

INFORME 229-6

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

(Cuestión 1/5)

(1959-1963-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

En el presente Informe se exponen los factores físicos de que dependen las características eléctricas de la superficie de la Tierra. Los métodos de estimación y determinación de los valores de las características eléctricas en relación con el cálculo de la propagación se examinan en el Informe 879.

2. Características del suelo

Las características eléctricas de cualquier medio pueden expresarse mediante tres parámetros: permeabilidad, μ , permitividad, ϵ y conductividad, σ , que influyen conjuntamente en la propagación de las ondas, de acuerdo con la expresión siguiente, que da el coeficiente de propagación k :

$$k = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = j\omega \sqrt{\mu \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)} \quad (1)$$

donde se supone que la dependencia con respecto al tiempo es de la forma $\exp(j\omega t)$.

La permeabilidad del suelo, μ , puede considerarse normalmente como igual a la permeabilidad en el espacio libre, de manera que en la mayoría de los problemas de propagación sólo nos interesan la permitividad, ϵ , y la conductividad, σ . Al referirse al suelo el coeficiente de propagación puede escribirse:

$$k = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r - j60 \sigma \lambda} \quad (2)$$

donde ϵ_r es la permitividad relativa, σ está en S/m y λ es la longitud de onda en el espacio libre en m.

Conviene advertir que las densidades de las corrientes de desplazamiento y conducción están entre sí en la relación de ϵ_r a $60 \sigma \lambda$, lo que permite apreciar su importancia relativa. En frecuencias superiores a 100 MHz hay que tener en cuenta una variación de la permitividad y la de la conductividad (dipolar e iónica) en función de la frecuencia [Saxton y Lane, 1952]. Además, debe advertirse que se ha utilizado un valor de 80 para la permitividad relativa del agua del mar para temperaturas bajas y frecuencias inferiores a 1 GHz aproximadamente. El valor real, incluso para frecuencias bajas, depende de la temperatura y composición del agua del mar.

En la Recomendación 527 se dan valores típicos de la conductividad y permitividad, para diferentes tipos de suelo, en función de la frecuencia. Estos valores, frecuentemente denominados valores intrínsecos, se refieren a estructuras homogéneas del subsuelo y pueden determinarse mediante mediciones de laboratorio de muestras de suelo. Coinciden normalmente con los valores obtenidos con otras mediciones de la impedancia de la superficie en el caso de estructuras homogéneas del subsuelo.

Sin embargo, la estructura del subsuelo es raramente homogénea, sino que consiste más bien en dos o más capas de diferente grosor y conductividades y permitividades distintas. Este hecho debe tenerse en cuenta y podría hacerse mediante la introducción del concepto de parámetros efectivos. Este concepto de parámetros efectivos permite la utilización de las curvas de propagación de la onda de superficie para terreno liso homogéneo de la Recomendación 368, substituyéndose el suelo no homogéneo del subsuelo por una estructura homogénea equivalente cuyos parámetros son la conductividad efectiva y la permitividad efectiva. Estos parámetros pueden determinarse si se conocen los valores de los parámetros de cada capa. Estos valores coinciden con los resultados obtenidos mediante mediciones de la impedancia de la superficie o de la impedancia de la antena.

En algunas bandas de frecuencia, en las que debería prestarse atención a otros factores que influyen en la propagación de la onda de superficie, tales como las irregularidades del terreno, la cobertura de la vegetación, los objetos de la superficie, etc., puede ampliarse este concepto mediante modificaciones ulteriores de este valor efectivo. Tales valores se obtienen mediante la aplicación del método de la atenuación de la onda de superficie o mediante procedimientos analíticos.

3. Factores que influyen en el valor de las características eléctricas

Los valores efectivos de las constantes del suelo dependen no solamente de la naturaleza de este último, sino también de su grado de humedad y de su temperatura. Los demás factores que intervienen son la frecuencia, la estructura geológica general del terreno, la profundidad de penetración efectiva y la dispersión lateral de las ondas.

3.1 *Naturaleza del suelo*

Aun cuando las numerosas mediciones efectuadas han permitido establecer que el valor de las características eléctricas varía según la naturaleza del suelo, es probable que esta variación no se deba tanto a la composición química del suelo como a sus propiedades de absorción y de retención de la humedad. Normalmente, la conductividad de la arcilla es de 10^{-2} S/m; ahora bien, ha podido demostrarse que, si la arcilla está seca, su conductividad puede disminuir hasta 10^{-4} S/m, es decir, a un valor igual a la del granito.

3.2 *Grado de humedad*

Es muy probable que el grado de humedad del suelo sea el parámetro que más influye en el valor de sus constantes eléctricas. Las mediciones efectuadas en laboratorio han demostrado que, aumentando el grado de humedad a partir de un pequeño valor, los valores aumentan rápidamente y van alcanzando el máximo a medida que el grado de humedad se aproxima al valor de los que normalmente existen en los suelos reales correspondientes. Parece ser que, en un lugar determinado, la humedad del suelo permanece sensiblemente constante durante todo el año, a profundidades iguales o superiores a un metro y aun cuando la humedad puede aumentar cuando llueve, terminada la lluvia, el curso natural de las aguas y la evaporación en la superficie pronto reducen la humedad a su valor normal.

Sin embargo, en un suelo determinado pueden registrarse variaciones considerables del grado de humedad de un lugar a otro a causa de las diferentes estructuras geológicas generales, cuya consecuencia es un desagüe más o menos rápido.

3.3 *Temperatura*

Mediciones de laboratorio de las características eléctricas del suelo han demostrado que, para frecuencias bajas, la variación de la conductividad con la temperatura es del orden del 3% por grado Celsius; en cambio, la variación de la permitividad es despreciable. Cuando se alcanza el punto de congelación, se produce generalmente una disminución considerable tanto en la permitividad como en la conductividad. Aunque estas variaciones sean apreciables, no hay que olvidar que la gama de variaciones de la temperatura durante el año disminuye rápidamente con la profundidad, por lo que es posible que la temperatura sólo tenga importancia para frecuencias elevadas en las que la penetración de las ondas es pequeña (véase el punto 3.6), o cuando el suelo está helado a gran profundidad.

La fig. 1 muestra la dependencia de la conductividad [Albrecht, 1963] y de la permitividad relativa [Blomquist, 1968] respecto al grado de humedad y de la temperatura del suelo. Conviene subrayar que tales variaciones sólo se producirán en las características eléctricas intrínsecas. Los cambios de las características eléctricas efectivas dependerán de la amplitud con la que las modificaciones del grado de humedad y la temperatura penetren en la superficie.

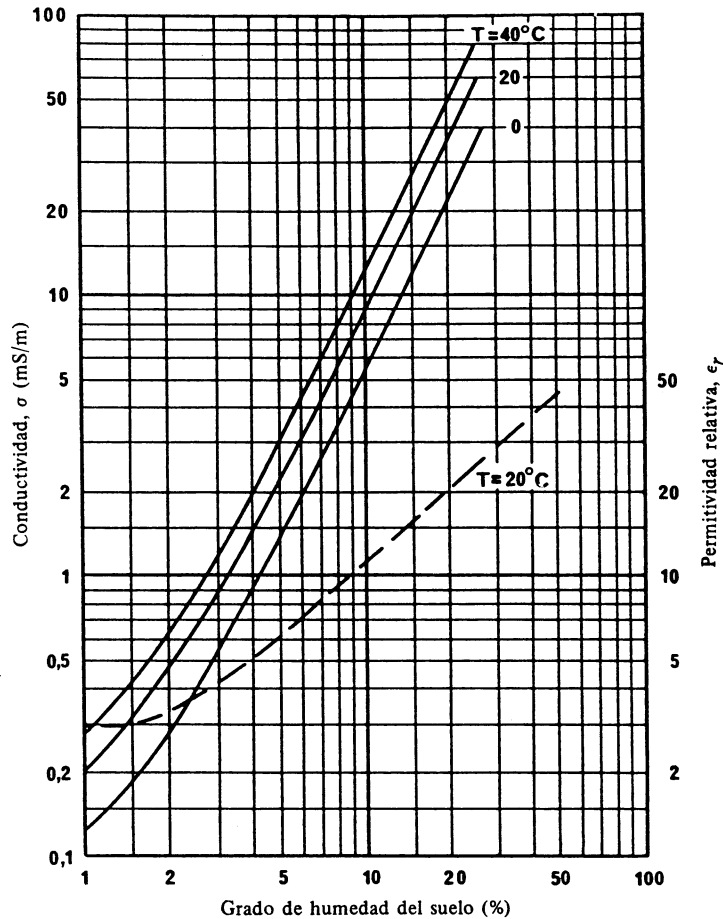


FIGURA 1 - Conductividad intrínseca σ , y permitividad relativa, ϵ_r , del suelo en función del grado de humedad

— Conductividad, σ
 - - - Permittividad relativa, ϵ_r

3.4 Variaciones estacionales

El efecto de las variaciones estacionales sobre la pérdida de propagación por onda de superficie depende del cociente entre la profundidad del suelo donde se manifiestan las variaciones estacionales y la profundidad de penetración. Cualquier efecto estacional de este tipo, dependerá de la frecuencia. Se han interpretado las variaciones estacionales muy pequeñas observadas en las mediciones de fase de emisiones LORAN-C [Doherty y Johler, 1975] en 100 kHz, como debidas completamente a cambios en el índice de refracción. Las mediciones efectuadas en ondas hectométricas en la India demuestran que apenas hay variación en la intensidad de campo correspondiente a la estación lluviosa del monzón cuando se comparan con los valores registrados en la estación seca. Mediciones en ondas hectométricas en la zona templada, realizadas en Finlandia [Koskenniemi y Laiho, 1975] han mostrado únicamente una variación de 1 a 2 dB en la intensidad del campo entre el invierno y el verano.

Mediciones reales de la conductividad del primer medio metro de suelo en Estados Unidos de América, realizadas por radioaficionados [Sevick, 1978], muestran una variación cíclica estacional, con un factor de dos, en la conductividad cerca de la superficie. Estos valores de la conductividad parecen ser función de la temperatura media del suelo con pequeñas fluctuaciones asociadas a la intensidad de precipitación medida.

3.5 Frecuencia

Las mediciones de laboratorio efectuadas con distintos tipos de suelo han demostrado que hay una variación de la permitividad y conductividad con la frecuencia que depende en gran medida de su grado de humedad. Los valores correspondientes al agua dulce y al agua del mar pueden calcularse para cualquier frecuencia a partir de los datos consignados [Saxton y Lane, 1952].

3.6 Estructura geológica general

Generalmente, los terrenos por encima de los cuales se efectúa la propagación, no son homogéneos; por consiguiente, las características eléctricas efectivas dependen de varios tipos de suelos distintos. Por ello importa conocer exactamente la estructura geológica general de la región que se estudia. En una zona dada, a lo largo de un trayecto determinado, las características eléctricas efectivas dependen, no solamente de la naturaleza de los suelos que forman la capa superficial, sino también de las capas subyacentes. Estas últimas pueden formar parte del medio que atraviesan las ondas, e incluso tener una influencia indirecta, determinando el nivel de las aguas en las capas superiores.

3.7 Absorción de la energía por los objetos situados en la superficie de la Tierra

Los objetos que se encuentran en la superficie de la Tierra no influyen directamente en el valor de las características eléctricas del suelo, pero pueden contribuir en gran medida a la atenuación de las ondas de superficie. Los efectos de esas pérdidas de energía pueden tenerse en cuenta empleando valores convenientemente modificados de las características eléctricas del suelo en los cálculos de propagación.

En particular en terreno boscoso, se asocian a la pérdida de transmisión altos valores de atenuación en frecuencias superiores a unos 30 MHz [Blomquist, 1958; Rice, 1971; Saxton y Lane, 1955; Tamir 1967]. La atenuación puede ser mayor cuando los árboles están cubiertos de aguanieve o sus hojas mojadas por la lluvia. En el Informe 1150 figura una exposición más detallada sobre este asunto.

4. Penetración y dispersión de las ondas

4.1 La medida en que las capas inferiores del suelo influyen en el valor de sus características eléctricas depende de la profundidad de penetración de la energía radioeléctrica, δ , que se define como la profundidad a la que la intensidad de la onda se ha atenuado hasta un valor $1/e$ (o sea, un 37%) de su valor en la superficie. En la Recomendación 527, se da la profundidad de penetración en función de la frecuencia, para diferentes tipos de suelo y de agua.

4.2 Si la profundidad de penetración, δ , es inferior al espesor de la capa, los estratos subyacentes tienen escasa influencia. Si δ es mucho mayor que el espesor de la capa superior, la propagación está determinada por las características eléctricas del estrato inferior. En los casos intermedios las características eléctricas del terreno pueden determinarse mediante una relación teórica [Wait, 1970] y un modelo apropiado de la estructura subyacente.

4.3 La energía radioeléctrica recibida en un punto determinado no se propaga únicamente a lo largo del trayecto que une directamente dicho punto al transmisor, sino también por gran número de trayectos indirectos distribuidos a ambos lados del primero. Hay que considerar, pues, las características eléctricas del suelo, no sólo a lo largo del propio trayecto directo, sino también en toda la zona en que se produce la dispersión lateral de las ondas. No es posible asignar límites precisos a esa zona; pero sí se ha formulado la hipótesis de que coincide en realidad con la primera zona de media onda de Fresnel; es decir, con la elipse cuyos focos están situados en el transmisor y el receptor, cuyos ejes son, respectivamente, $(D + \lambda/2)$ y $\sqrt{D\lambda}$, siendo D la longitud del trayecto directo y λ la longitud de onda.

5. Agua del mar

La conductividad eléctrica del agua del mar depende del contenido de sales (salinidad) y de la temperatura. En frecuencias inferiores a 1 GHz, su valor está dado por la siguiente fórmula:

$$\sigma = 0,18 C^{0,93} [1 + 0,02 (T - 20)] \quad \text{S/m} \quad (3)$$

en donde C es el contenido de sales en partes por mil y T es la temperatura en grados Celsius.

A 20 °C se utiliza un valor de 5 S/m como promedio mundial. En algunas zonas del Mar Báltico se han observado valores inferiores a 1 S/m. En el Mar Rojo, la conductividad puede ser superior a 6 S/m.

La permitividad del agua del mar es también función de la salinidad y de la temperatura. Se ha utilizado a menudo un valor de 80 para la permitividad relativa del agua del mar a 20 °C, aunque el valor real a frecuencias bajas es de 70 aproximadamente. Sin embargo, en frecuencias inferiores a unos 100 MHz, ϵ_r es muy inferior a $60 \lambda \sigma$ y cualquiera de los dos valores puede utilizarse para calcular los factores de propagación de la onda de superficie sobre el mar, sin diferencias mensurables en los resultados.

6. Hielo y nieve6.1 **Hielo marino**

El hielo marino es una compleja sustancia cuyas características eléctricas varían dentro de una amplia gama en función de la temperatura y de la edad del hielo. Existe una buena concordancia entre los modelos físicos teóricos del hielo marino [Luchiniov, 1968] y las características eléctricas medidas [Wentworth y Cohn, 1964]. En la fig. 2 aparece la gama de valores de estas características eléctricas para frecuencias comprendidas entre 0,1 y 30 MHz. Por encima de unos 30 MHz, las características eléctricas del hielo marino se aproximan asintóticamente a las del hielo de agua dulce (Recomendación 527).

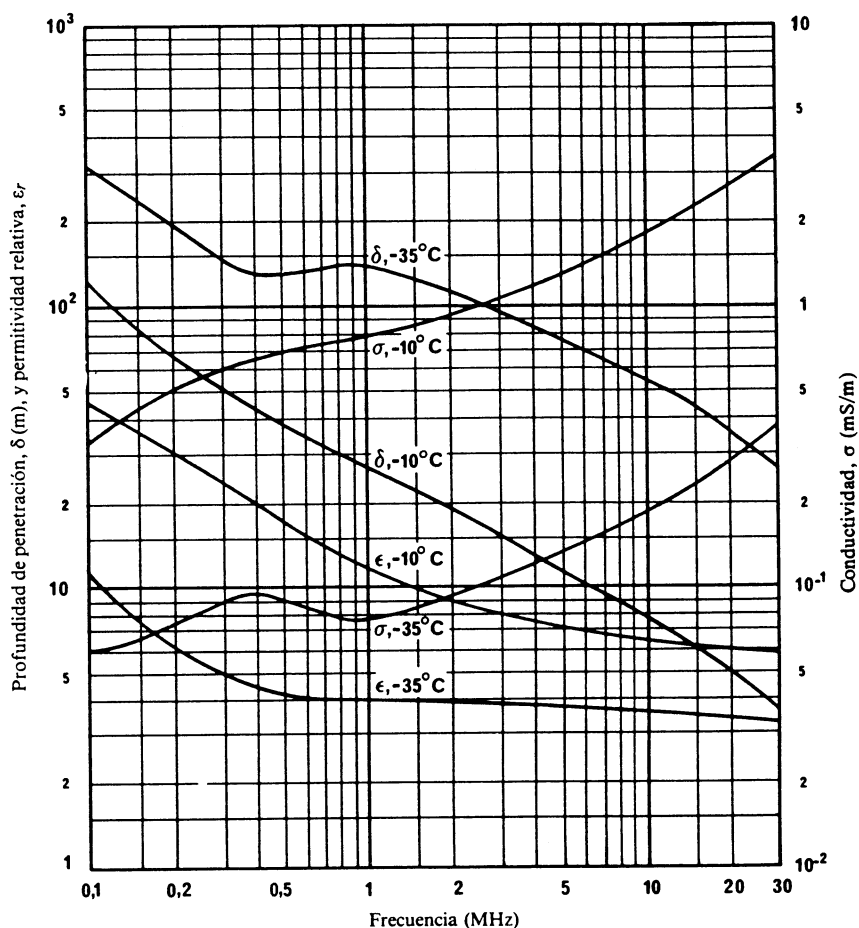


FIGURA 2 – Gama de valores de la profundidad de penetración (δ), permitividad relativa (ϵ_r), y conductividad (σ) de los hielos marinos [Wentworth y Cohn, 1964]

(Estos valores extremos corresponden a hielos nuevos a -10°C de menos de un mes y a hielos antiguos a -35°C de más de un año)

La propagación sobre el hielo marino es anómala [Bourne y otros, 1970]. La presencia de una capa de hielo de baja conductividad sobre agua marina de alta conductividad da lugar a una onda de superficie guiada o de modo «Elliott». Este modo predomina a distancias próximas al transmisor, donde la intensidad de campo puede exceder su valor en el espacio libre. A distancias intermedias se produce interferencia entre este modo de onda de superficie y el modo de onda de superficie normal, y la intensidad de campo oscila con la distancia. A gran distancia, el valor de la intensidad de campo corresponde al de la onda de superficie normal. La capa de hielo influye también mucho en los términos de ganancia de altura. Un análisis teórico de la propagación sobre hielo marino [Hill y Wait, 1981] ha permitido explicar fundamentalmente los fenómenos observados y permite sugerir que este comportamiento anómalo puede utilizarse para la teledetección desde aeronaves de campos de hielo marino.

La gama de profundidades de penetración en hielos marinos se muestra asimismo en la fig. 2 para frecuencias comprendidas entre 0,1 y 30 MHz. Si se conoce el espesor de la capa de hielo en el mar, resulta posible determinar sus valores efectivos de conductividad y permitividad en base a la relación mencionada en el punto 4.2 precedente.

También se producen cambios de la propagación de la onda de superficie sobre el hielo marino si se forma una película de agua sobre el hielo a causa de la lluvia o de la fusión superficial.

6.2 Hielo Antártico

El continente de la Antártida está cubierto por una capa de hielo de un espesor medio de 2,2 km. Mediciones efectuadas a 30 MHz como parte del International Antarctic Project [Jiracek y Bentley, 1971] indican que este hielo tiene una permitividad relativa comprendida entre 2,8 y 3,2, y una conductividad efectiva situada entre 5×10^{-5} y 10^{-6} S/m. La permitividad relativa varía linealmente con la densidad del hielo.

Las ondas radioeléctricas pueden penetrar fácilmente en el hielo antártico y reflejarse en un lecho de roca subyacente, lo que ha conducido a resultados anómalos en los sondeos ionosféricos verticales y a accidentes de aviación catastróficos relacionados con indicaciones erróneas del altímetro radar.

6.3 Nieve

Las características eléctricas de la nieve son dinámicas. Estas características varían al fundirse y congelarse la nieve. Conviene distinguir entre nieve seca y nieve húmeda. La nieve húmeda incluye componentes de agua líquida.

La permitividad relativa de la nieve seca es linealmente proporcional a la densidad de la nieve [Hallikainen y otros, 1986]. Para densidades inferiores a $0,5 \text{ g/cm}^3$, la permeabilidad relativa viene dada por la expresión:

$$\epsilon_r = 1 + 1,9\rho$$

donde ρ es la densidad de la nieve en g/cm^3 . En general, la permitividad relativa de la nieve seca es independiente de la temperatura y la frecuencia en la gama de microondas de 1 a 37 GHz. El término de pérdida correspondiente de la permitividad de la nieve seca es despreciable en el caso de las frecuencias inferiores a unos 15 GHz. Un valor típico para la permitividad relativa compleja de la nieve seca es $1,6 - j10^{-3}$.

La nieve húmeda es una mezcla compleja de aire, hielo y agua líquida. Las características eléctricas medidas pueden adaptarse a un modelo de Debye modificado. Una pequeña cantidad de agua líquida puede provocar un gran cambio en las propiedades de la nieve seca. La nieve húmeda es dispersiva y el mayor cambio de las características eléctricas se produce entre 3 y 18 GHz. Un valor típico de permitividad relativa compleja de la nieve húmeda a 10 GHz es $2 - j0,4$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, H. J. [1963] Über den Einfluss von elektrischen Erdbodeneigenschaften und meteorologischen Parametern auf praktische Feldstärkeberechnungen bei Kurzwellenausbreitung. (Efecto de las propiedades eléctricas del suelo y de los parámetros meteorológicos en los cálculos de la intensidad de campo real, en el caso de la propagación de las ondas cortas). *Arch. Met. Geophys. Bioklim. Ser. A*, Vol. 13, 429-443.
- BLOMQUIST, Å. [1958] Local ground-wave field strength variations in the frequency range 30-1000 MHz. Proc. Conference on Electromagnetic Wave Propagation, Bruselas, 127.
- BLOMQUIST, Å. [1968] *Propagation of Radio Waves. The Influence of the Earth's Surface*. Capítulo 5 (en sueco). Educational Courses of the National Defense Research Institute, Estocolmo, Suecia.
- BOURNE, I. A., ROSS, D. B. y SEGAL, B. [1970] Phase instability in radio waves propagating across ice covered seas. AGARD Conf. Proc., No. 33.
- DOHERTY, R. H. y JOHLER, J. R. [1975] Meteorological influences on LORAN-C ground wave propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1117-1124.
- HALLIKAINEN, M. T., ULABY, F. T. y ABDELRAZIK, M. [1986] Dielectric Properties of Snow in the 3 to 37 GHz Range, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, Noviembre, 1329-1339.
- HILL, D. A. y WAIT, J. R. [octubre de 1981] HF radio wave transmission over sea ice and remote sensing possibilities. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, Vol. GE-19, 4, 204-209.
- JIRACEK, G. R. y BENTLEY, C. R. [1971] Velocity of Electromagnetic Waves in Antarctic Ice, *Antarctic Snow and Ice Studies 2*, Antarctic Research Studies, Vol. 16, American Geophysical Union.
- KOSKENNIEMI, O. y LAIHO, J. [octubre de 1975] Measurements of the effective ground conductivity at low and medium frequencies in Finland. *EBU Rev. Tech.*, 153, 237-240.
- LUCHININOV, V. S. [3 de septiembre de 1968] Electrical characteristics of ice. *Zhurn. Tekhn. Fiziki*, Vol. 38, 3; Traducción en inglés; *Soviet Phys. - Tech. Phys.*, 13.
- RICE, P. L. [1971] Some effects of buildings and vegetation on VHF/UHF propagation. Proc. IEEE Mountain-West Conference on Electromagnetic Compatibility, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- SAXTON, J. A. y LANE, J. A. [octubre de 1952] Electrical properties of sea water. *Wireless Engr.*, Vol. 29, 349, 269-275.
- SAXTON, J. A. y LANE, J. A. [1955] VHF and UHF reception. *Wireless World*, Vol. 61, 5, 229-232.
- SEVICK, J. [1978] Short ground-radial systems for short verticals. *QST*, Vol. LXII, 4, 30-33.
- TAMIR, T. [1967] On radio-wave propagation in forest environments. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, 6, 806-817.
- WAIT, J. R. [1970] *Electromagnetic Waves in Stratified Media* (2.ª edición). Pergamon Press, MacMillan, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- WENTWORTH, F. L. y COHN, M. [junio de 1964] Electrical properties of sea ice at 0,1 to 30 Mc/s. *Radio Sci.*, Vol. 68D, 6, 681-691.

INFORME 879-1

MÉTODOS PARA CALCULAR LAS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS
EFECTIVAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

(Decisión 3)

(1982-1986)

1. Introducción

El presente Informe se refiere a la medición de las características eléctricas efectivas de la superficie de la Tierra. El conocimiento de estas características tiene especial importancia en la planificación de la radiodifusión por ondas hectométricas y kilométricas, en la que la onda de superficie es el modo primario de propagación. La conductividad efectiva de la superficie de la Tierra es habitualmente de 0,1 a 30 mS/m. Las curvas incluidas en la Recomendación 368 permiten observar que esta gama de conductividades da una diferencia de 44 dB en los valores de la intensidad de campo para una señal de 1 MHz a una distancia de 100 km. Por ello, el conocimiento de estas características es necesario para efectuar estimaciones precisas de la cobertura de la radiodifusión por ondas hectométricas y kilométricas y para calcular la interferencia.