

ONDAS DE MONTAÑA: TURBULENCIA EN VUELOS TROPOSFERICOS Y ESTRATOSFERICOS

JORGE LASSIG Y CLAUDIA PALESE

Universidad Nacional del Comahue
Facultad de Ingeniería
Bs.As. 1400 – (8300) Neuquén
ARGENTINA
lassig@uncoma.edu.ar

RESUMEN

Cuando un fluido circula sobre un cuerpo, detrás de este se generan ondas por obstáculo. En el caso de montañas, estas ondas se denominan ondas de montaña, además estas pueden producir perturbaciones de otro tipo como las ondas de Kelvin-Helmholtz, de flotación, etc., además pueden producirse rotores. A fines de la década de los 80, el descubrimiento del agujero de la capa de ozono, inició nuevos estudios de la atmósfera superior para tratar de entender y explicar el fenómeno. A casi dos décadas de ello, se ha comprendido el mecanismo que produce el agujero de la capa de ozono, pero también se ha descubierto que las ondas de montaña (OM), bajo ciertas condiciones, se propagan mas allá de la tropósfera. Pudiendo penetrar en la estratósfera a gran escala con grandes amplitudes y longitudes de onda, observadas a alturas entre 15 y 30 km, propagándose incluso arriba de los 30 km de altura. Los proyectos del planeador espacial, y de los vuelos estratosféricos, han rehabilitado el interés por conocer este tipo de fenómenos, pues pueden constituirse en un factor perjudicial para este tipo de vuelos. La Cordillera de los Andes en la región patagónica presenta condiciones especiales para ello, basta decir que en los últimos años pilotos nacionales y extranjeros han batido el 80% de los records mundiales en planeadores (en particular el de altura). El presente trabajo es una revisión (review) de este tipo de ondas y su incidencia en los vuelos a gran altura, tanto para naves tripuladas como autónomas.

Palabras clave: Ondas de montaña, planeadores, estratósfera.

1.- INTRODUCCIÓN

Cuando un fluido circula sobre un cuerpo, detrás de este se generan ondas por obstáculo. En el caso de montañas, estas ondas se denominan ondas de montaña (OM), que pueden otro tipo de perturbaciones como las ondas de Kelvin-Helmholtz, de flotación, etc. Existe, además, la posibilidad de la presencia de rotores.

Estos eventos se estudian en particular en meteorología, pues son los iniciadores de fenómenos significativos como lluvias, nieve, vientos intensos, fuerte cortante de vientos, etc.

En la aviación, se comenzó a dar importancia a las OM, cuando las aeronaves que volaban a gran altura en condiciones de aire claro comenzaron a experimentar turbulencia. Con los estudios se descubrió que el origen de este tipo de turbulencia estaba asociado a distintos patrones de ondas, muchas de ellas originadas a sotavento de las cadenas montañosas.

A fines de la década de los 80, el descubrimiento del agujero de la capa de ozono, inició nuevos estudios de la atmósfera superior para tratar de entender y explicar el fenómeno.

A casi dos décadas de ello, se ha comprendido el mecanismo que produce el agujero de la capa de ozono, pero también se ha descubierto que las OM, bajo ciertas condiciones, se propagan más allá de la tropósfera. Pudiendo penetrar en la estratósfera a gran escala con grandes amplitudes y longitudes

de onda, observadas a alturas entre 15 y 30 km, propagándose incluso arriba de los 30 km de altura. Los proyectos del planeador espacial y de los vuelos estratosféricos, han rehabilitado el interés por conocer este tipo de fenómenos, pues pueden constituirse en un factor perjudicial para este tipo de vuelos.

Además en el campo deportivo existen intentos por batir los récords mundiales de altura en planeadores a través del conocimiento y la utilización de las OM, pero el reto no queda ahí, ya que hay proyectos de intentar llegar con planeadores estratosféricos hasta los 30 km de altura.

2.- ONDAS DE MONTAÑA PROPAGADAS EN LA TROPÓSFERA

La presencia de un obstáculo en el seno de un fluido en movimiento produce una perturbación al flujo que se traducirá en turbulencia y/o en ondas normalmente estacionarias. El tipo de ondas dependerá de la escala de movimiento a considerar.

En la Mesoescala son dos tipos ondas que se generan: las de “gravedad interna” y las de “discontinuidad”. En el caso de la atmósfera, el viento al atravesar una montaña se eleva por el obstáculo y puede condensar su humedad y aparecer una nube en forma de “lenteja” llamada lenticular que coincide con las crestas de la onda formada.

En una atmósfera estable y estratificada, las ondas son transversales y se propagan tanto horizontal como verticalmente. En el caso vertical generalmente se produce reflexión de las ondas con el borde de la tropósfera, la tropopausa. Este tipo de propagación de ondas verticales no es importante en Escala Sinóptica (rangos cortos) y se filtra en el modelo cuasi geostrófico. Pero ellas son las responsables de la propagación de las ondas orográficas u OM en la estratósfera y de la turbulencia en aire claro.

Al suponer una atmósfera estable y estratificada cuando una parcela de aire se perturba, es restituida debido a las fuerzas de flotabilidad (Teoría de la parcela) y comenzará a oscilar con una frecuencia N (frecuencia de Brunt Vaisälä):

$$N = \sqrt{\frac{g}{T} \frac{\overline{T}}{z}} \quad (1)$$

donde g es la gravedad, T la temperatura potencial de la parcela, y z la altura.

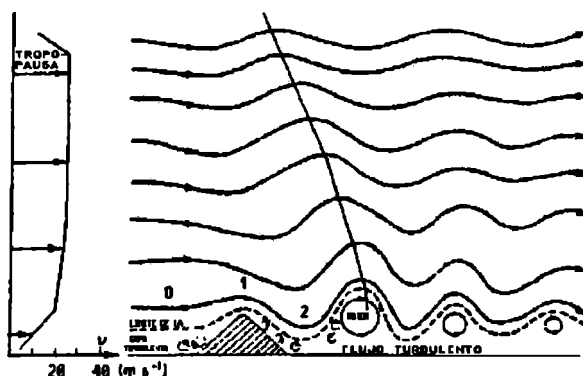


Figura 1: Esquema de la propagación horizontal y vertical, de las OM dentro de la tropósfera.

Si la partícula en 0 de la Figura 1, antes del obstáculo, tenía una cierta densidad, al pasar el obstáculo se eleva y pasa a un nivel 1 donde es más pesada que el medio que la rodea (válido para un fluido estratificado), entonces aparece una fuerza restitutiva de gravedad que la acelera hacia abajo y la traslada a un nivel 2 donde el medio está más denso que la parcela, por lo tanto aparece una fuerza de flotabilidad que la hace ascender y así se forma la onda, que es estable.

En el caso de la Cordillera de los Andes, Necco [1] dice que por imágenes satelitales se ha observado que los lenticulares así formados tienen una longitud de onda horizontal (k) entre 5 km y 25 km, mayoritariamente en 20 km.

La Figura 2, correspondiente a una escena del 22/NOV/2000, 16:00 horas, tomada por el satélite meteorológico NOAA16 mediante el equipo de recepción instalado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, muestra OM como bandas de nubes paralelas a la Cordillera de los Andes.

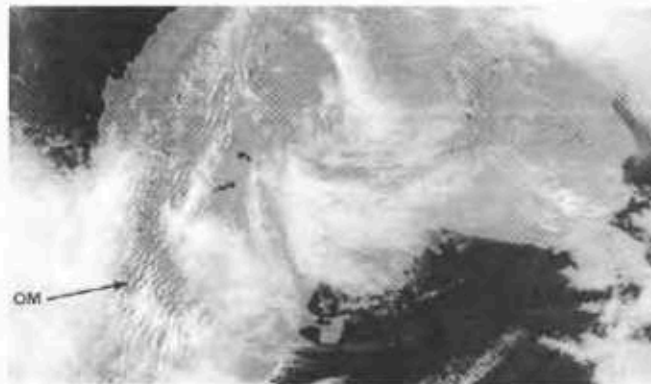


Figura 2: Imagen satelital en color compuesto donde se puede observar la formación de OM a sotavento de la Cordillera de los Andes, a través de la formación de calles de nubes lenticulares paralelas a esta.

Estas ondas se propagan con la altura, por lo tanto tienen una longitud de onda vertical m . Para determinar el desfase vertical, se puede asumir que es una onda de gravedad interna y estacionaria donde la velocidad de fase c es igual a cero, luego trasladándose con una partícula, se puede expresar la velocidad de traslado $\bar{u}$ como:

$$\bar{u} = \frac{N}{\sqrt{k^2 + m^2}} \quad (2)$$

Si se conoce u , k y N entonces se puede calcular m y determinar su inclinación con la altura.

3.- ONDAS DE MONTAÑA PROPAGADAS EN LA ESTRATÓSFERA

3.1.- Efectos

Hasta hace pocos años se creía que la estratósfera era una región de la atmósfera estable, pero con los estudios desarrollados a partir de investigaciones de las causas del agujero de ozono, se comenzaron a descubrir la existencia de este tipo de ondas en la alta atmósfera.

Las OM son importantes en la dinámica atmosférica de las latitudes medias. Estas se originan en la media y alta tropósfera, y se propagan hacia arriba penetrando en la estratósfera y mesósfera donde depositan su cantidad de movimiento y energía al disiparse allí. Por lo tanto, las OM influyen fuertemente la circulación global y son la principal causa de oscilaciones a escala global semejantes a la Oscilación Casi Bianual [2] y la Oscilación Semianual [3].

Pero la mayoría de los modelos de circulación global no pueden resolver explícitamente este tipo de ondas debido a la resolución espacial de los mismos. Últimamente han comenzado a desarrollarse modelos que intentan reproducir OM en la tropósfera, como el Modelo de Mesoescala MM5 del Naval Research Laboratory (NRL).

Las OM estratosféricas disparan la formación en los polos de nubes de hielo estratosféricas. Se ha demostrado que este tipo de nubes reduce el ozono debido a la presencia de compuestos clorados en ellas, debido al transporte de estas masas de aire desde las OM que alcanzan la estratósfera [4].

La turbulencia generada por las OM en la estratósfera hace rever el concepto de “poco riesgo ambiental” en los vuelos estratosféricos, ya que con ellos aumentaría el intercambio de gases nocivos entre la tropósfera - estratósfera.

3.2.- Condiciones Meteorológicas

Para que se formen OM moderadas, Teets [5] estableció cuales son los factores topográficos y meteorológicos más favorables:

- La atmósfera en los niveles bajos deberá ser estable y con vientos de al menos 10 m/seg.
- La dirección del viento respecto a la línea de cumbres de la cadena montañosa forma un ángulo de unos 30°.
- La velocidad del viento deberá incrementarse con la altura mientras la dirección del viento permanece bastante constante. Si la velocidad del viento se incrementa abruptamente con la altura, la energía de la onda tenderá a focalizarse o atraparse a baja altitud fluyendo como en un canal aguas abajo. Si la velocidad del viento decrece abruptamente con la altura en el tiempo, aquella onda puede decaer, formar un rotor o disiparse en turbulencia.
- El tamaño y la forma de las cumbres tienen poca incidencia sobre la longitud de onda, pero sí pueden afectar la amplitud. La amplitud resultante depende del ancho de la montaña, la pendiente a sotavento y el grado de estabilidad atmosférica.

La propagación de ondas en la estratósfera generalmente es favorecida por:

- Una débil o indefinida tropopausa, un mínimo cambio en la dirección del viento con la altitud, y velocidad del viento bastante consistente. Modestos incrementos de la velocidad del viento con la altitud permite que la amplitud de la onda crezca y se propague a grandes altitudes y bajas densidades.
- La presencia del Vórtice Polar intensifica los vientos en la estratósfera, y ayuda a propagar las OM que penetraron en la misma, sobre las regiones montañosas.

Como resultado de esto último, las OM estratosféricas en el Hemisferio Norte sólo se dan en latitudes altas (60° a 70°), y en el Hemisferio Sur en latitudes medias, pudiendo haber (raramente) algunas en bajas latitudes.

4.- MEDICIONES

Las OM estratosféricas se las pueden identificar por dos medios: con globos sondas, balones y aeronaves volando a gran altura, o por medio de satélites que miden fluctuaciones de temperatura de los gases atmosféricos en frecuencias de emisión muy precisas.

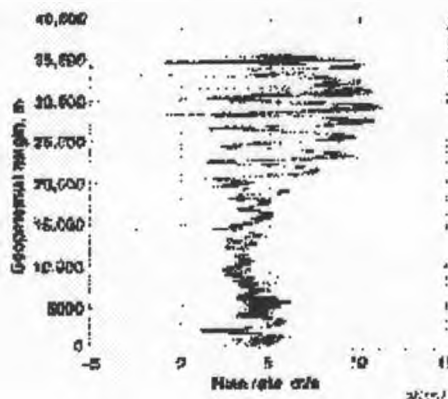


Figura 3: Amplificación de la OM con la altura, en condiciones propicias para penetrar en la estratósfera. Extraído de [5].

Las primeras pueden ser ilustradas como en la Figura 3, donde se observa la relación de ascenso con la altura, típica de un día con OM estratosféricas.

También con el uso de información proveniente de radiosondas se puede determinar la época de ocurrencia de las OM estratosféricas, calculando la variancia de la temperatura entre los niveles de 100 hPa y 10 hPa, pues cuanto mayor es este valor, mayores variaciones de la temperatura se producen fruto de la actividad de ondas circulando por esta capa de la atmósfera.

Para 5 estaciones meteorológicas se observó que el comportamiento de dicha variancia presenta la mayor actividad durante el invierno del Hemisferio Sur [6], coincidente con la mayor actividad del Vórtice Polar.

Los picos del período activo pueden ser detectados también por medio de estudios climatológicos derivados del análisis de datos extraídos de modelos como el NCEP/NCAR 40 year Reanalysis Project [7].

La Figura 4 muestra la variancia media de la temperatura de la tropopausa para cada uno de los meses en el período 1948-2002. En ella se puede observar que los períodos de mayor variación corresponden a los meses entre Mayo-Julio y a Noviembre, el primero relacionado con la aparición Vórtice Polar [8], como ya se mencionó, y el segundo con la presencia en la región Norpatagónica del Jet Polar, asociado este a vientos zonales muy intensos en toda la tropósfera. El período de menor variación de la temperatura de la tropopausa se produce entre Enero y Marzo.

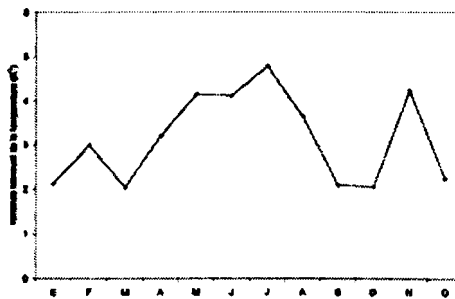


Figura 4: Variancia media mensual (K^2) de la temperatura de la tropopausa en la Norpatagonia en el período 1948-2002. Fuente: NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder Colorado.

<http://www.cdc.noaa.gov/>

Con respecto a la estratósfera en la Figura 5 se han graficado las anomalías de la temperatura del aire en el nivel de 10 hPa para el período con poca actividad de ondas (Enero a Marzo) y para el período activo (Mayo a Julio).

En la Figura 5a correspondiente al promedio de las anomalías de temperatura en la estratósfera de los meses de Enero a Marzo entre las latitudes de 43 ° y 33 °Sur y las longitudes de 80 ° y 54 °Oeste se observa que los valores de anomalía son cercanos a 0 °C (poca variación). Mientras que en la Figura 5b que se calculó con los meses de Mayo a Julio se alcanzan valores absolutos de hasta 1 °C, confirmando lo encontrado por Jiang y Wu [6].

La Figura 6 muestra el campo de vientos medios latitudinales (viento zonal) en la estratósfera (100 hPa a 10 hPa), en la misma zona y períodos analizados para las anomalías de temperatura. Se observa en la Figura 6a, meses con poca actividad de ondas, la existencia de un nivel crítico de velocidad nula (línea de velocidad del viento nula) entre los 40 hPa y 30 hPa de altura. Por sobre este nivel la circulación se invierte haciéndose del Este y con bajas velocidades. Por otro lado en la Figura 6b se puede observar que en toda la estratósfera los vientos son del Oeste con velocidades fuertes y no aparece el nivel de velocidad nula.

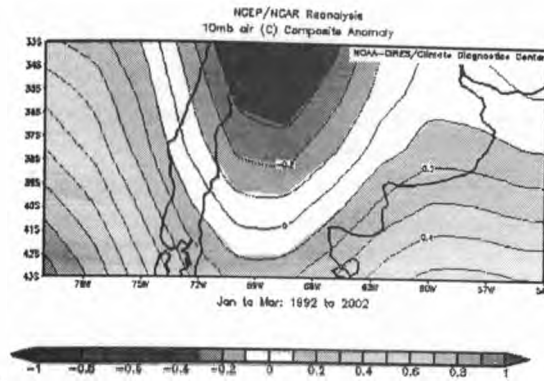


Figura 5a: Anomalías medias de temperatura del aire en 10 mb u de Enero a Marzo de 11 años (1992-2002) entre las latitudes de 43 ° y 33 °Sur y las longitudes de 80 ° y 54 °Oeste. Fuente: idem Figura 4.

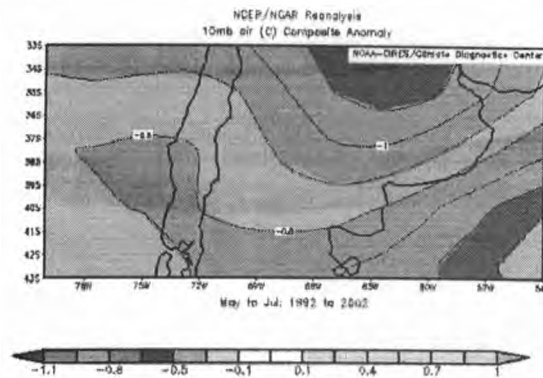


Figura 5b: Idem Figura 5a para el período Mayo a Julio.

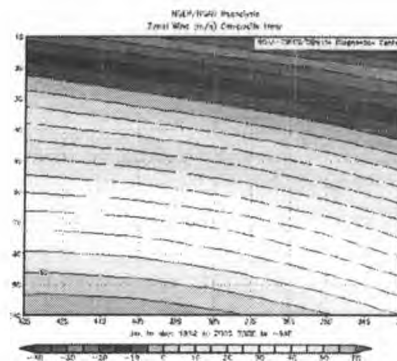


Figura 6a: Isotacas en m/s entre 100 hPa y 10 hPa según la latitud para el período quieto Enero-Marzo. Fuente: idem Figura 4.

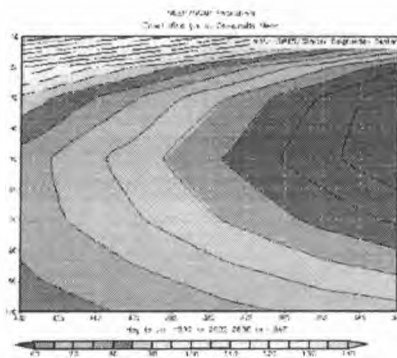


Figura 6b: Idem Figura 6a para el período activo Mayo-Julio.

El segundo método de medición es a través de sensores remotos instalados en naves espaciales que miden la radiancia de la línea de emisión del O_2 (cerca a 63 Mhz), que cuando esta se satura provee una buena medición de las perturbaciones de temperatura atmosféricas.

Ejemplos de ellos son los trabajos de Jiang y Wu [6] que utilizando datos del equipo Microwave Limb Sounder (MLS) en el satélite Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) y los de Eckermann y Preusse [9] usando datos del Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescope for the Atmosphere (CRISTA) en el vuelo shuttle STS-66, determinaron las características de las OM estratosféricas que ocurren al este de la cordillera de Los Andes, hallando que las longitudes de ondas horizontales preferenciales son dos: 110 km y 400 km.

5.- PLANEADOR ESTRATOSFÉRICO

A la fecha existen varios proyectos para utilizar este tipo de ondas y ascender hacia la estratósfera. A nivel deportivo, el más difundido es el proyecto PERLAN, donde un grupo privado encabezado por el Sr. Steve Fossett, quiere batir el récord mundial de altura en planeadores con un planeador standard como primera fase, y en una segunda etapa llegar hasta los 30 km de altura con una aeronave diseñada para tal fin (<http://www.firnspiegel.com/perlan/>).

En nuestro país está el Proyecto MAIPE que intenta llegar hasta los 15 km utilizando OM desde la zona de Chos Malal (Provincia de Neuquén) y con planeadores convencionales (<http://www.patagoniasoaring.org.ar/>).

Para este tipo de vuelo, los números de Mach variarán desde 0,07 a nivel del suelo hasta unos 0,70 para el nivel de 30 km, y los números de Reynolds involucrados serán $1,5 \times 10^6$ a nivel del mar, y de unos 2×10^5 a los 30 km, por lo que en esa altura el planeador deberá trabajar a altos números de Mach y bajos números de Reynolds, lo cual implica un desafío para la sustentación y el control de la aeronave, además de las condiciones extremas del medio ambiente.

Edward H. Teets del Dryden Flight Research Center [10] realizó el gráfico de la Figura 7, donde pone de manifiesto la velocidad vertical (ft/min) versus la altitud (ft) de una OM, la envolvente de su energía, la velocidad del planeador, y la diferencia entre ambas curvas es la relación de ascenso que dispondría el planeador, lo cual es un indicador de que el proyecto es posible, ya que existe energía disponible en las OM para alcanzar la meta de los 30 km.

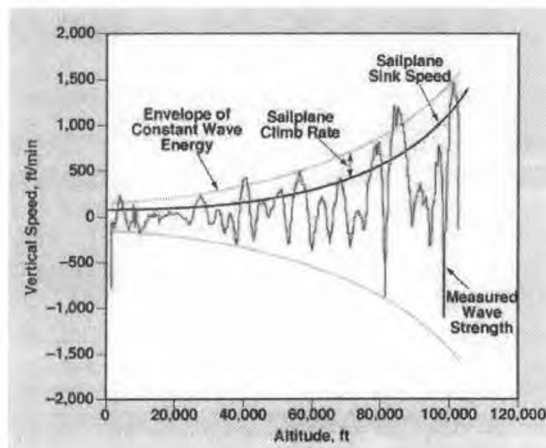


Figura 7: Gráfico según Teets [10] en el cual se demuestra que la energía aportada por una OM estratosférica alcanza para elevar a un planeador hasta la estratósfera.

El proyecto APEX de la NASA [11] intenta incrementar el conocimiento de las performances de los perfiles aerodinámicos en este régimen de vuelo, en particular estudiar la separación de las burbujas que se forman sobre el perfil a consecuencia de la aparición de una onda de choque transónica lambda y la cortante con el flujo libre a posterior de la misma, efecto conocido como inestabilidad de la capa límite de Tollmien-Schlichting (Figura 8), que entre otras cosas produce una vibración aerodinámica sobre el extra dos de los perfiles.

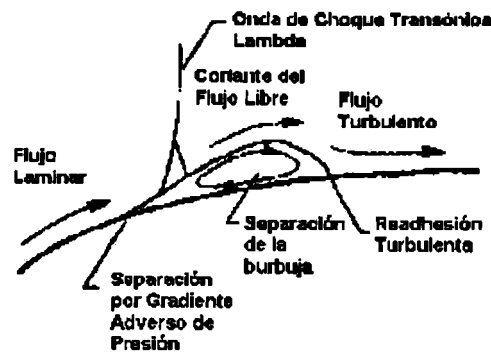


Figura 8: Esquema de la inestabilidad de la capa límite de Tollmien-Schlichting.

Bajos números de Reynolds y altos números de Mach, son también las condiciones de vuelo en la atmósfera Marciana.

Este es el caso de Aurora Flight Sciences, que ha ensayado un prototipo de planeador Marciano escala 1:2 en Septiembre de 2002, lanzándolo en nuestra atmósfera por medio de un globo estratosférico desde unos 30,000 metros de altura, (<http://www.aurora.aero/news.html#marsflyer2>).

6.- CONCLUSIONES

Las OM bajo ciertas condiciones (presencia del Vórtice Polar, debilitamiento de la tropopausa) pueden penetrar en la estratósfera y propagarse en ella, incluso amplificando su amplitud.

Es de esperar que los fenómenos asociados a las OM, como fuertes cortantes, rotores, turbulencia intensa de aire claro, estén presentes en la estratósfera, introduciendo en dicho tipo de vuelo consideraciones de seguridad a tener en cuenta.

El Hemisferio Sur, por poseer gran actividad el Vórtice Polar, se constituye en una región en que se deberán realizar pronósticos sobre la ocurrencia de este tipo de ondas, si se desarrollan los vuelos estratosféricos.

7.- REFERENCIAS

- [1] NECCO G.V. **Curso de Cinemática y Dinámica de la Atmósfera**. Ed. Eudeba, Bs.As., 1980.
- [2] DUNKERTON T.J. **The role of gravity waves in the quasi-biennial oscillation**. *Journal Geophys. Res.*, 102, 26.053-26.076, 1997.
- [3] MAYR H.G., MENGEL J.G., REDDY C.A., CHAN K.L., Y PORTER H.S. **Variability of the equatorial oscillations induced by gravity wave filtering**. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2629-2632, 1998.
- [4] CARSLAW K.S., PETER T., BACMEISTER J.T., y ECKERMANN S.D. **Widespread solid particle formation by mountain waves in the Arctic stratosphere**. *J. Geophys. Res.*, 104, 1827-1836, 1999.
- [5] TEETS, E.H.. **Atmospheric Conditions of Stratospheric Mountain Wave: Soaring the Perlan Aircraft to 30 Km**. 18th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hydrology, January 2002.
- [6] JIANG J.H., y WU D.L. (2002). **Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) MLS observation of wavea over the Andes**. *Journal of Geophysical Research Vol.107,Sol 15-1 a Sol 15-10.*
- [7] KALNAY, E. Y COAUTORES, 1996: **The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project**. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.

- [8] **RANDEL W.J. y NEWMAN P.A., 1998, The Stratosphere in the Southern Hemisphere. Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteor. Monograph, 27, nro 49, Editada por Karoly y Vincent, 243-282.**
- [9] **ECKERMAN S.D., Y PREUSSE P. (1999). Global Measurements of Stratospheric Mountain Waves from Space. Science Vol. 286, 1534-1537.**
- [10] **TEETS E.H.. Soaring to 100,000 ft on Stratospheric Mountain. 19/11/02, Dryden Flight Research Center, NASA**
<http://www.nasatech.com/Briefs/July00/DRC0008.html>
- [11] **GREER D., y HAMORY P. Design and Predictions for a High-Altitude (Low-Reynolds-Number) Aerodynamic Flight Experiment. NASA/TM-1999-206579.**