

ONDAS ECUATORIALES ATRAPADAS: ONDAS MEZCLADAS DE ROSSBY - GRAVEDAD

Por:
M. PILAR CORNEJO-RODRIGUEZ (1)

RESUMEN

La dinámica de la zona ecuatorial muestra la presencia de un conjunto de modos meridionales de onda, los cuales obedecen a una relación de dispersión que proporciona una familia de curvas en el espacio definido por la frecuencia (ordenadas) y el número de onda (abscisas). Estas ondas son las siguientes: ondas Rossby, ondas de Inercia-gravedad, ondas Kelvin y ondas Mezcladas de Rossby-gravedad.

Para las ondas Mezcladas de Rossby-gravedad el desplazamiento del nivel del mar es antisimétrico, con respecto al ecuador, con valores extremos cerca de $3-4^{\circ}$ N/S. La componente dominante de las corrientes es la meridional y se encuentra fuera de fase con respecto al desplazamiento del nivel del mar. La velocidad de fase puede propagarse ya sea con una dirección Este u Oeste, dependiendo de su período. Las ondas Mezcladas de Rossby-gravedad son altamente dispersivas, esto es, la velocidad de grupo no es constante pero la energía siempre se propaga hacia el Este.

Finalmente las ondas Mezcladas de Rossby-gravedad han sido detectadas en el Océano Pacífico Ecuatorial, tanto en los períodos en que se presenta el Fenómeno de "El Niño", así como en aquellos considerados normales, pero su origen es todavía desconocido.

ABSTRACT

The dynamics of equatorial waves shows the presence of a set of meridional wave modes which obeys a dispersion relationship that gives a family of curves in the frequency-wavenumber space: Inertia-gravity waves, Rossby waves, Kelvin wave and Mixed Rossby-gravity waves.

For Mixed Rossby-gravity waves the sea level displacement is antisymmetric with respect to the equator, and its extreme values are found near $3-4^{\circ}$ N/S. The meridional component of the currents is the dominant one and it is out of phase with respect to the sea level displacement. The phase speed can propagate either to east or to the west depending on the period. These waves are highly dispersive, i. e., the group velocity is not constant but the energy always propagates eastward.

Finally, Mixed Rossby-gravity waves have been detected in the equatorial Pacific during El Niño and non-El Niño periods, but their source is still unknown.

INTRODUCCION

A continuación se presenta información general acerca de la teoría de ondas ecuatoriales, de las características de las ondas mezcladas de Rossby-gravedad y por último, las observaciones de las mismas en el Océano Pacífico Ecuatorial.

TEORIA DE ONDAS ECUATORIALES

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de ondas ecuatoriales largas fueron desarrolladas por Laplace para aguas someras en una esfera en rotación. La solución a este sistema de ecuaciones consiste en un conjunto

(1) Escuela Superior Politécnica del Litoral.- P.O. Box 5863.- Guayaquil - Ecuador.

de modos meridionales que obedecen a la siguiente relación de dispersión (Wunsch y Gill, 1976; Gill, 1982),

$$(w/c)^2 - k^2 - Bk = 2(n+1) B/c \quad (1)$$

donde w es la frecuencia, k es el número de onda, c es una constante de separación (también la velocidad de la onda de gravedad), n es el orden del polinomio de Hermite que gobierna cada uno de los modos, $B = df/dy$, y es la coordenada meridional y f es el parámetro de Coriolis. Esta relación nos da una familia de curvas en el espacio (k, w) , conocido como diagrama de dispersión para ondas ecuatoriales, ya que cada curva muestra la relación de dispersión para los diferentes modos. En la Fig. 1, tenemos las curvas de dispersión para un subconjunto de soluciones de la ecuación (1) en función de frecuencia (ordenada) y número de onda (abscisas). La pendiente de una línea imaginaria que conecta el origen con puntos (k, w) en una curva, da la velocidad de fase (w/k) de la onda con sus respectivos período y longitud de onda. La pendiente de una línea tangente a la curva en el mismo punto, da la velocidad de grupo (razón de propagación de la energía). Para números de onda positivos, la propagación de la fase es hacia el Este, y para números negativos es hacia el Oeste. Existen cuatro clases de ondas: la onda Kelvin ($n = -1$); las ondas de Inercia-gravedad (Bk/w es pequeño, $n \geq 1$, frecuencias altas); ondas de Rossby (w^2/c^2 es pequeño, $n \geq 1$, frecuencias bajas); y la onda Mezclada de Rossby-gravedad (MRG), conocida también como Yanai ($n = 0$). Esta última deriva su nombre del hecho de que para números de onda positivos y grandes sus características son semejantes a las de una onda Kelvin (de gravedad) y para números de onda negativos y grandes se asemeja a una onda Rossby. Nótese que la fase se propaga solamente hacia el Este para una onda Kelvin y Oeste para ondas Rossby, mientras que las ondas de Inercia-gravedad y MRG se pueden propagar en cualquiera de los dos sentidos. La energía (velocidad de grupo) en cambio se propaga solamente hacia el Este para ondas Kelvin y MRG, y en cualquiera de los dos sentidos para ondas de Inercia-gravedad y Rossby.

Nótese también que existe un rango de frecuencias con límites superior (w_s) e inferior (w_i), dentro de los cuales no existen ondas Rossby y de Inercia-gravedad. La energía en esta ventana sólo se puede propagar hacia el Este como ondas Kelvin y MRG. Esto significa que si la energía dentro de esta banda llega a la frontera este (por ejemplo, las costas de Sudamérica), no podrá ser reflejada y tendrá que transmitirse hacia los polos como ondas costeras atrapadas. Para una constante de separación típica $c = 2.5 - 3.0$ m/s (primer modo baroclínico), esta ventana se extiende desde 5-6 días hasta 30-33 días. De aquí que, ondas ecuatoriales con períodos de 1-4 semanas deberán tomar la forma de ondas Kelvin o MRG y la energía será propagada solamente hacia el Este.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS MEZCLADAS DE ROSSBY-GRAVEDAD

Cuando $n = 0$, la solución de (1), representa las ondas MRG. En este caso la relación de dispersión viene dada por la siguiente relación,

$$w/c - k - B/w = 0 \quad (2)$$

En este caso la expresión para el desplazamiento del nivel del mar (N), viene dada por

$$N = -(wy/g) \exp(-By/2c) \text{ sen}(kx - wt) \quad (3)$$

mientras que las velocidades zonal (u) y meridional (v) vienen dadas por,

$$\begin{aligned} u &= gN/c \\ v &= \exp(By/2c) \cos(kx - wt) \end{aligned} \quad (4)$$

De acuerdo con estas relaciones, las ondas MRG están asociadas con corrientes meridionales dominantes y para una misma longitud el desplazamiento del nivel del mar se encuentra fuera de fase con la componente meridional de la velocidad. También para la onda MRG, el desplazamiento del nivel del mar con respecto a su posición de equilibrio es asimétrico con respecto al ecuador (Fig. 2), con valores extremos,

cerca de los 3–4 grados Norte/Sur y no presenta desplazamiento en el ecuador. Nótese que la curva de dispersión para la onda MRG (Fig. 1) cruza el eje de las frecuencias ($k = 0$), en $w = w_0 = (B/c)^{1/2}$. Para valores típicos de $c = 2.5$ m/s, esto sucede para un período $T_0 = 9.6$ días. Este punto es especial porque la velocidad de fase (w/k) presenta una discontinuidad, siendo negativa hacia la izquierda ($T > T_0$), y positiva hacia la derecha ($T < T_0$), del mismo, lo que indica el carácter dispersivo de las ondas MRG (la velocidad de grupo no es constante). En el punto w_0 tenemos la superposición de dos ondas de longitudes de onda y velocidades de fase infinitas, una viajando hacia el Este y la otra hacia el Oeste (Fig. 3). Esta superposición da origen a una onda estacionaria de longitud de onda infinita (sin embargo la energía se propaga hacia el Este), para las cuales la superficie del mar se mueve sinusoidalmente de arriba hacia abajo, pero con signos opuestos a lados opuestos del ecuador. Las partículas de agua se mueven anticiclónicamente y hacia el Este cuando la superficie del mar se eleva y hacia el Oeste cuando está deprimida.

OBSERVACIONES DE LAS ONDAS MEZCLADAS ROSSBY-GRAVEDAD EN EL PACIFICO ECUATORIAL

Las ondas MRG han sido observadas en la región ecuatorial, tanto en la atmósfera como en el océano. Luther (1980), hizo un análisis de las oscilaciones atmosféricas y los cambios en el nivel del mar en los océanos Pacífico e Índico Ecuatoriales. Él detectó la presencia de ondas MRG en la tropósfera baja, cuyas componentes meridionales eran dominantes cerca del ecuador, con períodos de 3.5–7 días, así como de ondas con períodos correspondientes a las ondas MRG en los espectros de nivel del mar. En la Fig. 4 tenemos espectro de Frecuencia-Número de onda de la componente Este del viento superficial en el Océano Pacífico Ecuatorial, Central-Occidental (Luther, 1980), superpuesto en el diagrama de dispersión de ondas ecuatoriales. Este gráfico sugiere que las ondas MRG observadas en el Océano Pacífico podrían ser excitadas por su contrapartida en la atmósfera y si es que las condiciones son las adecuadas, el océano podría estar en resonancia. Ripa y Hayes (1981) hicieron estudios sobre la estructura meridional del nivel del mar en el Océano Pacífico Oriental, utilizando sensores profundos de presión en tres estaciones en las Islas Galápagos. Ellos aplicaron el análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) en el dominio del tiempo y encontraron que el segundo modo tenía un pico espectral alrededor de un período de diez días y un carácter asimétrico con respecto al ecuador, que concordaba con la conocida estructura para ondas MRG. Las estructuras zonales y meridionales del nivel del mar alrededor de las Islas Galápagos, también han sido estudiadas por Chiswell et al., (1987), para el período de "El Niño", 1982–83. Ellos identificaron la presencia de ondas con períodos de 6–10 días, números de onda pequeños y el mismo comportamiento asimétrico en las alturas dinámicas semejante a la estructura de las ondas MRG. Cornejo-Rodríguez y Enfield (1987), encontraron fluctuaciones en el nivel del mar a lo largo de la costa Oeste de Sudamérica, durante "El Niño", 1982–83, que eran un orden de magnitud mayor que antes o después del evento, con períodos de 1–2 semanas. Ellos demostraron que estas fluctuaciones no fueron forzadas localmente. Enfield et al., (1987), analizaron series de tiempo de nivel del mar y corrientes en el Pacífico Ecuatorial Oriental para el período de 1982–83 y demostraron que las ondas MRG eran las responsables de las fluctuaciones más energéticas del nivel del mar, observadas por Cornejo-Rodríguez y Enfield (1987), que se detectaron en la frontera Este. Ellos encontraron que las ondas MRG eran las dominantes en la banda de 1–2 semanas.

Todavía se desconoce el origen o la fuente de estas ondas, pero podrían aplicarse de dos maneras, i) ya sea forzadas por oscilaciones zonales grandes del viento como sugieren Wunsch y Gill, (1976) o ii) por la presencia de pares de ciclones que ocurren frecuentemente durante fuertes El Niño en el Pacífico Central y Central-Occidental.

BIBLIOGRAFIA

- Chiswell, S.M., D.R. Watts y M. Wimbush, 1987.— Inverted Echo Sounder Observations of Zonal and Meridional Dynamic Height Variability in the Eastern Equatorial Pacific during the 1982–83 “El Niño”, Deep–Sea Res., 34, p: 313 - 327.
- Cornejo–Rodríguez M.P., y D.B. Enfield, 1987.— High Frequency Sea Level Variability along the West Coast of South America, J. of Geophys. Res., en prensa.
- Enfield, D.B., M.P. Cornejo–Rodríguez, R.L. Smith y P.A. Newberger, 1987.— The Equatorial Source of Propagating Variability along the Peru Coast during the 1982–83 “El Niño”, J. of Geophys. Res., en prensa.
- Gill, A.E., 1982.— Atmosphere–Ocean Dynamics, New York, Academic Press Inc., p: 662.
- Luther, D.S., 1980.— Observations of Long Period Waves in the Tropical Oceans and Atmosphere, Tesis de doctorado, Massachusetts Institute of Technology, Woods Hole Oceanographic Institution, p: 210.
- Ripa P. y S.P. Hayes, 1981.— Evidence for Equatorial Trapped Waves at the Galapagos Islands, J. Geophys. Res., 86, p: 6509 - 6516.
- Wunsch, C. y A.E. Gill, 1976.— Observations of Equatorially Trapped Waves in Pacific Sea Level Variations, Deep–Sea Res., 23, p: 371 - 390.

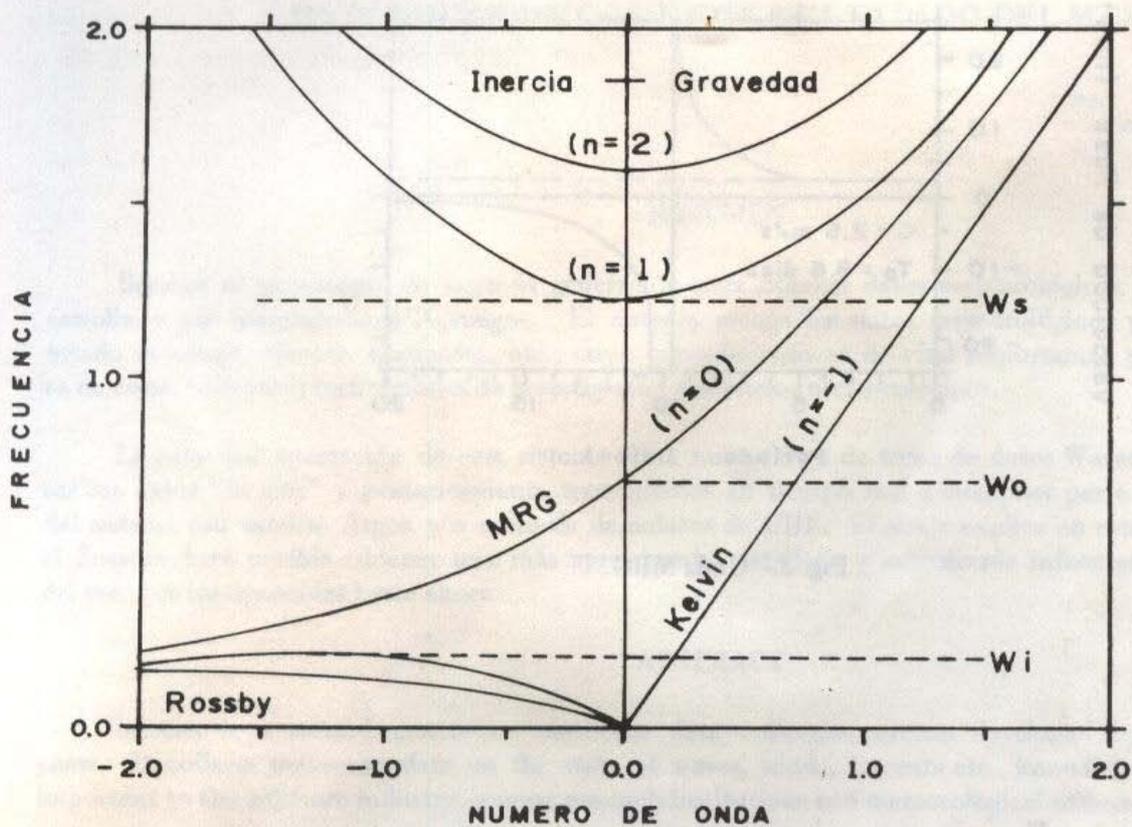


Fig. 1.- Diagrama de Dispersión de Ondas Ecuatoriales.

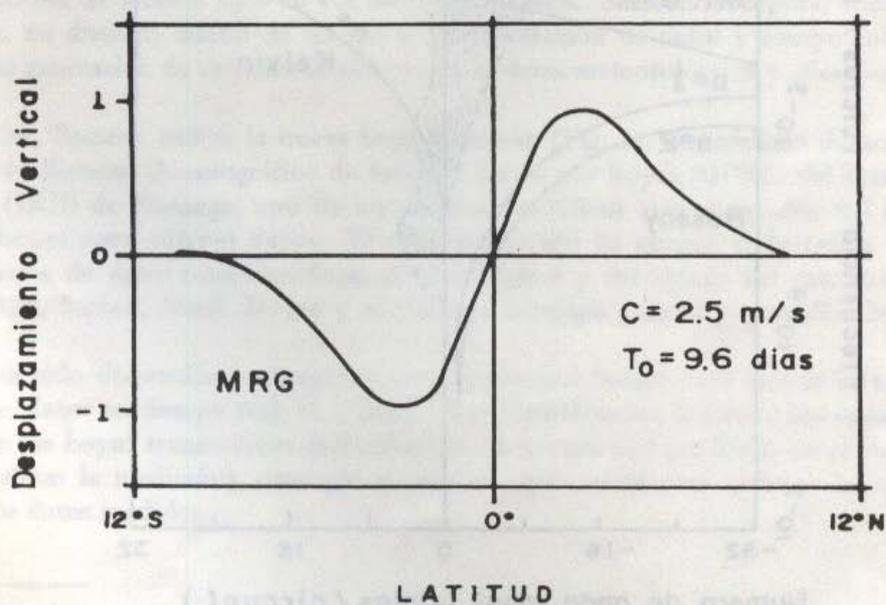


Fig. 2.- Perfil Meridional de una Onda MRG.

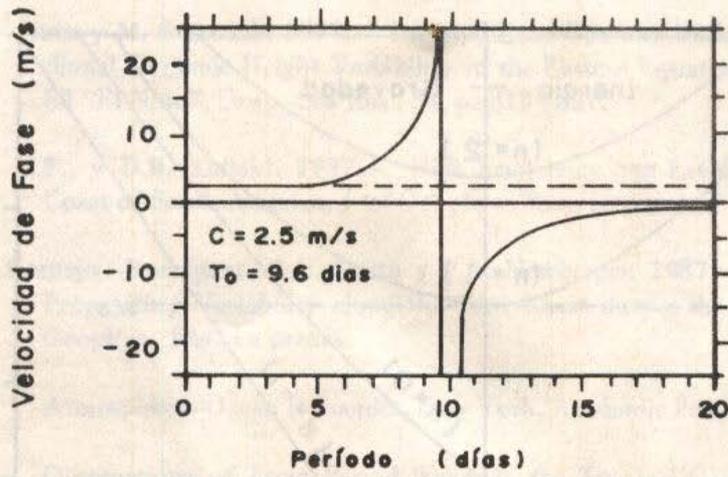


Fig. 3.- Onda MRG.

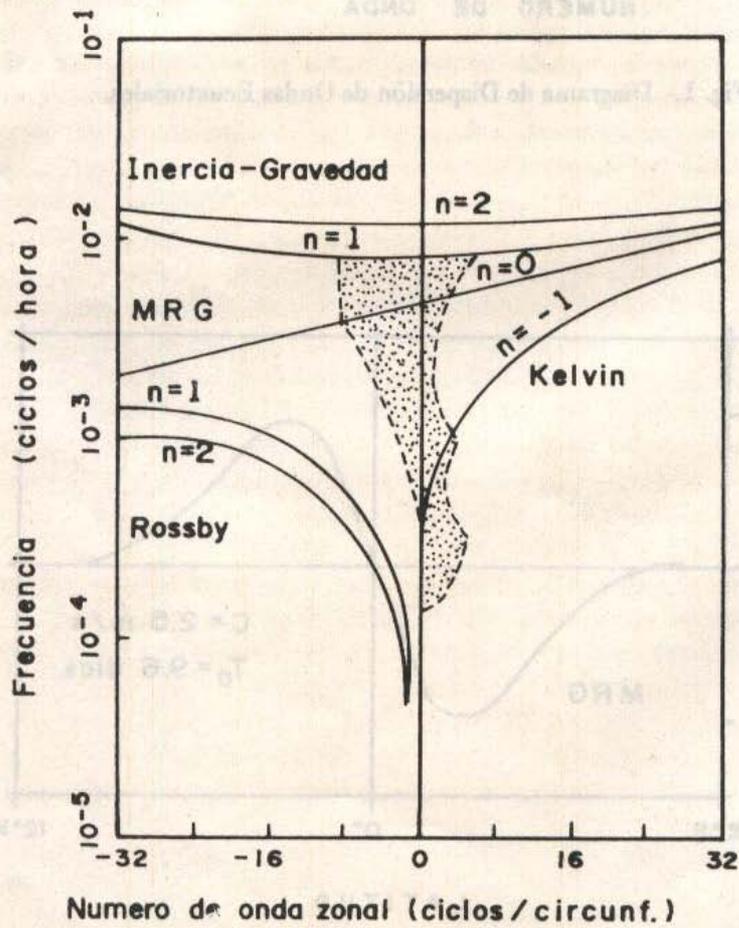


Fig. 4.- Componente Este del Viento Superficial.