



José Ramón Martínez Batlle

Geomorfología

Tema 6. Procesos Litorales

INTRODUCCIÓN

- Geomorfología litoral=evolución del modelado litoral (Bird, 2000)
 - acantilados
 - franjas rocosas
 - playas
 - dunas
 - estuarios
 - *lagoons*
 - deltas
- Los primeros 100 m de los 440,000 km de costa son usados intensamente por la humanidad
- Aprox. 66% población mundial vive a unos pocos kilómetros de la costa

INTRODUCCIÓN

- Pioneros:
 - Darwin (s. XIX): arrecifes, origen atolones
 - Grove Karl Gilbert (1890): spit, bar, línea de costa
 - Suess (1888), clasificación tectónica de las costas: rectas o pacíficas (paralelas a la costa); irregulares o atlánticas (estructuras forman un ángulo con la línea de costa)
 - Basados en Davis
 - Johnson (1919): inmersión, emersión, inspirado en ciclo de erosión
 - Cotton (1954): de regiones estables y móviles
 - Shepard (1948): de progradación y retracción del litoral
 - Strahler (1952): sedimentos, procesos
 - Fairbridge (1961), Shackleton: curvas de cambio, historia nivel del mar diferenciada entre costas
 - Inman y Nordstrom (1971): costas pacíficas (márgenes de placas activos) y atlánticas (pasivos)
 - Bloom (1978): costas bajas y acantilados
 - Woodroffe (2002): evolución costera (dataciones), nivel del mar
 - Houghton: cambios del nivel del mar debidos al cambio climático

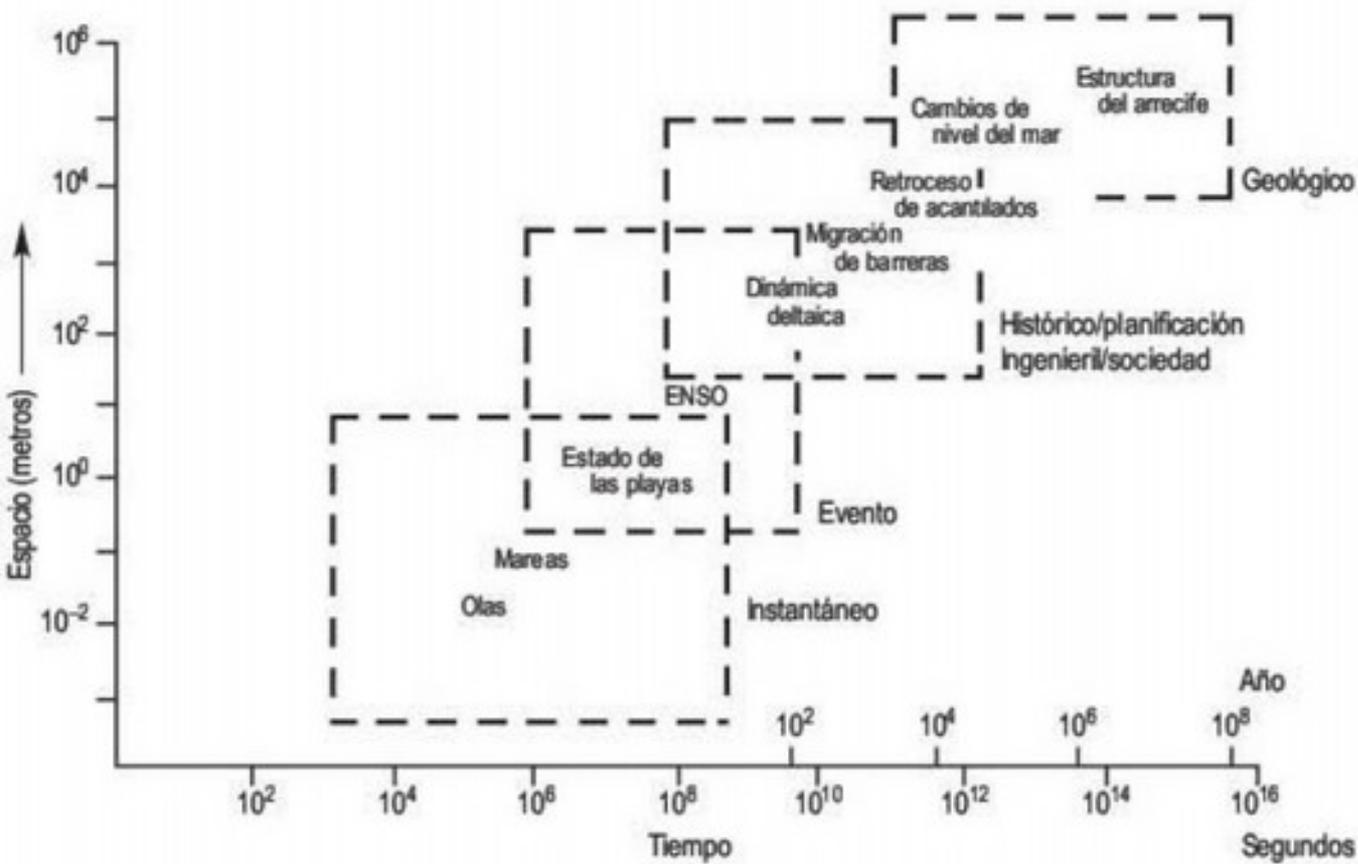
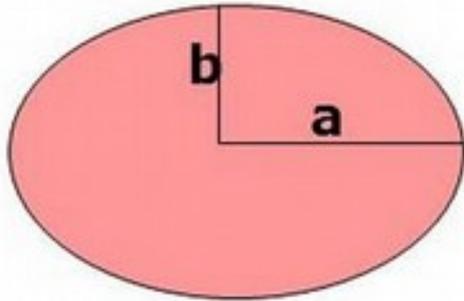


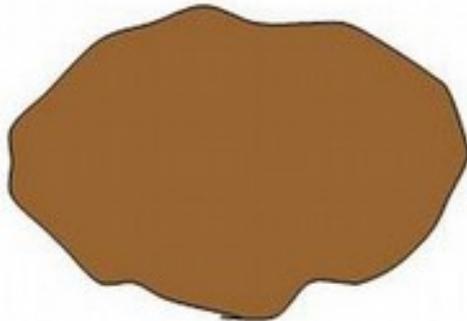
FIGURA 11.1 Representación de escalas espaciales y temporales implicadas en la evolución del litoral. Los modelados de mayor tamaño operan a grandes escalas de tiempo, mientras que las formas litorales de menor dimensión responden a intervalos de tiempo más cortos (modificado por Cowell y Thom, 1994, en Woodroffe, 2002).

NIVEL DEL MAR

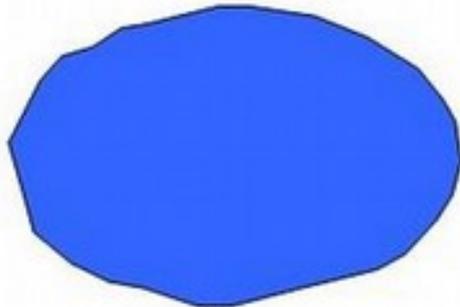
- Altura de las aguas del mar cuando está en calma, que sirve de referencia para medir la altura de una montaña, la profundidad de un lago, y de cualquier un punto geográfico, etc.



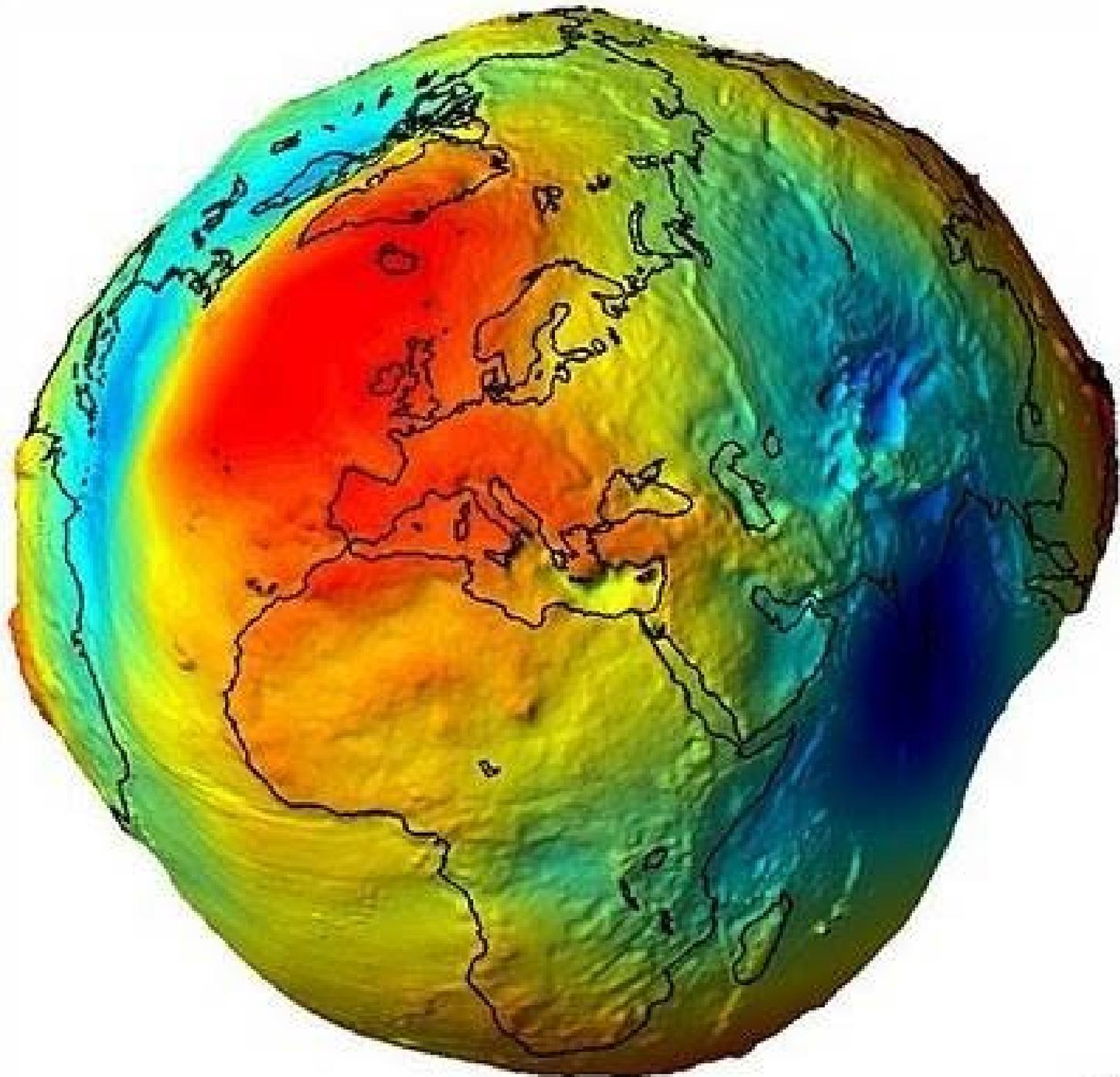
El **ELIPSOIDE** modela la superficie de un geode utilizando una figura definida matemáticamente (a = eje mayor; b = eje menor)



La superficie de la Tierra presenta montañas y otras irregularidades



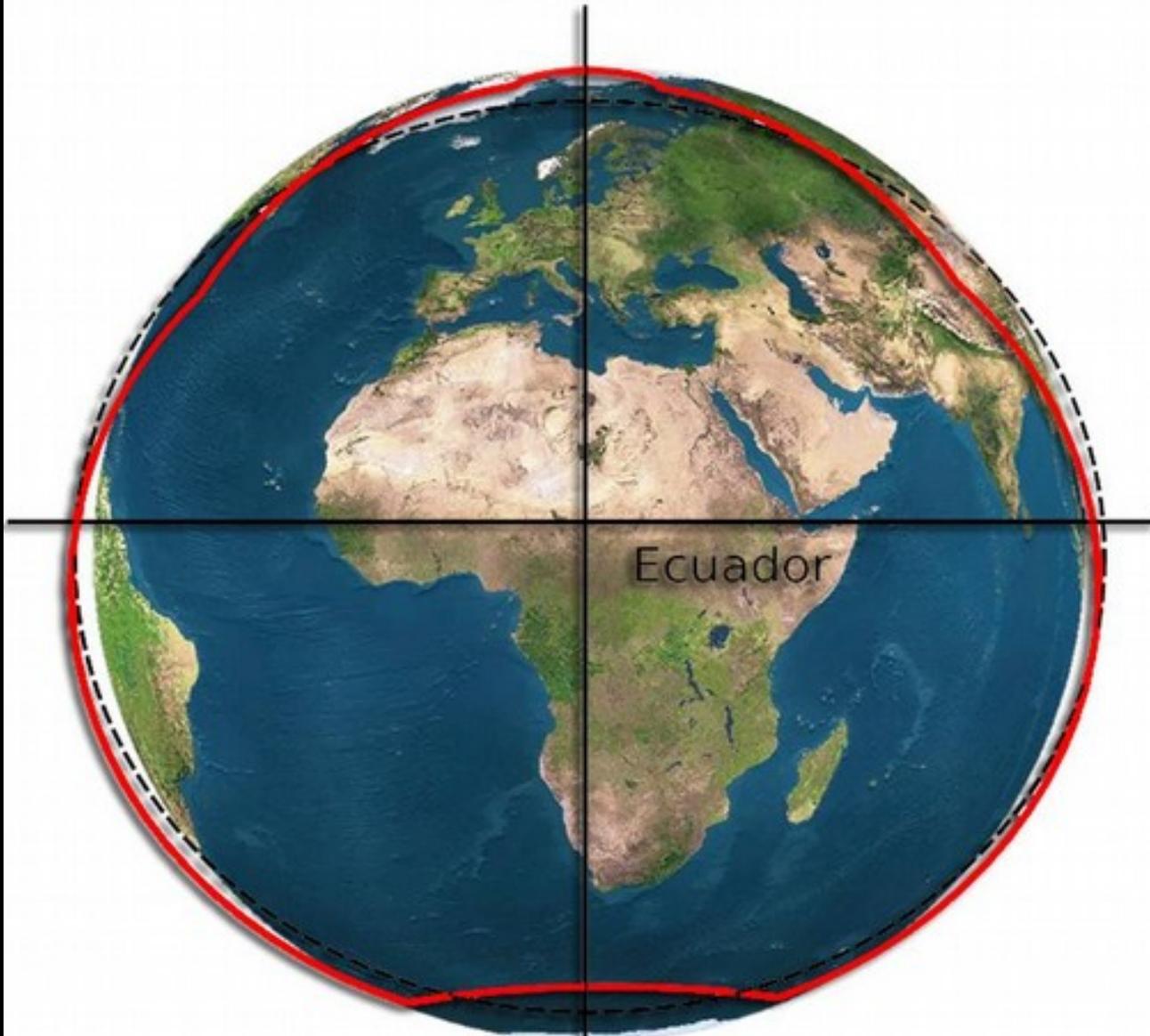
El **GEOIDE** es una superficie equipotencial perpendicular a la gravedad y aproximadamente está determinada por el nivel del mar



La forma de la Tierra (el geoide)

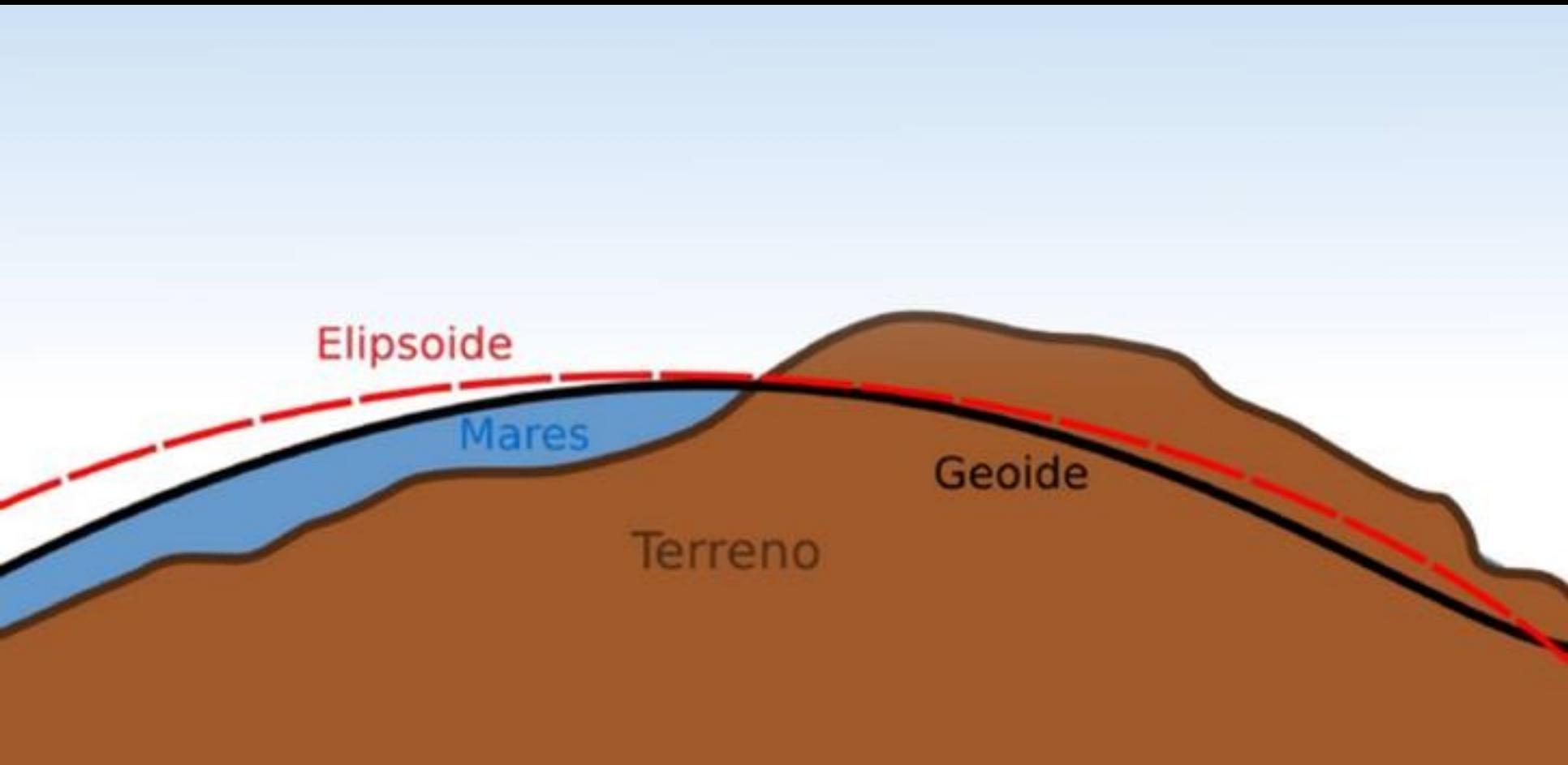
Representación real exagerada

Polo Norte



Ecuador

Polo Sur



NIVEL DEL MAR

- Indicadores: organismos marinos, como corales, ostras
- Deposicionales: estratigrafía y geomorfología litoral
- Costas rocosas: plataformas de abrasión emergidas, acantilados y nichos basales (muescas)

NIVEL DEL MAR

- Causas del cambio
 - Eustatismo (Suess)
 - Tectono-eustatismo (epirogénicos, orogénicos e isostáticos)
 - Sedimento-eustatismo
 - Glacio-eustatismo
- Cambios Estéricos
- Volcanismo
- Hidrostatia
- Geoidales
- Corrientes oceánicas
- Subsistencia antrópica

NIVEL DEL MAR

- Transgresión Flandriense
- Curvas regionales
- Estable desde hace ca. 6,000 años

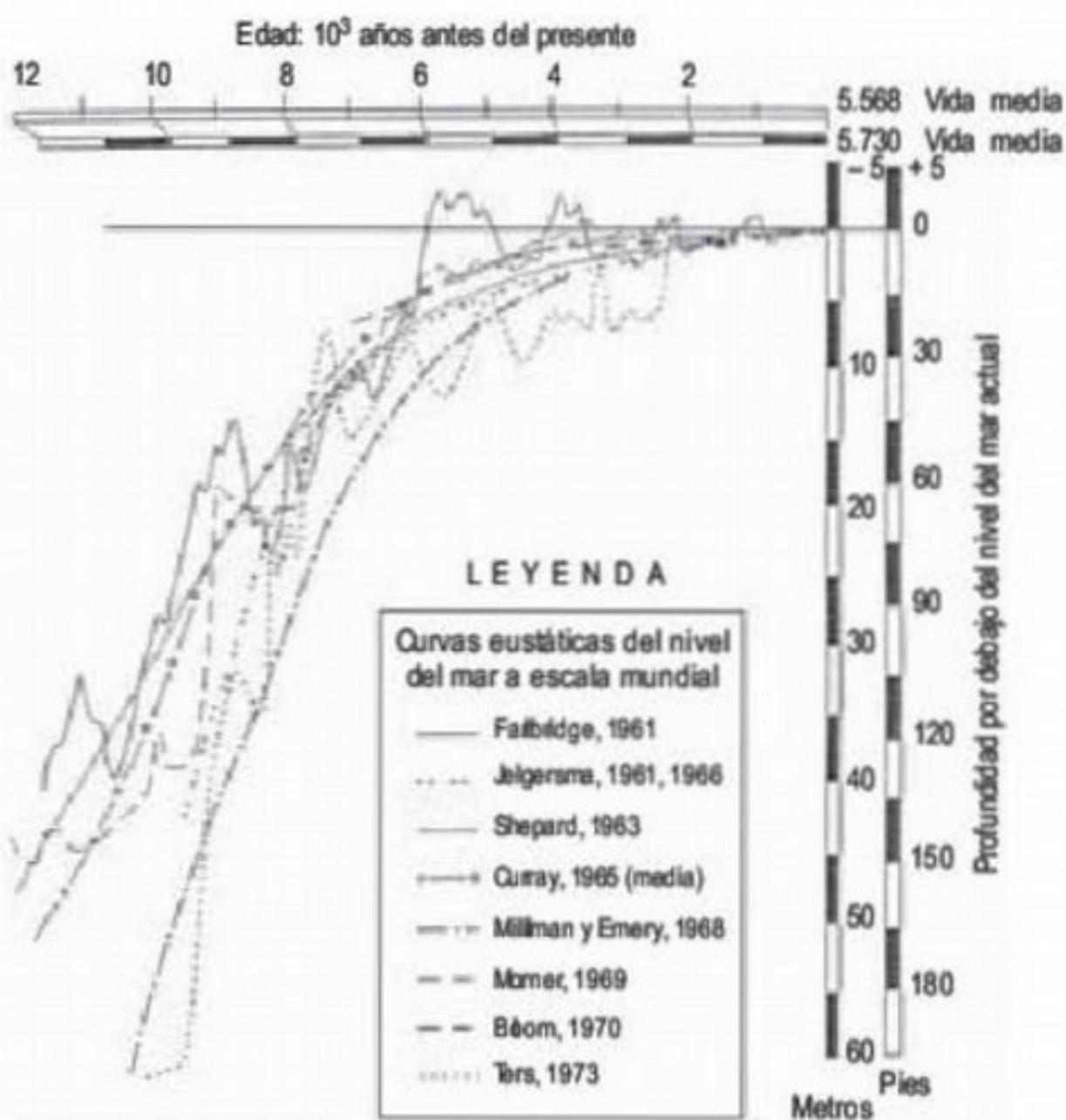


FIGURA 11.3 Curvas de variaciones de nivel del mar durante el Holoceno (Curray, 1969; en Flor, 2004).

NIVEL DEL MAR

- Geomorfología – Climatología: ¿cambia rápidamente o no?

"Las estimaciones del IPCC se basan en modelos geofísicos de carga, que según Pirazzoli (2004) se fundamentan en aproximaciones basadas en asunciones simplistas, en contraposición con los datos más precisos que ofrecen los trabajos de campo. Según este autor, no existe prueba alguna de un aporte de agua adicional al océano procedente del casquete de la Antártida"

Según los datos de campo y de mareógrafos, el nivel medio global del mar ha sufrido una elevación de 1 a 1.1 mm/año en el periodo de 1850-1930. Durante la etapa entre 1930 Y 1950 el nivel del mar desciende. A finales del siglo XX no hay señales de aceleración. A partir de las altimetrías por satélite durante la década de 1990, no se reconocen cambios en este periodo (Mörner, 2004).

NIVEL DEL MAR

- Geomorfología – Climatología: ¿cambia rápidamente o no?

"No cabe duda de que el planeta se calienta y que en parte se debe al incremento de gases de efecto invernadero. Con respecto al nivel del mar, no hay una relación directa entre el incremento de temperatura y las variaciones de nivel del mar y no existe una aceleración en el ascenso del nivel del mar, tal como se manifiesta con la temperatura (Zazo, 2006)"

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- **Olas**: ondulaciones sobre la superficie del agua producidas por el **viento**.
- **Corrientes**:
 - Deriva litoral: a lo largo de la costa
 - Oceánicas/termohalina
 - De resaca: perpendiculares a la costa
- **Mareas**

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas:

- Longitud de onda (L): distancia entre dos valles (senos) o dos picos (crestas)
- Los movimientos orbitales del agua que disminuyen rápidamente hacia el fondo, hasta que es muy débil en la denominada "base de la ola", a una profundidad ca. $L/2$
- Altura de la ola (A o H): la diferencia en elevación entre la cresta y el valle; es proporcional a la velocidad del viento
- Periodo (P): tiempo que emplea una ola en recorrer una distancia igual a la de su longitud de onda

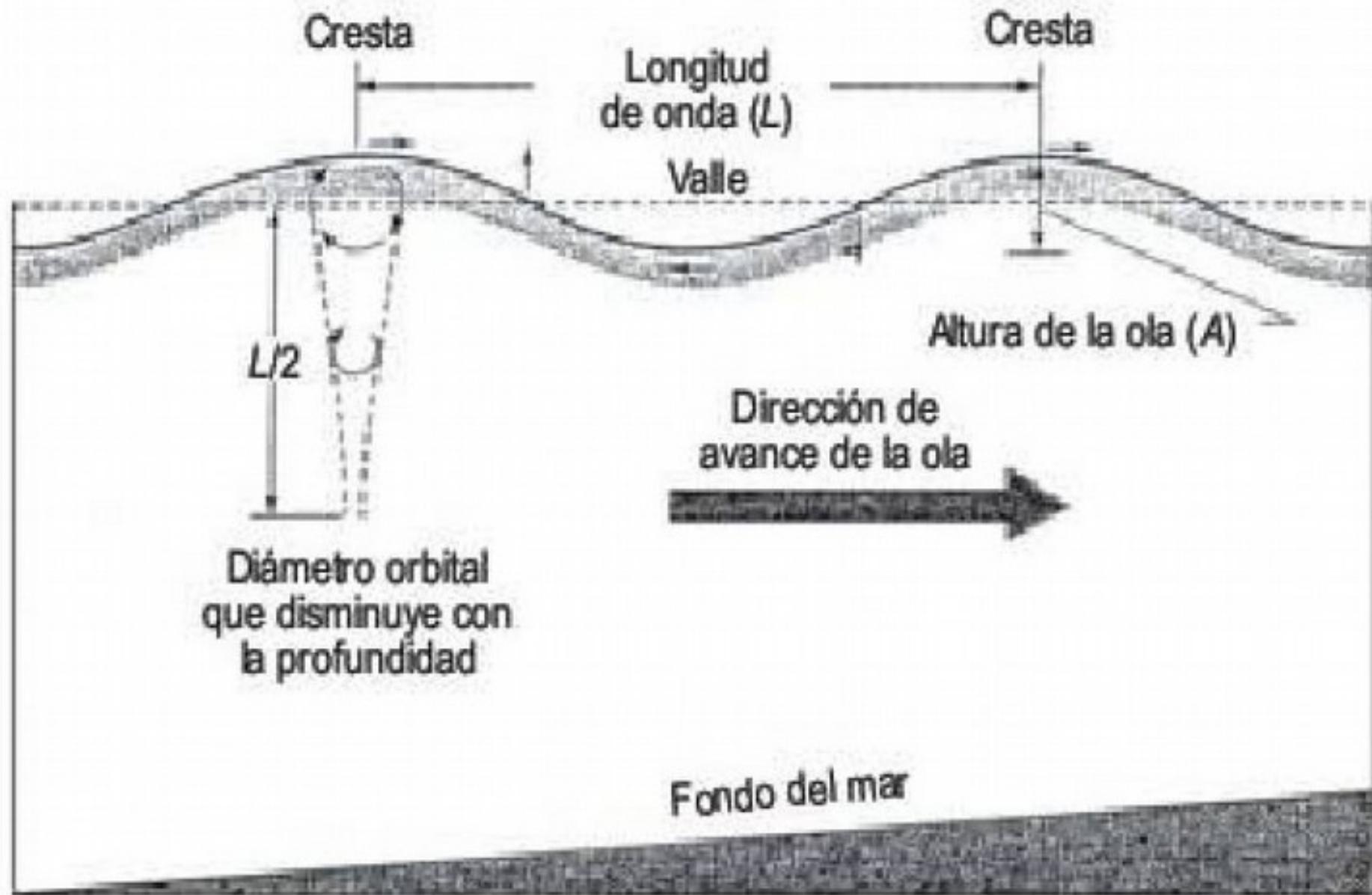
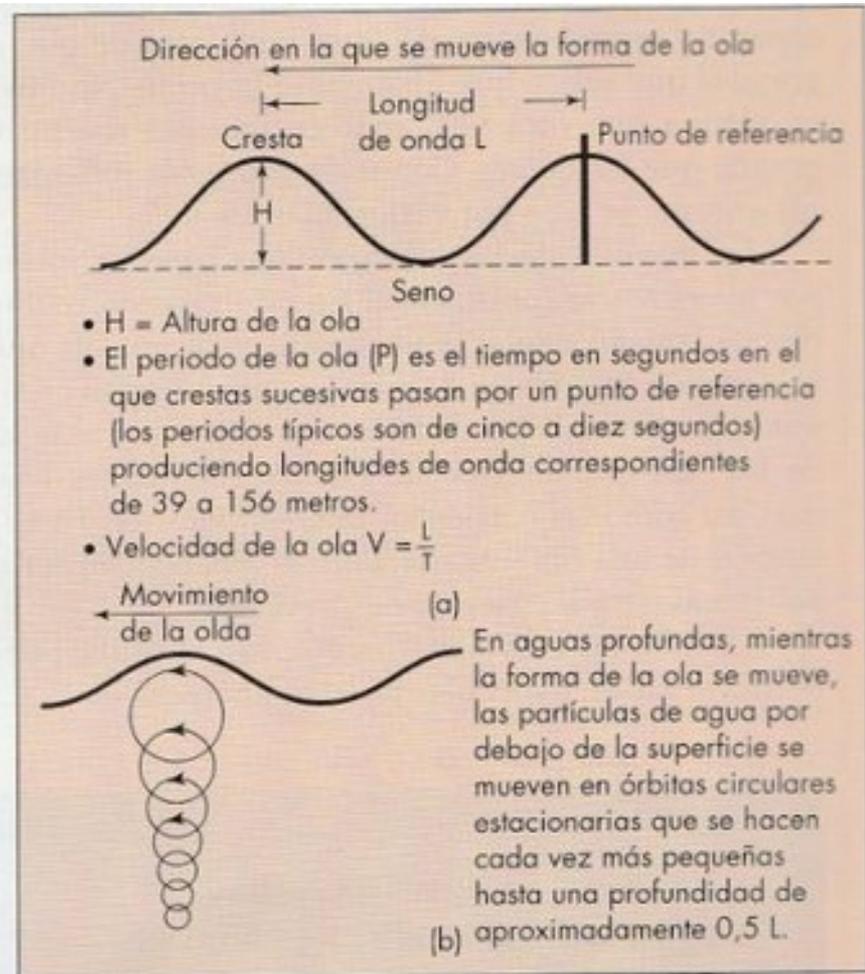
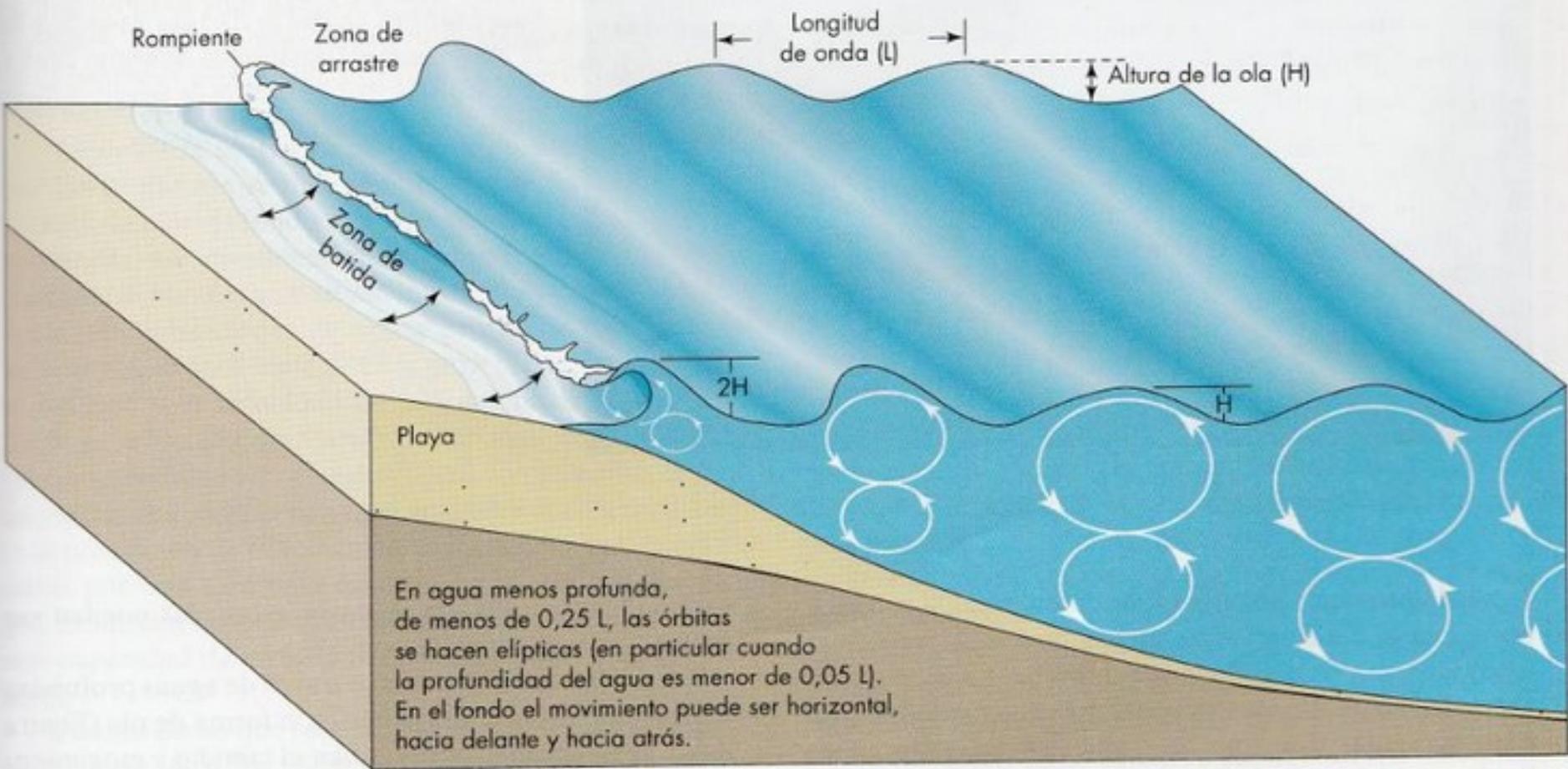


FIGURA 11.4 Términos utilizados para las olas y dirección de avance de las mismas (Bird, 2000).

► **FIGURA 8.2 OLAS Y PLAYAS** (a) Forma de la ola en aguas profundas (la profundidad del agua es mayor de $0,5 L$, donde L es la longitud de onda). La línea negra curva es la superficie del agua y la línea negra gruesa vertical es un embarcadero o cualquier otro objeto fijo que puede actuar como punto de referencia para determinar el periodo de la ola (P). Una línea negra discontinua conecta el fondo de los senos y es la línea de referencia para calcular la altura de la ola (H). (b) Movimiento de las partículas de agua asociado con el movimiento de la ola en aguas profundas. Las partículas de agua siguen el camino de las flechas en los círculos negros. El movimiento de la ola es de derecha a izquierda. (c) Movimiento de las partículas de agua en aguas poco profundas, menos de $0,25 L$. Las partículas de agua siguen el camino de las flechas en los círculos blancos. Las flechas negras pequeñas muestran que el agua en la playa se mueve arriba y abajo en la zona de batida, agua muy poco profunda en el frente de playa. Las olas se acercan a la orilla de derecha a izquierda.





(c)

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas:
 - Si se producen por tormentas, se denomina "swell", que pueden llegar a ser de hasta 20 m y viajar grandes distancias
 - Grandes olas:
 - En latitudes templadas, por el viento del oeste
 - En el trópico, durante ciclones tropicales

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas:

- **Refracción**: cambio de dirección o rotación de las crestas adaptándose al fondo.
- Dependiendo de la forma de la costa, la refracción puede producir convergencia y divergencia de las ortogonales de las olas
- Las trayectorias ortogonales tienden a converger sobre los **promontorios**, que provocan un **incremento en la altura** de la ola y una **concentración de la energía**
- En las **bahías** las ortogonales divergen, produciendo una **dispersión de la energía**

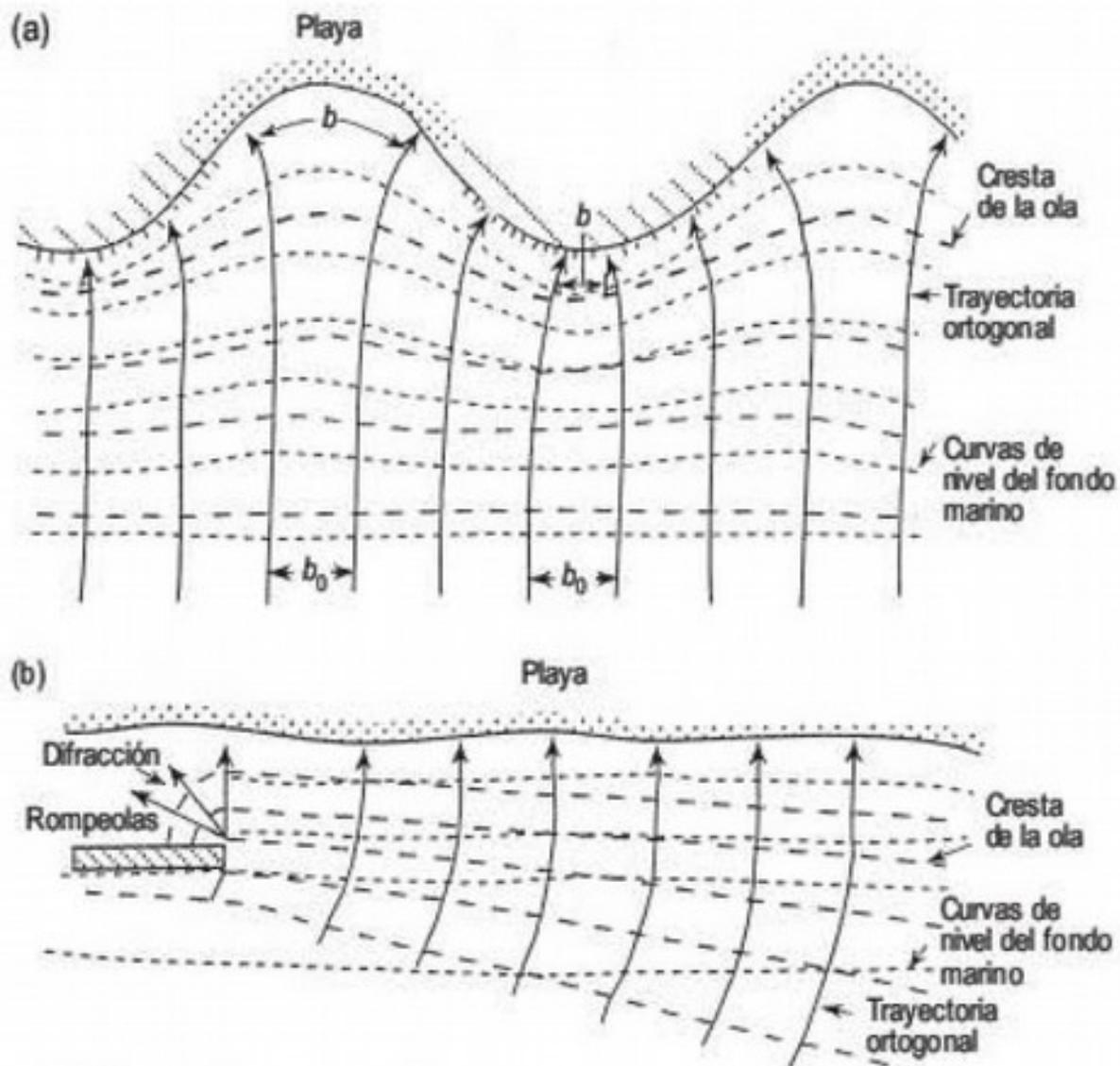
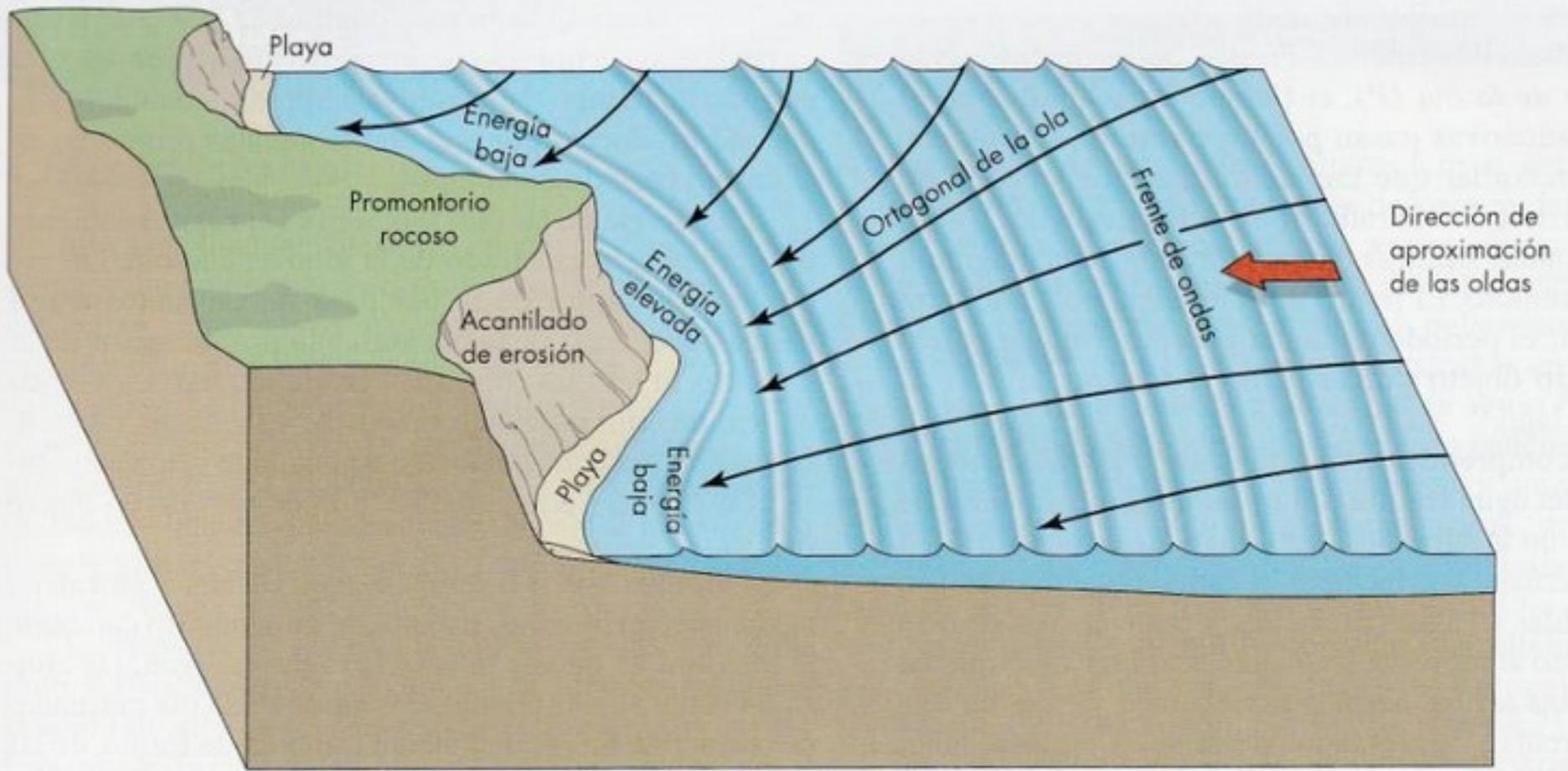


FIGURA 11.5 Refracción de las olas. (a) Olas cuyas trayectorias se acercan perpendiculares a la costa. La divergencia de las trayectorias viene indicada por $b > b_0$. (b) Olas con aproximación oblicua a la costa. La difracción tiene lugar detrás del rompeolas (Woodroffe, 2002).



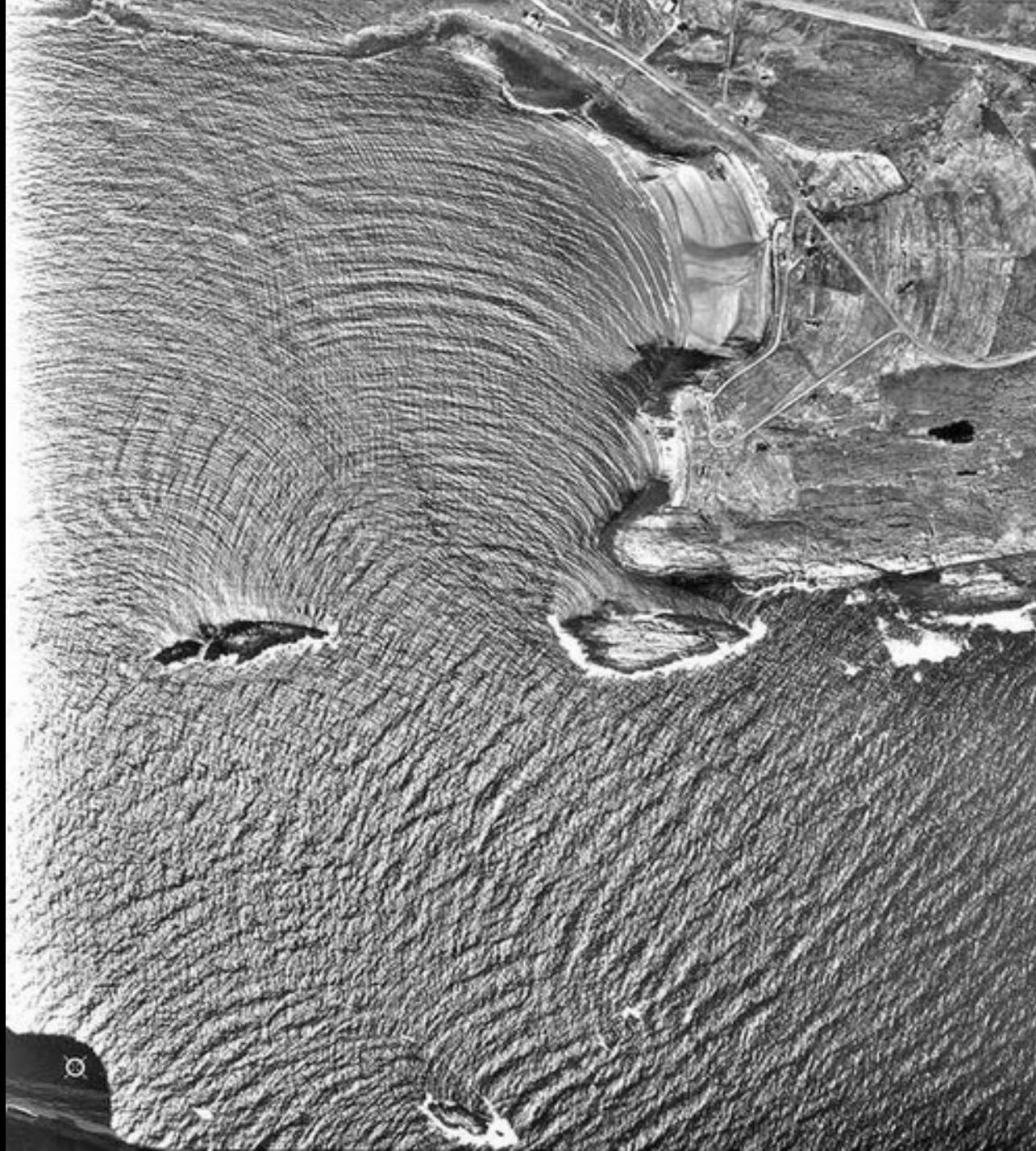
(a)



(b)

▲ **FIGURA 8.3 CONVERGENCIA Y DIVERGENCIA DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS** (a) Diagrama idealizado del proceso de refracción del oleaje y concentración de la energía de las olas en puntos rocosos llamados promontorios. La refracción, o curvatura de los frentes de oleaje causa la convergencia de las ortogonales del oleaje en el promontorio y su divergencia en las zonas de baja energía a lo largo de la costa lejos del promontorio. Las normales de las olas son las largas flechas curvas imaginarias de color negro. La flecha roja indica que las olas se acercan a la orilla de derecha a izquierda. (b) Olas grandes azotando un promontorio rocoso en la costa del Pacífico en Pebble Beach, condado de San Mateo, California. (Robert H. Blodgett)





OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas:

- La ola rompe al superarse la velocidad del agua en la cresta respecto a la del resto de la ola
- La caída ocurre en la rompiente, donde se produce máximo efecto erosivo
- Rompientes. Dependen de la pendiente de la playa y la profundidad relativa del agua
 - (A) Onduladas (surging): playas profundas con gran pendiente de fondo, H/h pequeña, la cara frontal de la ola tiene poca espuma y se rompe por su base, sin que se proyecte el labio lejos de la ola
 - (B) De colapso (colapsing): playa muy profunda, H/h grande, con forma de la ola entre ondulada y en voluta
 - (C) En voluta (plunging): fondos marinos profundos y con pendiente de fondo intermedia, H/h pequeña, la cresta se incurva, proyecta el labio lejos de la ola y dejando un hueco debajo
 - (D) En derrame (spilling): áreas poco profundas, altura relativa de la ola respecto de la profundidad, H/h, grande, pendiente de fondo tendida, y producen gran cantidad de espuma

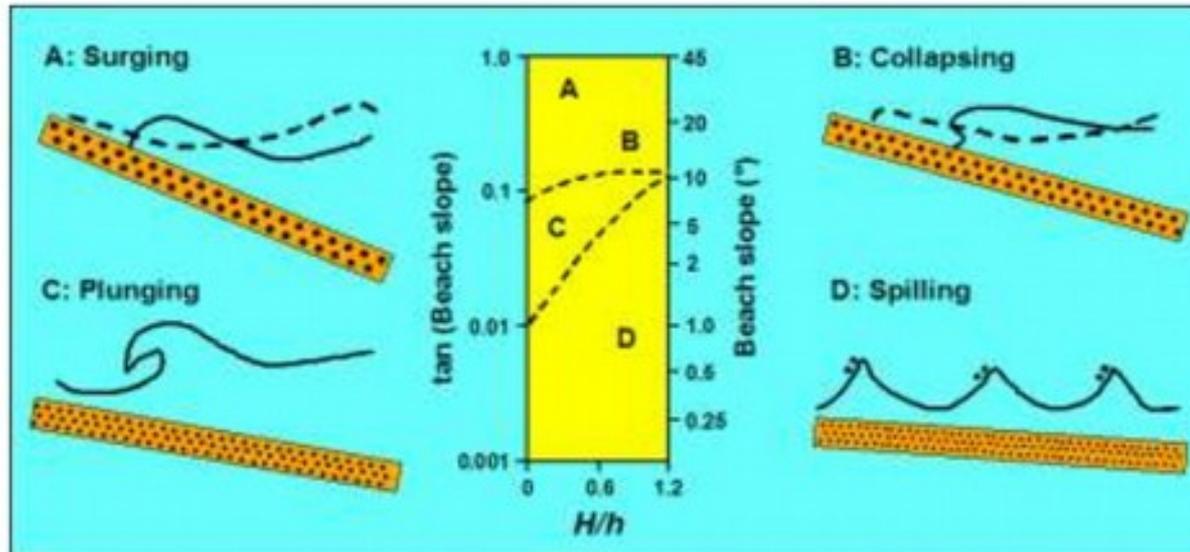
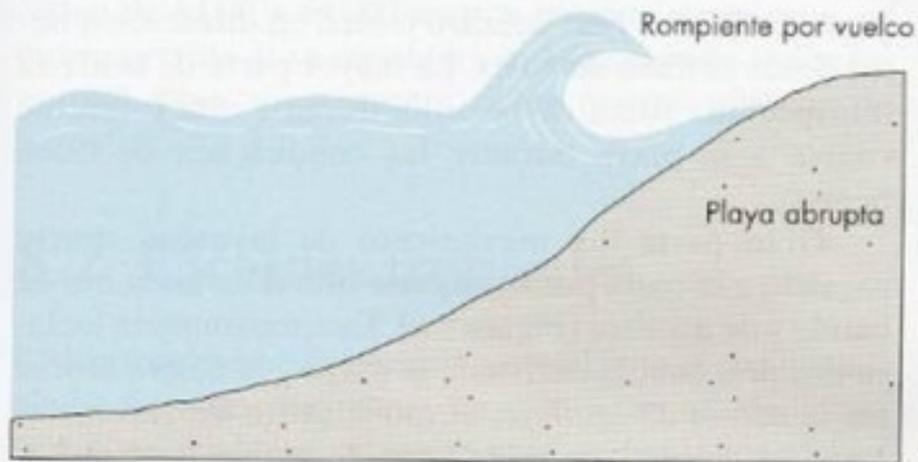
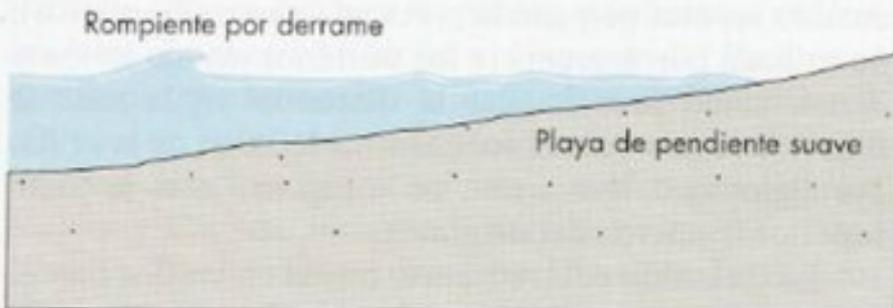


Fig. 12. Relationships between beach slope, the ratio between wave height and water depth, and breaker type (modified after Smithson et al., 2002; in parts based on Street and Camfield, 1966; Galvin, 1968; Carter, 1988).



(a)



(b)

▲ FIGURA 8.4 TIPOS DE ROMPIENTES Diagrama idealizado y fotos que muestran (a) rompiente por vuelco en una playa abrupta y (b) rompiente por derrame en una playa de pendiente suave. ((a) Peter Cade/Getty Images, Inc.-Stone Allstock; [b] Penny Tweedie/Getty Images, Inc.-Stone Allstock.)

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas. Tsunamis:
 - Denominados maremotos, mal llamados olas de marea
 - Se generan por:
 - Desplazamientos súbitos en el fondo del mar, tal como los terremotos asociados a fallas submarinas
 - Desplazamientos submarinos, como el colapso del flanco de un volcán (Krakatoa 1883, con olas de hasta 30 m de altura)
 - Explosión volcánica submarina
 - Causas antrópicas, por explosiones atómicas submarinas (Bikini)
 - Impacto gran objeto del espacio

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas. Tsunamis:
 - La longitud de las olas de los tsunamis pueden superar los 100 km y en alta mar las alturas de las crestas son menores de un metro y no se detectan por barcos
 - La velocidad de propagación disminuye con la profundidad y en océanos profundos, como el Pacífico, si la profundidad es de 5 km, la velocidad supera los 500 km/h

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Olas. Tsunamis:
 - Cuando el tsunami llega a aguas poco profundas, la velocidad disminuye rápidamente y la altura de la ola puede alcanzar los 30 m, efectuando una intensa erosión en el litoral
 - Las series de olas de un tsunami están separadas de unos pocos minutos a una hora, y la labor más destructiva puede ser de cualquiera de las olas
 - En el tsunami de Hawaii de 1 de abril de 1946, fue la octava ola de la serie la de mayor poder destructivo

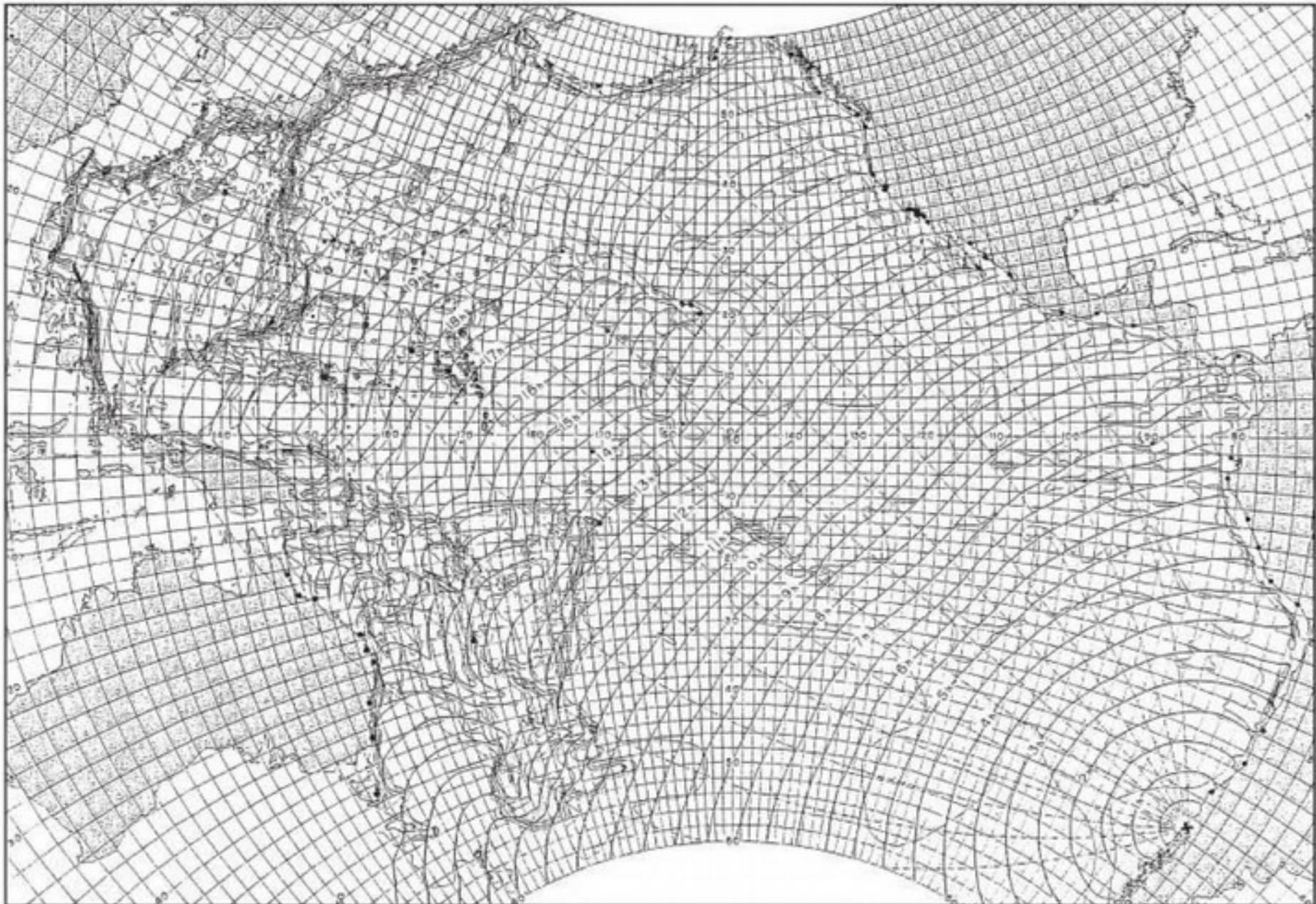


FIGURA 11.8 Mapa de Océano Pacífico indicando los tiempos de recorrido del tsunami correspondiente al terremoto de Chile de 1960. La curvatura de los frentes de las olas muestra refracciones por cambios en la profundidad del océano (Japan Meteorological Agency, en Bolt *et al.*, 1975).

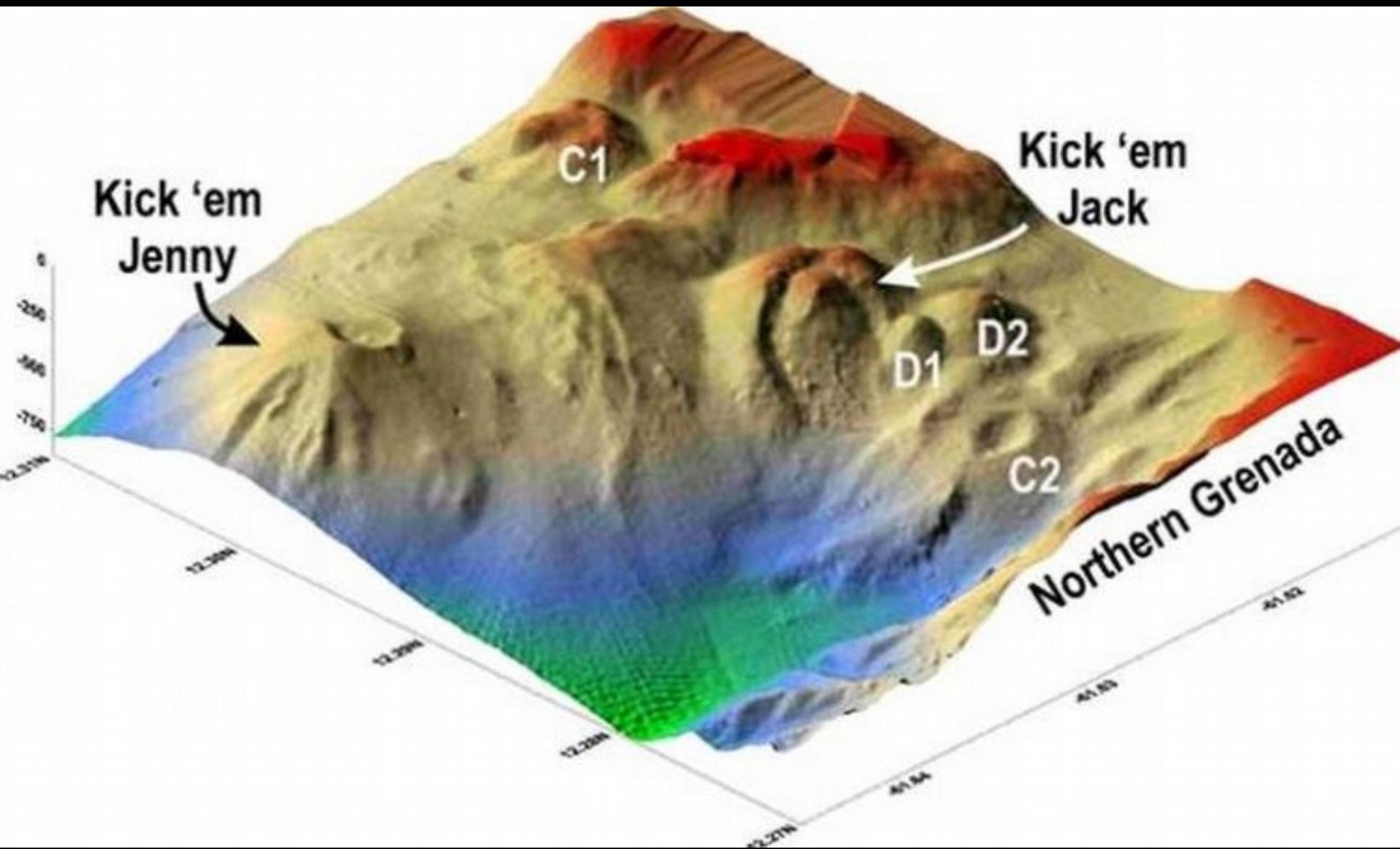
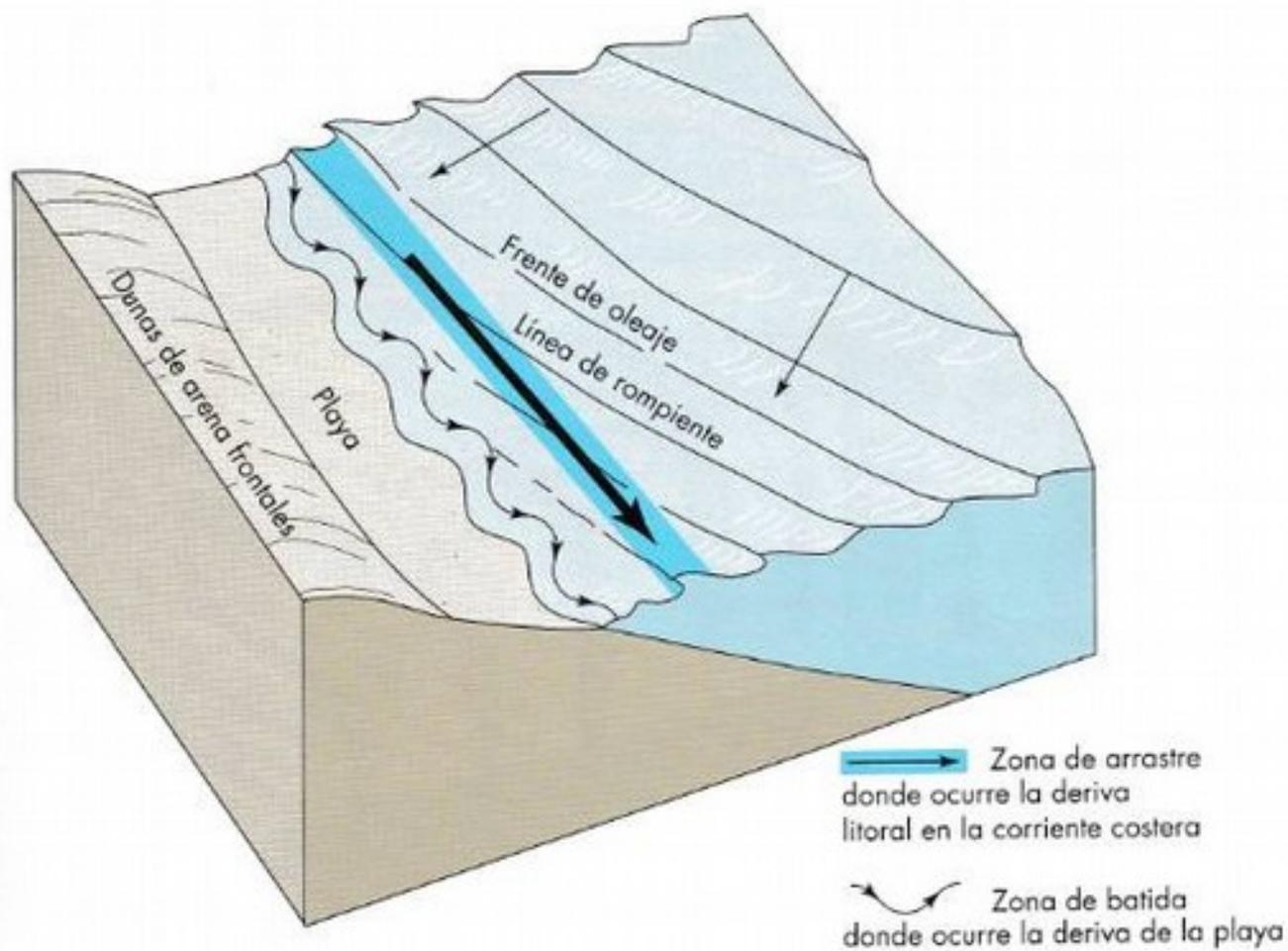


TABLA 11.2 Relación entre magnitudes del terremoto y del tsunami y alturas alcanzadas por las olas sobre el nivel medio del mar en Japón (Bryant, 2001).

Magnitud del terremoto (escala Richter)	Magnitud del tsunami	Altura máxima de las olas (metros)
6,0	-2	<0,3
6,5	-1	0,5-0,75
7,0	0	1,0-1,5
7,5	1	2,0-3,0
8,0	2	4,0-6,0
8,2	3	8,0-12,0
8,5	4	16,0-24,0
8,8	5	>32

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Corrientes. Deriva litoral
 - Son corrientes a lo largo de la costa que llevan consigo un transporte de sedimentos
 - Puede deducirse por la dirección en la que progresan las flechas que se construyen en los estuarios y desembocaduras de los ríos
 - Son indicadores la arena que se deposita en los rompeolas, promontorios naturales y afloramientos rocosos
 - Puede determinarse utilizando trazadores fluorescentes o radioactivos



◀ **FIGURA 8.6 TRANSPORTE DE SEDIMENTO A LO LARGO DE LA COSTA** Bloque diagrama que ilustra los procesos de deriva de la playa y deriva litoral. La dirección de la deriva de la playa se muestra por abundantes flechas en la línea curva en la zona de batida. La dirección de la deriva litoral se muestra con la flecha negra gruesa en la zona de arrastre. En su conjunto estos dos tipos de deriva mueven la arena a lo largo de la costa en un proceso que se conoce como transporte litoral. Las flechas negras finas muestran que las olas se acercan a la costa desde la parte superior derecha y se mueven hacia la parte inferior izquierda.

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Corrientes. Oceánicas (regionales, globales)
 - Las corrientes oceánicas se producen por la acción del viento sobre la superficie del océano abierto, empujadas por gradientes de presión
 - Están influenciadas por la distribución de las áreas terrestres, con desviación de las corrientes por la fuerza de Coriolis
 - El conjunto de corrientes, asistido y diferencias de densidad (salinidad) y temperatura se denomina circulación termohalina

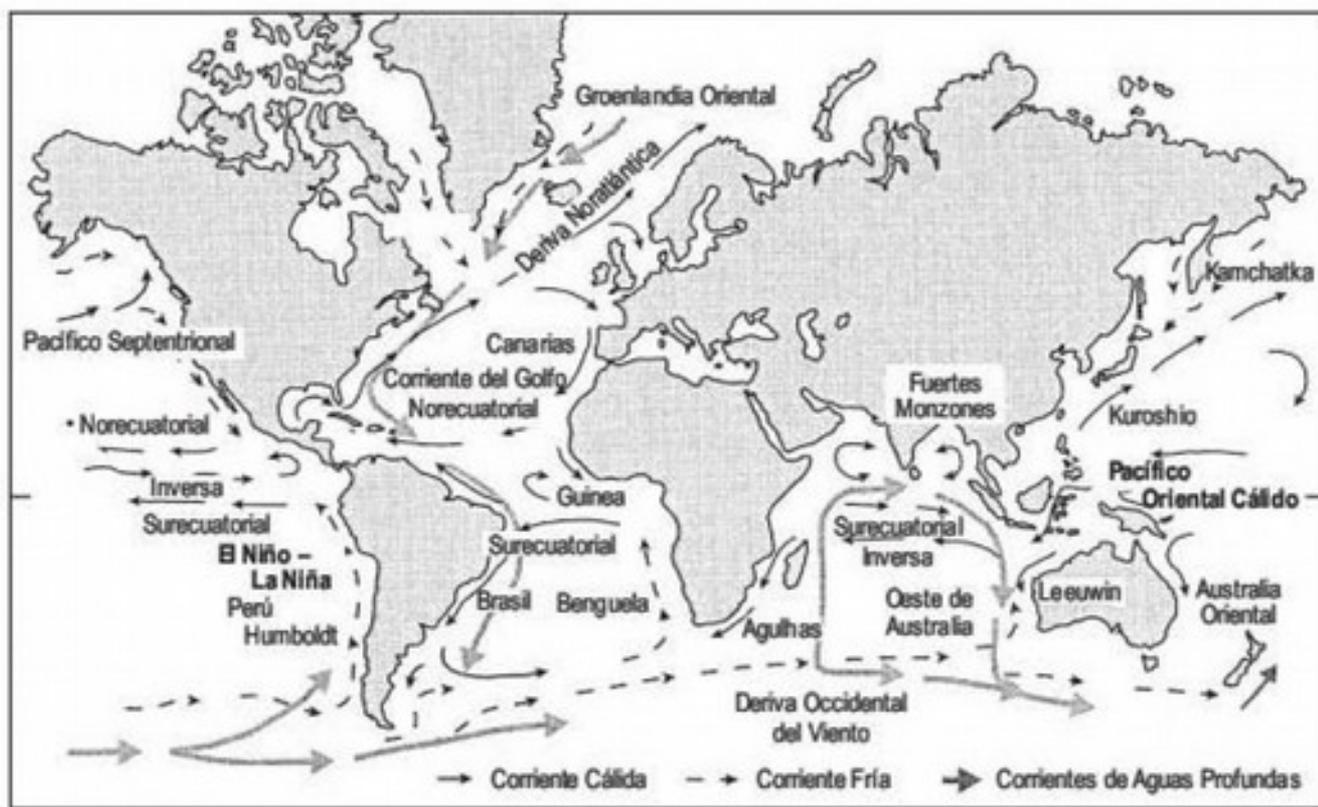
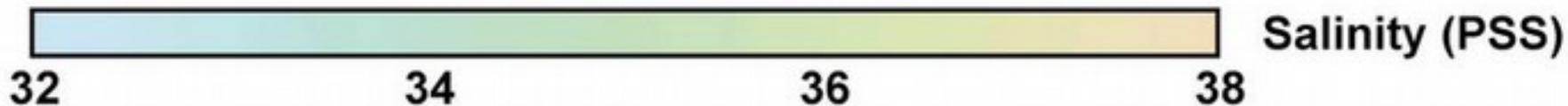
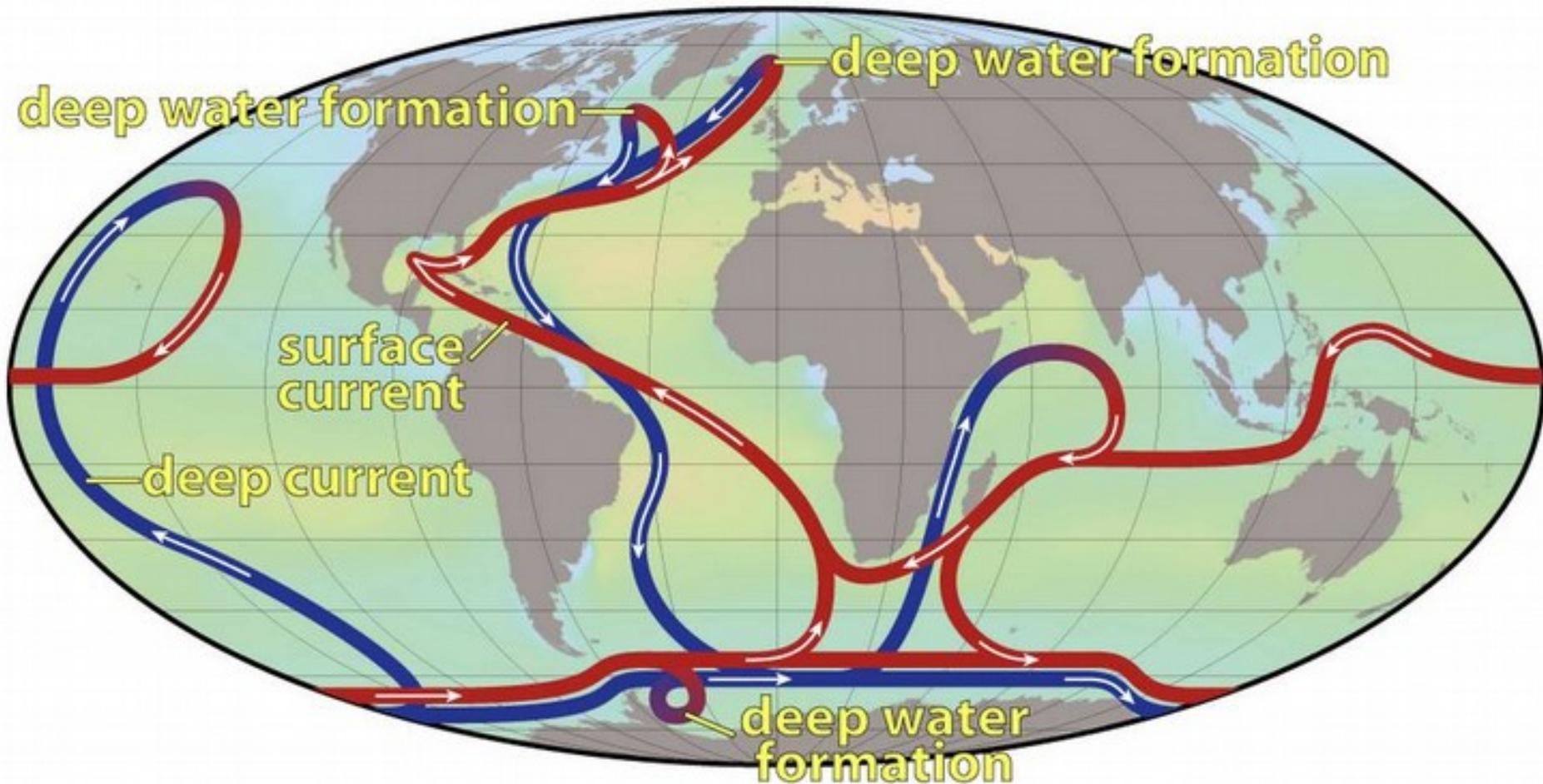


FIGURA 11.10 Corrientes oceánicas globales y circulación de aguas profundas (Woodroffe, 2002).

Thermohaline Circulation



OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Corrientes. Corriente de resaca (locales)
 - Son frecuentes en muchas playas y se las conoce por el riesgo que tienen cuando son fuertes.
 - El agua transportada por las olas tiene que retroceder y se produce un flujo de retomo canaliforme. Estas corrientes, que son habituales en donde hay grandes olas, desaparecen mar adentro
 - Los canales de resaca alcanzan hasta 30 m de anchura y velocidades de 8 km/h. Para evitar los riesgos de las corrientes de resaca, se debe nadar paralelo a la costa hasta que desaparezca el refluo de la resaca

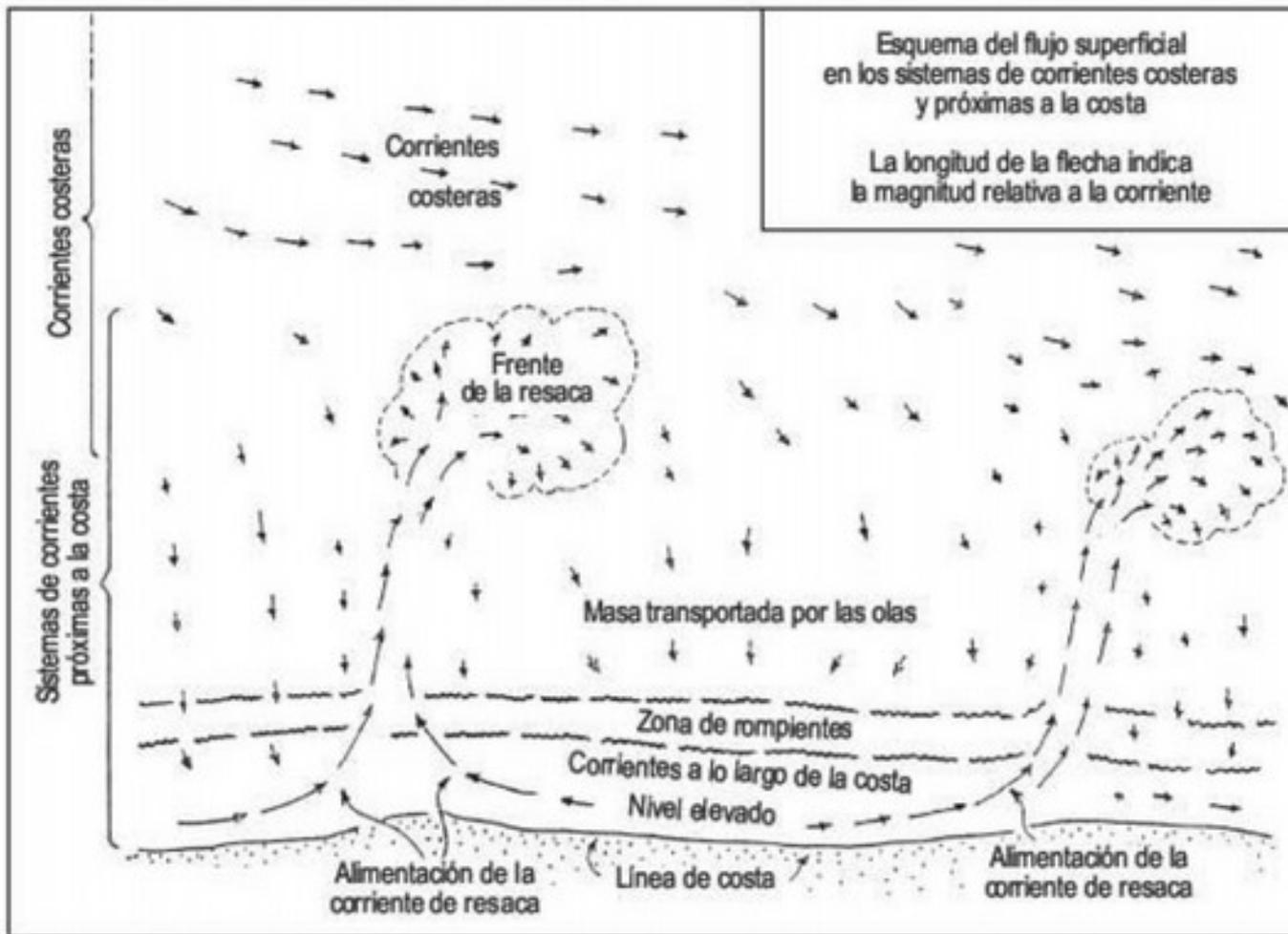


FIGURA 11.7 Corrientes costeras y desarrollo de corrientes de resaca (Shepard, 1959).

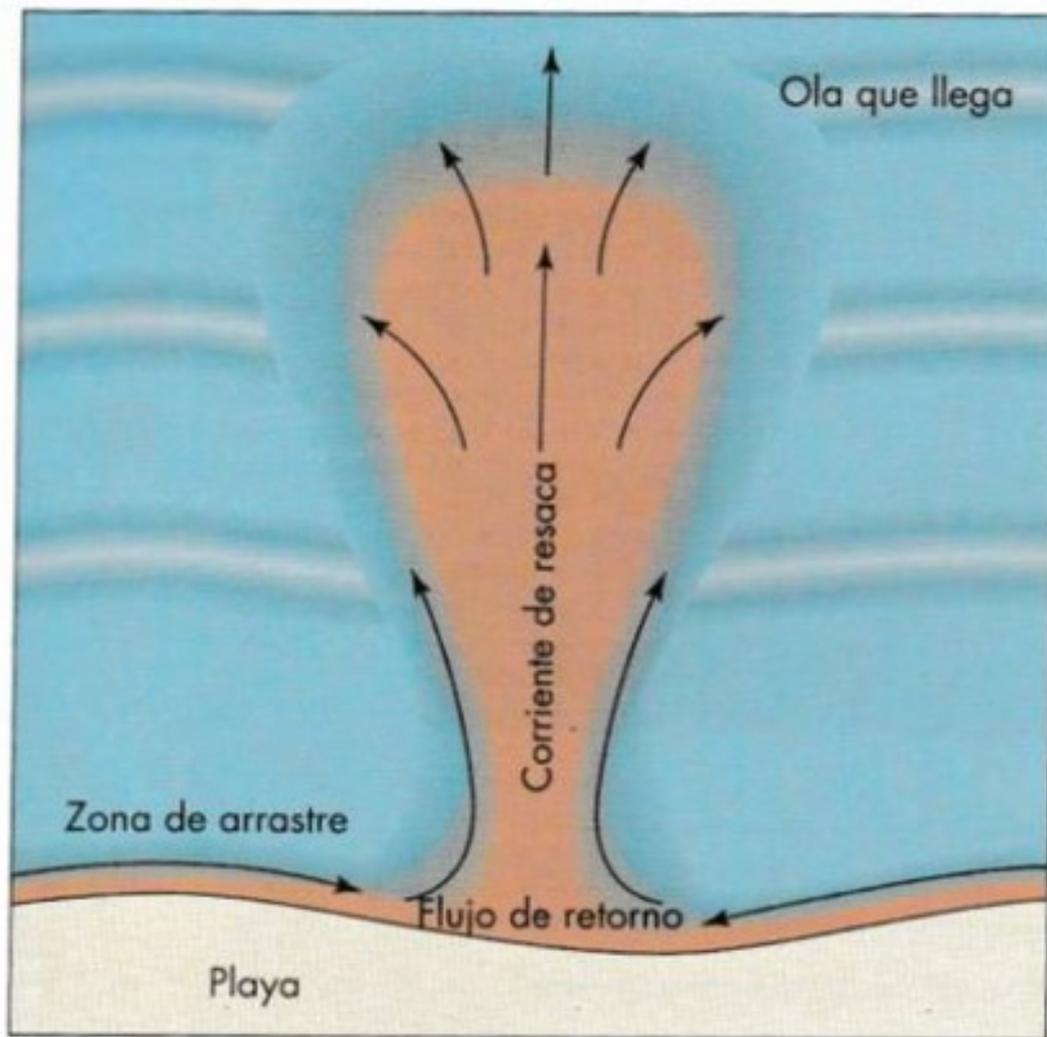


(a)



(b)

▲ **FIGURA 8.13 CORRIENTES DE RESACA** (a) La corriente de resaca está indicada por el agua azul lechosa que se extiende hacia fuera desde el punto rocoso. El agua azul lechosa tiene sedimento en suspensión. Las tiras oscuras en el agua son zonas de algas. (b) La existencia de una corriente de resaca en esta playa arenosa está indicada por una zona de agua tranquila donde no rompen las olas. (Edward A. Keller)



▲ **FIGURA 8.14 CORRIENTE DE RESACA** Imagen a vista de pájaro de la zona de arrastre que muestra una corriente de resaca que es el flujo de retorno del agua que se forma como resultado de las olas que llegan. El flujo de retorno comienza en la zona de arrastre y va por una zona baja de la barra sublitoral; el flujo se extiende hacia fuera una vez que la corriente pasa más allá de la zona de rompientes.

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Mareas

- Las mareas son movimientos del agua producidos por la atracción gravitacional de la Luna y, en menor grado, del Sol
- En casi todas las costas hay un ascenso de marea (pleamar) y un descenso de la misma (bajamar)
- El rango u oscilación de marea en medio del océano es muy pequeño (1 m), pero aumenta hacia la costa y puede alcanzar valores que superan los 10 m
- El aumento del rango marea depende de:
 - Anchura e inclinación de la plataforma continental,
 - Situación y forma de los continentes
 - Existencia de grandes bahías
- Por consiguiente, la distribución del rango mareal está fuertemente controlado por la configuración de los océanos y de las costas

OLAS, CORRIENTES, MAREAS

- Mareas

- Los rangos macromareales superan los 4 m y se encuentran en mares semicerrados y en estuarios
- Los rangos micromareales están por debajo de 2 m y se localizan fundamentalmente en costas de mar abiertas y prácticamente en todos los mares cenados.
- Un gran rango marea puede desarrollar una amplia zona intermareal
- También se pueden encontrar fluctuaciones de marea en lagos, como en los Grandes Lagos de Estados Unidos

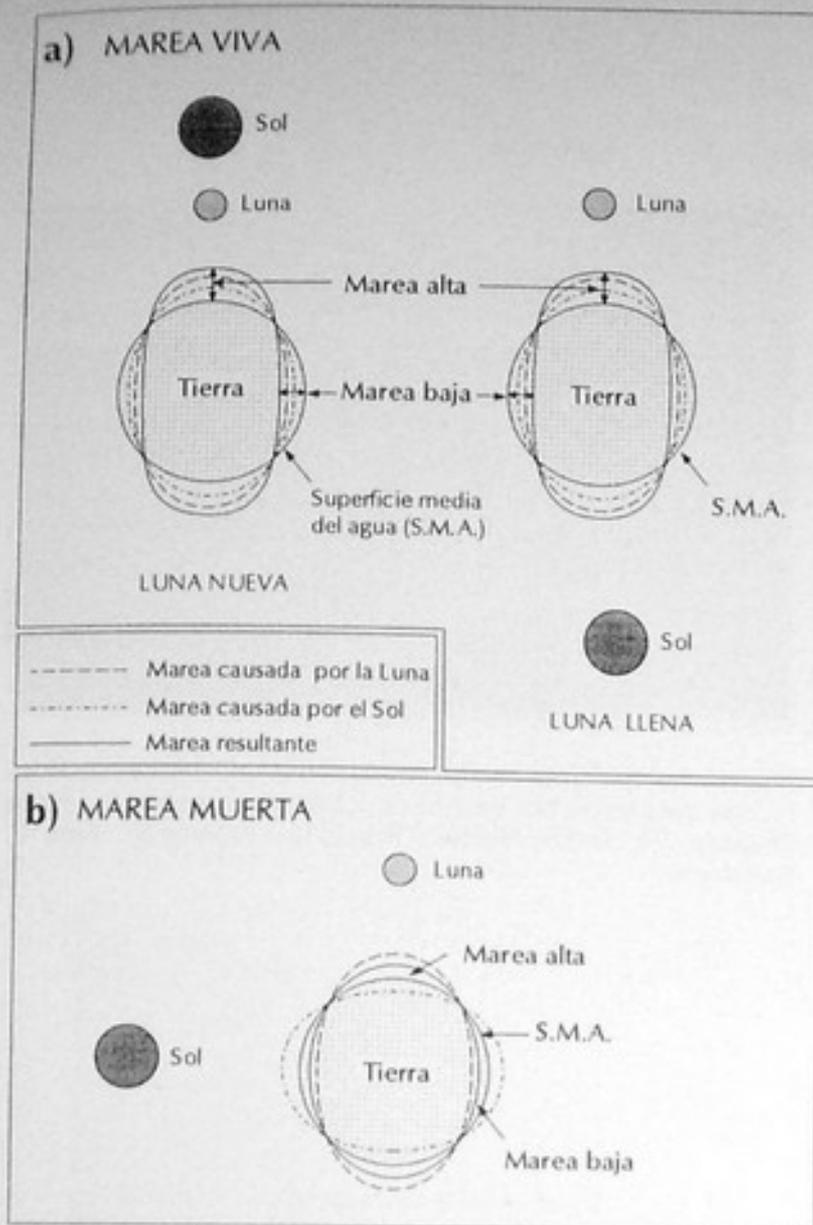


Figura 11.5. Corte esquemático en la zona del ecuador, mostrando los efectos del sistema Tierra-Sol-Luna en la generación de mareas (según Selby, 1985).

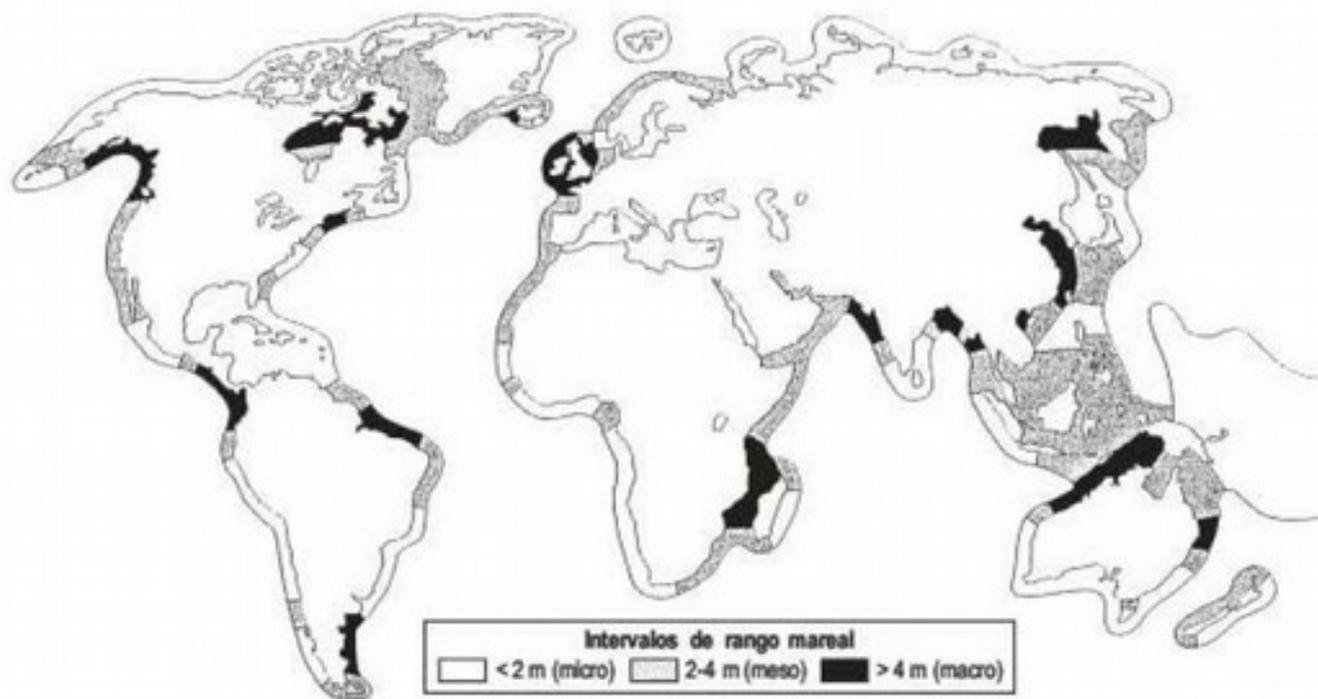


FIGURA 11.11 Distribución global del intervalo de mareas (modificado de Davies, 1980).

ELEMENTOS DEL LITORAL

Cuadro 11.1. Zonas y subzonas del medio litoral: definición. Correspondencia entre la terminología utilizada en lengua inglesa y castellana.

Littoral zone → **Zona litoral.** Su significado depende de los autores que lo definan, si bien suele aludir a la interacción «mares-continentes».

Beach → **Playa.** Franja con material movilizable (arena, grava, a veces bloques en proceso de desagregación), de topografía llana e irregular tendida hacia las aguas, y debida a la acción del oleaje.

Coast → **Costa.** Su significado depende de los autores que lo definan. Puede considerarse la porción de tierras emergidas que penetran en las aguas y hasta una profundidad, mostrando la influencia directa del medio acuático.

Coastal plain → **Llanura litoral o costera.** Planicies, más o menos elevadas sobre el nivel del mar, que deben su origen a los fenómenos de agradación o degradación por las aguas marinas o lacustres.

Shore → **Orilla, ribera.** Éste es, sin duda, el término más problemático, pues frecuentemente se traduce como playa, litoral o costa y así sus derivados tienen difícil correspondencia en castellano. En principio refiere aguas marinas o lacustres, en su contacto inmediato con las tierras emergidas; por tanto, equivale a orilla o ribera y usa de referencia las aguas estabilizadas. Puede definirse como la franja de tierras y agua que están o pueden estar, según el momento o región, en interacción mutua directa.

Backshore → **Trasribera, playa alta o superior.** Literalmente habría de traducirse como la parte «posterior» de la ribera (hacia las tierras emergidas). Corresponde al tramo superior de la playa, extendiéndose entre la cresta de berma y la línea, tierra adentro, donde comienza la vegetación, o cambia la morfología al pasar a un campo de dunas, un escarpe, o similar. Es una franja sólo inundada por el agua en tormentas excepcionales.

Foreshore → **Ribera exterior, playa baja, inferior o intermareal.** Estrictamente en castellano sería: orilla «delantera» o «frente» de la ribera (sobre las aguas). Es el tramo que, con pendiente más o menos pronunciada, aparece entre la cresta de berma y el límite de las aguas en bajamar. En ocasiones falta la cresta de berma, que separa las playas inferior y superior, delimitándose entonces esta franja como la comprendida entre los niveles de marea alta y marea baja. A veces la denominan *beach face* o frente de playa; sin embargo, éste es sólo parte de la playa baja.

Inshore → **Ribera interior, preplaya.** Equivaldría en castellano a: «dentro» de la ribera. Es el tramo comprendido entre el nivel medio de marea baja y la línea de rompiente para oleaje en bajamar. Otros la limitan entre el nivel medio inferior de las aguas y la zona donde el oleaje estacionario circular pasa a elíptico (en bajamar) generando barras en el lecho. Está permanentemente cubierto por el agua y el lecho sufre los efectos del oleaje que removiliza su material, fundamentalmente gravas y arenas; en Sedimentología suele denominarse *shore face*.

Offshore → **Prerribera, mar abierto.** Su significado es: «fuera» de la ribera; corresponde a la zona del litoral más alejada de la orilla (aguas adentro). Este término se usa también para referir las aguas y oleaje previas a la zona de ribera cercana (*nearshore*).

Nearshore → **Ribera cercana.** Término general que indica las franjas asociadas a la ribera y que están bajo la acción directa del oleaje; incluye las zonas de: transformación, rompiente (*breaker zone*), arrastre (*surf zone*) y batida o choque del oleaje (*swash zone*). En algunos esquemas este término comprende también parte de la prerribera (*offshore*).

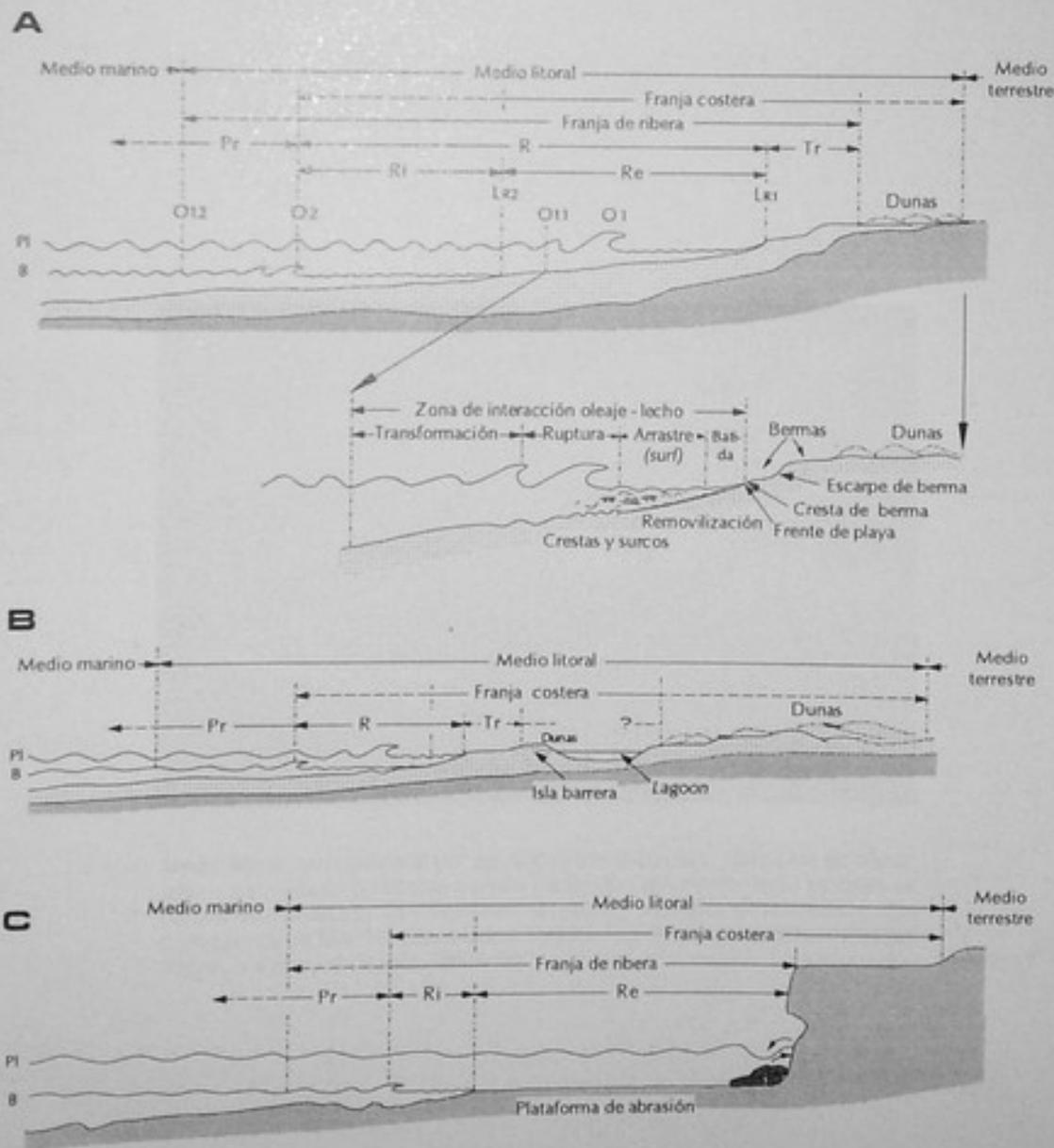
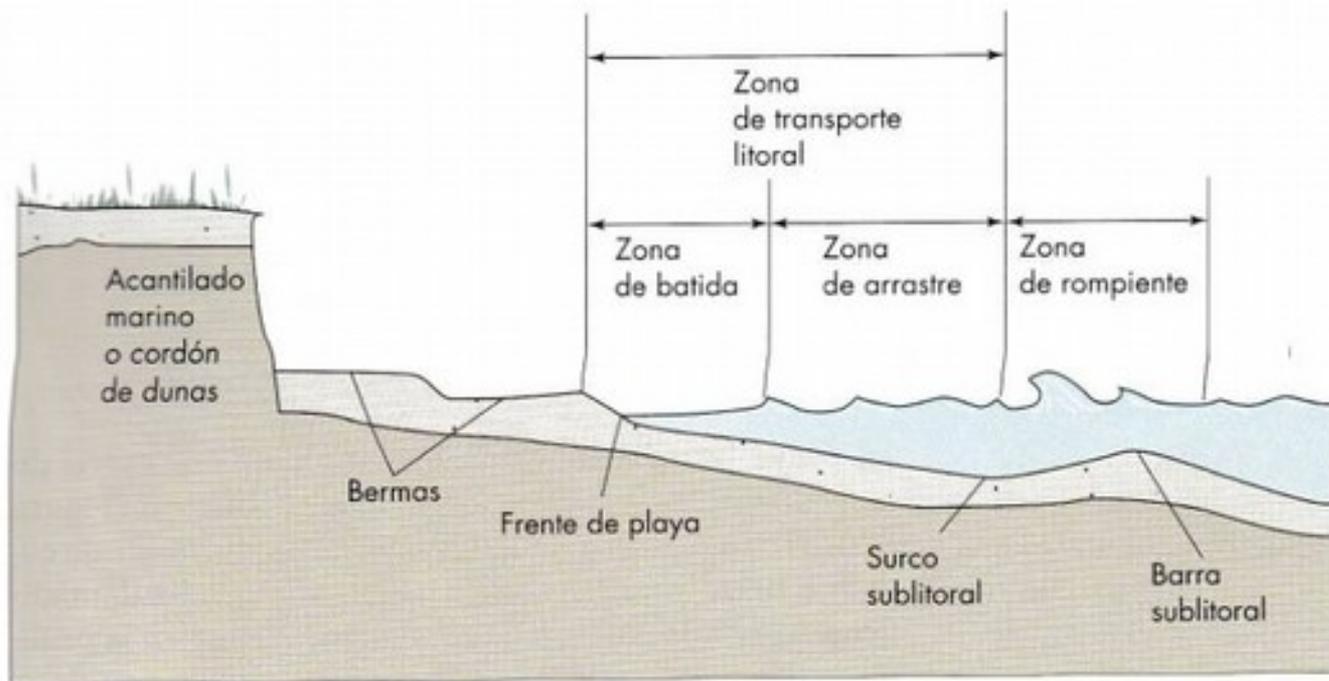


Figura 11.1. Delimitación y estructura del medio litoral en: **A**, playa; **B**, lagoon-isla barrera; y **C**, acantilado.
 Leyenda: pleamar (PI); bajamar (B); ribera (R); preribera (Pr); trasribera (Tr); ribera interior (Ri); ribera exterior (Re); rompiente de oleaje (O₁ en marea alta, O₂ en marea baja); límite inicial para la transformación del oleaje (O₁ en marea alta, O₂ en marea baja); línea de ribera (L_{R1} en marea alta, L_{R2} en marea baja).



◀ **FIGURA 8.5 TÉRMINOS DE LA PLAYA** Terminología básica para las formas del terreno y la acción de las olas en la playa y el entorno cercano a la orilla. Un acantilado marino o cordón de dunas de arena costeras a la izquierda marca la extensión de la playa en dirección a tierra. Se muestran dos bermas en la arena de la playa cada una de ellas con una inclinación suave hacia el acantilado o las dunas. El frente de playa, donde la tierra se une con el mar, tiene una pendiente más pronunciada hacia el agua. Una barra sublitoral de arena y un surco sublitoral se muestran bajo el agua; la barra de arena se forma por debajo de la zona de rompiente. La zona de transporte litoral incluye tanto la zona de batida como la zona de arrastre.

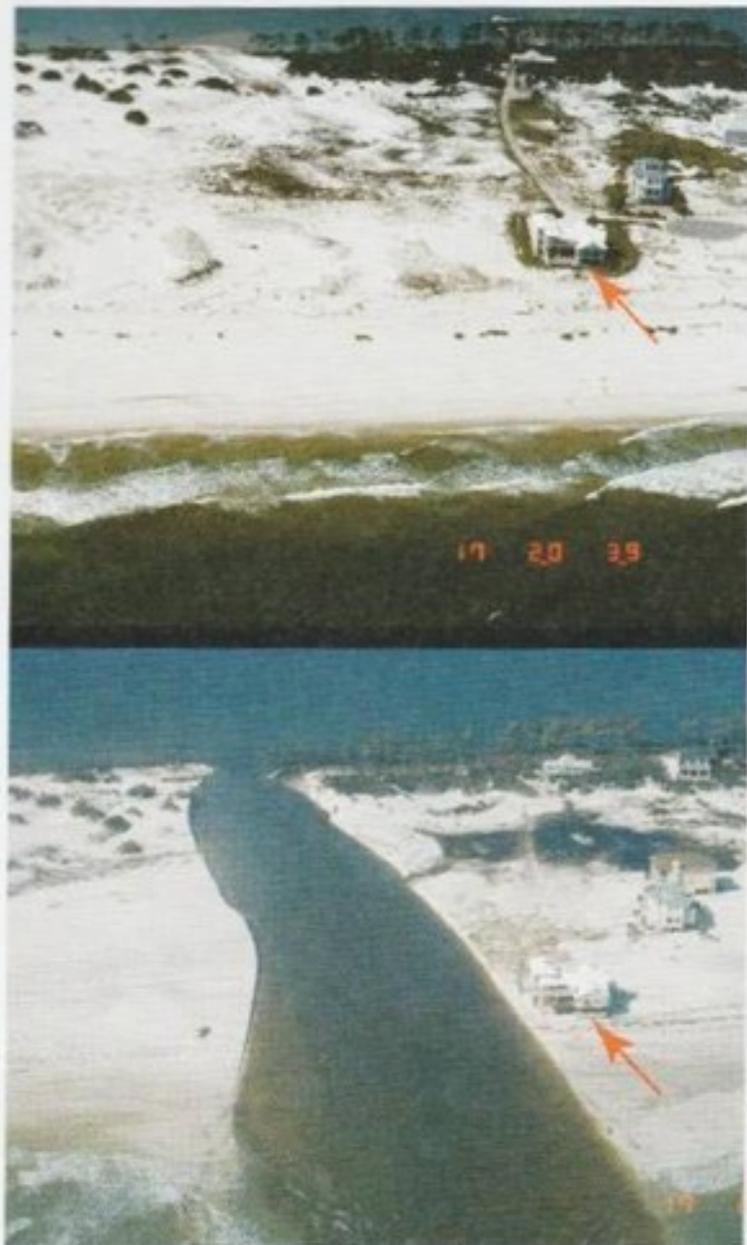
RIESGO COSTERO

- Ciclón tropical y marejada de tormenta
- Tsunami
- Corrientes de resaca
- Erosión costera: playas, acantilados



• Nueva Orleans

Florida

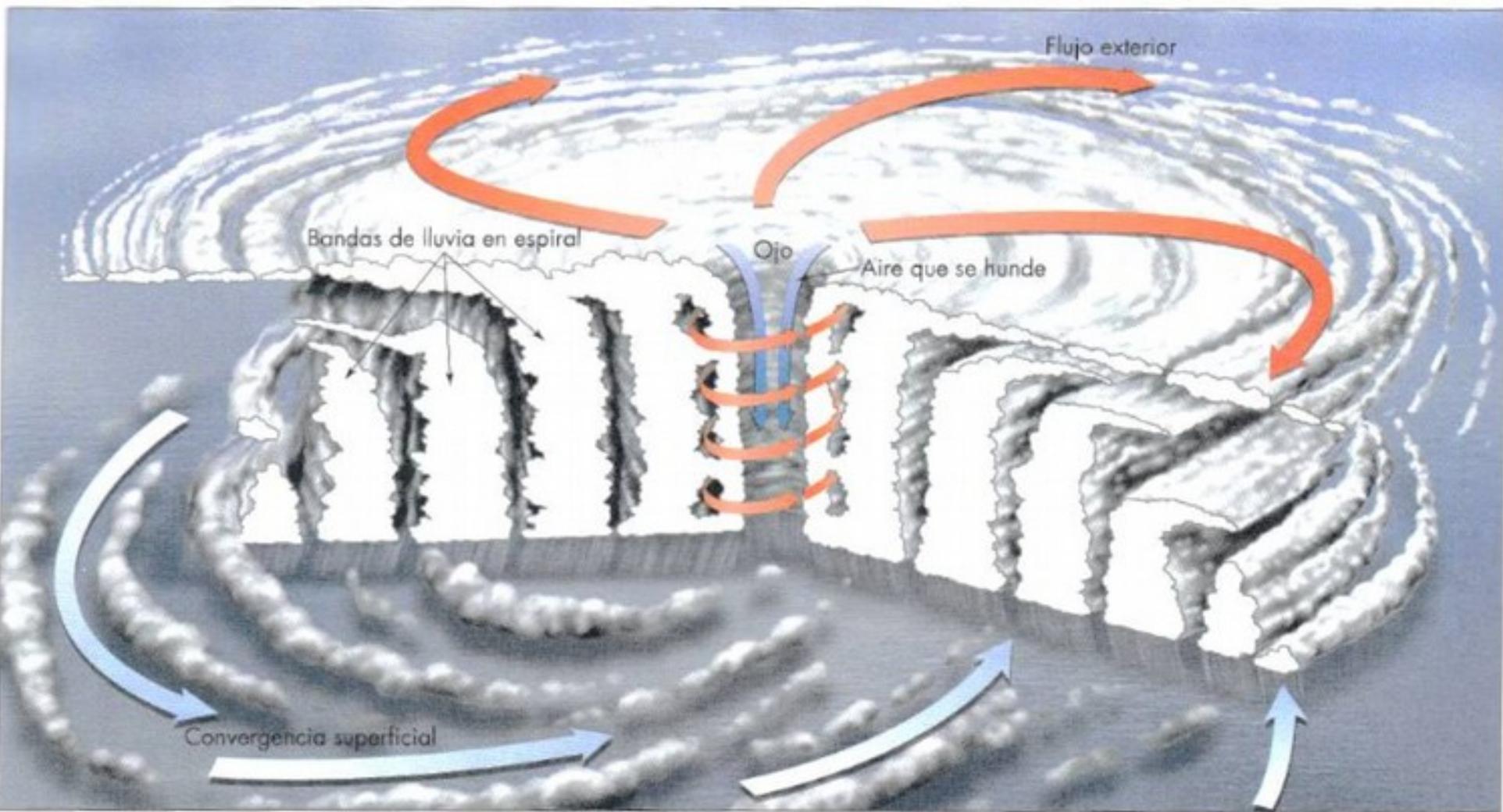


(a)



(b)

◀ **FIGURA 8.1 EFECTOS DEL HURACÁN IVÁN** (a) Isla barrera rota por corrientes llevadas de tormenta en Pine Beach, Alabama. Esto ocurrió cerca del lugar donde el ojo del huracán tocó tierra con un nivel del mar tres metros por encima de lo normal. La foto de arriba fue tomada antes y la de abajo después de la tormenta. La flecha roja señala una casa como referencia. (b) Grandes olas llevadas por vientos de 210 kilómetros por hora erosionaron esta playa en Orange Beach, Alabama. La foto de arriba fue tomada antes y la de abajo después de la tormenta. La arena fue erosionada por debajo del edificio de cinco plantas a la izquierda y de la casa de en medio señalada con una flecha roja. El edificio se derrumbó y la casa resultó dañada. Una tercera estructura, una casa a la derecha, fue completamente destruida. (*Coastal & Marine Geology Program/ USGS Hurricane Impact Studies/ U.S. Geological Sur-*



▲ FIGURA 8.7 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN HURACÁN La dimensión vertical de este diagrama se ha exagerado mucho. El aire que se hunde en el ojo sin nubes está rodeado por vientos en dirección ascendente y lluvia. El aire seco que desciende por el ojo se calienta por compresión y da a la tormenta su característico «núcleo caliente». La humedad tropical que gira hacia el centro de la zona de bajas presiones produce las bandas de lluvia. (Según NOAA.)

TABLA 8.1 Escala de huracanes Saffir-Simpson

La escala de huracanes Saffir-Simpson es una clasificación del uno al cinco basada en la intensidad actual de un huracán. Esta clasificación se utiliza para dar una estimación de los daños a la propiedad e inundaciones potenciales que se esperan a lo largo de la costa cuando un huracán toca tierra. La velocidad del viento es el factor determinante en la escala porque los valores de oleaje de la tormenta dependen en gran medida de la pendiente de la plataforma continental en la que el huracán avista tierra.

HURACÁN DE CATEGORÍA UNO:

Vientos de 119 a 153 kilómetros por hora. Oleaje de la tormenta generalmente de 1,2 a 1,5 metros por encima de lo normal. No hay daño real en las estructuras de edificios. Daño principalmente en caravanas sin sujetar, arbustos y árboles. Algún daño en señales de construcción deficiente. También inundación en algunas carreteras costeras y daños menores en embarcaderos. Los huracanes Allison de 1995 y Danny de 1997 fueron de categoría 1 en el máximo de intensidad.

HURACÁN DE CATEGORÍA DOS:

Vientos de 154 a 177 kilómetros por hora. Oleaje de la tormenta generalmente de 1,8 a 2,4 metros por encima de lo normal. Daños en el tejado, puertas y ventanas de algunos edificios. Daño considerable en arbustos y árboles, con algunos árboles derribados. Daños considerables en caravanas, señales de construcción deficiente y embarcaderos. Las carreteras costeras y vías de escape bajas se inundan de dos a cuatro horas antes de la llegada del centro del huracán. Pequeñas embarcaciones en fondeaderos sin protección rompen las amarras. El huracán Bonnie de 1998 era de categoría 2 cuando azotó la costa de Carolina del norte, mientras que el huracán George era de categoría 2 cuando golpeó los Cayos de Florida y más tarde la costa del golfo del Mississippi.

HURACÁN DE CATEGORÍA TRES:

Vientos de 178 a 209 kilómetros por hora. Oleaje de la tormenta generalmente de 2,7 a 3,7 metros por encima de lo normal. Algún daño estructural en pequeñas residencias y edificios de servicio con poca cantidad de rupturas en paredes. Daños en arbustos y árboles, con follaje desprendido y árboles grandes derribados. Caravanas y señales de construcción deficiente destruidas. Las vías de rupturas bajas quedan cortadas por el agua de tres a cinco horas antes de la llegada del centro del huracán. La inundación cerca de la costa destruye las estructuras más pequeñas y las más grandes quedan dañadas por los golpes de los escombros que flotan. El terreno por debajo de 1,5 metros por encima de la media del nivel de mar puede inundarse 13 kilómetros tierra adentro o más. Puede ser necesaria la evacuación de los residentes en zonas bajas en varias manzanas desde la costa. Los huracanes Roxanne de 1995 y Fran de 1996 eran de categoría 3 al tocar tierra en la península de Yucatán, México, y en Carolina del norte, respectivamente.

HURACÁN DE CATEGORÍA CUATRO:

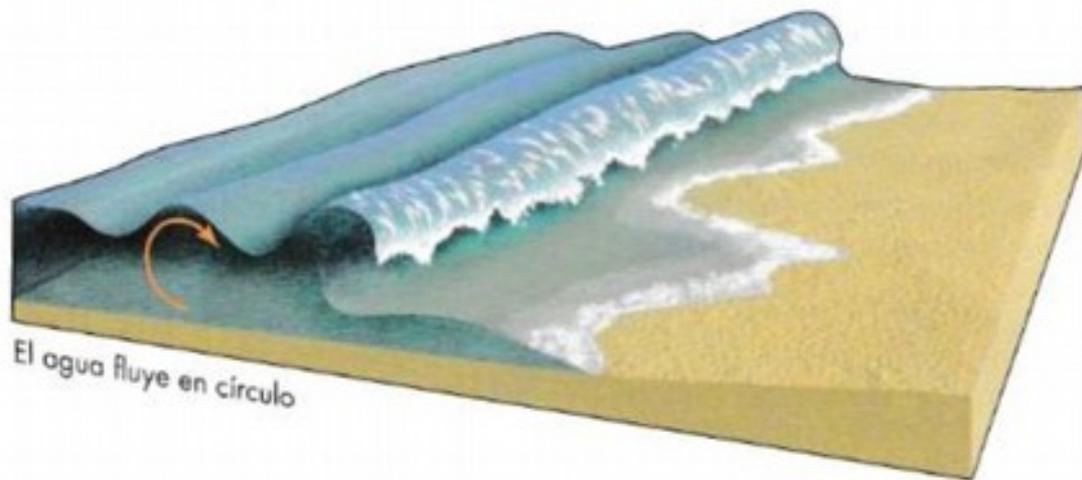
Vientos de 210 a 249 kilómetros por hora. Oleaje de la tormenta generalmente de 4 a 5,5 metros por encima de lo normal. Fallos más abundantes en las paredes y en algunos casos fallo completo en la estructura del tejado en residencias pequeñas. Arbustos, árboles y todas las señales derribadas. Destrucción completa de caravanas. Daños abundantes en puertas y ventanas. Las vías de salida bajas pueden quedar cortadas por el agua de tres a cinco horas antes de la llegada del centro del huracán. Daños importantes en pisos bajos de estructuras cerca de la orilla. Terrenos por debajo de 3,1 metros por encima del nivel del mar pueden quedar inundados, requiriendo la evacuación masiva de zonas residenciales a diez kilómetros tierra adentro. El huracán Luis de 1995 era de categoría 4 mientras se movía por las islas Leeward; Los huracanes Felix y Opal de 1995 también llegaron a categoría 4 en su intensidad máxima.

HURACÁN DE CATEGORÍA CINCO:

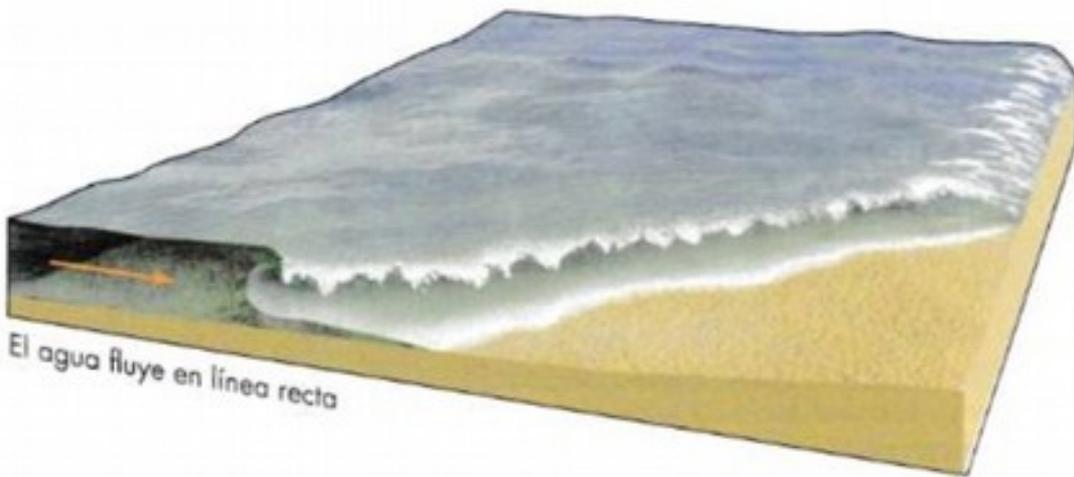
Vientos mayores de 249 kilómetros por hora. Oleaje de la tormenta generalmente mayor de 5,5 metros por encima de lo normal. Fallo completo del techo en muchas residencias y edificios industriales. Algunos fallos de edificios completos con edificios de servicio pequeños hundidos o destruidos. Todos los arbustos, árboles y señales derribados. Destrucción completa de caravanas. Daños graves y abundantes en ventanas y puertas. Las vías de salida bajas quedan cortadas por el agua creciente de tres a cinco horas antes de la llegada del centro del huracán. Daños importantes en pisos bajos de todas las estructuras ubicadas a menos de 4,6 metros por encima del nivel del mar y a 458 metros de la costa. Puede ser necesaria la evacuación masiva de zonas residenciales en tierras bajas a una distancia de ocho a 16 kilómetros de la costa. El huracán Mitch de 1998 era de categoría 5 en el máximo de intensidad al pasar por el oeste del Caribe. El huracán Gilbert de 1998 era de categoría 5 en el máximo de intensidad y es el ciclón tropical más fuerte registrado en el Atlántico.



◀ **FIGURA 8.10 RUTAS DE HURACANES** Tres rutas comunes de huracanes en el océano Atlántico. Cada una de ellas, señalada con una flecha roja curva, comienza en el océano Atlántico central al este (derecha) de este mapa. Las tres rutas amenazan las islas del Caribe, la ruta 2 amenaza el sudeste de Estados Unidos y la ruta 3 puede afectar a la costa este de Estados Unidos y a la costa atlántica de Canadá.



(a)



(b)

◀ **FIGURA 8.8 LAS OLAS DE LOS TSUNAMIS DIFIEREN DE LAS OLAS LLEVADAS POR EL VIENTO** (a) Las olas llevadas por el viento bañan la playa arriba y abajo sin inundar las zonas más altas. Las partículas de agua tienen un movimiento circular. (b) La ola de un tsunami puede que no sea más alta que una ola normal pero se levanta sobre la playa y las zonas más altas. Las partículas de agua fluyen en línea recta al moverse las olas hacia delante. Las personas que no se ahogan en un tsunami pueden resultar gravemente heridas ya que la fuerza de la ola las arroja contra objetos estacionarios. (Modificado de Department of Earth and Space Sciences, University of Washington at <http://www.ess.washington.edu/tsunami/images/tsulg.jpg>.)



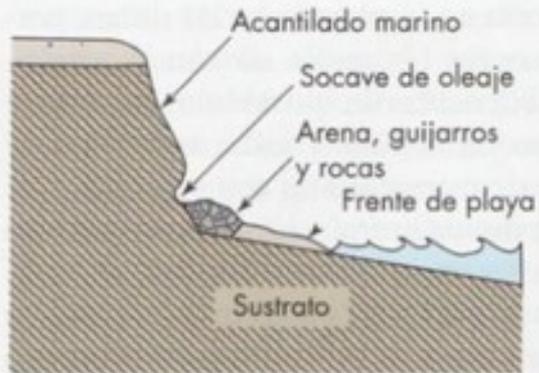
0 100 m
0 300 ft.

(a)



(b)

◀ **FIGURA 8.D ANTES Y DESPUÉS DEL TSUNAMI EN BANDA ACEH, INDONESIA** Fotos del satélite QuickBird de Banda Aceh, una capital de provincia indonesia en el extremo norte de la isla de Sumatra. (a) Tomada el 23 de junio de 2004, antes del tsunami de 2004; (b) foto del 28 de diciembre de 2004, dos días después del tsunami. Todos los edificios de esta zona han sido dañados, destruidos o eliminados incluyendo parte del puente en la parte inferior derecha de la imagen. (DigitalGlobe)

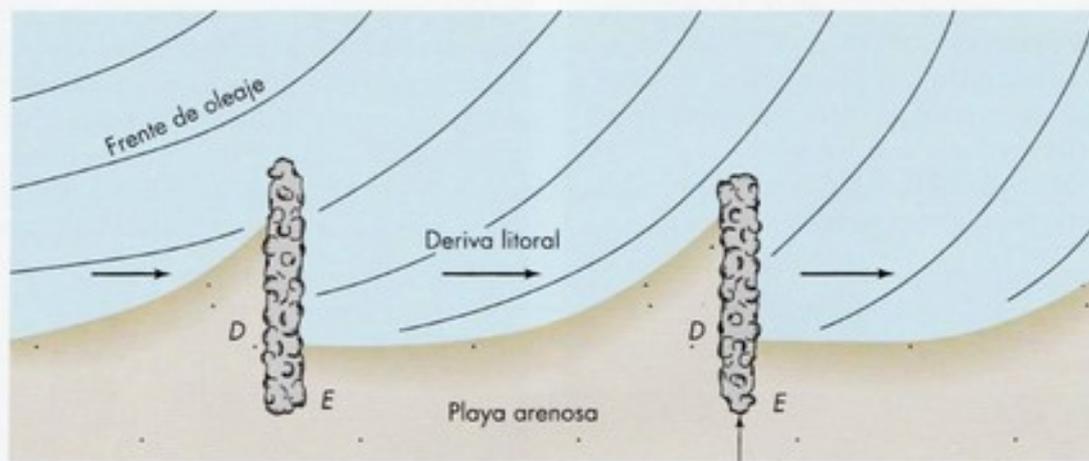


(a)



(b)

▲ **FIGURA 8.15 ACANTILADO MARINO Y PLAYA** (a) Sección transversal generalizada y (b) foto de acantilado marino, playa y sustrato expuestos con marea baja en Santa Bárbara, California (Cortesía de Donald Weaver.)



(a) D = Depósito, playa amplia
E = Erosión, playa estrecha

Espigón de playa, barrera a la deriva litoral, construido con grandes bloques de roca u otros materiales

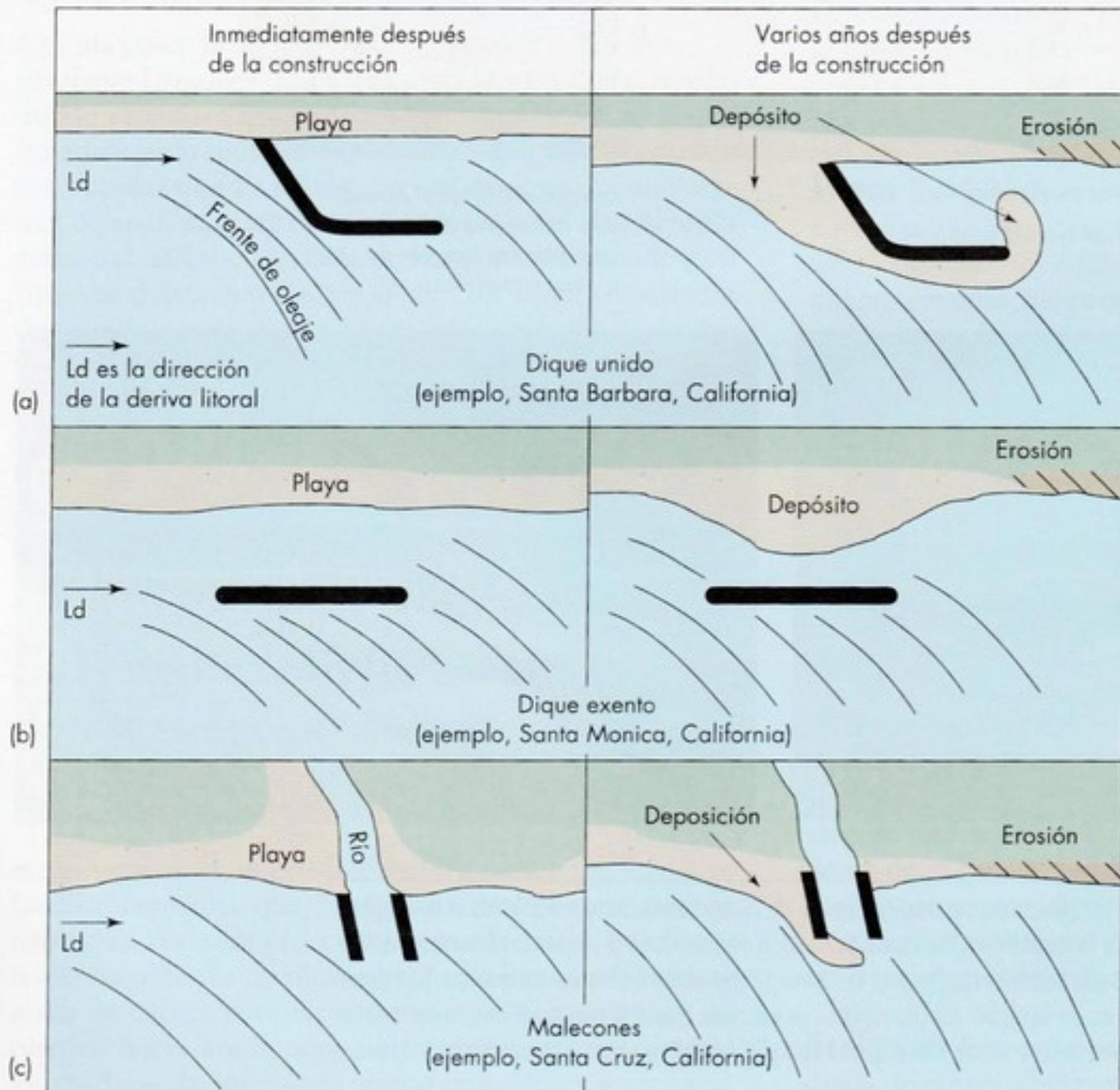


(b)

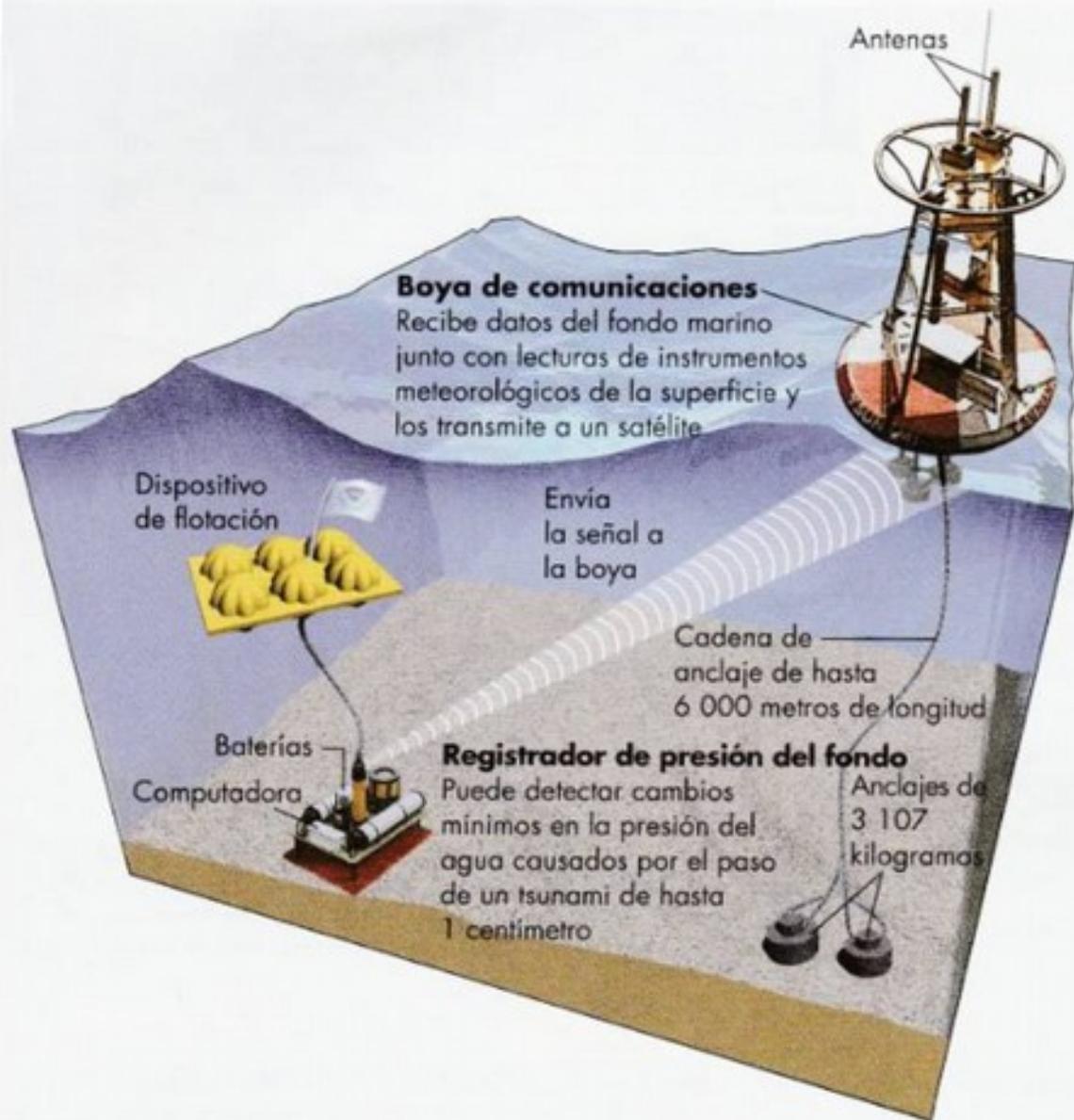


(c)

▲ **FIGURA 8.23 ESPIGONES DE PLAYA** (a) Diagrama de dos espigones de playa construidos para atrapar arena; las zonas de depósito deriva arriba (D) están a la izquierda y las zonas de erosión deriva abajo (E) están a la derecha de los espigones. Las olas se acercan desde la parte superior izquierda y la deriva litoral es de izquierda a derecha. (b) Primer plano de la zona erosionada deriva abajo de un espigón. (c) Un espigón se extiende hacia el mar en el centro de la foto; compárese la amplitud de la playa en el lado deriva arriba a la derecha con el lado deriva abajo a la izquierda. (Edward A. Keller)



◀ **FIGURA 8.24 LAS ESTRUCTURAS DE INGENIERÍA CONSTRUIDAS EN LA ZONA DE OLAJE PROVOCAN CAMBIOS** Diagramas que ilustran los efectos de diques, líneas negras gruesas en (a) y (b) y malecones, líneas negras cortas en (c) en patrones locales de depósito (beis) y erosión (marrón). La columna de la izquierda de los diagramas muestra las estructuras inmediatamente después de su construcción y la columna de la derecha muestra el depósito y la erosión después de construídas dichas estructuras. Las líneas curvas delgadas de color negro muestran las olas incidentes y las flechas indican la dirección del transporte litoral.



◀ **FIGURA 8.28 TSUNÁMETRO DE ALTA MAR** Esta tsunámetro de alta mar consiste en un registrador de la presión del fondo colocado en el fondo marino a una profundidad de unos 6 000 metros; mide cambios en la presión del agua que indican el paso de un tsunami. El registrador envía las señales a una boya de Evaluación e Información de Tsunamis de Alta mar (DART) que flota en la superficie del agua. La información de las boyas DART es transmitida a un satélite GOES del NOAA, que la retransmite de vuelta a la Tierra a un centro de alerta de tsunamis. (Modified after NOAA.)



◀ **FIGURA 8.29 CASA RESISTENTE A LOS HURACANES** Casa en los Cayos de Florida construida con bloques resistentes y con espacio por debajo de la zona destinada a vivienda para permitir que el oleaje de la tormenta de un huracán pase a través del edificio. (Edward A. Keller.)

Líneas E y Zonas E

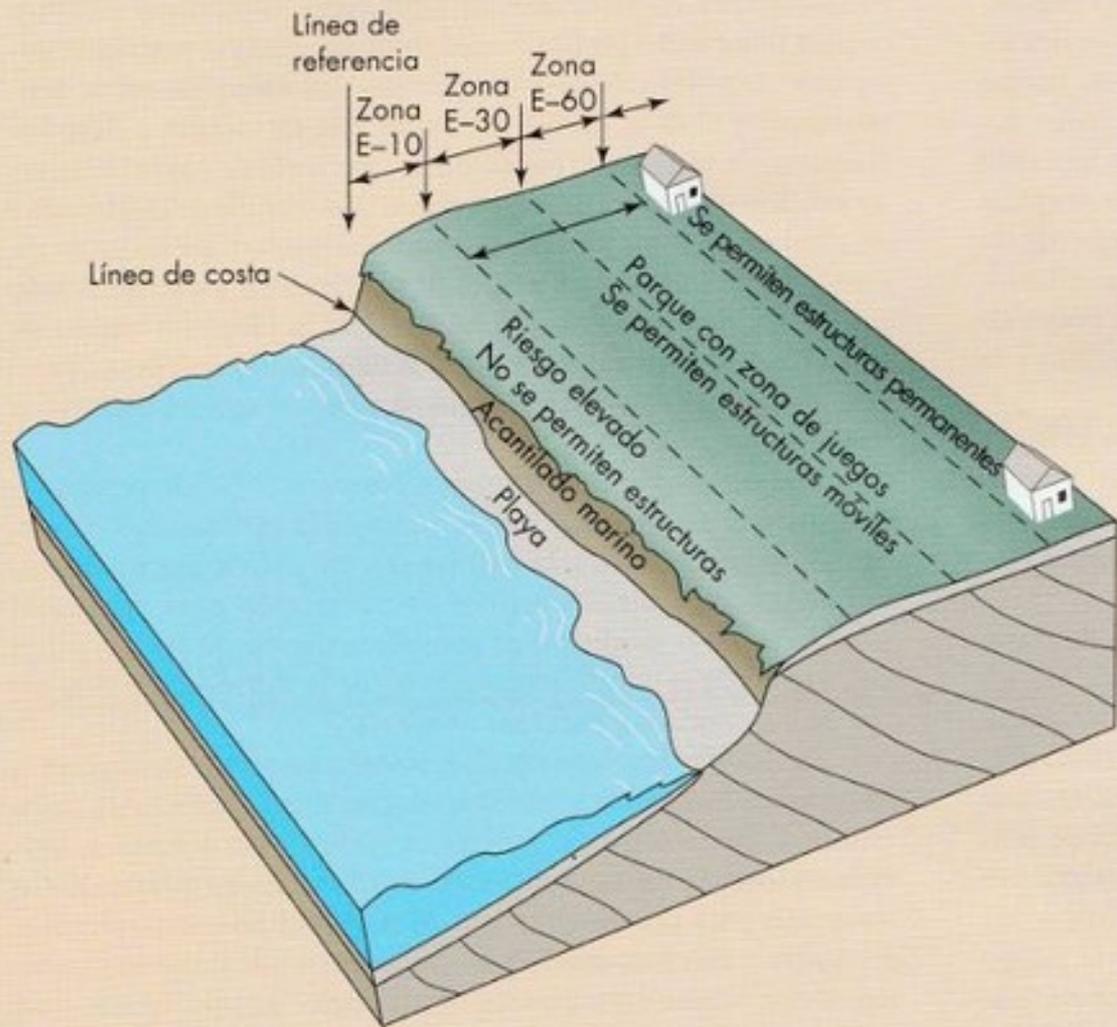
Recientemente, un comité especial del Consejo Nacional de Investigación (NRC) a petición de la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (FEMA) elaboró unas recomendaciones para la gestión de la zona costera, algunas de las cuales se recogen a continuación³⁹:

- Las estimaciones sobre tasas futuras de erosión deberían basarse en cambios históricos de la costa o en análisis estadísticos de las condiciones locales de las olas, el viento y aporte de sedimentos.
- Una vez determinados las tasas locales de erosión, deben elaborarse mapas que muestren líneas y zonas de erosión, denominadas líneas E y zonas E (Figura 8.G). Una *línea E* es la localización de la erosión esperada en un periodo de años determinado; por ejemplo, la línea E-10 es la localización en diez años. Las *zonas E* son análogas a las zonas de riesgo en las llanuras de inundación, esto es, la zona E-10 sería la zona entre el nivel del mar y la línea E-10. La elevación del nivel del mar se considera un riesgo inminente en la zona E-10 y no deberían permitirse nuevas estructuras habitables. El sistema de líneas E y zonas

E puede utilizarse para establecer distancias de servidumbre. Por ejemplo, si el ritmo de erosión es de un metro al año, la servidumbre E-10 es de diez metros.

- Se permiten estructuras móviles en las zonas de riesgo a medio y largo plazo (E-10 a E-60) (Figura 8.G).
- Las grandes estructuras permanentes se permiten más allá de la línea E-60.
- A excepción de las situadas en escarpes o acantilados marinos elevados, todas las estructuras nuevas construidas en dirección al mar desde la línea E-60 deben construirse sobre pilares. Su diseño debe resistir la erosión asociada con una tormenta de magnitud elevada con un intervalo de repetición de 100 años.

Las recomendaciones del NRC relativas a las servidumbres se consideran normas mínimas en los programas de gestión de la erosión costera estatales o locales. En la actualidad, sólo un pequeño número de estados, como California, Florida, Nueva Jersey, Nueva York y Carolina del norte utilizan servidumbres basadas en el ritmo de erosión. Sin embargo, el concepto de líneas E y zonas E basado en retranqueos designados por la erosión y construcciones permitidas tiene un mérito real en la gestión de las zonas costeras.



◀ **FIGURA 8.G LÍNEAS E Y ZONAS E** Diagrama conceptual de líneas E y zonas E basado en la tasa de la erosión costera a partir de un punto de referencia, como un acantilado marino o una línea de dunas. La anchura de las zonas depende del ritmo de erosión y define las distancias de servidumbre. Por supuesto, después de 60 años las estructuras estarán mucho más cerca de la orilla y serán más vulnerables a la erosión. Es una forma de obsolescencia planificada. (Modificado de National Research Council. 1990. *Managing coastal erosion*. Washington, DC: National Academy Press.)







2003 8 9



2003 8 30



2003 8 30



2003 8 30



























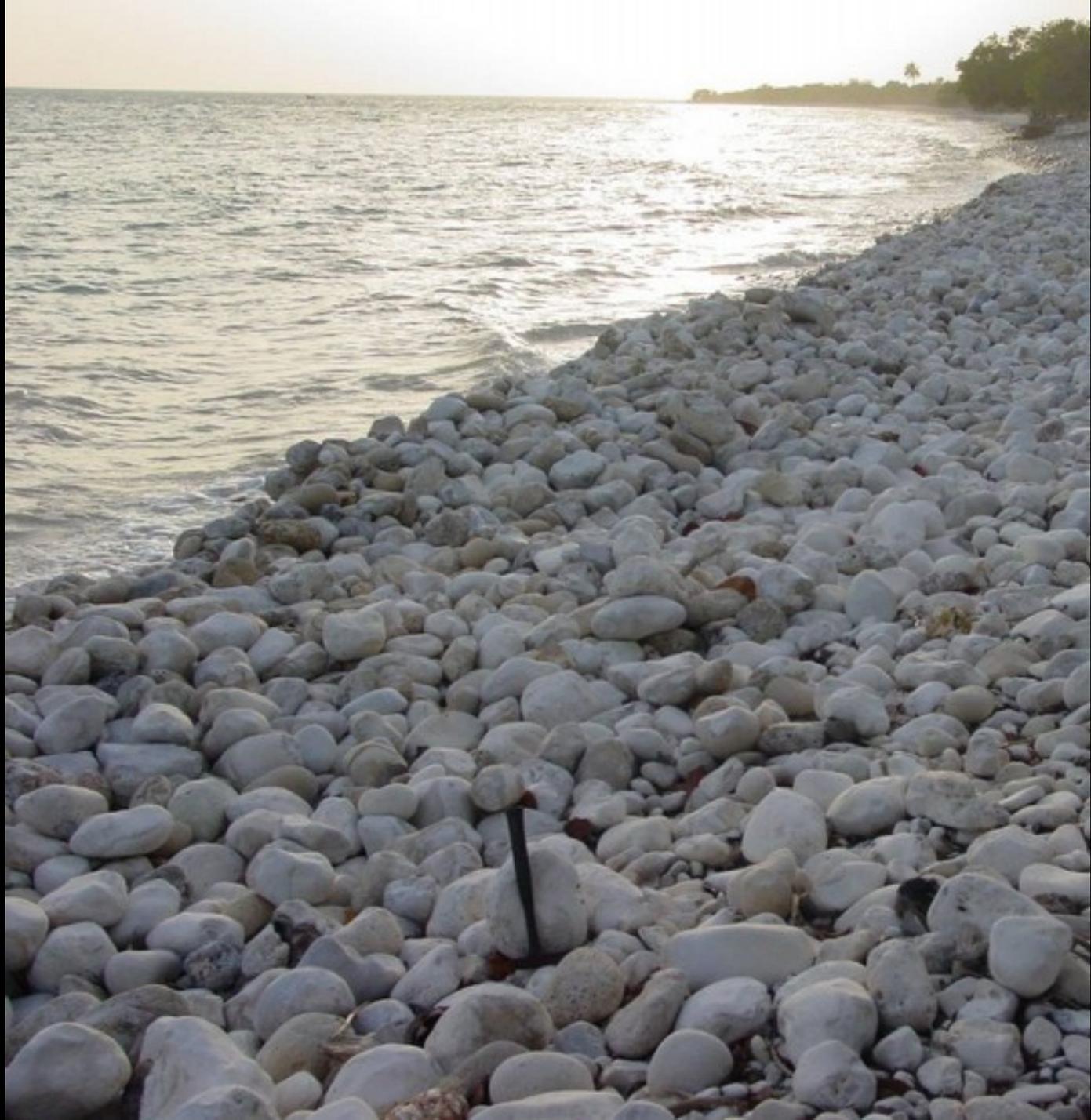














2003 7 22



2003 7 21



2003 7 22



2003 7 22



2003 7 22

