non esistano fenomeni geologici direttamente imputabili alle sole variazioni eustatiche in quanto queste si combinano sempre con la componente verticale dei movimenti tettonici". Gli Autori individuano nella discontinuità delle osservazioni, nella disomogeneità degli approcci metodologici e nella scarsa affidabilità dei riferimenti cronologici i maggiori problemi inerenti la valutazione degli effetti diretti dell'eusta-

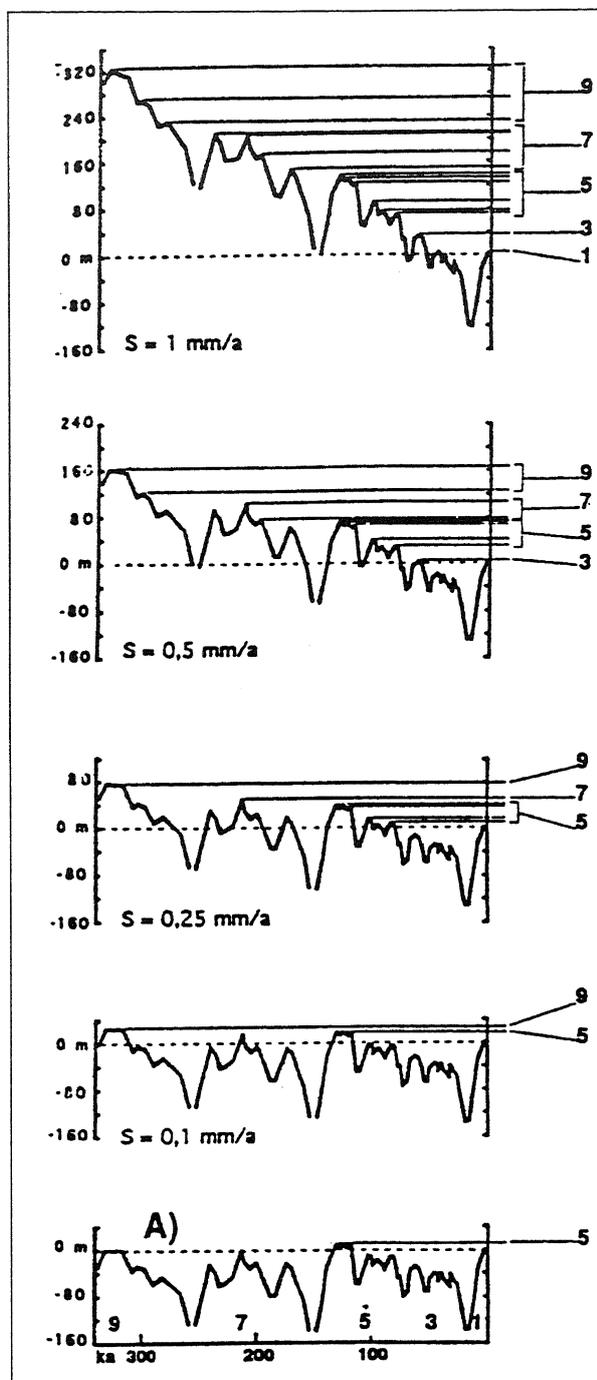


Fig. 11 - Le diverse velocità di sollevamento tettonico-isostatico mettono in risalto come apparirebbero diversi ordini di terrazzi costieri (linee continue orizzontali) corrispondenti ad alti stazionamenti del livello del mare negli stati isotopici 1, 3, 5, 7 e 9 (tratto da Bosi *et al.*, 1996).

*Different tectonic uplift show as different marine terraces could be appear, making a comparison between isotopic stage 1,2,3,5,7 e 9 (from Bosi *et al.*, 1996).*

tismo nel Mediterraneo.

Mc Guire *et al.* (1997) infine tentano una interessante correlazione tra il rateo di sollevamento del livello del mare e la frequenza di attività vulcanica esplosiva nel Mediterraneo.

La Commission of the European Communities, in una pubblicazione del 1990 su "l'effetto serra" e le sue implicazioni, individua - come potenziali cause della risalita del livello del mare - i seguenti fattori :

- espansione termica delle acque degli oceani, dovuta ad un riscaldamento degli stessi;
- scioglimento dei ghiacciai continentali delle medio-alte latitudini;
- incremento della fusione dei ghiacci nell'area scandinava.

L'innalzamento eustatico attribuito all'aumento della temperatura verrebbe solo in parte attenuato dall'aumento di precipitazioni, e quindi di ghiaccio, nella regione Antartica, come effetto locale del riscaldamento globale. Gli Autori della pubblicazione (Warrick, Barrow & Wigley) individuano come conseguenza dell'incremento della temperatura, l'innalzamento del livello del mare negli ultimi cento anni di 10-15 cm, dovuto soprattutto al ritiro dei ghiacciai di tipo alpino ed all'espansione termica degli oceani. Gli Autori propongono una proiezione dei possibili cambiamenti eustatici fra il 1985 ed il 2050, lasciando un margine di incertezza piuttosto ampio, con una risalita del livello del mare nel 2030, rispetto all'attuale, variabile fra +4 metri e + 40 cm (fig. 12).

Risulta evidente che esiste una difficoltà intrinseca nell'effettuare proiezioni sul futuro, dovuta sia al complesso interagire delle variabili considerate, sia ad una loro ancora approssimativa conoscenza ma soprattutto al periodo di riferimento, troppo breve per essere attendibile. L'attendibilità dei dati, e quindi dei modelli, appare ancora relativa, ed un miglioramento sostanziale non può prescindere da una valutazione più dettagliata di tutte le variabili geologiche e fisiche in gioco, come prodotto di un cambiamento climatico: questo può senz'al-

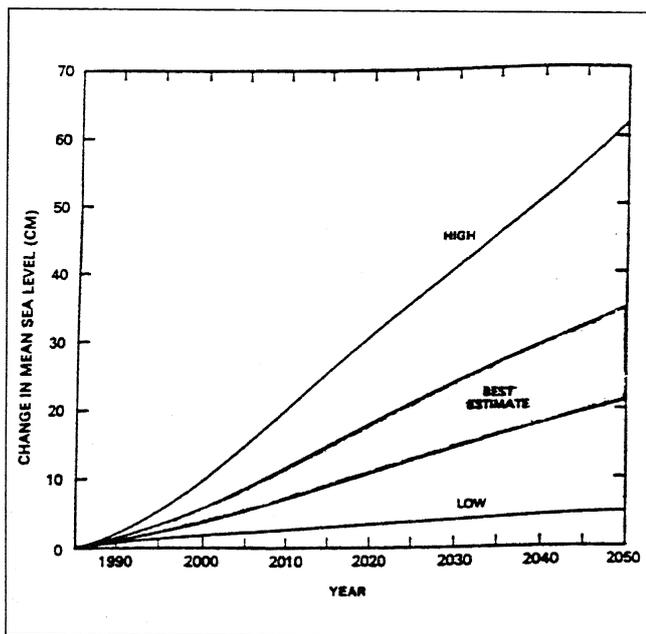


Fig. 12 - Proiezione delle variazioni massime e minime del livello del mare dal 1985 al 2050 AD, da Warrick et al., 1990.

Projections of the change in mean sea level, 1985-2050, by Warrick et al., 1990.

tro scaturire dallo studio di indicatori affidabili e confrontabili afferenti ad aree valutabili come tettonicamente stabili.

2.3 CURVE DI VARIAZIONE EUSTATICA: UNA PROSPETTIVA COMUNE

Risulta ormai accettato universalmente come sia impossibile ricostruire una curva di variazione eustatica valida globalmente, prendendo in oggetto dati provenienti da singole località. Va infatti considerata l'interazione tra fenomeni geologici legati al sollevamento del mare, quali l'isostasia e movimenti di tipo tettonico che agiscono in modo complesso e su scale di tempo ed aree differenti. Tutti elementi che non consentono una valutazione obiettiva dei dati scaturiti da morfostrutture o da sequenze deposizionali afferenti ad aree o bacini diversi.

L'utilizzo di parametri stratigrafici, morfologici, sedimentologici, isostatici e tettonici di una zona, consentono inoltre valutazioni sull'omogeneità di varie porzioni della costa in un dato bacino, come ad esempio il Tirreno.

Risulta evidente che, una volta individuato un marker di riferimento che indichi una quota prossima o coincidente con la quota eustatica del paleolivello del mare, si ridefinisce la possibilità che esistano aree valutabili come stabili. In queste aree si può indicare l'assenza di significativi fenomeni isostatici e tettonici, potendo escludere innalzamenti e abbassamenti relativi, altalenanti, di settori costieri, soprattutto se disomogenei e di natura differente. L'evidenza di una relativa stabilità tettonica in zone differenzialmente collocate rispetto ad aree che sono sede di manifeste attività tettono-isostatiche, con settori di piattaforma continentale dalla geometria, apporto sedimentario e geologia talvolta molto variabili, è credibilmente riferibile a tempi e carichi geostatici di azione relativamente bassi. D'altronde sono da escludere da un punto di vista statistico casi nei quali la somma di movimenti positivi o negativi avesse casualmente riportato in più zone costiere del mondo il marker Eutirreniano di nuovo a quota + 7, cioè alla sua iniziale quota eustatica.

Un tale marker permetterebbe, inoltre, di confrontare dati provenienti da località limitrofe o semplicemente diverse, una volta riconosciuta la reciproca stabilità tettonica.

Risulta opportuno considerare come *variazioni eustatiche relative* i record osservati, facendo riferimento alla misura delle differenze di quota piuttosto che di volume delle acque (variazione eustatica s.s.), seppure riferendosi ad un marker si possa prendere in considerazione la possibilità di valutare come eustatiche le evidenze a disposizione.

Come *variazione eustatica relativa* del livello del mare durante il Pleistocene superiore e l'Olocene, si intende la variazione di quota compiuta dal mare a causa del cambiamento di volume globale dell'acqua indotto dalle variazioni climatiche rispetto al livello attuale (principalmente scioglimento dei ghiacci, secondariamente espansione termica), ma così come si deduce dagli indicatori geologico-ambientali (ad es. solchi di battente o terrazzi) in aree costiere valutabili come stabili a partire dall'Eutirreniano (indici di dislocazione verti-

cale inferiori a variazioni di ± 4 m in 125 ka BP - Stadio 5e), correlando strettamente le variazioni globali al loro effetto sul territorio (indicatori geologici).

Come marker di riferimento si propone l'utilizzo di indicatori di livello del mare appartenenti allo stadio Eutirreniano (5e). La scelta, non casuale, deriva da diverse considerazioni, universalmente riconosciute (Cosentino e Gliozzi, 1988):

- risulta ben inquadrabile sia dal punto di vista paleontologico, grazie alla presenza di *Strombus bubonius*, sia cronostratigrafico, per l'ausilio di datazioni (U/Th ed aminostratigrafia). L'età riferita agli *Strombus bubonius* è di circa 125 ka BP (Dai Pra & Stearns, 1977; Pias et al., 1984; Hearty & Dai Pra, 1985; Hearty et al., 1986 a, b; Hearty, 1987);

- l'Eutirreniano è un periodo durante il quale il livello del mare ha stazionato al di sopra della quota attuale, per questo motivo è facilmente individuabile (Fig. 13);

- affiora, con forme e depositi, con continuità in moltissime località costiere del mondo;

- il livello di risalita massima e di stazionamento del mare eustatico globale raggiunto durante l'Eutirreniano, è valutato ed universalmente accettato essere di 7 ± 1 m sopra il livello attuale (Ku *et al.*, 1974; Harmon *et al.*, 1983).

Carobene *et al.* (1994) in un recente lavoro chiariscono la terminologia utilizzata nella stratigrafia del quaternario in particolare nel Pleistocene superiore (Tirreniano) e l'uso corretto di forme e depositi litorali.

Un esempio pratico di come utilizzare il marker di riferimento proposto è costituito dagli studi di paleoclimatologia e paleoeustatismo condotti presso il promon-

torio di Capo Palinuro (SA) ed il promontorio dell'Argentario (GR) (Alessio *et al.*, 1992 e 1997; Antonioli & Oliverio, 1996; Antonioli *et al.*, 1997). Sulla base della quota di affioramento del solco di battente attribuito all'Eutirreniano, sono stati calcolati indici di subsidenza di $3-4 \cdot 10^{-3}$ m ka⁻¹ (Palinuro, solco a +2.2 m) e \sim zero (Argentario, solco a + 5.5 m): gli indici calcolati per le due località hanno permesso una buona correlazione fra le quote delle evidenze geomorfologiche e cronologiche utili alla ricostruzione delle oscillazioni del livello del mare dallo stadio 3 ad oggi, anche se afferenti a siti di ambiti geografici molto distanti.

CONCLUSIONI

L'utilizzo di indicatori geologici (coralli, speleotemi a livelli marini-continentali, beach rock, ecc.) reperibili in ambienti ed in aree geografiche dissimili ha permesso, unitamente all'affinamento delle tecniche di radiodating e di calibrazione dei dati, la realizzazione di curve sempre più dettagliate delle variazioni del livello del mare da 22 ka ad oggi.

Al fine di ottenere dati attendibili e confrontabili fra loro, seppure afferenti ad aree e bacini geologicamente distinti, viene avanzata una proposta di *modus operandi* integrata a livello globale: la formulazione di curve di variazioni eustatiche del livello del mare confrontabili fra loro dovrebbe scaturire da studi afferenti alle sole aree ritenute neotettonicamente stabili attraverso il riferimento ad un marker ideale. Quest'ultimo è individuato nella quota di affioramento del solco di battente Eutirreniano

(paleolivello eustatico del mare +7±1 m s.l.m. attuale). Vengono definite come aree costiere stabili quelle che a partire all'Eutirreniano (Stadio 5e) mostrano dislocazioni verticali inferiori a variazioni di ± 4 m in 125 ka BP rispetto alla quota eustatica di 7 m. Tale valore è stato scelto, considerando i movimenti verticali postirreniani costanti e rapportati cronologicamente agli ultimi 10 ka. Con una dislocazione di 4 metri in 125 ka infatti l'errore finale, riferi-

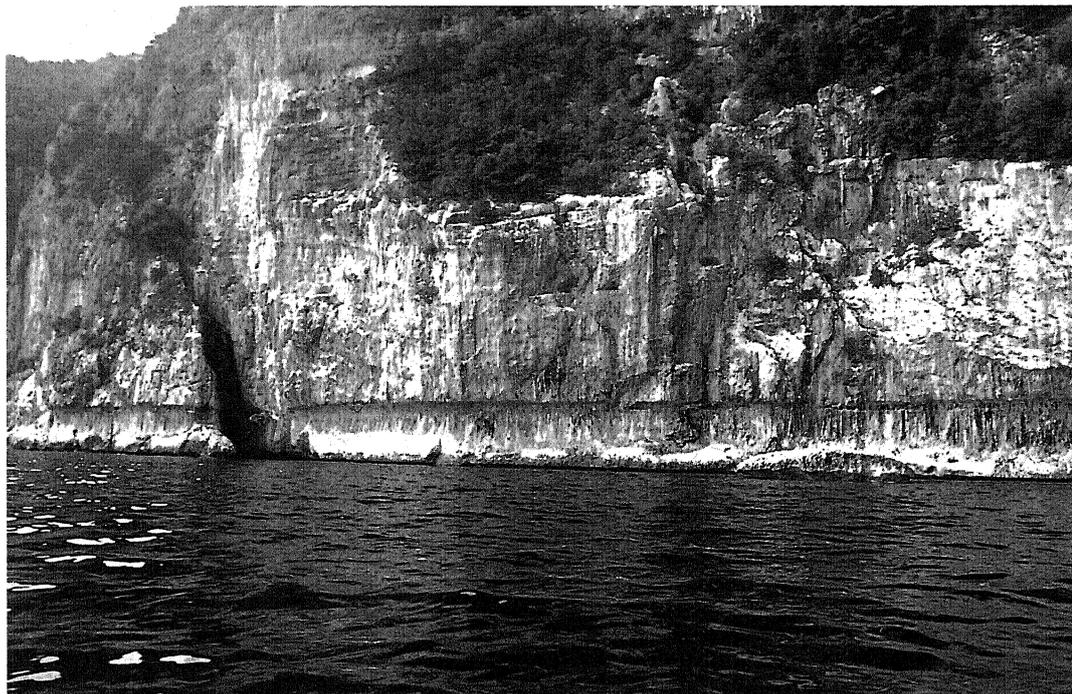


Fig. 13 Solco di battente Eutirreniano ubicato nel settore Meridionale del Golfo di Orosei, alla quota di 7,7 m (Antonioli & Ferranti 1992), il solco è scolpito con continuità per decine di chilometri proseguendo anche sul settore settentrionale del Golfo dove raggiunge la quota massima di 10,75 m (Carobene 1978).

Eutyrrhenian notch at + 7.7 m, in the south portion of Orosei Gulf (Antonioli & Ferranti 1992). The notch reach 10,75 m in the north portion of the Gulf (Carobene 1978) showing an impressive continuity.

to ad un livello marino olocenico, sarebbe dell'ordine del decimetro, quota paragonabile allo stesso errore di rilevamento dell'indicatore geologico o geoarcheologico o al valore di errore della stessa datazione. In quest'ottica la variazione eustatica del livello del mare viene intesa come una variazione del volume globale dell'acqua indotta dalla variazioni climatiche così come registrato dagli indicatori geologici (e quindi dal territorio) nelle aree stabili (*variazione eustatica relativa*).

L'alta correlabilità fra i dati scaturiti da indicatori diversi (per esempio coralli e speleotemi sommersi) in aree ben distinte fra loro (Thaiti e Mare Tirreno) ma considerate stabili sulla base di quanto detto nel cap. 2.3, ci permette di proporre come curva di riferimento per studi sulle variazioni recenti del livello del mare, il record dei dati plottati in figura 14.

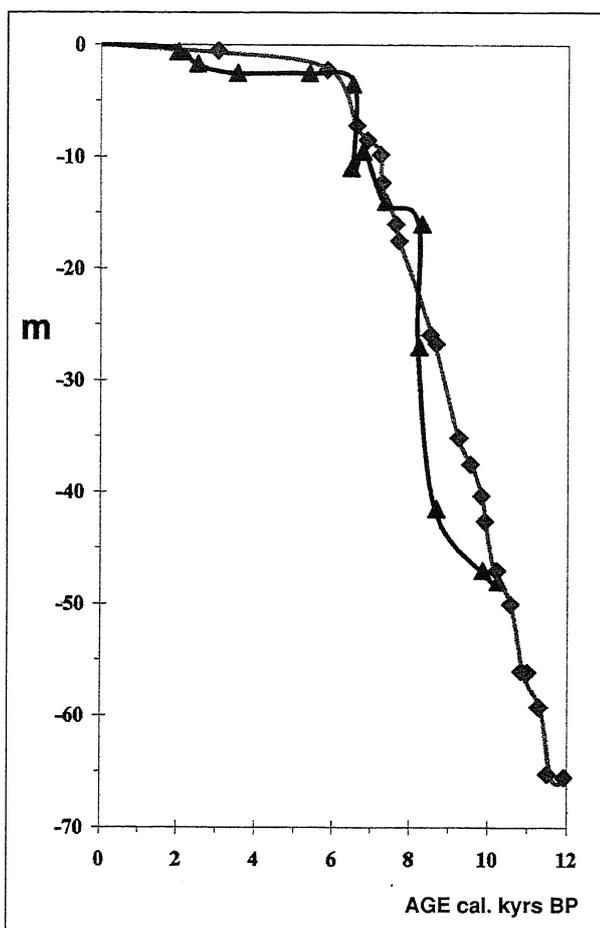


Fig. 14 - Curva comparativa di risalita del livello del mare post-glaciale ottenuta utilizzando i dati di Bard et al. (1996) provenienti da Thaiti (datazioni effettuate su coralli; in grigio) e da Alessio et al. (1997) provenienti dal Mar Tirreno (datazioni effettuate su speleotemi a livelli marini-continentali, in nero). I dati riportati sulla curva risultano confrontabili perchè provenienti da zone considerabili stabili e calibrati con il medesimo modello.

Post glacial sea level history obtained using data of Bard et al. (1996; dating corals from Thaiti cores, grey balls) and data of Alessio et al. (1997; dating speleothemes showing continental-marine layer from Thyrrhenian sea, Italy, black balls). Data, calibrated, and coming from stable area, are comparable.

BIBLIOGRAFIA

- Aharon P., 1983 - *14000-yr isotope climatic record from raised coral reefs in New Guinea*. Nature, **304**, 720-73.
- Alessio M., Allegri L., Antonioli F., Belluomini G., Ferranti L., Improta S., Manfra L. & Proposito A., 1992 - *Risultati preliminari relativi alla datazione di speleotemi sommersi nelle fasce costiere del Tirreno centrale*. Giorn. Geol., **54**, 2, 165-194.
- Alessio M., Allegri L., Antonioli F., Belluomini G., Improta S., Manfra L., Preite M., 1994 - *La Curva Di Risalita Del Mare Tirreno Negli Ultimi 43 Ky Ricavata Da Datazioni Su Speleotemi Sommersi E Dati Archeologici*. Memorie Descrittive Del Servizio Geologico Nazionale, Vol **52**.
- Alessio M., Allegri L., Antonioli F., Improta S., Molinaro, A., Puglisi C., Verrubi V. & Villani C., in progress. - *Ricostruzione paleogeografica ed andamento del Pleistocene superiore ed Olocene nelle piane Pontina e di Fondi*.
- Antonioli F. & Oliverio M., 1996 - *Holocene Sea-Level Rise Record by a Radiocarbon-Dated Mussel in a Submerged Speleothem beneath the Mediterranean Sea*. Quat. Res., **45**, 241-244.
- Antonioli F., Puglisi C. & Silenzi S., 1997 - *Rilevamento morfostratigrafico della costa emersa e sommersa del settore settentrionale del promontorio di Capo Palinuro*. Memorie Descrittive Del Servizio Geologico Nazionale, Vol **52**.
- Bard E., Hamelin B. & Fairbanks R., 1990 - *Calibration of ¹⁴C timescale over the past 30.000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals*. Nature, **345**, 405-410.
- Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G. & Rougerie F., 1996 - *Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge*. Nature, **382**, 241-244.
- Barth M. C. & Titus J. G. (Eds.), 1984 - *Greenhouse Effect and Sea-Level Rise: A Challenge for this Generation*. New York, Van Nostrand Reinhold, 325 pp.
- Belknap D. F. & Kraft J. C., 1977 - *Holocene relative sea level changes and coastal stratigraphic units on the northwest flank of the Baltimore Canyon trough geosyncline*. Jour. Sed. Petrol., **47**, 610-629.
- Blanc A. C., 1936 - *La stratigraphie de la plaine cotiere de la basse-Versilia (Italie) et la trasgression flandriene en Mediterranee*. Rev. de Geographis et Geol. Dynam., **IX**, 2, Paris.
- Blanchon P. & Shaw J., 1995 - *Reef drowning during the last deglaciation: Evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse*. Geology, **23**, 1, 4-8.
- Bloom A. L., 1967 - *Pleistocene shorelines: a new test of isostasy*. Geol. Soc. America Bull., **78**, 1477-1494.
- Bloom A. L., 1977 - *Atlas of Sea-Level Curves*. Dep. Geol. Sci., Cornell Univ., Ithaca.
- Bloom A. L., Broecker W. S., Chappel J., Matthews R. K. & Mesolella K. J., 1974 - *Quaternary sea level fluctuations on a tectonic coast: new ²³⁰Th/²³⁴U dates from the Huon Peninsula, New Guinea*. Quat. Res., **4**, 185-205.

- Bondesan M., Castiglioni G.B., Elmi C., Gabbianelli G., Marocco R., Pirazzoli P. & Tomasin A., 1995 - *Coastal Areas at Risk from Storm Surges and Sea-Level Rise in Northeastern Italy*. Jour. of Coast. Res., **11** (4), 1354-1379.
- Bosellini A., Mutti E. & Ricci Lucchi F., 1994 - *Rocce e successioni sedimentarie*. UTET ed., 395 pp.
- Bosi C., Carobene L. & Sposato A., 1996 - *Il ruolo dell'eustatismo nella evoluzione geologica nell'area mediterranea*. Mem. Soc. Geol. It., **51**, 363-382.
- Burton R., Kendall C. & Lerche I., 1987 - *Out of Our Depth: on the impossibility of Fathoming Eustasy from the Stratigraphic Record*. Earth Sci. Rev., **24**, 237-277.
- Carobene L., 1980 - *Terrazzi marini, eustatismo e neotettonica*. Geogr. Fis. Din. Quat., **3**, 35-41.
- Carobene L., Firpo M. & Vetuschi Zuccolini M., 1994 - *Archiviazione e gestione informatica dei dati bibliografici sulle antiche linee di riva marine*. Il Quaternario, **7**(1), 483-492.
- Chappell J., 1974 - *Late Quaternary Glacio- and Hydro-isostasy, on a Layered Earth*. Quaternary Res., **4**, 429-440.
- Chappell J., Rhodes E. G., Thom B. G. & Wallensky E., 1982 - *Hydro-Isostasy and the Sea-Level Isobase of 5500 B.P. in North Queensland, Australia*. Marine Geol., **49**, 81-90.
- Chappell J. & Shackleton N.J., 1986 - *Oxygen isotopes and sea level*. Nature, **324**, 137-140.
- Chappel J., Omura A., Esat T., McCulloch M., Pandolfi G., Ota Y. & Pillans B., 1996 - *Reconciliation of late Quaternary sea level derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records*. Earth Planet. Sci. Lett., **141**, 227-236.
- Chen Y. G. & Liu T. K., 1996 - *Sea Level Changes in the Last Several Thousand Years, Penghu Island, Taiwan Strait*. Quat. Res., **45**, 254-262.
- Clark J. & Lingle J., 1979 - *Predicted Relative Sea Level Changes (18,000 Years B.P. to Present) Caused by Late-Glacial Retreat of the Antarctic Ice Sheet*. Quaternary Res., **11**, 279-298.
- Clark J., Farrell W. E. & Peltier W. R., 1978 - *Global Changes in Postglacial Sea Level: A Numerical Calculation*. Quaternary Res., **9**, 265-287.
- Commission of the European Communities, 1990 - *The greenhouse effect and its implications for the European Community*. Report EUR **12707**.
- Cosentino D. & Gliozzi E., 1988 - *Considerazioni sulle velocità di sollevamento di depositi eutirreniani dell'Italia meridionale e della Sicilia*. Mem. Soc. Geol. Ital., **41**, 653-665.
- Dai Pra G. & Hearty P. J., 1988 - *I livelli marini pleistocenici del Golfo di Taranto. Sintesi geocronostratigrafica e tettonica*. Mem. Soc. Geol. Ital., **41**, 637-644.
- Dai Pra G. & Stearns C. E., 1977 - *Sul Tirreniano di Taranto. Datazioni sui coralli col metodo $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$* . Geol. Rom., **16**, 231-242.
- Emery K. O. & Aubrey D. G., 1991 - *Sea Levels, Land Levels and Tide Gauges*. Springer, Berlin, 237 pp.
- Emery K. O., Aubrey D. G. & Goldsmith V., 1988 - *Coastal Neo-Tectonics of the Mediterranean From Tide-Gauge Records*. Marine Geol., **81**, 41-52.
- Emiliani C., 1955 - *Pleistocene temperatures*. Journ. Geol., **63**, 538-578.
- Emiliani C., 1966 - *Isotopic Palaeotemperatures*. Science, **154**, 51-57.
- Fairbanks R. S. & Matthews R. K., 1978 - *The Marine Oxygen Isotope Record in Pleistocene Coral, Barbados, West Indies*. Quat. Res., **10**, 181-196.
- Fairbridge R. W., 1961 - *Eustatic changes in sea level*. Phys. Chem. Earth, **4**, 99-185.
- Fairbridge R. W., 1983 - *Isostasy and Eustasy*. Smith & Dawson eds., Shorelines and Isostasy, London, Academic Press, 3-25.
- Flemming N. C. & Webb C. O., 1986 - *Tectonic and eustatic coastal changes during the last 10000 years derived from archeological data*. Z. Geomorphol. N. F., **62**, 1-29.
- Flemming N. C., 1992 - *Predictions of relative coastal sea-level change in the Mediterranean based on archeological, historical and tide-gauge data*. Climatic Change in the Mediterranean. Edward Arnold, London, 247-281.
- Fletcher C. H., 1988 - *Holocene sea-level history and neotectonics of the united states mid- atlanti region: applications and corrections*. Journal of Geol., **96**, 323-337.
- Harmon R. S., Mitterer R. M., Kriausakul N., Land L. S., Schwarcz H. P., Garrett P., Larson G. J., Vacher H. L. & Rowe M., 1983 - *U-series and amino-acid racemization geochronology of Bermuda: implications for eustatic sea-level fluctuations over the past 250000 years*. Paleogeogr. Paleoclim. Paleoecol., **44**, 41-70.
- Hearty P. J. & Dai Pra G., 1985 - *Aminostratigraphy and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of Quaternary shorelines in the Puglia region of Southern Italy*. Proc. Int. Coral Reef Congr. Papeete, **3**, 163-169.
- Hearty P. J., 1987 - *An inventory of the last interglacial (latu sensu) age deposits from the Mediterranean basin: a study of isoleucine epimerization and U series dating*. Z. Geomorph. N. F., **62** (suppl), 51-69.
- Hearty P. J., Miller G. H., Stearns C. E. & Szabo B. J., 1986 a - *Aminostratigraphy of Quaternary shorelines in the Mediterranean basin*. Bull. Geol. Soc. Am., **97**, 850-858.
- Hearty P. J., Bonfiglio L., Violanti D. & Szabo B. J., 1986 b - *Age of late Quaternary marine deposits of Southern Italy determined by aminostratigraphy, faunal correlation and Uranium-series dating*. Riv. It. Paleont. Strat., **92**, 148-164.
- Hey R. W., 1978 - *Horizontal Quaternary Shorelines of the mediterranean*. Quaternary Res., **10**, 197-203.
- Ku T. L., Kimmel M. A., Easton W. H. & O'Neil T. J., 1974 - *Eustatic sea level 120000 years ago on Oahu, Hawai*. Science, **183**, 959-962.
- Laborel J, Morhange C., Lafonte R., Le Campion J., Laborel-Deguen F. & Sartoretto S., 1994 - *Biological evidence of sea level rise during the last 4500 years on the rocky coasts of continental southwestern France and Corsica*. Marine Geology, **120**, 203-223.
- Lisitzin E., 1974 - *Sea-Level Changes*. New York, Elsevier.
- Milankovitch M., 1938 - *Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate*. Handb. der Geophysik, Gutenberg Ed., **9**, pp. 593-

- 698.
- Mc Guire W., Howarth R., Firth C., Solow A., Pullen A., Saunders S., Stewart I & Vita Finzi C., 1997 *Correlation between rate of sea level change and frequency of explosive volcanism in the Mediterranean*. *Nature*, **389**, 473-476.
- Morner N. A., 1979 - *Earth Rheology, Isostasy and Eustasy*. New York, Wiley.
- Newman W.S., 1986 - *Palaeogeodesy data bank and palaeogeodesy IGCP Project 200*. Newsletter and annual report, Univ. of Durham, pp. 41.
- Peltier W. R., 1976a - *Glacial-isostatic adjustment II: The inverse problem*. *Geophys. J.R. astr. Soc*, **46**, 669-705.
- Peltier W. R., 1976b - *Glacial-isostatic adjustment I: The forward problem*. *Geophys. J.R. astr. Soc*, **46**, 605-646.
- Pirazzoli P. A., 1976 - *Les variations du niveau marin depuis 2000 ans*. *Mem. Lab. Geomorphol. Ecol. Prat. Ht. Etud.*, Dinard, **30**, 421 pp.
- Pirazzoli P. A., 1986 - *Marine Notches*. Sea level research: a manual for the collection and evaluation of data. *Geobooks*, Norwich, 361-400.
- Pirazzoli P. A., 1986 - *Secular trends of relative sea level (RSL) changes indicated by tide-gauge records*. *Jour. Coast. Res.*, **SI-1**, 1-26.
- Pirazzoli P.A., 1991 - *World Atlas of Holocene Sea Level Changes*. Elsevier Oceanography Series, **58**.
- Pirazzoli P. A., 1993 - *Global sea-level changes and their measurement*. *Global and Planetary Changes*, **8**, 135-148.
- Pirazzoli P.A., Radtke U., Hantoro W.S., Jouannic C., Hoang C.T., Causse C. & Borel Best M., 1993 - *A one million-year-long sequence of marine terraces on Sumba Island, Indonesia*. *Marine Geol.*, **109**, 221-236.
- Pisias N. G., Martinson D. G., Moore T. C., Shackleton N. J., Prell W., Hays J. & Boden G., 1984 - *High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 300000 years*. *Marine Geol.*, **56**, 119-136.
- Provansal M., 1991 - *Varations verticales du trait de cote en Provence depuis 5000 ans*. *Mediterranée*, **4**, 15-22.
- Radke U., Grun R. & Schwarcz H.P., 1988 - *Electron Spin Resonance of the Pleistocene coral reef tracts of Barbados*. *Quat. Res.*, **29**, 197-215.
- Segre A., 1949 - *Tracce di morfologia subaerea sul fondo marino litoraneo del Lazio Meridionale*. *Historia Naturalis*, anno III^o, fasc. **1**, 1-3.
- Segre A., 1969 - *Linee di riva sommerse e morfologia della piattaforma continentale italiana relative alla trasgressione marina versiliana*. *Quaternaria*, **XI**, 141-154.
- Shackleton N. J. & Opdyke N. D., 1973 - *Oxygen Isotope and Palaeomagnetic Stratigraphy of Equatorial Pacific Core V28-238: Oxygen Isotope Temperatures and Ice Volumes on a 105 Year and 106 Year Scale*. *Quat. Res.*, **3**, 39-55.
- Shackleton N. J., 1987 - *Oxygen isotopes, ice volume and sea level*. *Quat. Sci. Rev.*, **6**, 183-190.
- Shepard F. P. & Curray J. R., 1967 - *Carbon-14 determination of sea level changes in stable areas*. *Progr. Oceanogr.*, **4**, 283-291.
- Smith D. E. & Dawson A. G., 1983 - *Shorelines and Isostasy*. London, Academic Press, 387 pp.
- Stuiver M. & Reimer P.J., 1993 - *Radiocarbon calibration program*. *Radiocarbon*, **35**, 215-230.
- Walcott R. I., 1972 - *Past sea levels, eustasy and deformation of the Earth*. *Quaternary Res.*, **2**, 1-14.
- Warrick R. A., Barrow E. M. & Wigley T. L. M., 1990 - *The Greenhouse Effect and its Implications for the European Community*. Commission of the European Communities. Report EUR 12707 EN.
- Whitcomb J. H., 1976 - *New vertical geodesy*. *Jour. Geophys. Res.*, **81**, 4937-4946.
- Yokoama Y., Nakada M., Maeda Y., Nagaoka S., Okuno J., Matsumoto E., Sato H. & Matsushima Y., 1996 - *Holocene sea-level change and hydro-isostasy along the west coast of Kyushu, Japan*. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **123**, 29-47.
- Zerbini S., Plag H., Baker T., Becker M., Billiris H., Burki B., Kahle H., Marson I., Pezzoli L., Richter B., Romagnoli C., Sztobryn M., Tomasi P., Tsimplis M., Veis G. & Verrone G., 1996 - *Sea level in the Mediterranean: a first step towards separating crustal movements and absolute sea-level variations*. *Global and Planetary Change*, **14**, 1-48.

Ms: ricevuto il: 30 giugno 1997
 Inviato all'A. per la revisione il: 20 ottobre 1997
 Testo definitivo ricevuto il: 23 novembre 1997

Ms received: June 30, 1997
 Sent to the A. for a revision: October 20, 1997
 Final text received: November 23, 1997