



Altímetros y Nivel del Mar

Jonathan Cedeño Oviedo. FIMCM-ESPOL

Taller de Aplicaciones Satelitales RA-III

Ecuador 2020. NOAA – ESPOL – INAMHI

Agenda

1. Altimetros
2. Aplicaciones: Nivel del Mar
3. Caso de estudio: ondas de Kelvin y El Niño

1 Altimetros

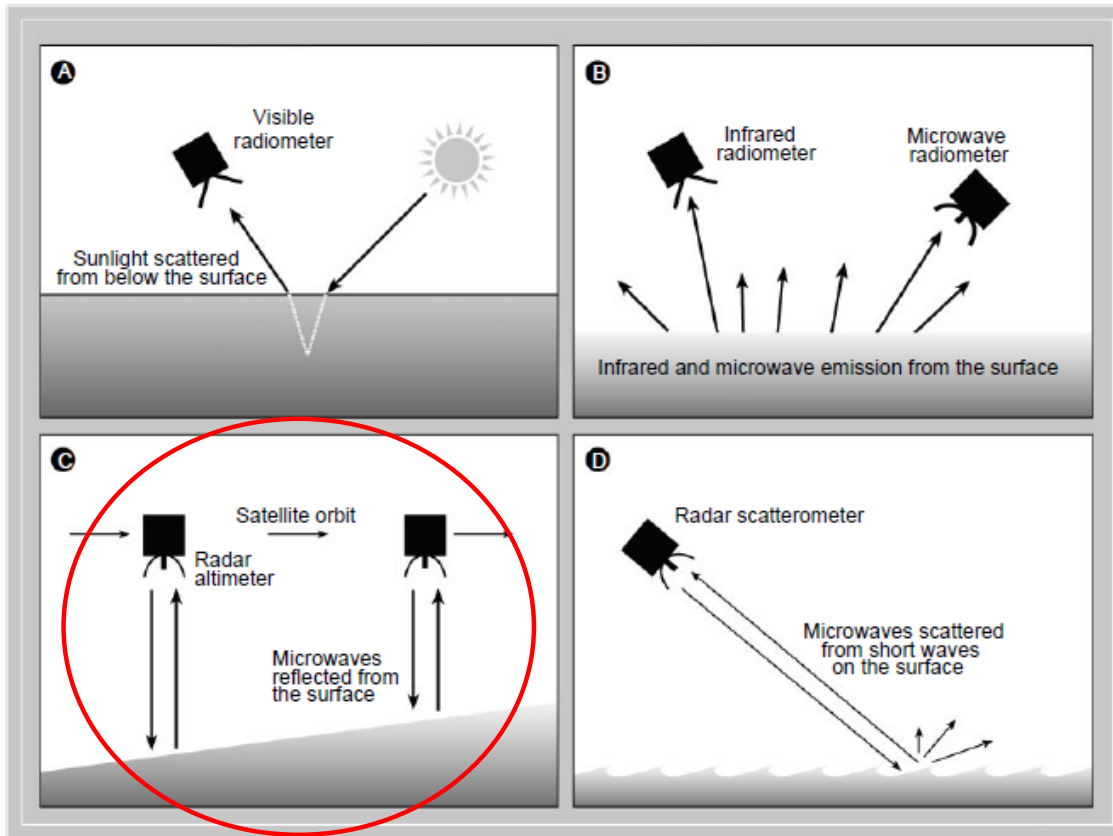


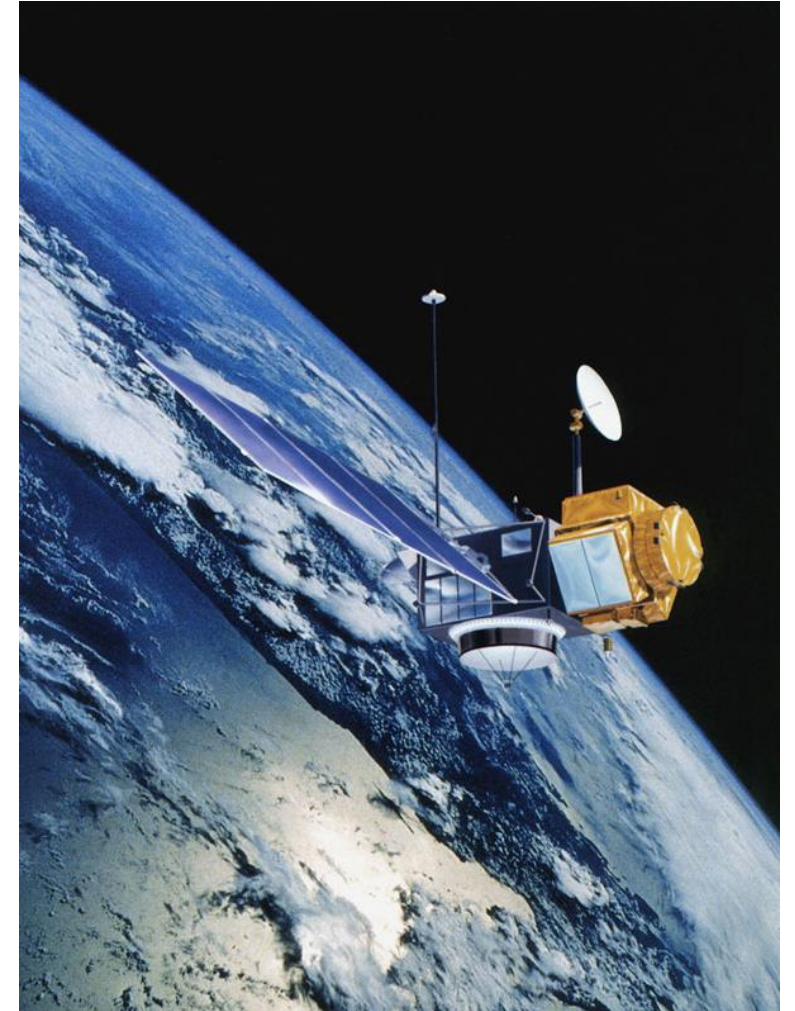
Figure 7 Four techniques for making oceanic observations from satellites: (A) visible radiometry, (B) infrared and microwave radiometry, (C) altimetry, and (D) scatterometry. (After Robinson and Guymer, 1996.)

Wilson (2001)

Radares altímetros

Altímetros

- Radar altímetro (sensor activo)
 - Emite/recibe un pulso electromagnético
 - **Rango (R)**: distancia entre el sensor y la superficie del mar, derivada del tiempo de viaje de ida-vuelta del pulso.
- Opera en la banda de microonda (MW)
 - 5-13 GHz
- Órbita: polar, a una altitud de $\sim 1,100$ km
- El pulso se emite justo al NADIR de la trayectoria (no *swath*)



Swath: trayectoria de barrido del satélite.
NADIR: punto sobre la superficie terrestre que está centrado directamente bajo el satélite.

Altímetros (satélites)

- Radar altímetro
- Radar doppler, retro-reflector láser, GPS
 - Determinación precisa de la órbita del satélite
 - **Altura orbital (H)**
- Radiómetro MW
 - Corrige el efecto atmosférico en R (principalmente, vapor de agua)

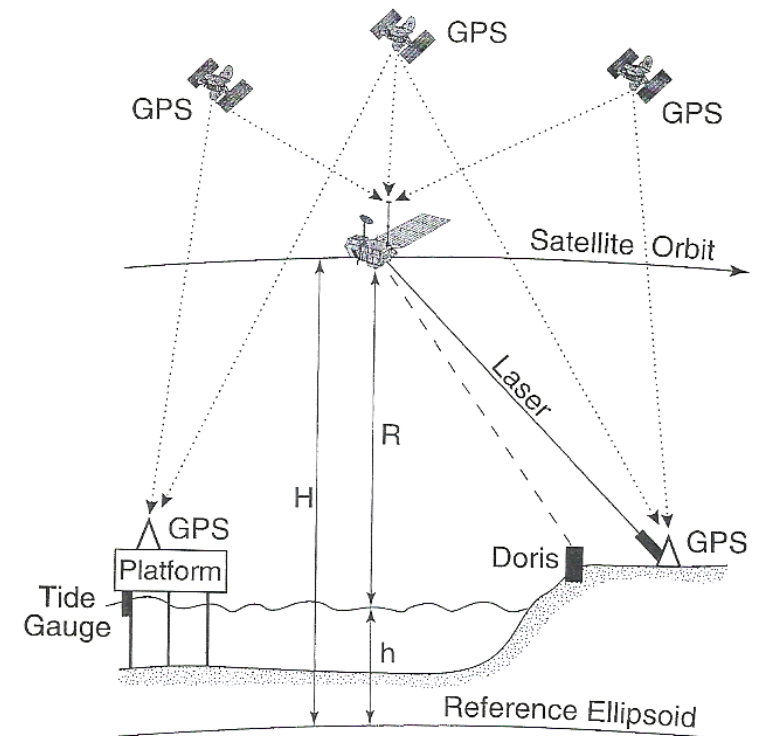


FIGURE 67 Schematic diagram showing the geometry of altimeter point calibration. At the instant the satellite passes overhead, geocentric sea surface height is observed independently by the altimeter and *in situ* measurement systems. Assuming that the *in situ* systems are properly calibrated, the difference represents the “altimeter bias.”

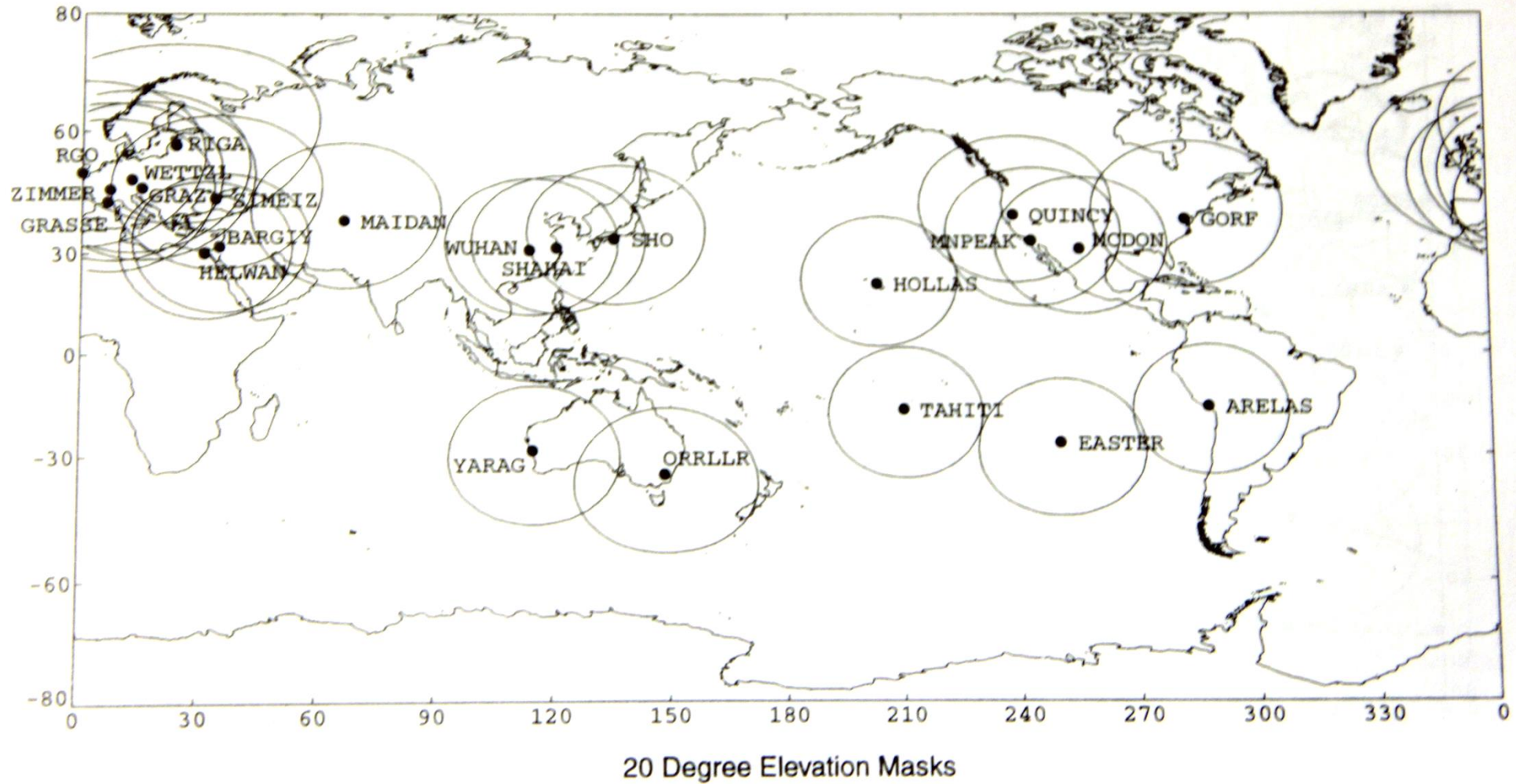


FIGURE 42 The geographic distribution of the SLR tracking stations during the T/P, ERS-1, and ERS-2 missions.

SLR: Satellite Laser Raging. Chelton et al. (2001).

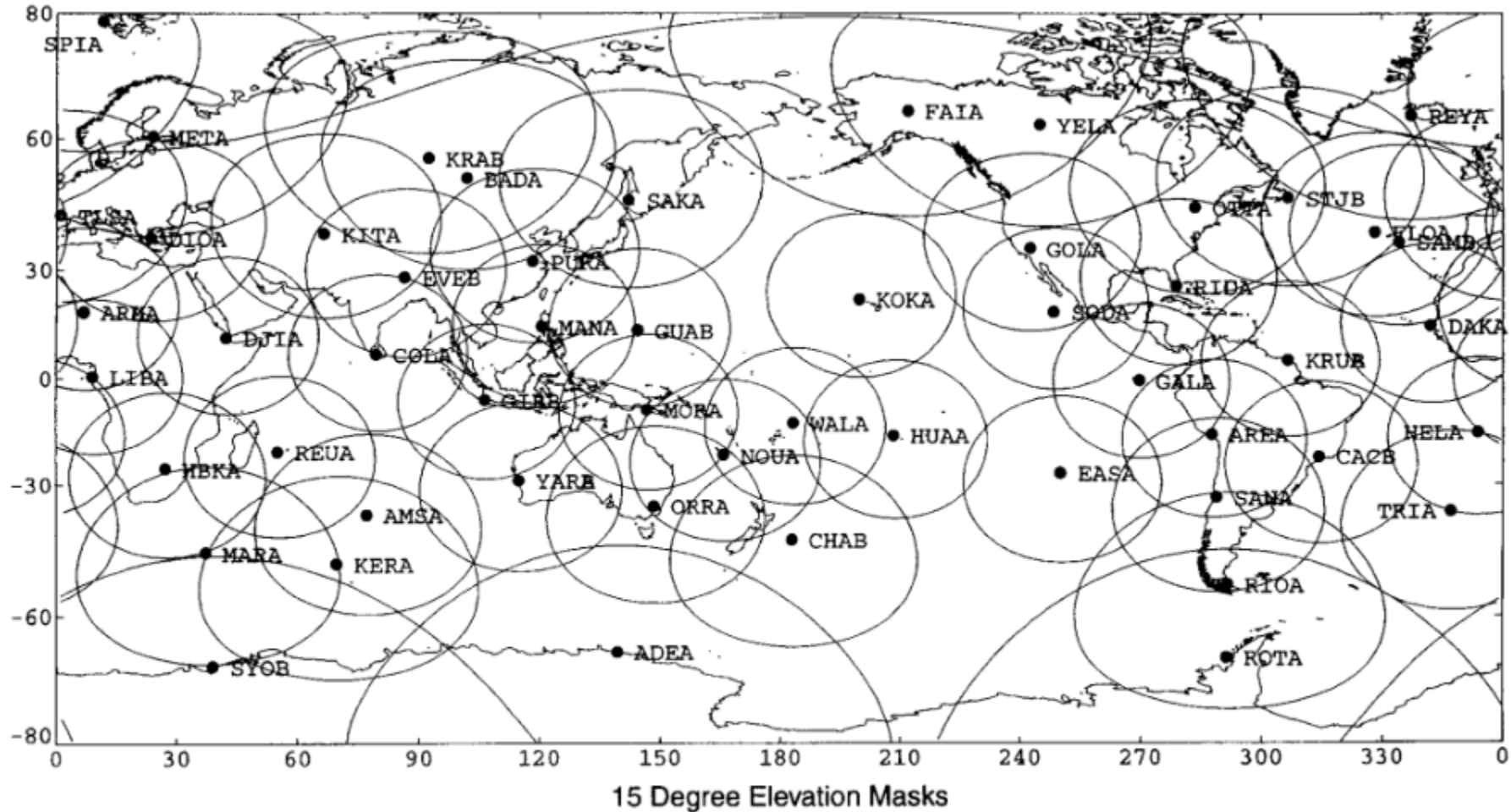


FIGURE 43 The geographic distribution of the DORIS tracking stations during the T/P mission.

DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite. Chelton et al. (2001).

$$h = H - R$$

h = altura de la superficie del mar relativa a un elipsoide de referencia

H = altura orbital (respecto al elipsoide)

R = rango

$$h_d = h - h_g - h_T - h_a$$

h_d = altura dinámica de la superficie del mar

h_g = altura del geoide (respecto al elipsoide)

h_T = altura de la marea oceánica

h_a = respuesta de la superficie del mar al efecto de barómetro invertido

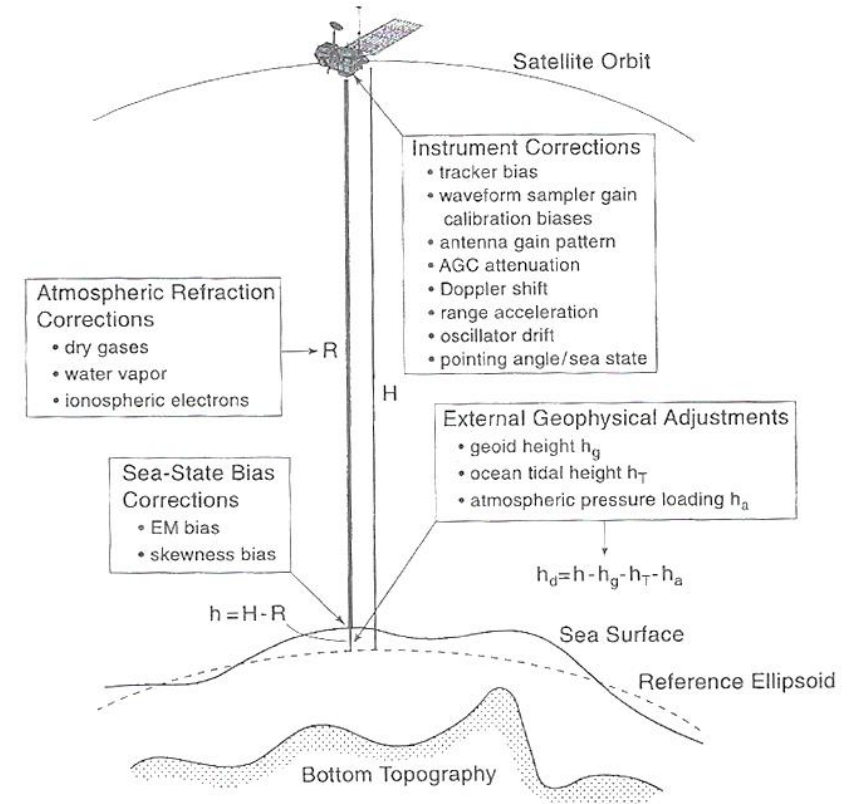
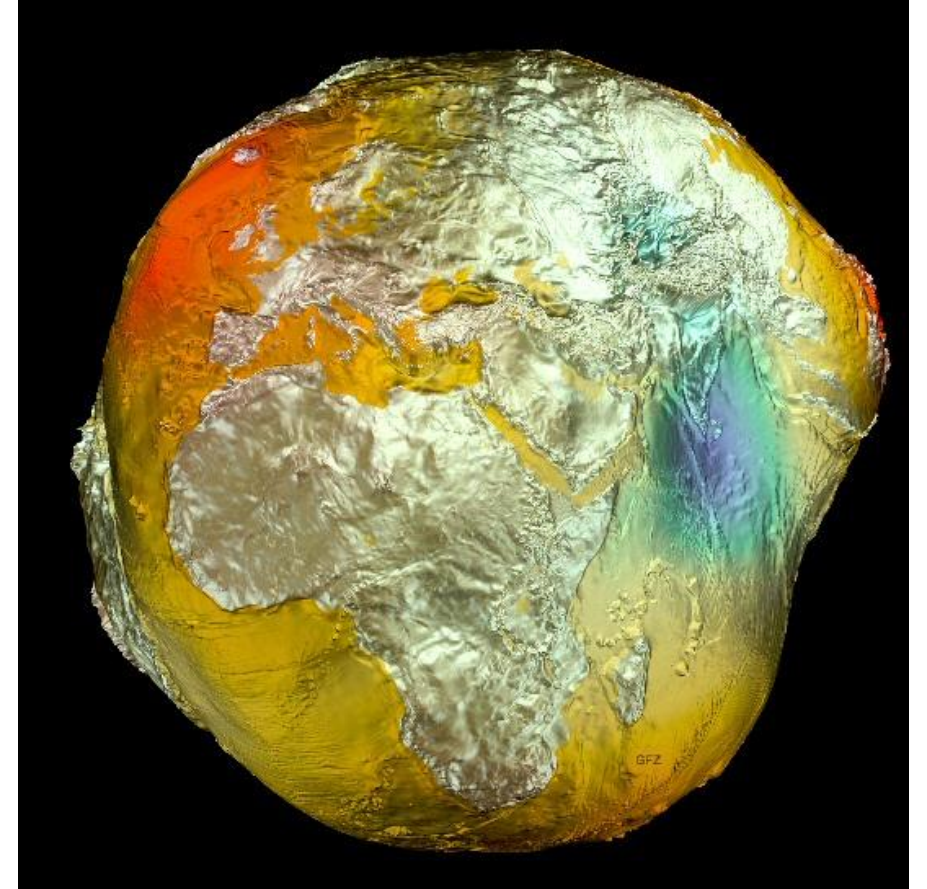


FIGURE 1 A schematic summary of the corrections that must be applied to the altimeter range measurement R and the relations between R , the orbit height H and the height h of the sea surface relative to an ellipsoidal approximation of the equipotential of the sea surface from the combined effects of the earth's gravity and centrifugal forces (the geoid). The dynamic sea surface elevation h_d that is of interest for ocean circulation studies is obtained from h by subtracting the height h_g of geoid undulations relative to the reference ellipsoid and the height variations h_T and h_a from tides and atmospheric pressure loading, respectively.

Chelton et al. (2001).

Geoide

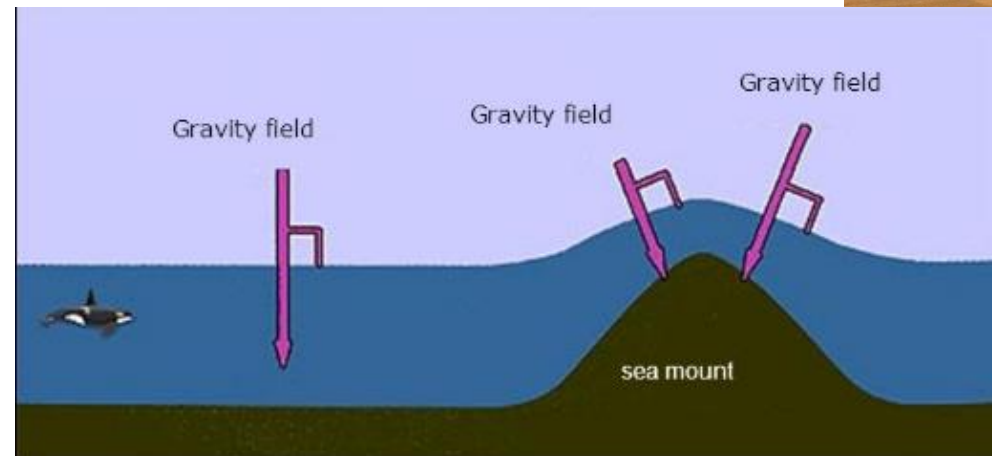
- Superficie equipotencial (potencial de la gravedad es igual en todos sus puntos).
- Variabilidad geográfica de h_g : -105 m en India y +85 m en Nueva Guinea.
- Las variaciones temporales de h_g son dos órdenes de magnitud menores a los otros términos, pero la variabilidad espacial es más energética que h_T , h_a y h_d .



La “papa gravitacional de Postdam”. La escala vertical se muestra exagerada. GFZ.

Geoide

- Las plomadas apuntan perpendicularmente, y la superficie del mar es paralelo al geoide.
 - No existe circulación oceánica (no hay gradientes de presión).
- Para obtener la señal de h_d , es necesario remover la altura del geoide.



Altura dinámica de la superficie del mar

- h_d es la variable de interés para los estudios de circulación oceánica.
- Altura dinámica de la superficie del mar vs. **Altura dinámica absoluta del nivel del mar**.
- En los años 90s, la inexistencia de un geoide de alta resolución limitaba la estimación de la Altura dinámica absoluta del nivel del mar (los errores de incertidumbre de h_g eran más grandes que h_d).



Figure 10.9. Mean geopotential anomaly relative to the 1,000 dbar surface in the Pacific based on 36,356 observations. Height of the anomaly is in geopotential centimeters. If the velocity at 1,000 dbar were zero, the map would be the surface topography of the Pacific. After Wyrtki (1979).

Altura dinámica de la superficie del mar

- Estas limitaciones llevaron a considerar el componente variable en el tiempo de h_d .
- Las variaciones del campo gravitacional terrestre son pequeñas en el tiempo, por lo que las ondulaciones del geoide pueden ser asumidas como “estacionarias” para las aplicaciones en oceanografía.
- Estrategia: la ondulación del geoide se remueve (incluyendo $H_d(x,t)$) a través de la resta del promedio de h (para cada punto de grilla).

Componente variable en el tiempo de la Altura Dinámica h_d

- $h_d = h - h_g - h_T - h_a$
- $h(x,t) = h_d(x,t) + h_g(x) + h_T(x,t) + h_a(x,t)$
- $h'(x,t) = h(x,t) - \overline{h(x)}$
- $= h_d(x,t) - \overline{h_d(x)} + h_T(x,t) + h_a(x,t)$

Se asume que no
varía en el tiempo

$h(x,t)$ = SSH (Sea Surface Height)
 $h'(x,t)$ = SSHA (Sea Surface Height Anomaly). También conocida como **SLA (Sea Level Anomaly)**.

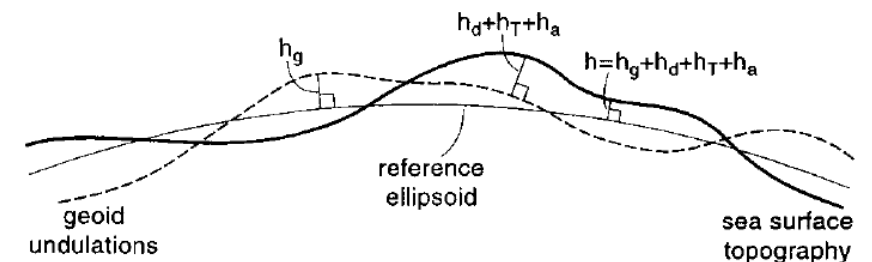
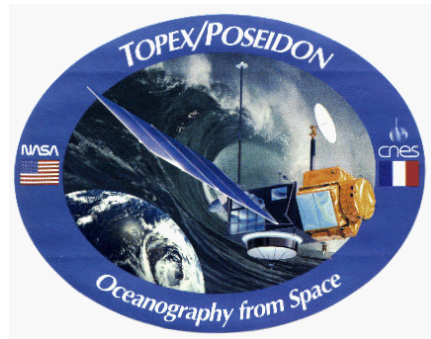


FIGURE 50 Schematic summary of the various contributions to the sea surface height h relative to a reference ellipsoid. The components of h include the geoid undulations h_g , tidal variations h_T , atmospheric pressure loading h_a and the dynamic sea surface height h_d associated with geostrophic surface currents.

Altimetría: misiones

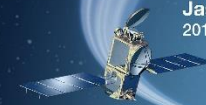
- Geosat
- ...
- TOPEX-Poseidon
- Jason-1
- Jason-2
- Jason-3
- Sentinel



SWOT
2020



Jason CS
2020



Jason 3
2015







TOPEX/Poseidon
1992-2006



Jason 1
2001-2013



OSTM/Jason 2
2008-Present

Satellite	Agency	Launch	Altitude	Altimeter	Frequency used	Repetitivity	Inclination	Error budget (Open ocean)	Satellite	Agency	Launch	Altitude	Altimeter	Frequency used	Repetitivity	Inclination	Error budget (Open ocean)
Skylab																	
	NASA	1973	435 km	S193		?	50°	Range: 1 m; Orbit: ~500 cm		CNES / NASA	2001	1336 km	Poseidon-2	Ku and C-band	10 days	66°	Range: 2 cm; Orbit: 2-3 cm
GEOS 3																	
	NASA	1974	845 km	ALT			115°	Range: 25 cm; Orbit: ~500 cm		ESA	2002	800 km	RA-2	Ku and S-band	35 days	98.5°	Range: 2-3 cm; Orbit: 2-3 cm
Seasat																	
	NASA	1978	800 km	ALT	Ku-band	17 days?	108°	Range: 5 cm; Orbit: ~100 cm		CNES / NASA / Eumetsat / NOAA	2008	1336 km	Poseidon-3	Ku and C-band	10 days	66°	
Geosat																	
	US Navy	1985	800 km		Ku-band	17 days	108	Range: 4 cm; Orbit: 30-50 cm		ESA	2008	720 km	SIRAL	Ku-band	369 days	92°	
ERS-1																	
	ESA	1991	785 km	RA	Ku-band	35 days (3 days ice phase, 168 days geodetic phase)	98.5°	Range: 3 cm; Orbit: 8-15 cm		China	2010	963 km		Ku and C-band		99.3°	
Saral																	
										ISRO / CNES	2013	800 km	AltiKa	Ka-band	35 days	92°	
Sentinel 3																	
										ESA	2016	814 km	SRAL	Ku and C-band	27 days	98.5°	
Topex/Poseidon																	
	NASA / CNES	1992	1336 km	Topex Poseidon-1	Ku and C-band Ku-band	10 days	66°	Range: 2 cm; Orbit: 2-3 cm		CNES / NASA / Eumetsat / NOAA	2016	1336 km	Poseidon-3	Ku and C-band	10 days	66°	

<http://www.altimetry.info/missions/#:~:text=Precise%20satellite%20altimetry%20missions%20have,to%20demonstrate%20proof%20of%20concept.>

Altimetría: datos (Nivel del mar)

- Disponible según varios niveles de procesamiento.
 - L4: Producto en grilla y libre de brechas (*gaps*)
- Altura del nivel del mar: AVISO.
- AVISO --> DUACS2014.
- Repositorio: Copernicus (EU).

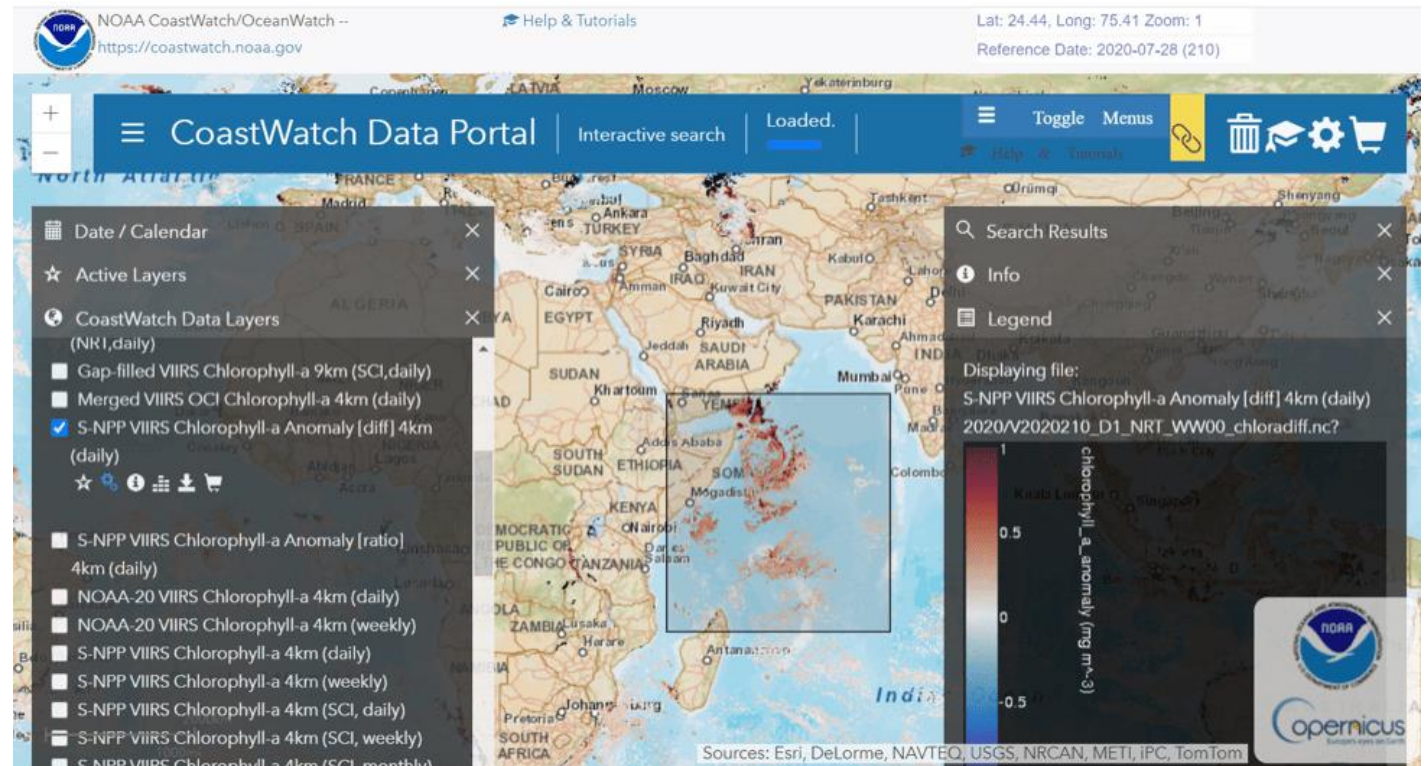
Altimetría: datos (Nivel del mar)

- Visualizador rápido.
 - LAS (Live Access Server)
- Descarga de información vía FTP.
 - Se requiere registro previo. Es gratuito.
 - Uso de programa de procesamiento de datos. R, Python, Matlab.
- Data disponible:
 - MDT: Topografía Dinámica Promedio
 - SLA: Anomalía del Nivel del Mar
 - u_g, v_g : Corriente Geostrófica



Altimetría: datos

- Otros repositorios
 - Coastwatch
 - Oceanwatch
 - (ver presentación siguiente: Trinanes & Goni)



2 Aplicaciones: nivel del mar

Altimetría: aplicaciones (general)

- Nivel del mar
- Viento marino (sólo magnitud de velocidad)
- Oleaje

Aplicaciones: Nivel del mar

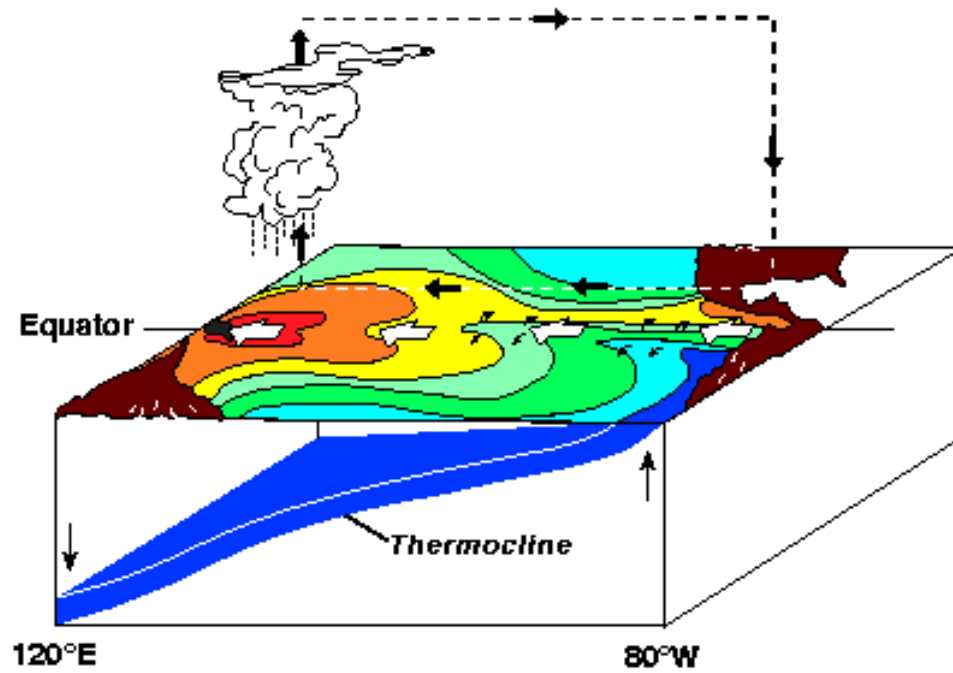
- Un amplio abanico de estudios
- Remolinos de Mesoescala (Eddies)
- (Ondas planetarias)
- Ondas de Kelvin y Rossby
 - Ondas de Kelvin: costeras, ecuatoriales
- Clima: El Niño-Oscilación del Sur
- Cambio climático: Elevación del Nivel del mar

ENOS

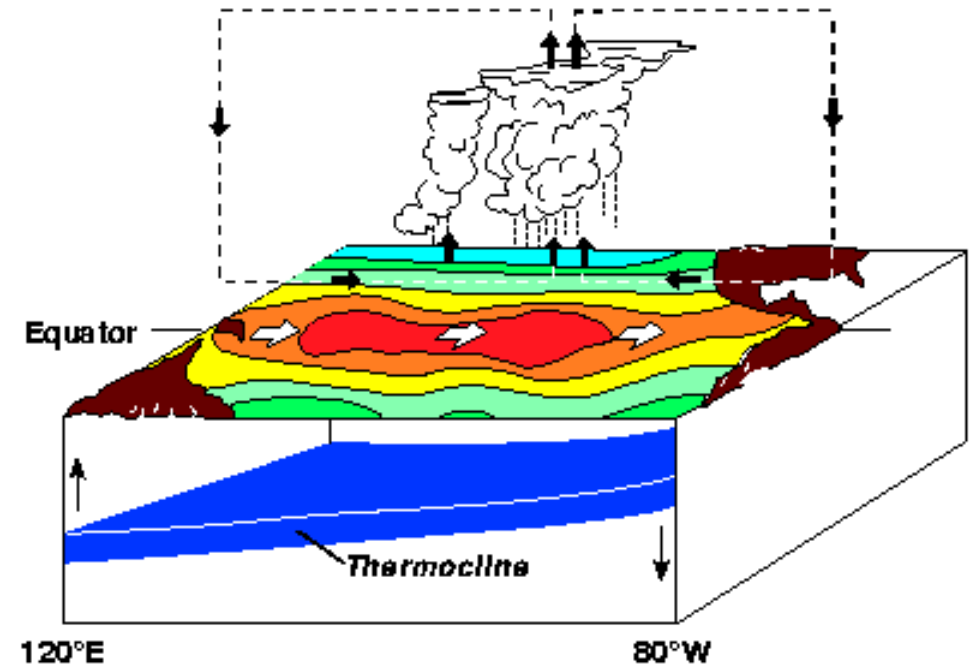
- Modo de variabilidad interanual más importante del clima terrestre.
- El Niño (parte oceánica)
- Oscilación del Sur (parte atmosférica)
- Es un evento “acoplado”.

- Dos fases:
 - El Niño (fase cálida)
 - La Niña (fase fría)

Pacific Marine Environmental Laboratory
(PMEL-NOAA).



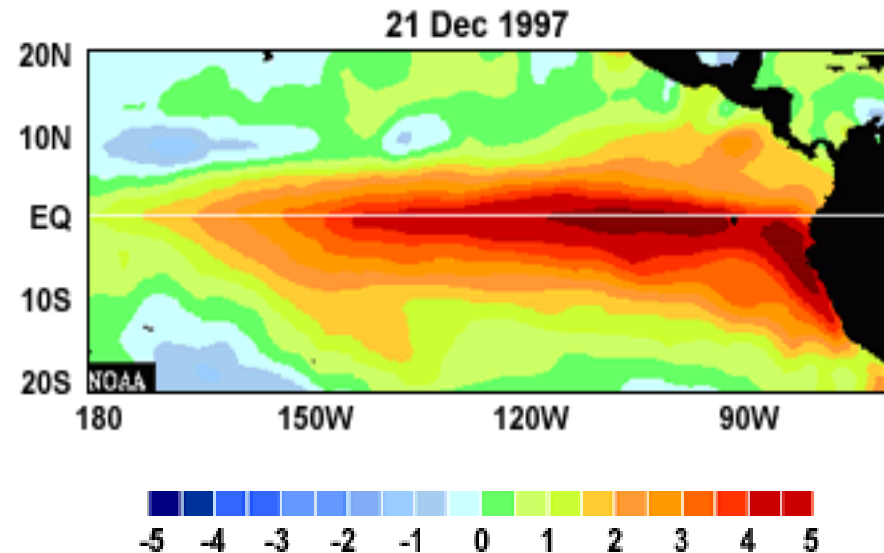
La Niña



El Niño

El Niño (fase cálida)

- Disrupción del sistema océano-atmósfera en el Pacífico ecuatorial, que se manifiesta con anomalías positivas de la temperatura superficial del mar por varios meses en las regiones Niño 3.4 y Niño 1+2.

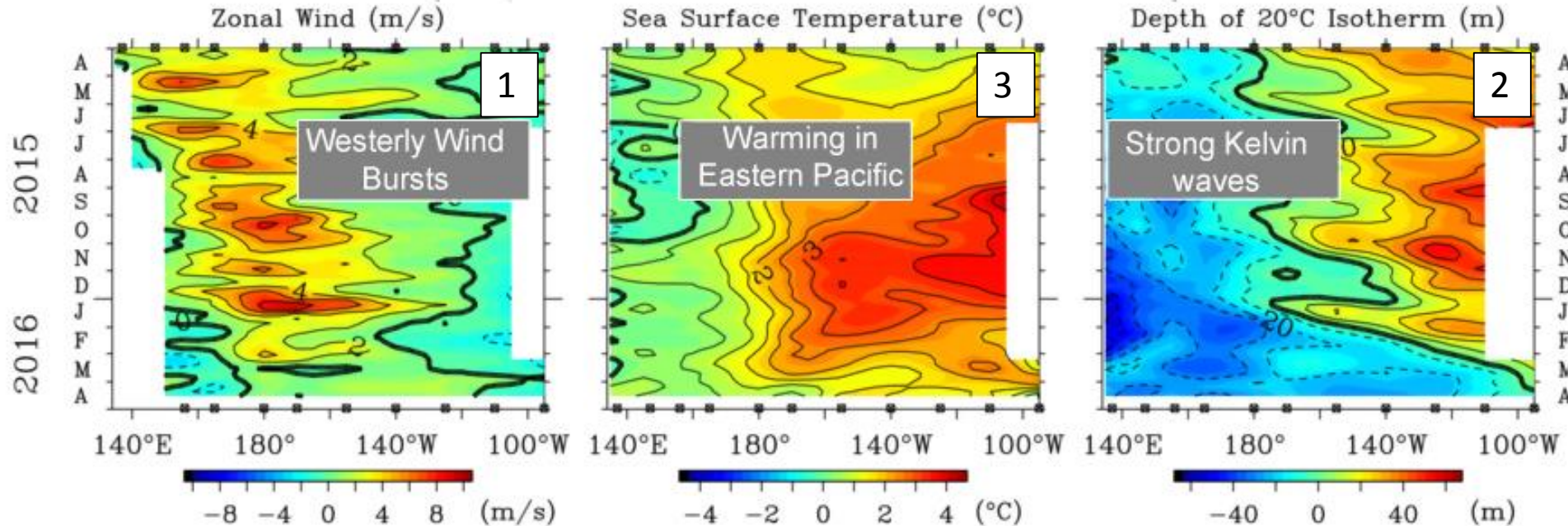


El Niño Evolution

In the tropical Pacific Ocean

In each panel
Indonesia is on the left & South America is on the right

Time increases
downwards



El Niño begins

El Niño builds

El Niño declines

El Niño begins with westerly wind bursts blowing across the Pacific Ocean towards South America (red colors above).

Surface water in the central Pacific Ocean warms (red colors above).

Strong downwelling Kelvin waves are seen in the central and eastern Pacific Ocean (red colors above).

Ondas ecuatoriales

- Las ondas ecuatoriales son cruciales en la respuesta del océano tropical a las variaciones del viento, y para explicar El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).
- El ajuste oceánico asociado con los cambios provocados por el ENSO depende crucialmente de la existencia de las ondas ecuatoriales, especialmente las ondas de Kelvin y Rossby, ya que éstas pueden alterar la profundidad de la termoclina ecuatorial.
- A una onda de Kelvin, le toma aproximadamente de 2-3 meses para cruzar el Pacífico, y menos de 8 meses a una onda de Rossby. A causa de esta separación, las propiedades de la respuesta oceánica a la perturbación del viento dependen fuertemente del carácter de dicho forzamiento.

Onda de Kelvin ecuatorial

Para incluir (de manera preliminar) el efecto **baroclínico** en la relación de dispersión, reemplazamos g por g' , y H (profundidad de toda la columna) por H_1 (profundidad interfase ---> termoclina).

Modo Barotrópico

$$c = \sqrt{gH}$$

Modo Baroclínico

$$c = \sqrt{g'H_1}$$

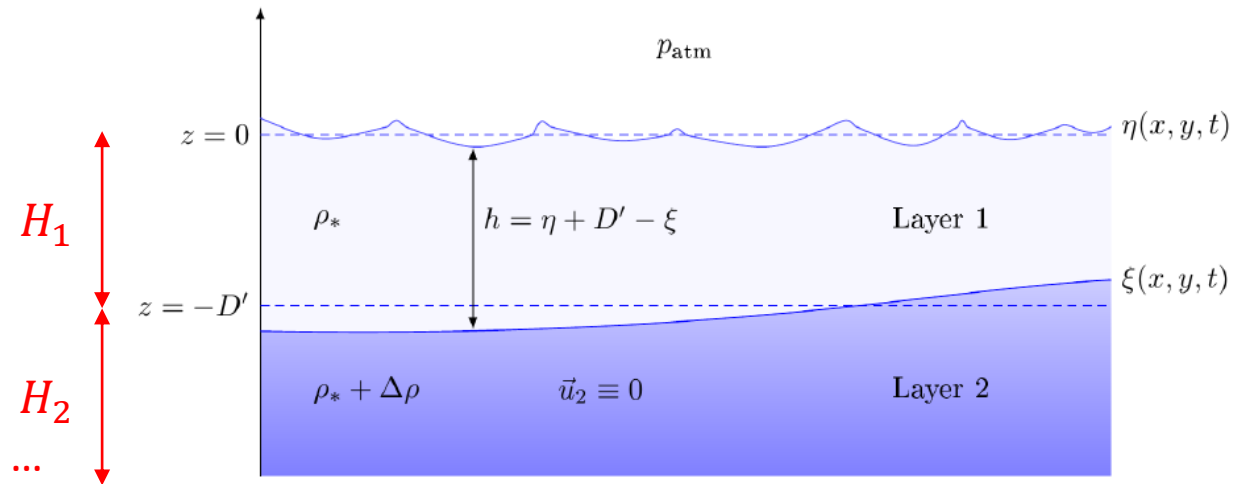
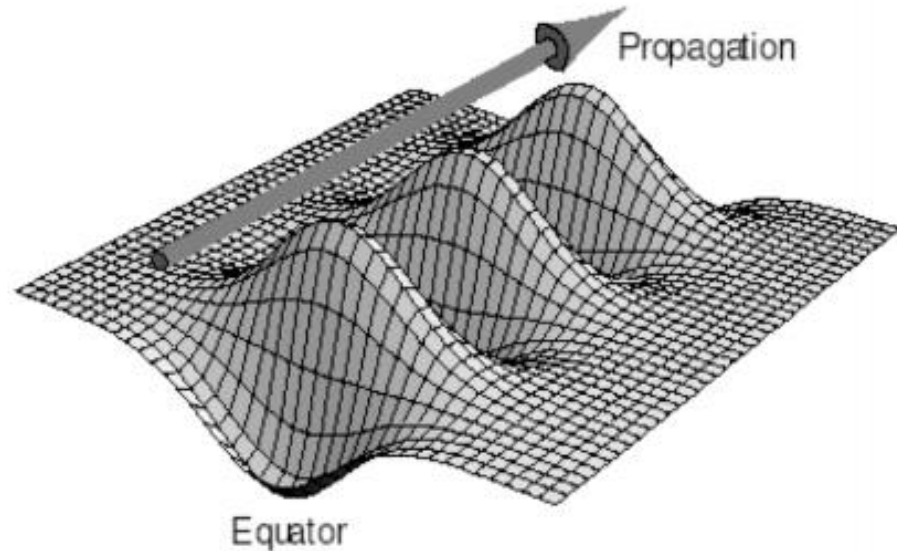


Figure 2.2: Sketch of the *reduced gravity* model. ξ is the deviation of the thermocline/interfacial from its mean value $-D'$. Layer 2 is regarded as motionless and infinitely deep, in analogy with figure 2.1.

Ejercicios: Onda de Kelvin



Relación de dispersión

Onda de Kelvin, modo **Baroclínico**

$H_1 = 120$ m (profundidad promedio de la Termoclina en el Pacífico Tropical, Fedorov & Brown 2009).

$\Delta\rho/\rho = 0.006$ (valor típico en la zona ecuatorial).

$$g' = g(\Delta\rho/\rho)$$

$$g' = 9.8 \text{ m/s}^2 \times 0.006$$

$$g' = 0.059 \text{ m/s}^2, \quad \text{o} \quad g' = 5.9 \text{ cm/s}^2$$

$$c = \sqrt{g' H_1}$$

$$c = \sqrt{0.059 \text{ m/s}^2 \times 120 \text{ m}}$$

$$c = 2.66 \text{ m/s}$$

3 Caso de estudio: ondas de Kelvin y El Niño-Oscilación del Sur

Monitoreo de El Niño-Oscilación del Sur

- www.enos.espol.edu.ec
- Objetivo: Monitoreo del nivel del mar en el Pacífico Tropical, para evaluación y detección de eventos El Niño-Oscilación del Sur.
- Complemento: Estación Oceanográfica El Pelado (CTD semanal). CENAIM-ESPOL.
- Insumo: ERFEN (Estudio Regional del Fenómeno de El Niño), Ecuador. Análisis de otras variables océano-atmosféricas.

Monitoreo de El Niño-Oscilación del Sur

- El Niño (fase cálida del ENOS) tiene un importante impacto global, y en los países de la Costa Oeste de Sudamérica.
- Eventos El Niño extremos (ejemplo: 1997-98): cuantiosas pérdidas. 9.5% del PIB (CAF, 2001).
- Requiere de una continua observación del océano y atmósfera del Pacífico Tropical: TSM, viento, presión, precipitación, temperatura sub-superficial, **nivel del mar**.

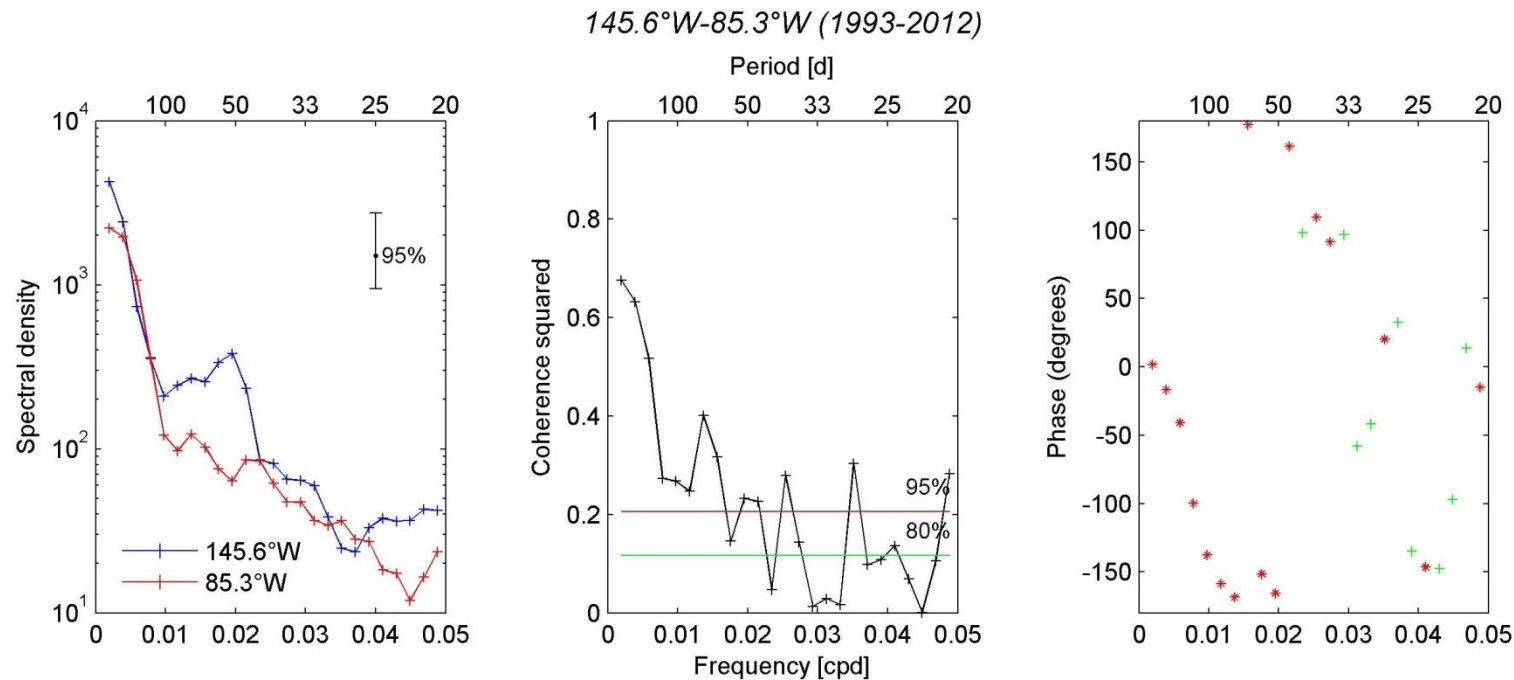
Monitoreo de El Niño-Oscilación del Sur

- Nivel del mar ecuatorial. Forzamiento remoto (Pacífico Occidental).
- La perturbación se propaga, desde el Pacífico Occidental al Pacífico Oriental, en la forma de una onda de Kelvin Ecuatorial.
- Onda de Kelvin: forzada por el viento (WWB, Ráfagas de Viento Oeste). Perturba la termoclina. El pulso se propaga en dirección Oeste a una velocidad que es consistente con el 1er modo baroclínico de onda de Kelvin (2.7 m/s). La variación de la termoclina se “refleja” en la superficie del mar --> señal que es censada por los mareógrafos y por los altímetros.

Monitoreo de El Niño-Oscilación del Sur

- Onda de Kelvin
 - Hundimiento (cálida). Deprime la termoclina. Eleva el nivel del mar.
 - Afloramiento (fría). Levanta la termoclina. Deprime el nivel del mar.
- El contenido de calor (ecuatorial) es proporcional al nivel del mar (ecuatorial).
- Buen indicador de El Niño-Oscilación del Sur.
 - Durante los eventos El Niño (fase cálida ENOS), la actividad de ondas de Kelvin (de hundimiento) es máxima.

¿Cómo sabemos que el nivel del mar ecuatorial es efectivamente explicado por las variaciones producto de ondas de Kelvin Ecuatoriales?

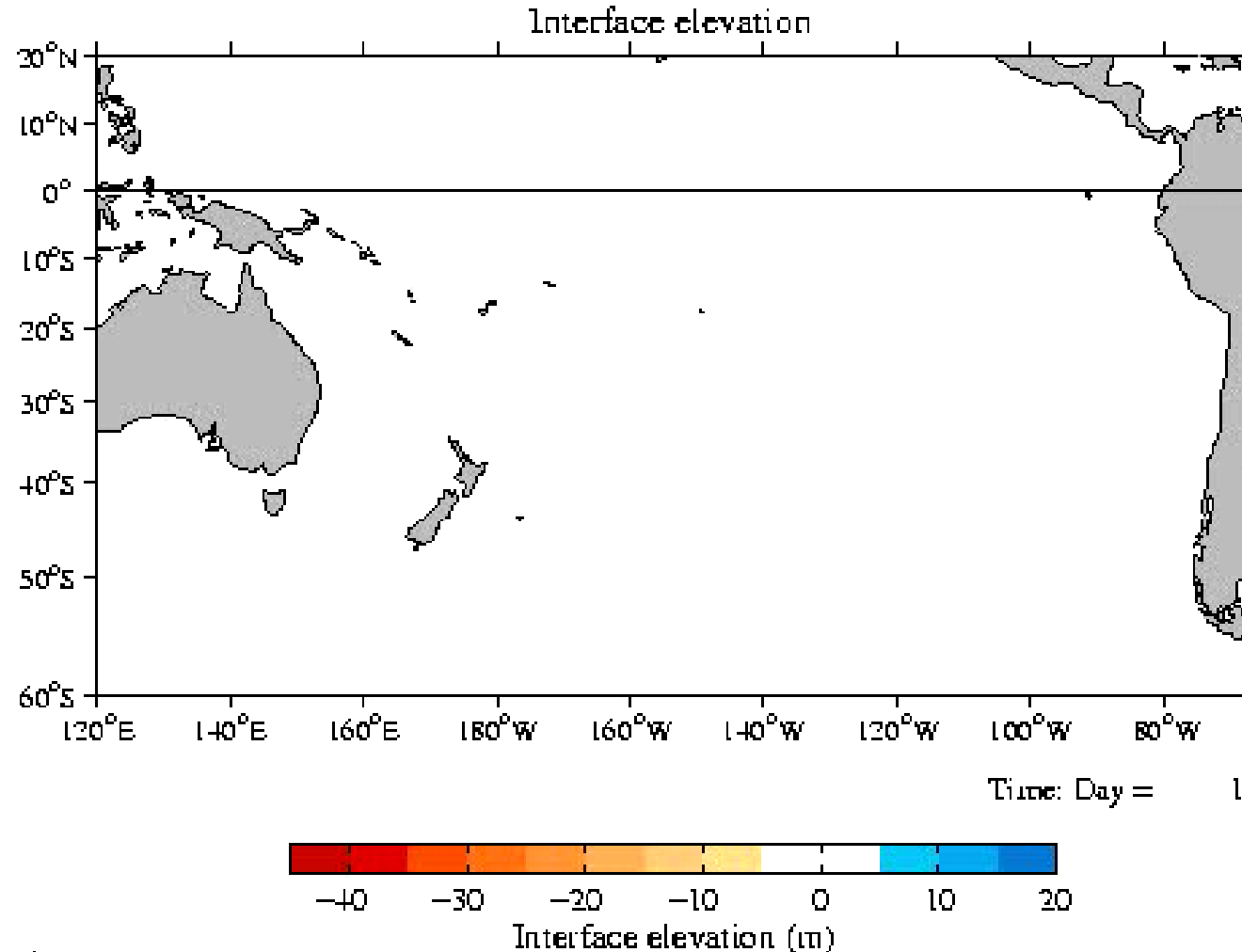


Coherencia y fase del nivel del mar (altimetría) entre dos puntos del Pacífico central (145.6°W) y oriental (85.3°W). La velocidad de fase estimada es de 2.7 m s⁻¹.

¿Cuál es la correlación del nivel del mar (observado vs. satelital) en el Ecuador?

- Para efectos de validación, Cedeño (2015) estimó el grado de correlación de las observaciones altimétricas versus el nivel del mar *in-situ* registrado por mareógrafos en cuatro locaciones del Pacífico Tropical, para el período 1993-2013. Las correlaciones obtenidas fueron de 0.92 (Christmas, islas de la Línea), 0.89 (Santa Cruz, islas Galápagos), 0.74 (La Libertad, costa Ecuador), y 0.77 (Callao).

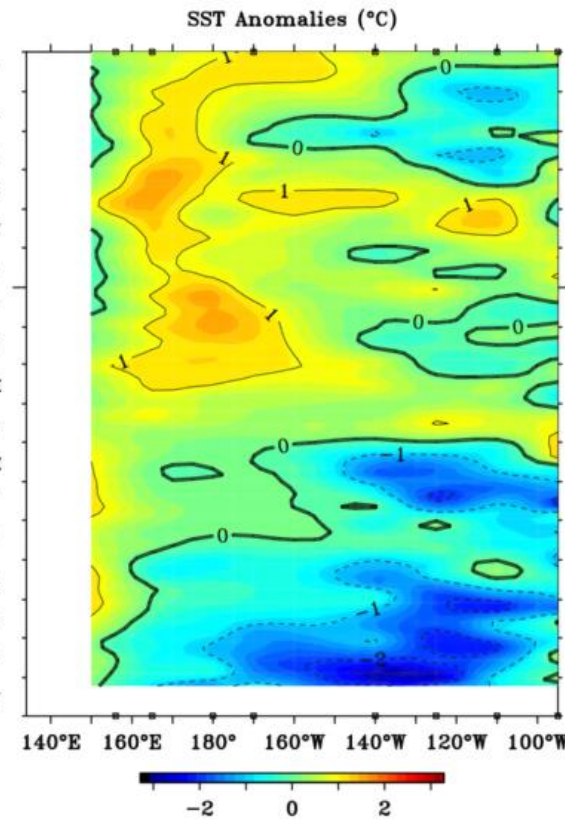
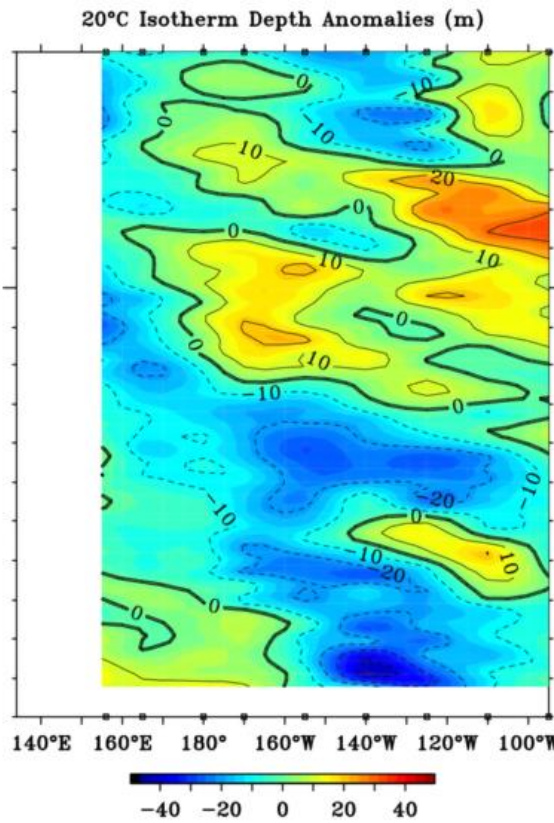
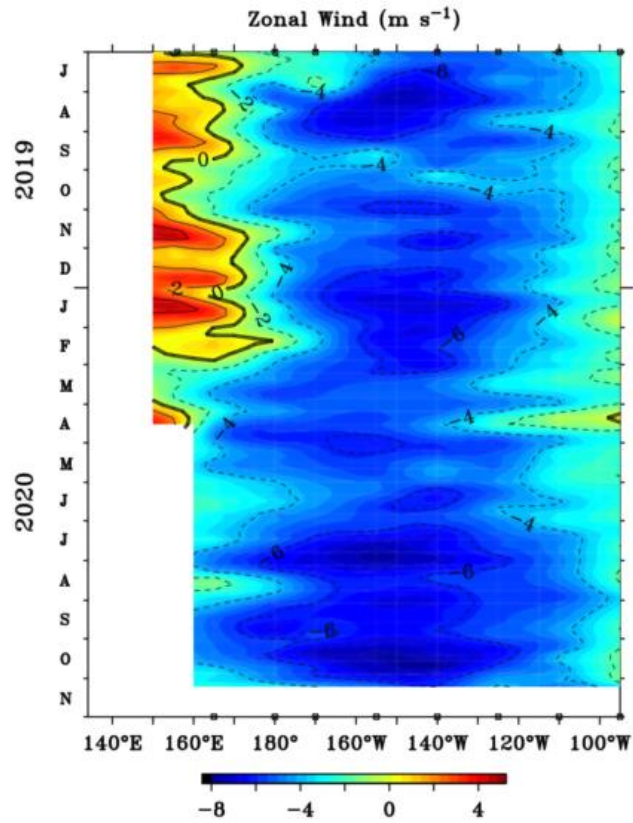
Onda de Kelvin Ecuatorial/Costera Modo Baroclínico



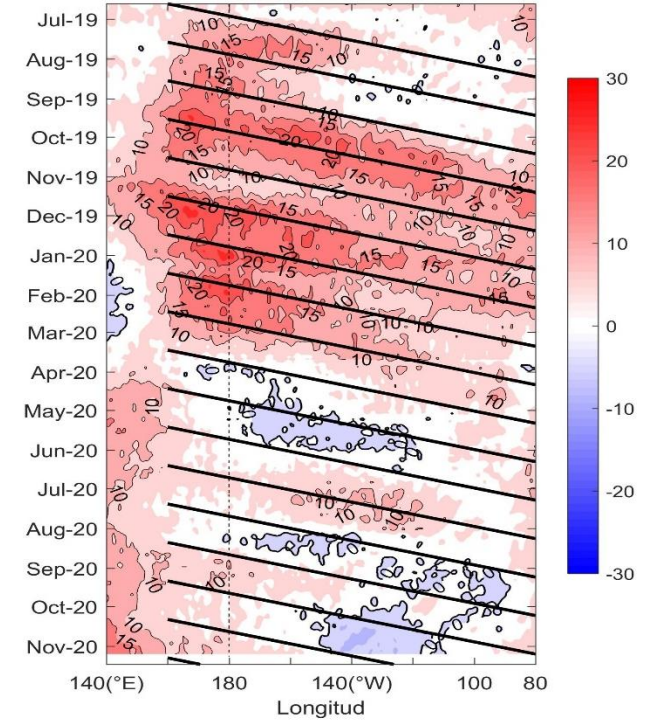
Universidad de
Concepción (2004)

Five-Day Zonal Wind and 20°C Isotherm Depth 2°S to 2°N Average

SST 2°S to 2°N Average



ANOMALIA DEL NIVEL DEL MAR [cm]
Pacífico Ecuatorial



Fuente de datos: Duacs DT2014+NRT
Procesamiento: ESPOL

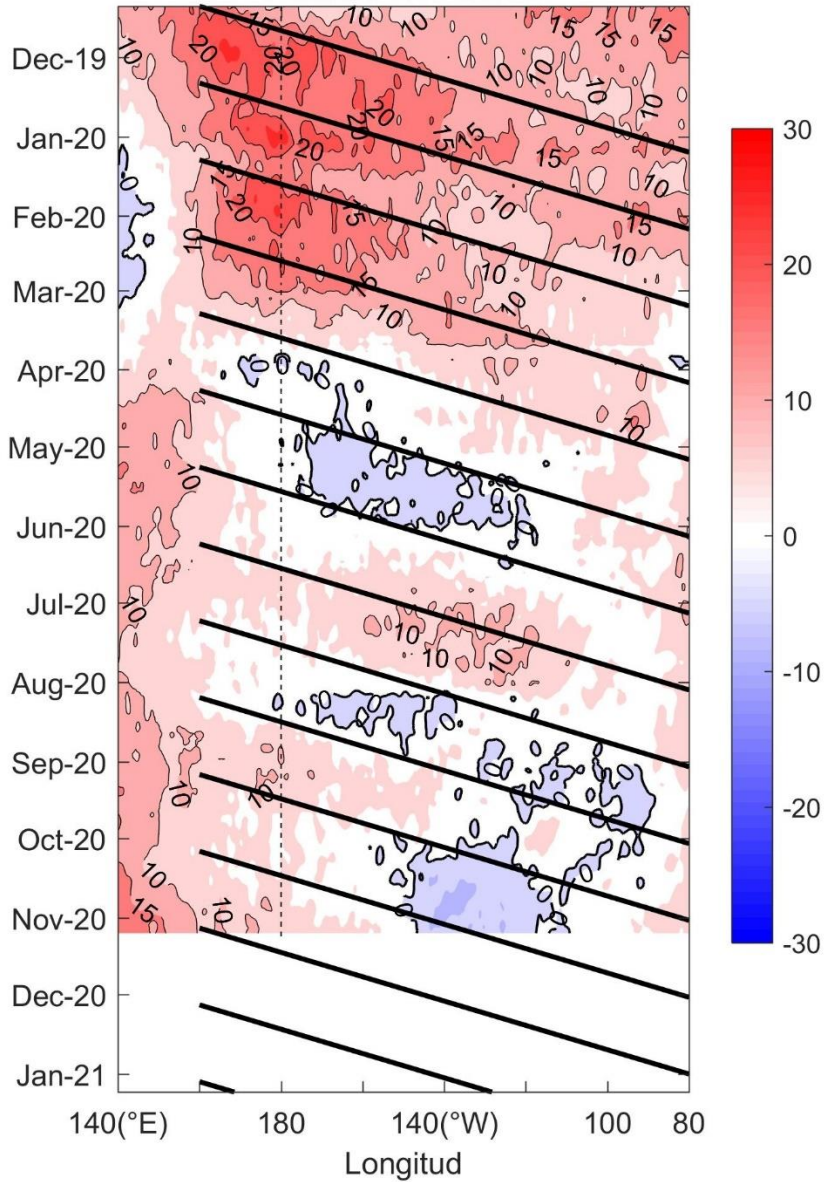
Global Tropical Moored Buoy Array Program Office, NOAA/PMEL

Nov 10 20

Nov 10 2020

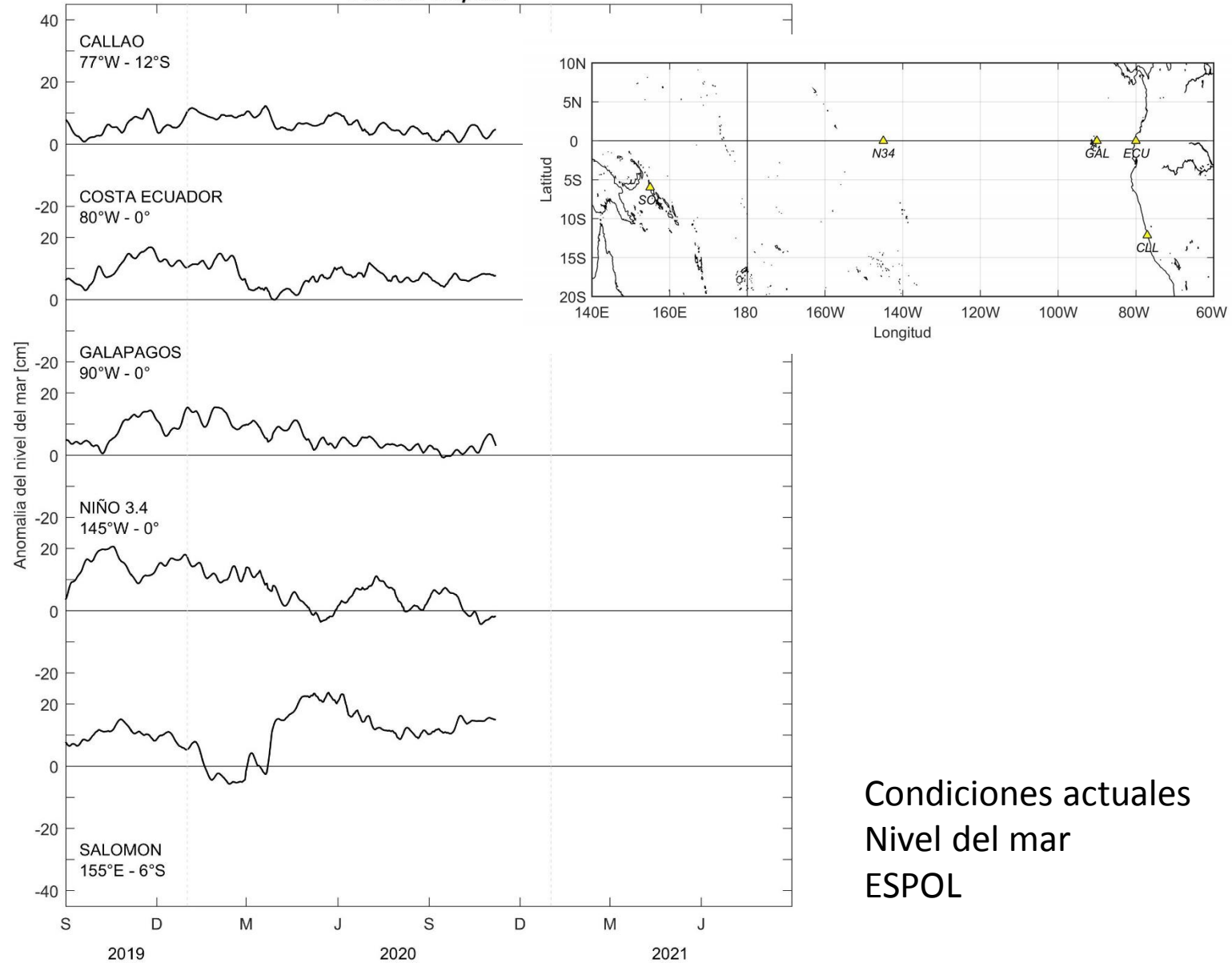
Condiciones actuales. u (viento), d20 (termoclina), ATSM + nivel del mar
PMEL-NOAA, ESPOL.

ANOMALIA DEL NIVEL DEL MAR [cm] Pacífico Ecuatorial



Fuente de datos: Duacs DT2014 + NRT
Procesamiento: ESPOL
Ultimo dato: 09-Nov-2020

NIVEL DEL MAR POR ESTACIONES Pacífico Tropical



Fuente de datos: Duacs DT2014 + NRT
Procesamiento: ESPOL
Ultimo dato: 09-Nov-2020

Condiciones actuales
Nivel del mar
ESPOL

Early-October 2020 CPC/IRI Official Probabilistic ENSO Forecasts

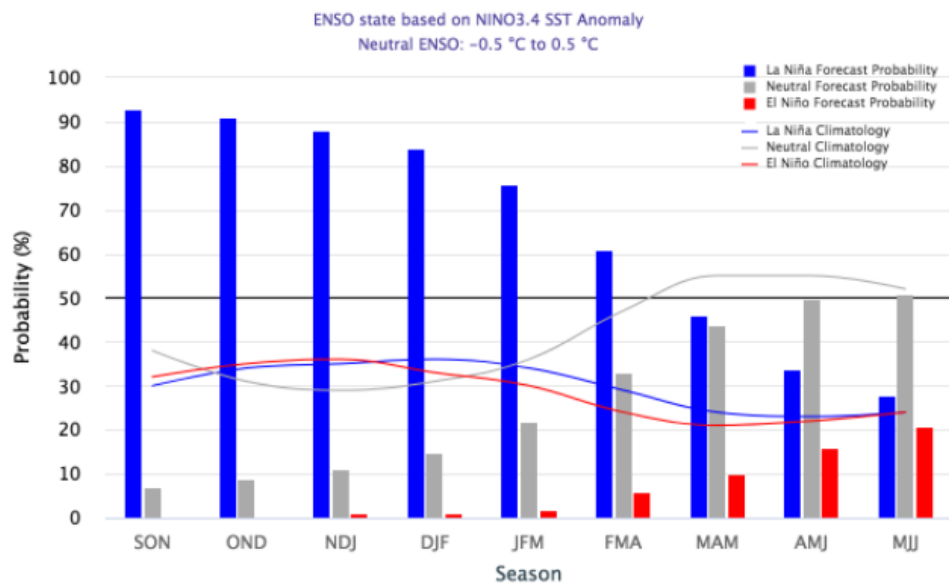


Tabla 1. Probabilidades estimadas de las magnitudes de El Niño – La Niña en el Pacífico oriental (región 1+2 frente a la costa del Perú) en el verano diciembre 2020 – marzo 2021.

Magnitud del evento diciembre 2020 - marzo 2021	Probabilidad de ocurrencia
El Niño fuerte	0%
El Niño moderado	2%
El Niño débil	13%
Neutro	58%
La Niña débil	25%
La Niña moderada	2%

Tabla 2. Probabilidades estimadas de las magnitudes de El Niño – La Niña en el Pacífico central (región 3.4) en el verano diciembre 2020 – marzo 2021.

Magnitud del evento diciembre 2020 - marzo 2021	Probabilidad de Ocurrencia
El Niño moderado	0%
El Niño débil	1%
Neutro	10%
La Niña débil	30%
La Niña moderada	47%
La Niña fuerte	12%

CPC/IRI Early-Month Official ENSO Forecast Probabilities

Season	La Niña	Neutral	El Niño
SON 2020	93%	7%	0%
OND 2020	91%	9%	0%
NDJ 2020	88%	11%	1%
DJF 2020	84%	15%	1%
JFM 2020	76%	22%	2%
FMA 2020	61%	33%	6%

IRI Climate Outlook

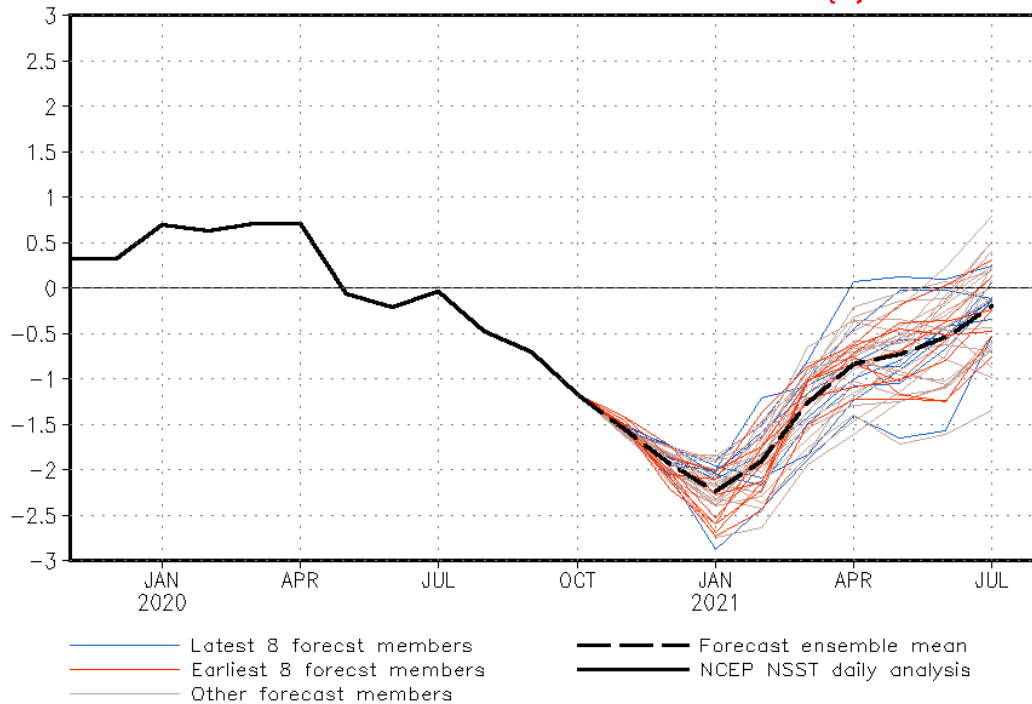
Boletín ENFEN Perú 14-2020 (9-noviembre)
Modelo NMME



NWS/NCEP/CPC

Last update: Tue Nov 10 2020
Initial conditions: 31Oct2020-9Nov2020

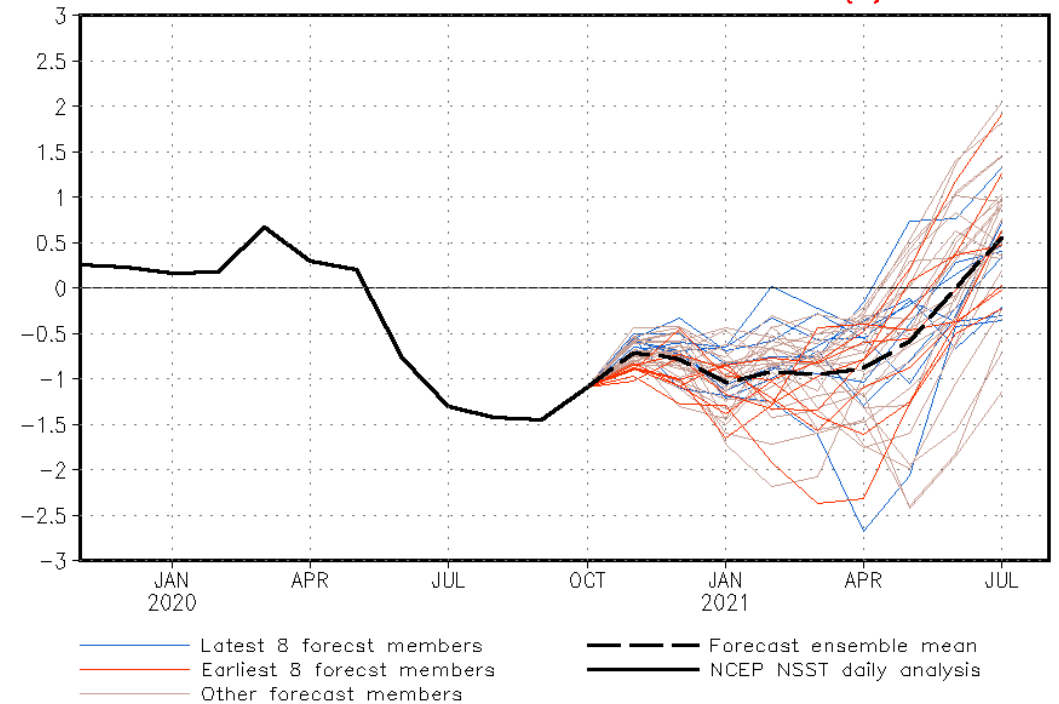
CFSv2 forecast Nino3.4 SST anomalies (K)



NWS/NCEP/CPC

Last update: Tue Nov 10 2020
Initial conditions: 31Oct2020-9Nov2020

CFSv2 forecast Nino1+2 SST anomalies (K)



Predicción de ATSM, regiones Niño 3.4 y Niño 1+2
NOAA. Modelo CFSv2.

Monitoreo de El Niño-Oscilación del Sur

Data utilizada: AVISO/DUACS (SLA).

- Repositorio: Copernicus.
- Programa de procesamiento: Matlab.
- Se descarga data (.NC). Un archivo diario.
- Extracción del nivel del mar ecuatorial (puntos de grilla más cercanos al ecuador).
- Ensamble de los datos más recientes con el histórico (desde 1993).
- Aplicación de un filtro pasa-bajo de 5 días.
- Generación de gráficas. Hovmoeller (lon-time-sla), Serie de tiempo (en varios puntos del Pacífico Tropical).

Monitoring El Niño-Southern Oscillation events

Cedeño J., D. Moncayo, D. Navarrete, M. Zavala, S.R. Granja, Y. Solórzano.

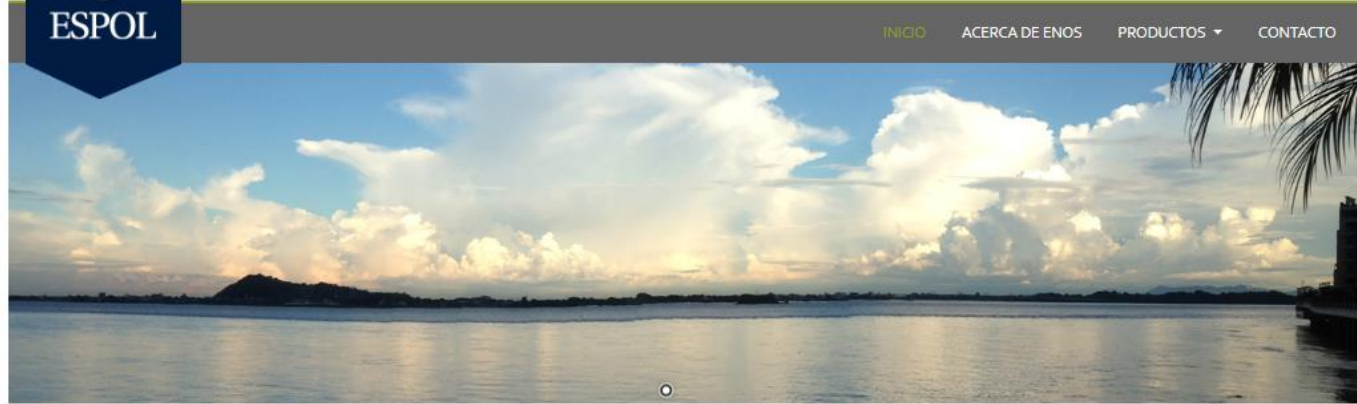
www.enos.espol.edu.ec



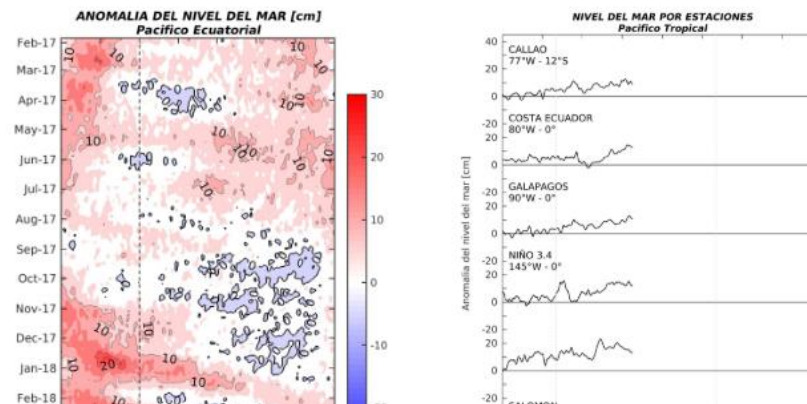
ESPOL

Monitoreo de eventos ENOS El Niño-Oscilación del Sur

INICIO ACERCA DE ENOS PRODUCTOS CONTACTO



ANOMALÍAS DEL NIVEL DEL MAR



BIENVENIDOS AL WEB ENOS

Aquí podrá encontrar información actualizada acerca de la evolución de los eventos ENOS (El Niño-La Niña), visto a través de distintas variables oceanográficas como el nivel del mar ecuatorial.

FIMCBOR-ESPOL. Ecuador.

NOTICIAS

IV Conferencia Internacional sobre El Niño-Oscilación del Sur: ENOS en un clima más cálido.

16-18 de octubre del 2018. ESPOL, campus "Gustavo Galindo V.", Km. 30.5 vía Perimetral. Guayaquil.

Organizan: CLIVAR, CIIFEN

Weekly updates!

Muchas gracias !
Thanks !



Guayas river estuary at Bajoalto