

**PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS KILOMÉTRICAS, MIRIAMÉTRICAS Y
MÁS LARGAS EN LA IONOSFERA Y A TRAVÉS DE ELLA**

(Cuestión 25/6)

(1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

Las frecuencias radioeléctricas en la gama de 30 Hz a 300 kHz, que normalmente se reflejan en las capas más bajas de la ionosfera, resultan útiles para una gran variedad de aplicaciones además de la radiocomunicación. En particular, las frecuencias de la banda de ondas miriamétricas (3-30 kHz), gracias a la estabilidad de su propagación, son útiles para fines de navegación y de comparación de tiempos. (En lo que atañe a los trayectos terrenales, el Informe 895 examina las características de propagación de las frecuencias inferiores a unos 30 kHz, y el Informe 265 contiene información sobre las características de funcionamiento de los circuitos en la gama de frecuencias de 30 a 500 kHz.) Sin embargo, sabido es, desde hace muchos años, que las ondas miriamétricas pueden propagarse a través de la ionosfera según un modo que, por razones históricas, se ha denominado «modo de silbidos». Se observaron señales procedentes de relámpagos en frecuencias de la gama audible y se denominó a estas señales «atmosféricos musicales» [Eckersley, 1925; Barkhausen, 1919]. Estas frecuencias estaban sujetas a una dispersión tal, que disminuía la velocidad de propagación en función de la frecuencia. Las señales recibidas se caracterizaban en consecuencia por un silbido característico cuya frecuencia decrecía durante un segundo o más. También se componían estas señales de una serie de ecos netamente separados con dispersiones crecientes de frecuencia. Estas propiedades notables se explicaron teóricamente en términos de la propagación por un modo extraordinario de poca velocidad y reducida atenuación a lo largo de un trayecto muy ceñido a una línea de fuerza del campo magnético terrestre y por el que las señales van y vienen entre puntos conjugados situados en la superficie terrestre [Storey, 1953; Morgan y otros, 1956; Helliwell y Morgan, 1959]. Se ha publicado un estudio completo sobre los antecedentes de las investigaciones relativas a la propagación por el modo de silbidos [Helliwell, 1965].

El modo de silbidos puede ser un modo de propagación guiada a lo largo de irregularidades de ionización reforzada alineadas según las líneas de campo [Smith, 1961; Cerisier, 1974], y un modo de propagación no guiada con grandes ángulos en relación con las líneas del campo geomagnético [Kimura, 1966; Smith y Angerami, 1968; Aikyo y otros, 1972]. Resultados de cálculos trayectográficos de las ondas miriamétricas a través de modelos reales de la magnetosfera [Aikyo y Ondoh, 1971; Walter y Scarabucci, 1974] sugieren que las ondas quedan atrapadas según el gradiente de densidad en la plasmapausa y que las ondas miriamétricas en la propagación no guiada quedan atrapadas en la plasmaesfera o depresión de plasma, tal como indican los experimentos por satélite sobre las ondas miriamétricas [Burtis y Helliwell, 1969; McPherson y Koons, 1970; Gurnett y Shaw, 1973]. La anchura del conducto de silbidos aumenta en la plasmaesfera con la latitud geomagnética corregida [Ondoh, 1976].

2. Utilización de transmisores de ondas miramétricas y kilométricas

La propagación por el modo de silbidos se ha estudiado utilizando transmisores de gran potencia en ondas miramétricas y kilométricas. Dado el creciente interés que se atribuye al problema de la transmisión en varias frecuencias para puntos terminales situados en la superficie terrestre y en la ionosfera, o por encima de ésta, es preferible considerar la propagación de las ondas kilométricas, miramétricas y más largas de una manera general y limitar el término «silbido» a las transmisiones que cubran un espectro de frecuencias igual al que origina un relámpago y en el que puede observarse la dispersión de frecuencia característica de los silbidos.

Es interesante observar que los periodos en que se han obtenido señales de intensidad relativamente grande en las transmisiones de ondas miramétricas entre puntos conjugados, sólo han ofrecido una correlación mediocre con los periodos en que se registró gran número de silbidos. Así, si bien los experimentos con fuentes naturales son de gran interés científico porque aclaran ciertos puntos oscuros de la propagación de las ondas miramétricas a través de la ionosfera, es necesario complementarlos con experimentos directamente ligados a la propagación en determinadas frecuencias, partiendo de puntos de transmisión seleccionados.

3. Límites de frecuencia y consideraciones sobre la intensidad de las señales

Se ha comprobado que, cuando los dos puntos terminales se hallan en la superficie terrestre, el modo de silbidos es eficaz en frecuencias tan bajas como 400 Hz y tan elevadas como 35 kHz. Existe una frecuencia de corte superior bien definida igual a unas 0,6 veces la girofrecuencia mínima de los electrones a lo largo del trayecto. Receptores situados a bordo de satélites, que amplían las observaciones a señales no guiadas, indican la presencia de señales propagadas por el modo de silbidos en frecuencias de hasta 0,9 veces la girofrecuencia de los electrones locales [Dunckel y Helliwell, 1977]. Se ha observado la propagación por el modo de silbidos en la mayor parte de ubicaciones situadas en latitudes geomagnéticas comprendidas entre unos 20° y unos 80°, y, durante las noches de invierno, incluso en Okinawa y Varanasi, donde la latitud geomagnética es de sólo 15° [Ondoh y otros, 1979; Singh y Singh, 1977]. Las observaciones hechas en latitudes medias han demostrado que, por la noche, durante más del cincuenta por ciento del tiempo, pueden obtenerse señales que se propagan según el modo de silbidos en un solo recorrido entre puntos conjugados. Ocurre a veces que la intensidad de esas señales se aproxima en menos de 10 dB a la intensidad de la señal transmitida por el conducto normal entre la Tierra y la ionosfera. Poco se sabe sobre la intensidad de las señales propagadas durante el día por el modo de silbidos, pero, según parece, sufren una atenuación muy elevada en la región D de la ionosfera.

En el cálculo de la intensidad son importantes diversos factores:

- la polarización y la directividad de la antena transmisora,
- las propiedades del trayecto entre los puntos extremos del conducto en la ionosfera y los terminales del enlace situado en tierra,
- el coeficiente de transmisión a través de las zonas inferiores de la ionosfera,
- la divergencia espacial en el conducto,
- los efectos de trayectos múltiples resultantes de la presencia de más de un conducto,
- la amplificación, o la absorción, de la energía de la señal por interacción con partículas cargadas del plasma.

4. Análisis de la propagación

Se ha elaborado un programa de computador para todas las ondas para estudiar las intensidades de campo en una ionosfera estratificada horizontalmente para las ondas incidentes por encima o por debajo y con relación a una amplia gama de parámetros adecuados [Pitteway, 1965; Pitteway y Jespersion, 1966]. En algunos modelos empleados se han incluido los efectos de las capas E esporádicas. La ionización E esporádica puede dar coeficientes de reflexión interna muy elevados para las ondas incidentes desde arriba, lo que es importante cuando sólo el extremo distante de la línea guía de campo magnético se halla en una zona iluminada, ya que entonces es posible una propagación por silbidos muy eficaz, en dos saltos. Se ha observado también que gran parte de la energía de la onda de silbidos puede ser reflejada en ausencia de capa E esporádica a condición de que la dirección normal de la onda se halle fuera del cono de aceptación para la penetración en la superficie de la Tierra [Thomas y Smeathers, 1971], lo que es importante para la interpretación de mediciones sobre silbidos hechas desde cohetes.

A 14 kHz aproximadamente, el coeficiente de transmisión para las ondas ascendentes sólo varía lentamente con el ángulo de incidencia entre $\pm 85^\circ$ para latitudes medias, en tanto que a 100 kHz, únicamente resulta posible una transmisión eficaz en los ángulos comprendidos dentro de un cono cuyo eje sigue la dirección del campo magnético; la influencia del campo magnético es más sensible para todas las frecuencias en latitudes más bajas [Thomas y Horowitz, 1971]. Tanto de día como de noche, el coeficiente de transmisión depende principalmente de las pérdidas en la ionosfera a condición de que no haya gradientes pronunciados de densidad electrónica análogos a los de la capa E esporádica. La absorción de la onda de silbido, que se produce principalmente en la baja ionosfera, aumenta con la frecuencia y a medida que disminuye la latitud [Thomas y Horowitz, 1971; Wieder, 1967].

En la zona auroral, la absorción de la onda de silbido está considerablemente influida por precipitaciones de partículas, es decir, varias decenas de dB en los casos de noche polar, y de 10 a 20 dB en un mediodía soleado o en la noche auroral, en tanto que sólo se registran algunos dB en una ionosfera tranquila durante una noche de invierno [Ondoh, 1963; Harang, 1968].

En las frecuencias más bajas, Galejs [1972] y Pappert [1973] observaron que se necesitaban momentos dipolares excesivos para excitar eficazmente el modo de guiaoondas terrestre mediante fuentes a bordo de satélites. De Witt y otros [1976] calcularon las características de propagación de las ondas miriamétricas y más largas a través de la ionosfera, desde una fuente en la magnetosfera. Se desarrollaron expresiones que dieron la relación entre la potencia transmitida en la superficie de la Tierra y la potencia incidente en la parte superior de la ionosfera, en función del número de saltos de la señal entre el guiaoondas Tierra-ionosfera. Se calculó asimismo la polarización de la onda en función del número de saltos. Además, al calcular la potencia de la señal para una fuente magnetosférica de ondas miriamétricas o más largas, fue necesario calcular el factor de dispersión geométrica de las ondas cuando se propagaban desde la fuente hasta un receptor situado en la superficie de la Tierra [Kelly y otros, 1976a]. En todos los casos de transmisor a baja altitud (menos de unos 2200 km), la magnitud del factor de dispersión disminuye rápidamente a medida que aumenta la distancia desde el receptor al punto de máxima energía del diagrama. Se ha demostrado que el factor de dispersión era más pequeño y menos sensible a la ubicación del receptor para una ubicación fija del transmisor a mayor altura. Se evaluó para varios casos [Kelly y otros, 1976b] la potencia del satélite requerida para proporcionar una relación S/N superior a 0 dB, en una anchura de banda de 1 Hz, en una gama terrestre de 1000 km desde el punto ionosférico de salida de las señales. La potencia necesaria (en la gama de los megavatios) excede de la potencia disponible en las actuales misiones espaciales, pero entra en lo que se considera posible para futuras centrales eléctricas espaciales.

5. Observaciones por satélite

El estudio de la propagación de las ondas miriamétricas en la ionosfera y a través de ella, ha hecho considerables progresos gracias al empleo de satélites. En el caso de que un terminal esté situado en la ionosfera, habrá que tener en cuenta la influencia que ejerce un medio muy anisótropo en las características de la antena y, por consiguiente, en la pérdida de transmisión. Se ha publicado una recapitulación útil de las observaciones mediante satélites de los fenómenos de propagación de las ondas miriamétricas que se producen en la magnetosfera [Rycroft, 1967].

Se ha realizado al respecto una serie muy interesante de experimentos dentro del programa de satélites Lofti. El Lofti-I permitió comprobar que cierta cantidad de energía útil en ondas miriamétricas puede atravesar la frontera entre la atmósfera y la ionosfera y, en particular, que las señales transmitidas desde tierra en 18 kHz pueden captarse a una distancia de hasta 16 000 km en la ionosfera, con una atenuación mucho menor de noche que de día. Los tiempos de propagación registrados van de 10 a 200 ms, lo cual prueba que la velocidad de propagación de las ondas miriamétricas en la ionosfera es mucho más reducida que en el espacio libre [Leiphart y otros, 1962]. Con motivo del experimento Lofti-II se midió, además de la intensidad de la señal, la impedancia de un dipolo en la ionosfera, comprobándose que es totalmente distinta de la que se mide en el espacio libre. Los análisis teóricos confirman esta distinción.

El satélite Alouette-1 llevaba un receptor que cubría la gama de frecuencias comprendidas entre 0,4 y 10 kHz y un dipolo eléctrico. Las señales recibidas por satélite eran muy intensas. Las señales del modo de silbidos que se propagan en un corto salto fraccionario (SFH), es decir, las que se han propagado a partir de un relámpago después de atravesar una sola vez la ionosfera, a menudo sobrecargaban el receptor. Algunas señales procedían de transmisores terrestres de gran potencia, e incluso de poca (100 W) en 10 kHz, pero todavía no se han estudiado. Se observó que los silbidos de un solo salto largo fraccionario (LFH), es decir, los silbidos cuya propagación se supone a lo largo de una línea de fuerza procedente del otro hemisferio, conservaban sus características de dispersión durante todo un registro de telemetría de 10 minutos. Esto significaba que, durante este periodo cierto conducto propagaba los silbidos, los cuales, una vez fuera del conducto, recorrían transversalmente varios miles de kilómetros hasta llegar al receptor del satélite. Aparte de este hecho, no señalado hasta ahora en las publicaciones técnicas, la propagación horizontal de los silbidos SFH puede producir la reflexión de esas señales cerca de la altura del satélite [Barrington y Belrose, 1963; Carpenter y otros, 1964; Smith, 1964].

No obstante, la recepción simultánea de silbidos en el suelo y en satélites [Thomson y Dowden, 1977a] muestra que la mayor parte de los silbidos se reciben en los satélites previa reflexión cerca de la base de la ionosfera. Como los silbidos propagados por conductos descendentes salen generalmente de éstos a altitudes bastante superiores a 1000 km [Thomson y Dowden, 1977b], los silbidos procedentes de un conducto determinado pueden recibirse en los satélites a lo largo de una porción considerable del trayecto de los mismos (hasta de 2000 km en el caso de ISIS-2 y a una altitud de 1400 km). Tratándose de los silbidos «pro-longitudinales» y no propagados por conductos, ese tramo de recepción es aún mayor sin que varíen las características de dispersión [Thomson y Dowden, 1977c]. Aunque en ambos casos estos efectos se deben a la desviación ($\approx 20^\circ$) respecto de la propagación según las líneas de fuerza del campo magnético, no interviene la propagación transversal.

Aunque teóricamente cabría esperar que los iones influyan fuertemente en la propagación de las ondas muy largas, los efectos de los iones no se han observado directamente con anterioridad a los experimentos con satélites. La importancia de los iones queda demostrada por la identificación de silbidos de ciclotrones iónicos [Smith y otros, 1964; Barrington y otros, 1966a y b], que han sido estudiados para obtener la densidad iónica media a la altitud del satélite [Gurnett y otros, 1965; Barrington y McEwen, 1967]. Además, los datos obtenidos por el Alouette demuestran la existencia de una resonancia de plasma (resonancia híbrida inferior para el modo de propagación transversal) en forma de una frecuencia de corte para una banda de ruido en ondas miriamétricas [Brice y otros, 1964]; la identificación de esta resonancia proporcionó información sobre la densidad iónica media a la altitud del satélite [Barrington y otros, 1965].

Mediante observaciones con los satélites ISIS se determinaron los efectos de las variaciones del ciclo solar sobre la frecuencia de aparición de los silbidos iónicos protónicos y deuterónicos transecuatoriales [Watanabe y Ondoh, 1984].

6. Conclusiones

El estudio de la propagación de las ondas kilométricas, miriámétricas y más largas en la ionosfera y a través de ella comenzó con observaciones desde tierra de los silbidos, que sufren la influencia predominante de su largo trayecto de propagación a través de la magnetosfera. Las observaciones realizadas desde satélites han permitido mejorar considerablemente el conocimiento de la propagación dentro de la ionosfera. Tales observaciones han revelado la importancia sobre la propagación (en las frecuencias más bajas) tanto de la propagación en dirección transversal al campo magnético de la Tierra como del papel de los iones. Como era de esperar, la ionosfera influye poderosamente en la propagación de las ondas kilométricas, miriámétricas y más largas que pueden penetrar en ella en el modo de propagación por silbidos. Esta propagación es posible en los sistemas Tierra-espacio y espacio-Tierra. La propagación se caracteriza por presentar grandes retardos de grupo, atenuaciones sumamente variables, trayectos de transmisión muy indirectos y, asimismo, una complicada interacción entre las ondas propagadas y las partículas energéticas presentes en la ionosfera. Como consecuencia de esta última observación se han formulado propuestas de utilización de transmisores de elevada potencia en la banda de las ondas miriámétricas y kilométricas en satélites. Si bien tales transmisiones pueden dar lugar a volúmenes importantes de ruido e interferencia, es posible que estén limitadas por la dificultad de proporcionar una potencia elevada a los transmisores situados a bordo de satélites.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIKYO, K. y ONDOH, T. [1971] Propagation of non-ducted VLF waves in the vicinity of the plasmapause. *J. Radio Res. Labs.* (Japón), **18**, 153-182.
- AIKYO, K., ONDOH, T. y NAGAYAMA, M. [1972] Non-ducted whistlers observed in the plasmasphere. *J. Radio Res. Labs.* (Japón) **19**, 151-174.
- BARKHAUSEN, H. [1919] Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen (Dos fenómenos descubiertos gracias a la utilización de nuevos amplificadores). *Phys. Z.*, **20**, 401-403.
- BARRINGTON, R. E. y BELROSE, J. S. [1963] Preliminary results from the very low frequency receiver aboard Canada's Alouette satellite. *Nature*, Vol. 198, **4887**, 651-656.
- BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. y NELMS, G. L. [1965] Ion composition and temperature at 1000 km as deduced from simultaneous observations of a VHF plasma resonance and topside sounding data from the Alouette I satellite. *J. Geophys. Res.*, **70**, 1647-1664.
- BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. y MATHER, W. E. [1966a] A helium whistler observed in Canadian satellite Alouette II. *Nature*, Vol. 210, 80-81.
- BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. y NELMS, G. L. [1966b] Ion composition and temperature at 1000 km as deduced from VLF plasma resonances and topside ionograms. *Electron density distributions in the ionosphere and exosphere*, edited by J. Frihagen, North-Holland, Publ. Co., Amsterdam, Países Bajos.
- BARRINGTON, R. E. y McEWEN, D. J. [1967] Ion composition from VLF phenomena observed by Alouette I and II. *Space Res.* **VII**, 624-633.
- BRICE, N. M., SMITH, R. L., BELROSE, J. S. y BARRINGTON, R. E. [1964] Recordings from satellite Alouette I – a very low frequency plasma resonance. *Nature*, Vol. 203, **4948**, 926-927.
- BURTIS, W. J. y HELLIWELL, R. A. [1969] Banded chorus – A new type of VLF radiation observed in the magnetosphere by OGO 1 and OGO 3. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 3002-3010.
- CARPENTER, D. L., DUNCKEL, N. y WALKUP, J. F. [1964] A new very low frequency phenomenon – whistlers trapped below the protonosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, **23**, 5009-5017.
- CERISIER, J. C. [1974] Ducted and partly ducted propagation of VLF waves through the magnetosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1443-1467.
- DE WITT, R. N., KELLY, F. J. y CHAYT, G. A. [1976] Lower ionospheric effects on the propagation of waves from an ELF/VLF source in the magnetosphere. *Radio Sci.*, **11**, 189-197.
- DUNCKEL, N. y HELLIWELL, R. A. [1977] Spacecraft observations of man-made whistlermode signals near the electron gyrofrequency. *Radio Sci.*, Vol. 12, **5**, 821-829.
- ECKERSLEY, T. L. [1925] A note on musical atmospheric disturbances. *Phil. Mag.*, **49**, 1250-1260.
- GALEJS, J. [1972] Stable solutions of ionospheric fields in the propagation of ELF and VLF waves. *Radio Sci.*, **7**, 549-561.
- GURNETT, D. A. y SHAW, R. R. [1973] Electromagnetic radiation trapped in the magnetosphere above the plasma frequency. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, **34**, 8136-8149.
- GURNETT, D. A., SHAWAN, S. D., SMITH, R. L. y BRICE, N. M. [1965] Ion cyclotron whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 1665-1688.
- HARANG, L. [1968] VLF emissions observed at stations close to the auroral zone and at stations on lower latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1143-1160.
- HELLIWELL, R. A. [1965] *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*. Stanford University Press, Stanford, CA, Estados Unidos de América.

- HELLIWELL, R. A. y MORGAN, M. G. [1959] Atmospheric whistlers. *Proc. IRE*, **47**, 200-208.
- KELLY, F. J., BAKER, D. J. y CHAYT, G. A. [1976a] Spreading of waves emitted from an ELF/VLF source in the magnetosphere. *Radio Sci.*, **11**, 93-106.
- KELLY, F. J., CHAYT, G. A. y BAKER, D. J. [1976b] Waveguide-mode power budget for an ELF/VLF transmitting satellite. Naval Research Laboratory Report No. 8032 (NTIS Accession AD A002287), National Technical Information Service, Springfield, VA Estados Unidos de América.
- KIMURA, I. [1966] Effect of ions on whistler-mode ray tracing. *Radio Sci.*, **1**, 269-283.
- LEIPHART, J. P., ZEEK, R. W., BEARCE, L. S. y TOTH, E. [1962] Penetration of the ionosphere by very low frequency radio signals. Interim results of the LOFTI I experiment. *Proc. IRE*, **50**, 6-17.
- McPHERSON, D. A. y KOONS, H. C. [1970] Dependence of ELF emissions on the location of the plasmopause. *J. Geophys. Res.*, **75**, 5559-5564.
- MORGAN, M. G., DINGER, H. E. y ALLCOCK, G. McK. [1956] Observations of whistling atmospheric at geo-magnetically conjugate points. *Nature*, Vol. 177, 29-31.
- ONDOH, T. [1963] The ionospheric absorption of the VLF emissions at the auroral zone. *J. Geomag. Geoelectr.*, **15**, 90-108.
- ONDOH, T. [1976] Magnetospheric whistler ducts observed by ISIS satellites. *J. Radio Res. Labs.* (Japón), **23**, 139-147.
- ONDOH, T., KOTAKI, M., MURAKAMI, T., WATANABE, S., y NAKAMURA, Y. [1979] Propagation characteristics of low-latitude whistlers. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2097-2104.
- PAPPERT, R. A. [1973] Excitation of the earth-ionosphere waveguide by point dipoles at satellite heights. *Radio Sci.*, **8**, 535-545.
- PITTEWAY, M. L. V. [1965] The numerical calculation of wave fields reflection coefficients and polarizations for long waves in the lower ionosphere. Part I, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Series A, **257**, 219-242.
- PITTEWAY, M. L. V. y JESPERSON, J. L. [1966] A numerical study of the excitation, internal reflection and limiting polarization of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 17-43.
- RYCROFT, M. J. [1967] A review of satellite observations of VLF phenomena in the magnetosphere, in MF, LF and VLF propagation. IEE Conf. Publ., **36**, 267-294.
- SINGH, R. N. y SINGH, R. P. [1977] Whistlers recorded at Varanasi. *Nature*, Vol. 266, 40-41.
- SMITH, R. L. [1961] Propagation characteristics of whistlers trapped in field aligned columns of enhanced ionization. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 3699-3716.
- SMITH, R. L. [1964] An explanation of sub-protonospheric whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, **23**, 5019-5021.
- SMITH, R. L. y ANGERAMI, J. J. [1968] Magnetospheric properties deduced from OGO 1 observations of ducted and non-ducted whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 1-20.
- SMITH, R. L., BRICE, N. M., KATSUFRAKIS, J., GURNETT, D. A., SHAWAN, S. D., BELROSE, J. S. y BARRINGTON, R. E. [1964] An ion gyrofrequency phenomenon observed in satellites. *Nature*, Vol. 204, 274-275.
- STOREY, L. R. O. [1953] An investigation of whistling atmospheric. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Series A, **246**, 113-141.
- THOMAS, L. y HOROWITZ, S. [1971] The ionospheric absorption of downgoing whistler waves during night-time. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 879-888.
- THOMAS, L. y SMEATHERS, J. R. [1971] The internal reflection of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 959-962.
- THOMSON, R. J. y DOWDEN, R. L. [1977a] Simultaneous ground and satellite reception of whistlers: 1. ducted whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 869-878.
- THOMSON, R. J. y DOWDEN, R. L. [1977b] Ionospheric propagation of whistlers. *Planet. and Space Sci.*, **25**, 1037-1043.
- THOMSON, R. J. y DOWDEN, R. L. [1977c] Simultaneous ground and satellite reception of whistlers: 2. PL whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 879-890.
- WALTER, F. y SCARABUCCI, R. R. [1974] VLF ray trajectories in a latitude-dependent model of the magnetosphere. *Radio Sci.*, **9**, 7-15.
- WATANABE, S. y ONDOH, T. [1984] Solar activity dependence of trans-equatorial ion whistler. *Planet. Space Sci.*, **32**, 955-964.
- WIEDER, B. [1967] Transmission of VLF radio waves through the ionosphere. *Radio Sci.*, **2**, 595-605.
-