

ESTUDIO DE PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR LAS ONDAS DE GRAVEDAD

M. Pulido*, M. Lamfri, M. Scavuzzo, M. Caranti

Facultad de Matemática Astronomía y Física (FaMAF) - Universidad Nacional de Córdoba
Ciudad Universitaria - (5000) - Córdoba - Argentina
e-mail: pulido@roble.fis.uncor.edu

Con el objeto de caracterizar las ondas de gravedad observadas en sondeos de viento, se analizaron los parámetros, que dan información acerca de la actividad de ondas, el sentido de rotación, dirección de propagación y tipo de polarización. Se analizaron 3 sondeos de viento realizados con un balón de volumen constante seguido por un radar (Jimsphere-radar system) desde 0.2 km a 17 km de altura con una resolución de 25 m. Hay preponderancia de rotación horaria arriba de la tropopausa y rotación variable en la troposfera. La polarización es circular en la cercanía de la tropopausa, en la parte baja del perfil en general no es bien definida. Se observa un perfil con posible generación de ondas inerciales en el jet, el cual tiene alta energías con divergencias de flujos de energía en el jet, la polarización es circular arriba y elíptica abajo. Se observan dependencias de la polarización con el viento de corte. El sentido de rotación (dado por Hamilton) esta pesado por el número de onda. Hay una sensible dependencia de los parámetros obtenidos con la ventana de filtrado. Los parámetros de Stokes son altamente variables con el número de onda, por lo cual es recomendable utilizar medias de bandas espectrales.

In order to characterize the observed gravity waves in wind profiles the parameters related to wave activity, sense of rotation, propagation direction and polarization are analyzed. The data was from 3 soundings measured with the Jim-sphere and radar system from 0.2 to 17 km and 25 m resolution. The sense of rotation is definite negative above the tropopause and variable in the troposphere. The polarization is circular near the tropopause while below it, the polarization is not well defined. There is a profile with generation of inertial waves and divergent energy flow from the jet. The polarization is circular above and elliptical below the jet following the degree of wind shear. The sense of rotation in the real space is weighted by the wavenumber. A dependence of the parameters with the filtering window can be noticed. In turn, the Stokes parameters show a high variability with the wavenumber suggesting the use of spectral bands.

I. INTRODUCCIÓN

El movimiento irregular en la atmósfera es atribuido a ondas de gravedad. Con el avance en la tecnología se ha obtenido un crecimiento en la cantidad de datos con alta resolución, en varias latitudes esto ha permitido que se comiencen a realizar estudios climatológicos de ondas de gravedad (Hirota, 1986⁽¹⁾, Eckermann and Vincent, 1989⁽²⁾, Hamilton, 1991⁽³⁾, Allen and Vincent, 1995⁽⁴⁾). Estos estudios son de interés para la simulación de la circulación general, ya que en los modelos son necesarias parametrizaciones de los movimientos de la mesoscala, debido a que estos son un importante medio de transporte de momento y energía, Lindzen (1981)⁽⁵⁾ demostró que en los niveles de rompimiento se produce intercambio de momento y energía entre distintas regiones de la atmósfera.

Para el estudio climatológico se han propuesto varias técnicas alternativas, Hamilton (1991)⁽³⁾, realizó un estudio de las características del campo de ondas mediante el hodógrafo y otros técnicas en el dominio real. Por otro lado Eckermann y Vincent (1989)⁽²⁾, fueron los primeros en utilizar los parámetros de Stokes en perfiles verticales, una antigua técnica del electromagnetismo (Born and Wolf, 1959⁽⁶⁾). Varias otras han sido propuestas, Thompson (1978)⁽⁷⁾ utilizó el

espectro de rotación (rotary spectrum) para determinar la energía involucradas con los dos sentidos de rotación del vector velocidad horizontal. Recientemente se han aplicado el espectro cruzado (cross spectrum) y las ondeletas.

Eckermann⁽⁸⁾ en un esfuerzo por lograr comparar las distintas técnicas, relacionó el espectro cruzado, espectro de rotación y los parámetros de Stokes. Proponiendo como alternativa a los análisis hodográficos, los parámetros de Stokes una técnica que engloba todo lo necesario para la determinación de las características de las ondas de gravedad.

En este trabajo hay dos objetivos interrelacionados, por un lado en vistas a futuros estudios climatológicos, pretendemos estudiar como se comportan las técnicas en perfiles individuales, ante distintas situaciones, para esto se ha elegido un perfil con una factible generación de ondas, un perfil relativamente coherente y un perfil altamente irregular. Por otro lado se comparan los resultados que arrojan técnicas en el dominio real con técnicas en el dominio de Fourier.

Es de interés determinar las características principales en los parámetros que permiten distinguir un perfil con generación de ondas inerciales de perfiles no coherentes.

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

II. DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS

En los siguientes secciones describiremos como se definen los parámetros utilizados a partir de la suposición que tenemos una onda monocromática o una superposición de estas y como se relacionan.

Parámetros de Stokes y espectro de rotación

Para calcular los parámetros se trabaja en el dominio de Fourier, sean $U(k_n)$ y $V(k_n)$ las transformadas de Fourier de las componentes $u(z)$ y $v(z)$ de la perturbación del viento; de esta manera los parámetros quedan definidos (Eckermann and Vincent 1989⁽²⁾, Born and Wolf 1959⁽⁶⁾) como:

$$I(k_n) = \text{Re}(U)^2 + \text{Im}(U)^2 + \text{Re}(V)^2 + \text{Im}(V)^2 \quad (1.a)$$

$$D(k_n) = \text{Re}(U)^2 + \text{Im}(U)^2 - \text{Re}(V)^2 - \text{Im}(V)^2 \quad (1.b)$$

$$P(k_n) = 2(\text{Re}(U)\text{Re}(V) + \text{Im}(U)\text{Im}(V)) \quad (1.c)$$

$$Q(k_n) = 2(\text{Re}(U)\text{Im}(V) - \text{Im}(U)\text{Re}(V)) \quad (1.d)$$

A menos de una constante elegida de tal manera para que valga el Teorema de Parseval en 1. El desfase, la dirección del eje mayor (τ) y la razón entre los ejes se definen como:

$$\delta(k_n) = \text{atan}(Q(k_n)/P(k_n)) \quad (2)$$

$$\tau(k_n) = 1/2 \text{atan}(P(k_n)/D(k_n)) \quad (3)$$

$$AR(k_n) = \cot \text{an}(0.5 \text{arcsen}(Q(k_n)/I(k_n))) \quad (4)$$

Para el cálculo de las energías de rotación, los datos fueron transformados como $u+iv$ así las amplitudes espectrales son energía de rotación horaria para números de ondas positivos y energía rotación antihoraria, para negativos (espectro de rotación).

Caracterización en el espacio real

La energía media por unidad de masa del perfil es de:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(z_i)^2 + v(z_i)^2 \quad (5)$$

donde N es el número de puntos en el perfil.

Para determinar el sentido de rotación del vector velocidad (según Hamilton 1991⁽³⁾)

$$\psi = \sum v(z_{i+1})u(z_i) - u(z_{i+1})v(z_i) \quad (6)$$

cuando ψ es positivo (negativo) el vector rota en sentido horario (antihorario)

La tercera cantidad importante de caracterizar es la dirección de propagación de la onda, en este caso, hacemos uso de la función correlación definida como:

$$\rho = \sum u(z_i)v(z_i) \quad (7)$$

Si el campo de ondas tiene una dirección privilegiada al realizar una rotación de los ejes coordenados nos dará 0 en la dirección de oscilación, a los -45 grados estará el máximo y a los +45 grados estará el mínimo de la función correlación (Eckermann and Vincent, 1989⁽²⁾).

Relaciones entre los parámetros

La relación que hay entre el sentido de rotación (6) y los parámetros de Stokes (1) para una onda monocromática es:

$$\psi = v'u - v'u' = kQ \quad (8)$$

Notar que no depende de z . Si suponemos una superposición de ondas los términos cruzados serán de la forma:

$$i[(k_2 - k_1)\text{sen}(k_1 + k_2)z + (k_1 + k_2)\text{sen}(k_1 - k_2)z] \quad (9)$$

$$(u_1v_2e^{i\delta_2} - u_2v_1e^{i\delta_1})$$

Cuando hay una superposición de ondas la función $\psi(z)$, aún teniendo todos los modos con un mismo sentido de rotación, el signo oscilará en z , pero cuando se tiene en cuenta ψ para todo el perfil, eq. (6), los términos cruzados se anulan (9), quedando:

$$\psi = \sum k_n Q(k_n)$$

Expresión que relaciona el parámetro de Stokes Q , (1.d), en el dominio de Fourier con el sentido de rotación ψ , (6). Este sobrepesa a los grandes números de onda cuando calculamos el sentido dominante. Siendo un efecto negativo debido a que la banda espectral de grandes números de onda tiene efectos de contaminación espectrales, y es el tipo de perturbaciones mas alteradas por turbulencia ruido, etc.

Interval	Completo			Inferior			Superior		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
I	28.3	20.8	12.9	6.5	10.7	7.6	54.3	31.0	18.4
D	-0.9	6.0	-1.0	0.1	2.6	0.3	-2.4	11.5	-2.3
P	-2.4	3.2	0.1	1.9	0.3	2.6	-7.3	6.6	-3.6
Q	19.9	5.8	6.9	-1.9	0.9	0.5	48.0	10.7	14.1
AR	2.4	7.0	3.5	-6.9	23.2	33.2	1.7	5.6	2.1

Tabla 1 Parámetros de Stokes I, D, P y Q (en m^2/s^2) y razón axial AR para los 3 perfiles, intervalo completo (0-17 km), intervalo inferior (0-9 km) e intervalo superior (9-17 km).

Interval	Completo			Inferior			Superior		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
E. CW	24.1	13.6	10.0	2.7	5.8	4.4	46.3	20.4	15.0
E. CCW	4.2	7.6	3.1	3.6	5.9	3.3	3.2	9.3	2.2
Sentido	-0.9	-0.3	-0.2	0.04	-0.02	-0.04	-1.9	-0.5	-0.31
Tau	124.6	13.0	89.4	51.3	0.4	40.7	125.6	18.2	116.2
Ángulo	125	15	90	50	0	40	125	20	115

Tabla 2. Energía de rotación horaria y antihoraria, sentido y correlación están en m^2/s^2 , el sentido esta normalizado con la cantidad de puntos del intervalo, tau y ángulo de propagación están en grados, este último tiene una resolución de 5 grados.

La otra característica del campo a relacionar es la dirección del eje mayor de la elipse. La correlación de las componentes del viento es:

$$\int u(z)v(z) dz = \frac{1}{2} \sum_n u_n v_n \cos \delta_n = \frac{1}{4} \sum_n P(k_n)$$

Hagamos una rotación arbitraria de los ejes coordenados, entonces:

$$\int u'v' dz = -\int (u^2 - v^2) dz \cos \theta \sin \theta + \int uv dz (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Usando el teorema de Parseval y teniendo en cuenta que el eje de propagación será el de correlación 0 tenemos,

$$0 = \frac{1}{4} \sum D(k_n) \sin(2\theta) + \frac{1}{4} \sum P(k_n) \cos(2\theta)$$

$$\operatorname{tg}(2\theta) = \frac{\sum P(k_n)}{\sum D(k_n)} \quad (11)$$

El ángulo de propagación calculado en el dominio real es igual al promedio ponderado de τ , (3), de cada modo, es decir P , (1.c), del perfil dividido D , (1.b).

III. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Se utilizaron mediciones realizadas con un balón de volumen constante el cual fue seguido por un radar de alta precisión, la altura en que fue posible medir de esta manera es desde 0.2km a 17km, la resolución con que se obtuvieron los datos es de 25 m, con alrededor de 680 puntos por perfil.

El primer tratamiento que se le realizó a cada perfil fue la extracción de la media para esto se utilizó un ajuste cúbico (Eckermann et al. 1994⁽⁹⁾) con la rutina de cuadrados mínimos, esta extracción de la media fue sugerida por Eckermann (private communication), debido a que el viento medio no es solución de una ecuación de onda al ser descompuesta en armónicos puede dejar residuos, debido a la falta de periodicidad.

A la perturbación resultante se le aplicó el filtro, (equivalente al utilizado por Scavuzzo et al., 1997⁽¹⁰⁾), la ventana elegida para el filtro fue variable pero debido a que estamos interesados en ondas de gravedad y a que vamos a comparar a las técnicas sin sacar medias u otros procesos de eliminación del ruido, utilizamos como ventana mas amplia la que cubre las longitudes de onda entre 1km-7km, longitudes de ondas pequeñas pueden estar altamente influenciadas por convección, turbulencias y otros tipos de fenómenos en los cuales no estamos interesados.

Por último se calculan los parámetros, cuando se necesitó trabajar en el dominio de Fourier, se transforma con la definición de Transformada de Fourier no se utilizan algoritmos de fast fourier transform, para no estar limitados a números de datos de potencias de 2. Para eliminar fenómeno de Gibbs se utiliza una ventana de Kayser.

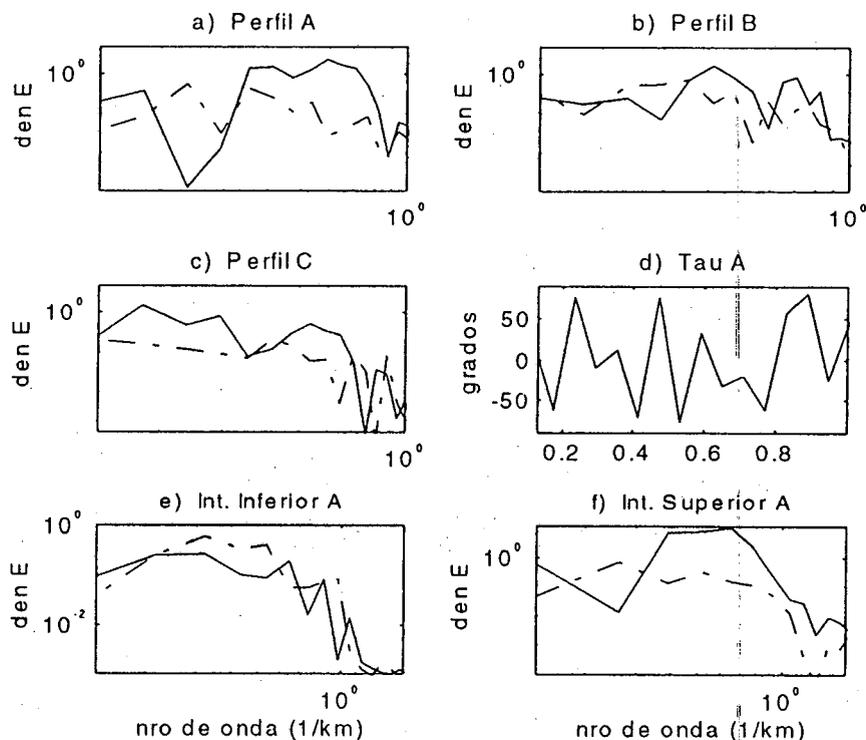


Fig 1. a), b) y c) Densidades de energía involucradas con la rotación horaria (línea continua) y antihoraria (punto y raya) de los perfiles A, B y C respectivamente.

d) Ángulo de propagación de la perturbación (parámetro τ) en función del número de onda para el caso A.

e) Energías de rotación horaria (continua) vs antihoraria (punto y raya) correspondientes al perfil A, intervalo de 0.2 a 9.5 km, f) Como en e) para el intervalo superior (9.5 a 17 km).

IV. RESULTADOS

Para los tres sondeos se calcularon todos los parámetros analizados en la sección 2 siendo la información resultante la que se encuentra en las tablas 1 y 2, la cual contiene datos medios para cada intervalo. Además de analizar el perfil completo, se dividió en dos y se analizó los intervalos por separado, ya que como es bien conocido en la tropopausa hay, un salto en la frecuencia de Brunt Vaisala, generación de ondas, etc.

Análisis de los tres perfiles

Las energías que existen en la parte superior del perfil son un factor de 4-10 a las inferiores (tabla 1), lo que se condice con lo observado en estudios climatológicos (Allen y Vincent, 1995⁽⁴⁾).

La razón de ejes (eq. (4)) de la parte inferior, perfiles B y C solo representa las altas variaciones del sentido de rotación, como resultado de esto hay pequeños Q (1.d) y grandes razones de ejes, pero de ninguna manera representa la razón de los ejes de la elipse de polarización (que uno induciría este tipo de valores con una polarización lineal). En la estratosfera la razón axial es mas pequeña representando una mayor polarización circular.

En los tres sondeos hay un fuerte predominio en el intervalo superior de rotación horaria (ver dos primeras filas de datos de la tabla 2), mientras en el inferior los flujos de energías son variables, aunque en general se observa que hay rotación antihoraria para las grandes longitudes de onda, de ondas generadas en la tropopausa. En la fig. 1 a), b) y c), se muestran las dependencias de las energías de rotación horaria y antihoraria con el número de onda. La información dada por el rotary spectrum es equivalente a la cantidad $I+Q/2I$ que da el porcentaje de energía horaria.

La dirección de propagación esta dominada por los modos de mayor amplitud, es un parámetro altamente variable en función del modo y la información que se obtiene con τ vs m , es poco confiable, debido a que al cambiar la longitud de onda de un mismo evento en z , este evento contribuye a varios modos, por lo tanto hemos analizado unicamente la dirección preponderante del perfil, solo con el objeto de mostrar los antes mencionado presentamos en la fig. 1d) el parámetro τ del perfil A.

El cálculo de la dirección de propagación minimizando la correlación y τ dan la misma información, (tabla 2).

El sentido de rotación en ambos dominios es equivalente a excepción del perfil B en la parte inferior que dan distintos sentidos.

Análisis de perfil con generación de ondas inerciales

Para un análisis mas detallado elegimos el perfil A, el cual tiene gran energía y sus características están relacionadas con una generación de ondas inerciales.

Este perfil tiene divergencia de flujos de energía a los 9.5 km. Arriba del jet tiene energía ascendente y debajo de este la energía es descendente como se observa en las energías de rotación horaria-antihoraria de la tabla 2 y en fig.1 e) y f).

En el intervalo inferior hay predominio de rotación antihoraria en longitudes de ondas grandes y en el superior hay predominio de rotacion horaria en longitudes de ondas mas pequeñas, cercanas a 1 km.

Las ondas en la estratosfera tienen menores longitudes que las de la tropósfera para el fenómeno de generación debido a las variaciones que producen viento medio y frecuencia de Brunt Vaisala sobre el número de onda:

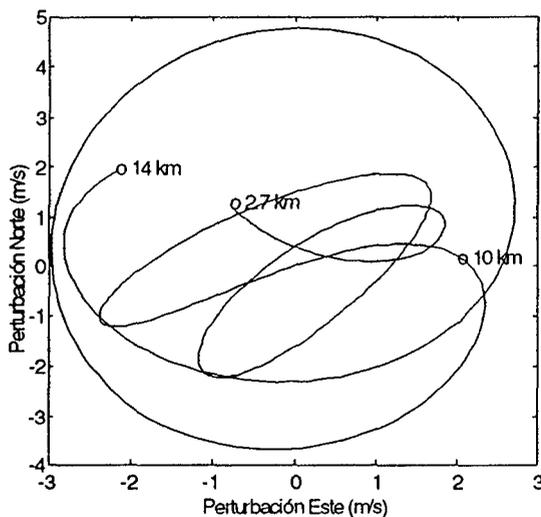
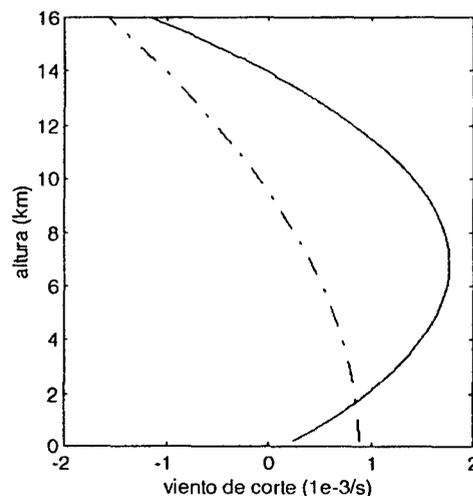


Fig 2. a) Hodografo del perfil A. para un filtrado de 2-7 km, se muestran las alturas que corresponden



b) Viento de corte en la dirección de propagación troposférica (cercana a los 45 grados, ver Fig.2 a) punto y raya, perpendicular a esta línea continua.

$$k(z) = N \left[(c - \bar{u})^2 - \left(\frac{f}{k_H} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

Al ser $N_{EST} \approx 4 N_{TROP}$, y dado que el viento de corte es mayor en la troposfera que en la baja estratosfera, entonces $k_{TROP} < k_{EST}$.

El tipo de polarización es marcadamente circular arriba del jet, lo cual se puede observar en tabla 1, $AR=1.66$, esto indica una frecuencia de oscilación cercana a la inercial ($f/\omega-1$), en la fig. 2 a) está el hodógrafo para un filtro de 2-7km. En la parte inferior del perfil, entre los 4 a 8 km de altura la polarización es elíptica, si tenemos en cuenta la relación de polarización cuando el viento de corte no es despreciable,

$$u = \frac{-i m \omega}{\bar{v}_z k - m f} v$$

en fig. 2 b) está el viento de corte para la dirección perpendicular a la de propagación (línea continua) y en la paralela a la dirección de propagación (se entiende que la dirección de propagación esta dada por la polarización elíptica troposférica). El viento de corte se relaciona con la figura del hodógrafo (fig. 2 a). Entre 12-14 km el viento de corte es casi 0 mientras la polarización es circular. En la región donde hay máximo viento de corte 4-8 km la polarización es elíptica.

V. CONCLUSIONES

En general se observan los mismos comportamientos entre las técnicas aplicadas en el dominio real con las del dominio de Fourier. Sin embargo los perfiles con altas discontinuidades en los extremos pueden manifestar incoherencias, esto debería estar relacionado a distintos comportamientos de las técnicas frente al fenómeno de Gibbs.

Se ha demostrado que el sentido de rotación definido por Hamilton (1991)⁽³⁾ esta pesado por el número de onda correspondiente, esto provoca una sobrevalorización de las ondas con longitudes de onda pequeñas.

Resaltamos, como ya lo hiciera Thompson (1978)⁽⁷⁾, la utilidad de la técnica del rotary spectrum para la determinación de ondas inerciales en el perfil, o similarmente esta información puede ser obtenida de los parámetros de Stokes (léase I+Q/2I, para obtener el porcentaje de energía). A esto sumamos, como de relevancia, la información obtenida por el parámetro AR (razón de los ejes, (4)), un parámetro que en general no es tenido en cuenta, y resulta muy útil a la hora de cuantificar el tipo de polarización existente en el perfil.

Los parámetros de Stokes son altamente variables con el número de onda, siendo la información poco confiable (a menos de la obtenida para energías, léase rotación horaria, antihoraria, energía total) es recomendable usar medias de bandas espectrales.

Se observa en uno de los perfiles analizados, altas energías asociadas con un evento de generación de ondas inerciales. Dependencias en el tipo de polarización con el viento de corte, dependencias de la longitud de onda con el viento medio y la frecuencia de Brunt Vaisala.

Referencias

- 1 - Hirota I., J Atmos. Terr. Phys., **46**, 767-773(1986).
- 2 - Eckermann S. D. and Vincent R.A., Pure Appl. Geophys., **130**, 263-286(1989).
- 3 - Hamilton K., J. Geophys. Res., **96**, 20831-20839(1991).
- 4 - Allen S.J. and Vincent R.A., J. Geophys. Res., **100**, 1327-1350(1995).
- 5 - Lindzen R.S., J. Geophys. Res., **86**, 9707-9714(1981).
- 6 - Born and Wolf, "Principles of optics", Pergamon Press (1959).
- 7 - Thompson R. O., Quart. J. R. Met. Soc., **104**, 691-698 (1978).
- 8 - Eckermann S. D., J. Geophys. Res., en prensa
- 9 - Eckermann S.D., Hirota I. and Hocking W.K., Q. J. R. Meteorol. Soc., **121**, 149-186(1994).
- 10 - Scavuzzo M., Lamfri M., Teitelbaum H. and Lott F., J. Geophys. Res., en prensa.