

Análisis de situaciones extremas para la caracterización del canal ionosférico en comunicaciones HF

G. MIRÓ

Estación de Sondeos Atmosféricos «El Arenosillo», Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Ctra. San Juan del Puerto-Matalascañas Km. 33, 21130, Huelva, España

S. M. RADICELLA

Laboratorio de Aeronomía y Radiopropagación, Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy

M. HERRAIZ

Dpto. de Geofísica y Meteorología, Universidad Complutense, Madrid, Spain

B. A. DE LA MORENA

Estación de Sondeos Atmosféricos «El Arenosillo», INTA, Huelva, España

RESUMEN

Habitualmente, para determinar los principales parámetros medios que interviene en la radiopropagación HF, se consideran perfiles medios mensuales para cada hora de densidad electrónica obtenidos a partir de medidas experimentales o de modelos. El método utilizado se basa en las conocidas técnicas de trazado de rayos. En este artículo se introduce el concepto de *worst cases* para definir las condiciones extremas de propagación HF mediante perfiles individuales obtenidos para una hora y una estación determinada. La selección se realiza a partir de las distribuciones de frecuencias acumuladas de la frecuencia crítica de la capa F2. Los perfiles horarios del período 1993-1997, obtenidos con la Digisonda 256 en El Arenosillo, se introducen en el programa de trazado de rayos para caracterizar las condiciones extremas de comunicación en un enlace entre dos puntos próximos. En los cálculos se ha asumido una Ionosfera esféricamente simétrica. Los resultados indican que para el intervalo comprendido entre las 8:00 UT y las 18:00 UT es posible transmitir incluso en las condiciones más adversas.

Palabras clave: Radiopropagación HF, Perfiles ionosféricos, Casos Extremos, Trazado de rayos.

ABSTRACT

Mean HF radiopropagation parameters obtained with raytracing techniques are usually determined by model or experimental average electron density profiles for a given time and location. In this paper the concept of «worst cases» is introduced to define extreme conditions of propagation, using series of individual profiles for a given hour and season and cumulative distributions for key profile parameters. «Worst case» conditions of radiopropagation for short distance links have been characterised by applying a 2D raytracing program to hourly digisonde profiles obtained at El Arenosillo in the period 1993-1997. Spherically stratified ionosphere has been assumed in the calculations. The results show the possibility of

transmitting even in the «worst cases» during the 8:00 UT-18:00 UT hours interval.

Key words: HF radiopropagation, Density profiles, «Worst Cases», Raytracing.

1. INTRODUCCIÓN

Para establecer un enlace de comunicación entre dos puntos, es esencial conocer el medio donde se propagan las señales, y las trayectorias que éstas siguen desde el transmisor al receptor, *caracterizando el canal de transmisión*. El caso particular que se trata, considera señales con frecuencias entre 3 y 30 MHz (High Frequency, HF) que viajan a través de las distintas capas de la Ionosfera (80-2000 Km de altura). Este tipo de comunicaciones tienen aplicación para enlaces a grandes distancias tanto en el campo militar como civil.

Entre los parámetros de radiopropagación que caracterizan el canal ionosférico destacan principalmente, la frecuencia de operación y el ángulo de elevación de la señal HF. Para completar el estudio pueden añadirse, el tiempo de retardo experimentado por la onda desde el transmisor al receptor y la altura del punto donde la señal es reflejada. El cálculo de estos parámetros se efectúa por medio de técnicas de trazado de rayos que se basan en teorías de óptica geométrica. Estas técnicas describen la trayectoria experimentada por el rayo, basándose en las condiciones del canal de transmisión ionosférico. El estado de la Ionosfera en el momento de la transmisión, se introduce a través de los perfiles de densidad electrónica calculados a partir de ionogramas horarios experimentales o de modelos teóricos o experimentales (International Reference Ionospheric IRI, Di Giovanni-Radicella model, DGR, entre otros). Los ionogramas medidos experimentalmente son obtenidos a partir de la digisonda DGS256. En la Figura 1, se muestra el ionograma correspondiente a la Estación de Sondeos Atmosféricos del INTA en El Arenosillo (37.1N, 353.3E), del día 19 de Agosto de 1998 a las 13:00 UT horas. En este caso, pueden distinguirse perfectamente las capas E, F₁ y F₂, de la Ionosfera.

Por otro lado, para el estudio del comportamiento medio, se consideran métodos desarrollados recientemente (Huang y Reinisch, 1996), que proporcionan dichos perfiles medios a una hora fija, a partir de los perfiles de un período dado, por ejemplo, un mes.

En este trabajo se introduce el concepto de condiciones extremas para identificar situaciones donde las características de propagación difieren substancialmente de estas condiciones medias. Para definir estas condiciones extremas se recurre a métodos estadísticos, obteniendo las distribuciones de frecuencias acumuladas de un parámetro clave de la Ionosfera: La frecuencia crítica de la capa F₂, foF₂.

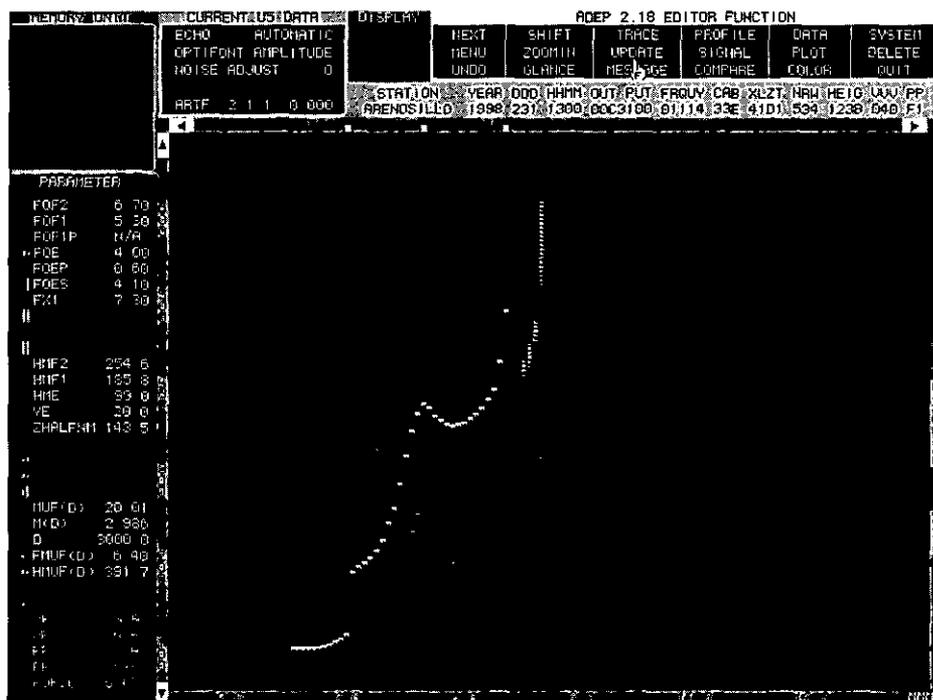


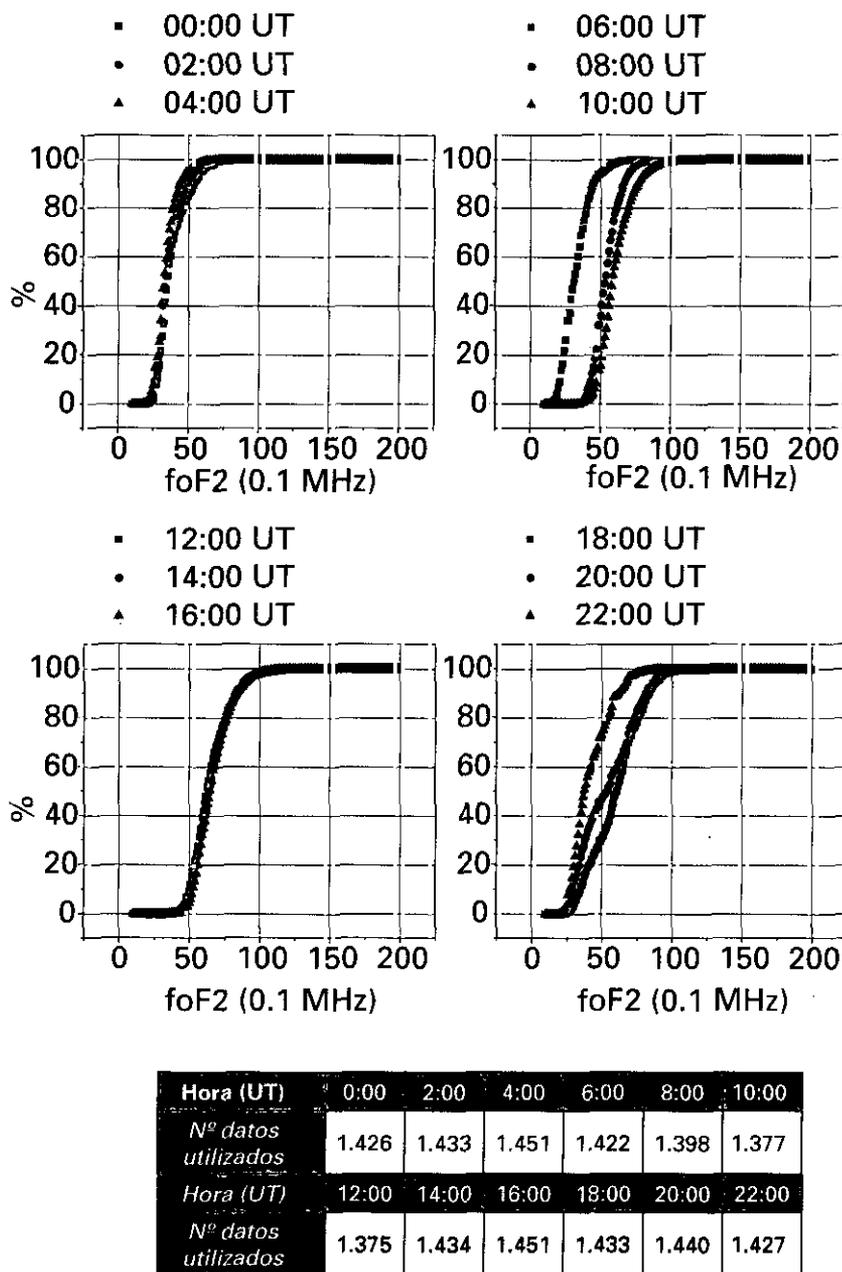
Figura 1. Ionograma vertical de INTA-El Arenosillo

2. METODOLOGÍA

Aunque la base de datos ionosféricos disponibles en la Estación de Sondeos Atmosféricos del INTA en El Arenosillo (Huelva) proviene del año 1974, los perfiles de densidad electrónica empiezan a ser calculados en 1993, a partir de la adquisición de la digisonda DGS256 que proporciona los ionogramas de forma digital (Figura 1). De este modo, para este estudio, se consideran perfiles instantáneos y medios para todas las horas del período 1993-1997. Como se ha indicado anteriormente, el método para obtener la media del perfil para cada hora, está descrito en Huang y Reinisch (1996).

Para seleccionar los casos extremos, se realizan para cada hora, las distribuciones de frecuencias acumuladas de la frecuencia crítica de la capa F2, medida directamente de los ionogramas, incluyendo todos los años disponibles (1993-1997). Previamente, se han revisado y corregido manualmente todos los datos ionosféricos de la base digital considerada, mediante programas informáticos (ARTIST, ADEP) diseñados por la Universidad de Lowell (USA).

Las curvas de las distribuciones de frecuencias acumuladas resultantes, permiten elegir el 1% de los casos con los valores de foF2 superiores e infe-

Figura 2. Distribución de frecuencias acumuladas de $foF2$ en el período 1993-1997.

rios. Los perfiles correspondientes a este 1% de casos se escogen para calcular de forma independiente, la media superior e inferior para cada hora. En definitiva, se separan aquellas situaciones que presentan un comportamiento extremo.

En la Figura 2, se muestran para algunas horas, las distribuciones de frecuencias acumuladas correspondientes al parámetro foF2 de todos los días de los años 1993 a 1997, en el INTA-El Arenosillo.

Los perfiles medios que corresponden a estas condiciones, extremas y medias, aparecen en la Figura 3. Para cada hora, aparecen tres perfiles de densidad electrónica que corresponden al perfil medio considerando el 1% de casos con menor foF2, al perfil medio del 1% de casos con mayor foF2 y al perfil medio de todas las situaciones.

En cada gráfica se pueden observar las diferencias entre las alturas de pico (máximo de densidad electrónica) y las frecuencias máximas para los casos extremos y medios, correspondientes a todas las horas del día. Estos perfiles representan las condiciones ionosféricas, es decir, el estado del canal por el que se transmiten las señales hasta alcanzar el receptor.

Una vez seleccionadas las distintas situaciones, extremas y medias, se calculan los principales parámetros de caracterización del canal ionosférico. La técnica de trazado de rayos elegida para este estudio considera que la Ionosfe-

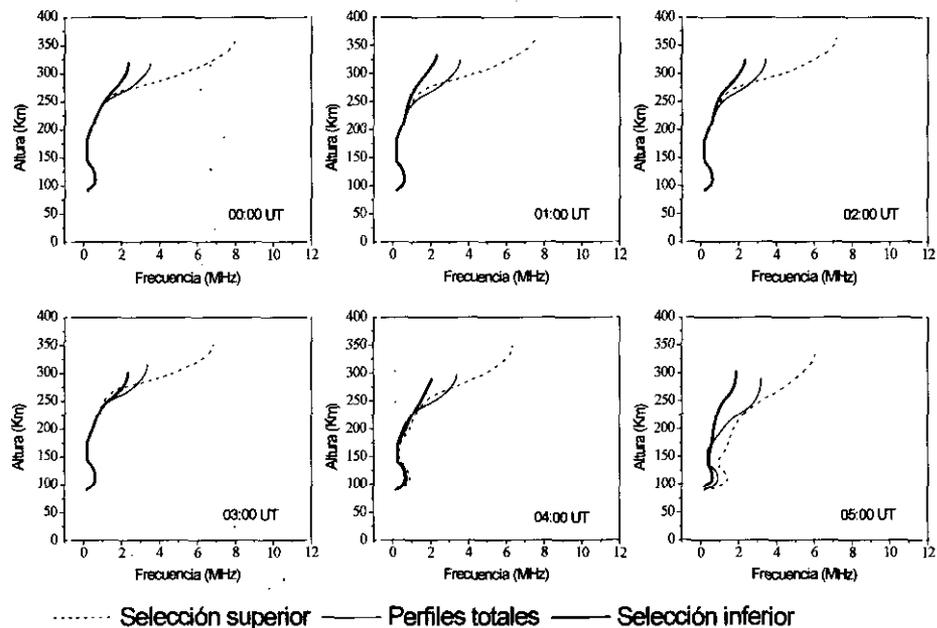


Figura 3. Perfiles de densidad electrónica medios para cada hora.

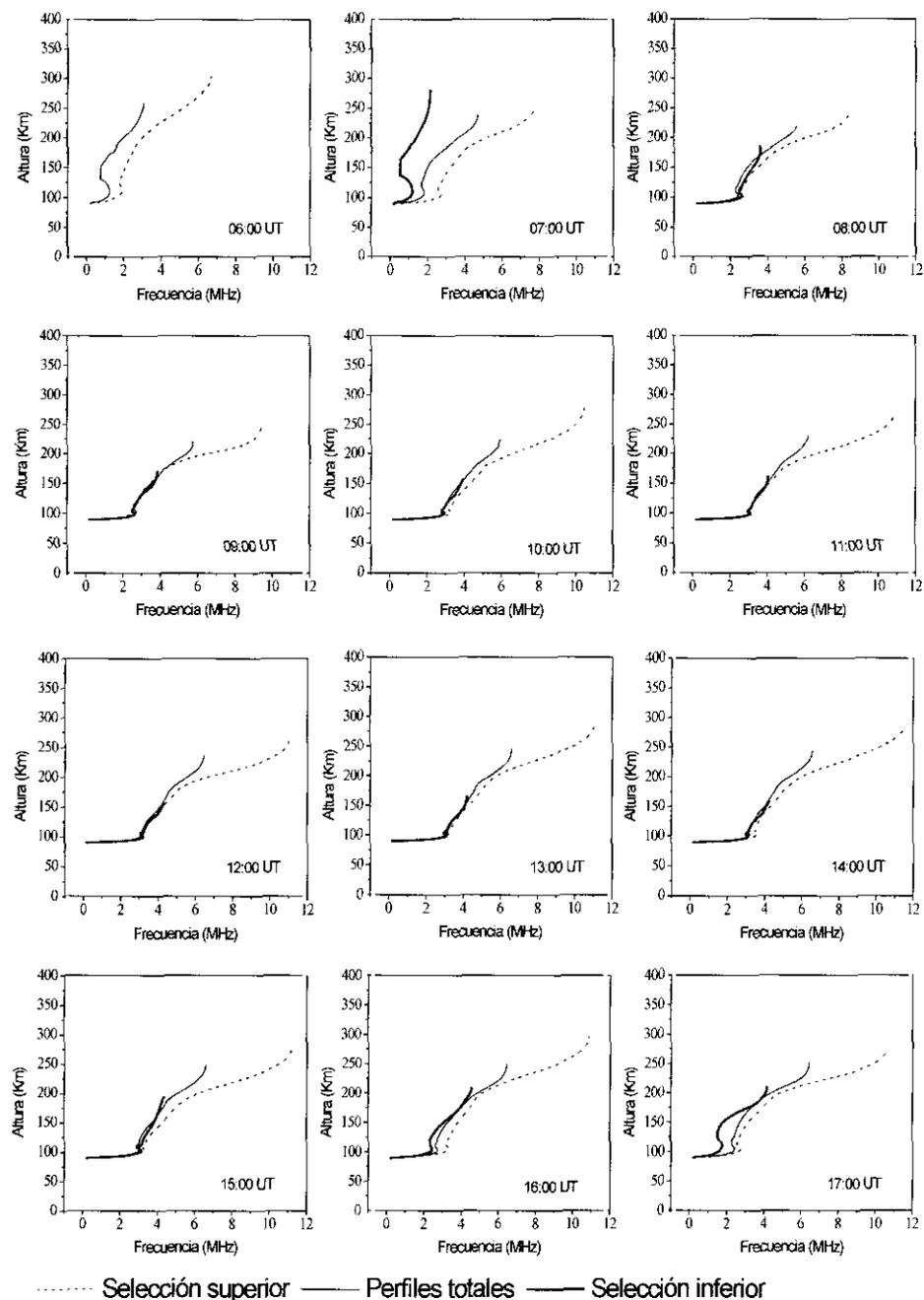


Figura 3. Perfiles de densidad electrónica medios para cada hora.

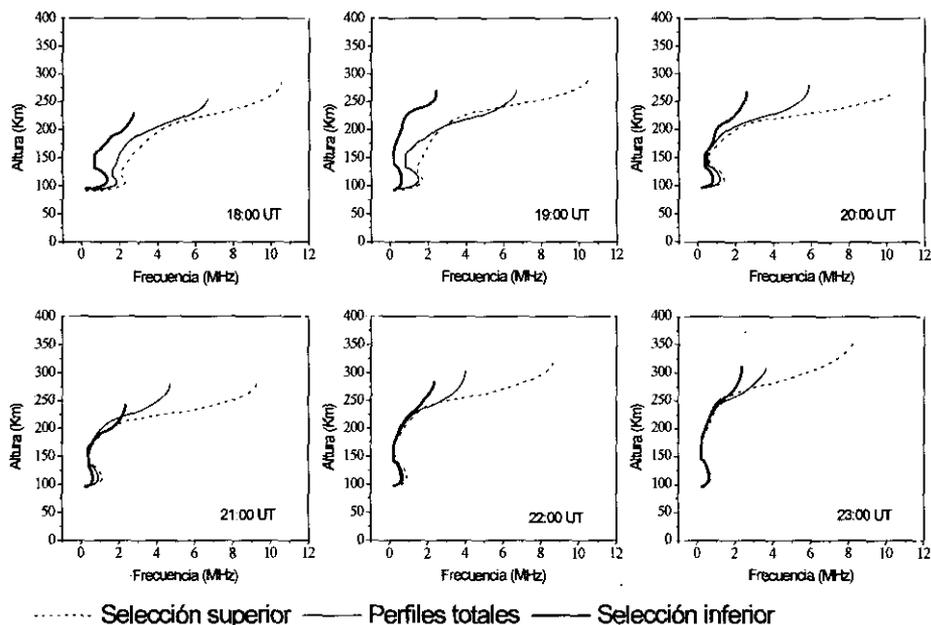


Figura 3. Perfiles de densidad electrónica medios para cada hora.

ra que atraviesa la señal, es bidimensional y desprecia el campo magnético y las colisiones entre iones y partículas neutras (Moorhead y Radicella, 1998). La segunda condición sólo es asumible para frecuencias superiores a 6 MHz.

El programa se denomina *abcray03* y está basado en los estudios realizados por Croft (1968, 1969) sobre técnicas de trazado de rayos y modelos ionosféricos cuasiparabólicos. Considera la Ionosfera dividida en pequeñas capas con índice de refracción constante y dibuja la trayectoria del rayo paso a paso, mediante una forma modificada de la conocida Ley de Snell. De este modo, trazando el camino del rayo se definen los puntos *b* y *c* de la Figura 4.

Estos puntos *b* y *c* y el centro de curvatura definen un triángulo que permite aplicar la ley del seno:

$$\text{sen } \phi_c = \text{sen } \beta_b \frac{\rho_b}{\rho_c}$$

Por otro lado, en el punto *c*, la ley de Snell puede representarse como:

$$\text{sen } \phi_c = \text{sen } \beta_c \frac{\mu_c}{\mu_b}$$

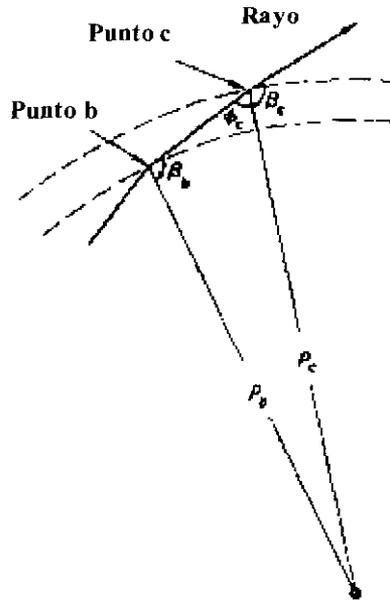


Figura 4. Geometría del trazado de rayo.

donde μ_b y μ_c son los índices de refracción de los puntos b y c respectivamente.

Igualando obtenemos:

$$\mu_b \rho_b \operatorname{sen} \beta_b = \mu_c \rho_c \operatorname{sen} \beta_c$$

3. ANÁLISIS DE DATOS

Mediante esta técnica de trazado de rayos comentada en el apartado anterior, se obtienen la frecuencia de operación, el tiempo de retardo de la señal desde el transmisor al receptor, el ángulo de elevación y la altura del punto de apogeo. El programa traza todos los rayos que salen desde el transmisor cuya frecuencia y ángulo de elevación se sitúen dentro del rango deseado. Es decir, realiza un barrido en frecuencia y ángulo de elevación, para seleccionar aquellas señales que alcanzan el receptor. En este estudio, el rango de frecuencias se establece en el intervalo de 2 a 15 MHz y el de ángulos de elevación, de 6 a 60 grados.

Las condiciones del canal de transmisión para cada hora, son introducidas con los distintos perfiles medios mostrados anteriormente en la Figura 3.

Para este estudio, se ha escogido un enlace entre dos estaciones ionosféricas españolas, INTA-El Arenosillo (37.1N, 353.3E) y el Observatorio del Ebro

(40.8N, 0.5E), que distan unos 785Km, considerando sólo los casos de transmisión con un único rebote en la Ionosfera.

Para cada hora, se obtienen tres caracterizaciones diferentes, correspondientes a distintas condiciones del medio: la media de todos los años, y las selecciones del 1% de casos con foF2 inferior, y del 1% de casos con foF2 superior.

Si se representa el camino recorrido por la onda, P' , que es proporcional al tiempo de retardo de la señal, frente la frecuencia, se obtiene un ionograma oblicuo. En cada ionograma se observa el número de rayos que alcanzan el receptor para cada una de las frecuencias (rebotes) y permite seleccionar en cada caso cuáles de éstas son óptimas. Los ionogramas oblicuos para algunas de las horas calculadas están representados en la Figura 5. De igual modo, han sido calculados los ángulos de elevación y alturas de apogeo.

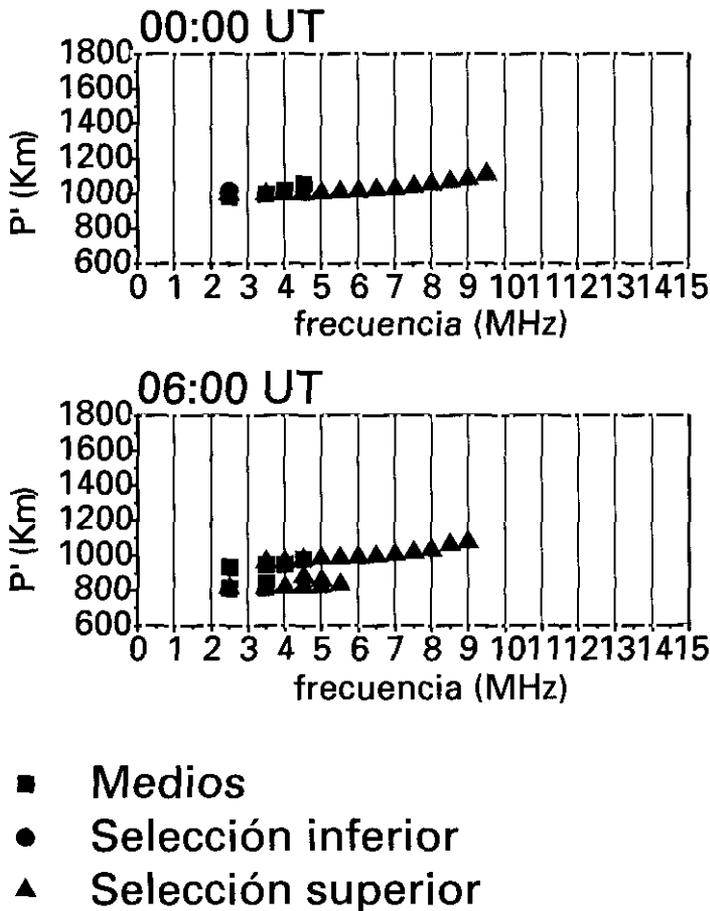


Figura 5. Ionogramas oblicuos para distintas horas.

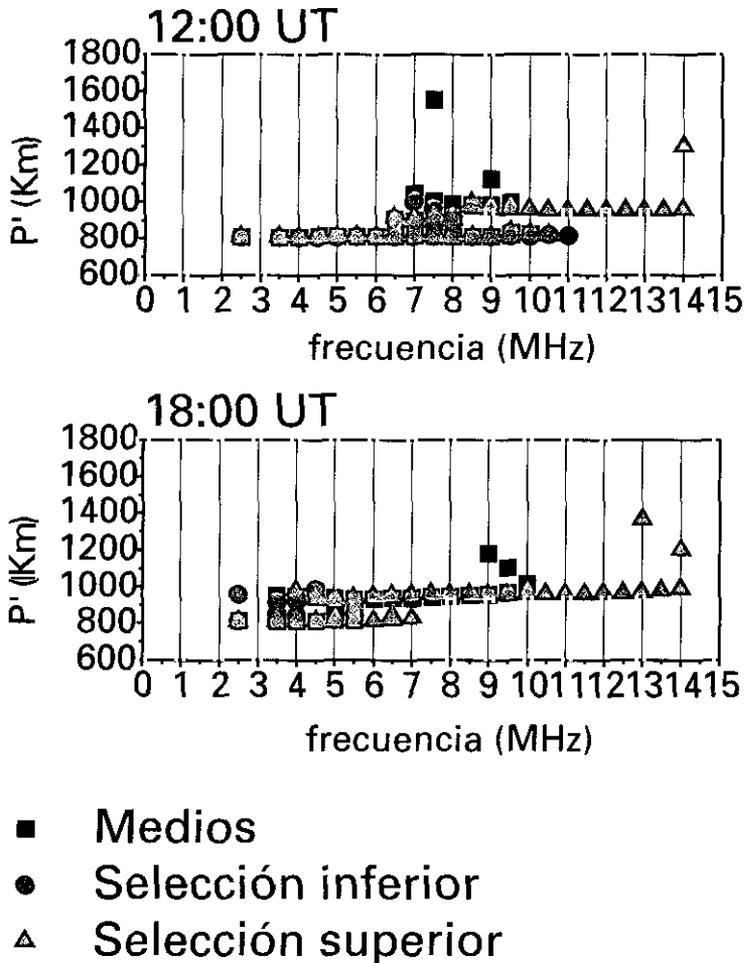


Figura 5. Ionogramas oblicuos para distintas horas (continuación).

Si seleccionamos de forma independiente cada frecuencia del intervalo estudiado (2-15 MHz), y se representa su evolución respecto a la hora del día, pueden observarse las frecuencias que se transmiten en cada hora y para cada circunstancia, extrema o media. A pesar de que sólo las frecuencias superiores a 6 MHz permiten la suposición que desprecia el campo magnético, se ha elegido este intervalo para dar una información más completa de la evolución de las frecuencias.

En la Figura 6 se muestra la variación horaria del camino de grupo (P'), para algunas de estas frecuencias.

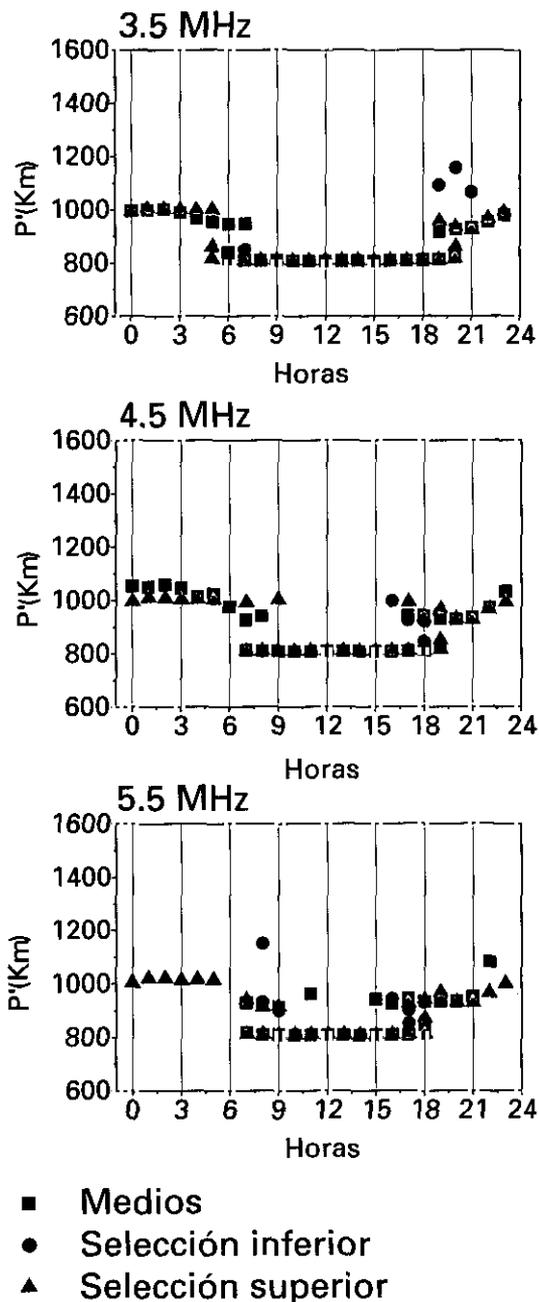


Figura 6. Evolución horaria a frecuencias fijas.

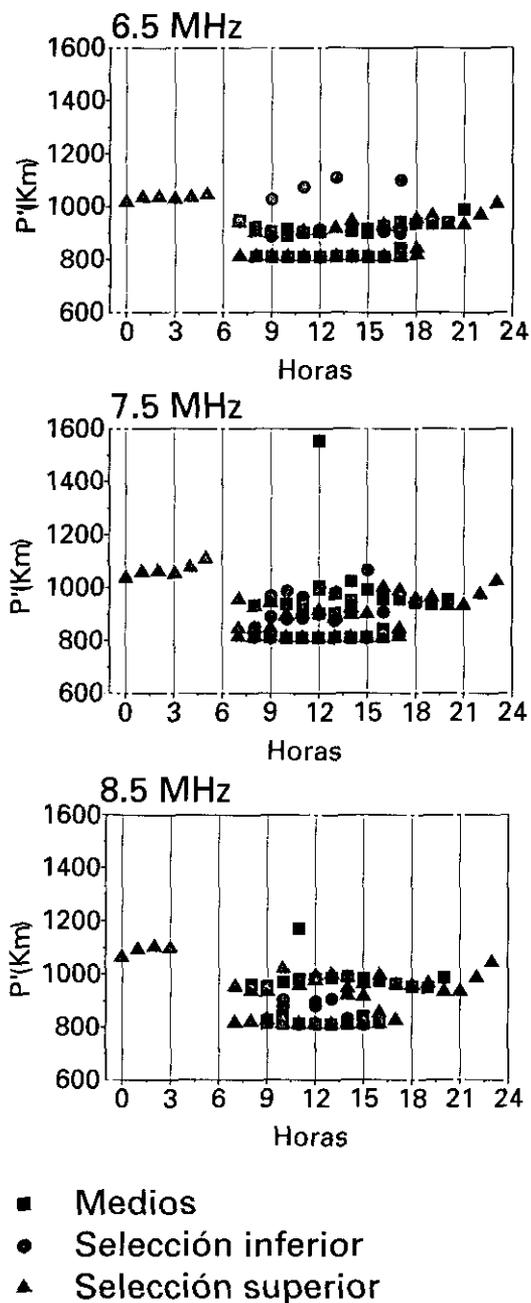


Figura 6. Evolución horaria a frecuencias fijas (continuación).

3. CONCLUSIONES

El método descrito permite estimar la frecuencia de operación, el ángulo de elevación, la altura del punto de apogeo y el tiempo de retardo para condiciones medias y extremas.

Los resultados muestran que durante las horas diurnas, es decir, para el intervalo aproximado de 8:00 UT a 18:00 UT horas, existen frecuencias que se transmiten bajo las tres condiciones estudiadas. De este modo, eligiendo una frecuencia de operación para cada hora diurna, en general entre 6 y 8 MHz, la señal sería recibida bajo cualquier condición ionosférica.

Sin embargo, en las horas nocturnas, las frecuencias para las que se establece el enlace entre transmisor y receptor en todas las circunstancias, son extremadamente bajas (2 y 3 MHz), y por las limitaciones indicadas anteriormente no deben ser consideradas en este tipo de técnicas de trazado de rayos donde el campo magnético se supone despreciable. Por tanto, la transmisión a frecuencias superiores a 6 MHz, para estas horas, sólo es posible para condiciones ionosféricas que incluyan una concentración de electrones anormalmente elevada.

Desde el punto de vista de las comunicaciones HF, las situaciones más peligrosas son aquellas que producen una importante disminución de la frecuencia crítica de la capa F2 porque ello puede provocar la pérdida de la señal. La Tabla 1 muestra para las 24 horas del día, el número de rebotes correspondientes a este 1% de situaciones más desfavorables (columna 3), comparado con el número correspondiente a la totalidad de las situaciones (columna 2). Puede observarse que sólo entre las 8 y las 16 horas UT, este número es aceptable, lo que indica que únicamente en horas de elevada iluminación sería posible transmitir bajo cualquier condición.

La necesidad de crear un conjunto de datos suficientemente extenso para los cálculos estadísticos que constituyen la base de este estudio, ha motivado la inclusión de toda la base ionosférica disponible en El Arenosillo (1826 datos aproximadamente), sin establecer distinciones entre diferentes actividades solares y geomagnéticas, estaciones del año, etc... Como consecuencia, debe considerarse que los resultados y conclusiones responden a todo tipo de situaciones ionosféricas.

Además, se han considerado sólo datos obtenidos en la Estación de Sondeos de El Arenosillo, punto del transmisor, sin considerar la información aportada por los perfiles disponibles en el Observatorio del Ebro. Dado que la distancia que separa ambos puntos, unos 785 Kms, permite un enlace con un solo rebote ionosférico, y que por tanto, la reflexión se situaría próximo al punto medio, un cálculo más exhaustivo consideraría una interpolación entre ambos perfiles de densidad electrónica. Sin embargo, la necesidad de agrupar el mayor número posible de días y horas ha motivado de nuevo esta aproximación, ya que las muestras de ambos observatorios no eran siempre coincidentes.

<i>Hora UT</i>	<i>Rebotes para casos totales</i>	<i>Rebotes para casos inferiores</i>	<i>%</i>
0:00	4	1	25
1:00	4	1	25
2:00	4	1	25
3:00	4	1	25
4:00	4	1	25
5:00	7	1	14
6:00	4	0	0
7:00	16	2	13
8:00	23	19	83
9:00	24	18	75
10:00	26	20	77
11:00	28	19	68
12:00	30	25	83
13:00	28	20	71
14:00	27	20	74
15:00	27	19	70
16:00	28	17	61
17:00	27	13	48
18:00	24	6	25
19:00	19	3	16
20:00	15	3	20
21:00	11	2	18
22:00	6	1	17
23:00	6	1	17

Tabla 1. Porcentaje de casos que alcanzan el receptor.

4. REFERENCIAS

- ADEP user's Handbook, versión 2.12.* Universidad de Massachusetts, Lowell, 1995.
- BILITZA, D. (1990): *International Reference Ionosphere 1990*. National Space Science Data Center, NSSDC, Report 90-22, Greenbelt, MA, USA.
- CROFT, T. A., y HOOGASIAN, H. (1968): *Exact ray calculations in a quasiparabolic ionosphere*. Radio Science, Vol. 3, pp. 69-74.
- CROFT, T. A. (1969): *Methods and applications of computer raytracing*. Stanford Electronics Labs tech. rept. SU-SEL-69-007.
- HUANG, X., y REINISCH, B. W. (1996): *Vertical electron density profiles from Digisonde ionograms-the average representative profile*. Annali di Geofisica, Vol. 39, N.º 4, pp. 751-756.

- MOORHEAD, M. D., y RADICELLA, S. M. (1998): *Using 2D raytracing to model the effects of vertical profile variability on oblique path propagation at HF frequencies*. Proceedings of the Side Workshop of COST 251.
- RADICELLA, S. M., y ZHANG, M. L. (1995): *The improved DGR analytical model of electron density height profile and total electron content in the ionosphere*. *Annali di Geofisica*, Vol. 38, pp. 35-41.

