

RECOMENDACIÓN UIT-R P.527-3*

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

(1978-1982-1990-1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la propagación de las ondas de superficie depende principalmente de las propiedades eléctricas del suelo, y que la medida en que los estratos inferiores del suelo influyen en los valores efectivos de las características eléctricas de la Tierra depende de la profundidad de penetración de la energía radioeléctrica;
- b) que las características eléctricas se pueden expresar por medio de tres parámetros: la permeabilidad μ , la permitividad ϵ y la conductividad σ ;
- c) que la permeabilidad del suelo, μ , se puede considerar normalmente como igual a la permeabilidad en el vacío y que se necesitan valores de la permitividad relativa y de la conductividad en función de la frecuencia de los diferentes tipos de superficie;
- d) que es necesario conocer la profundidad de penetración en función de la frecuencia,

recomienda

que se emplee la información indicada en el anexo 1 para el cálculo de la intensidad de campo de la onda de superficie, en las frecuencias correspondientes y en las condiciones que se especifican.

ANEXO 1

1. Introducción

En el presente anexo se indican los valores típicos de las características eléctricas de los diferentes tipos de superficie de la Tierra y se estudian los factores físicos de los que dependen esas características.

2. Valores de permitividad y conductividad

En la fig. 1 se muestran los valores típicos de conductividad y permitividad para diferentes tipos de terrenos en función de la frecuencia. Estos valores, mencionados frecuentemente como valores intrínsecos, se refieren a estructuras de suelos subsuperficiales homogéneas.

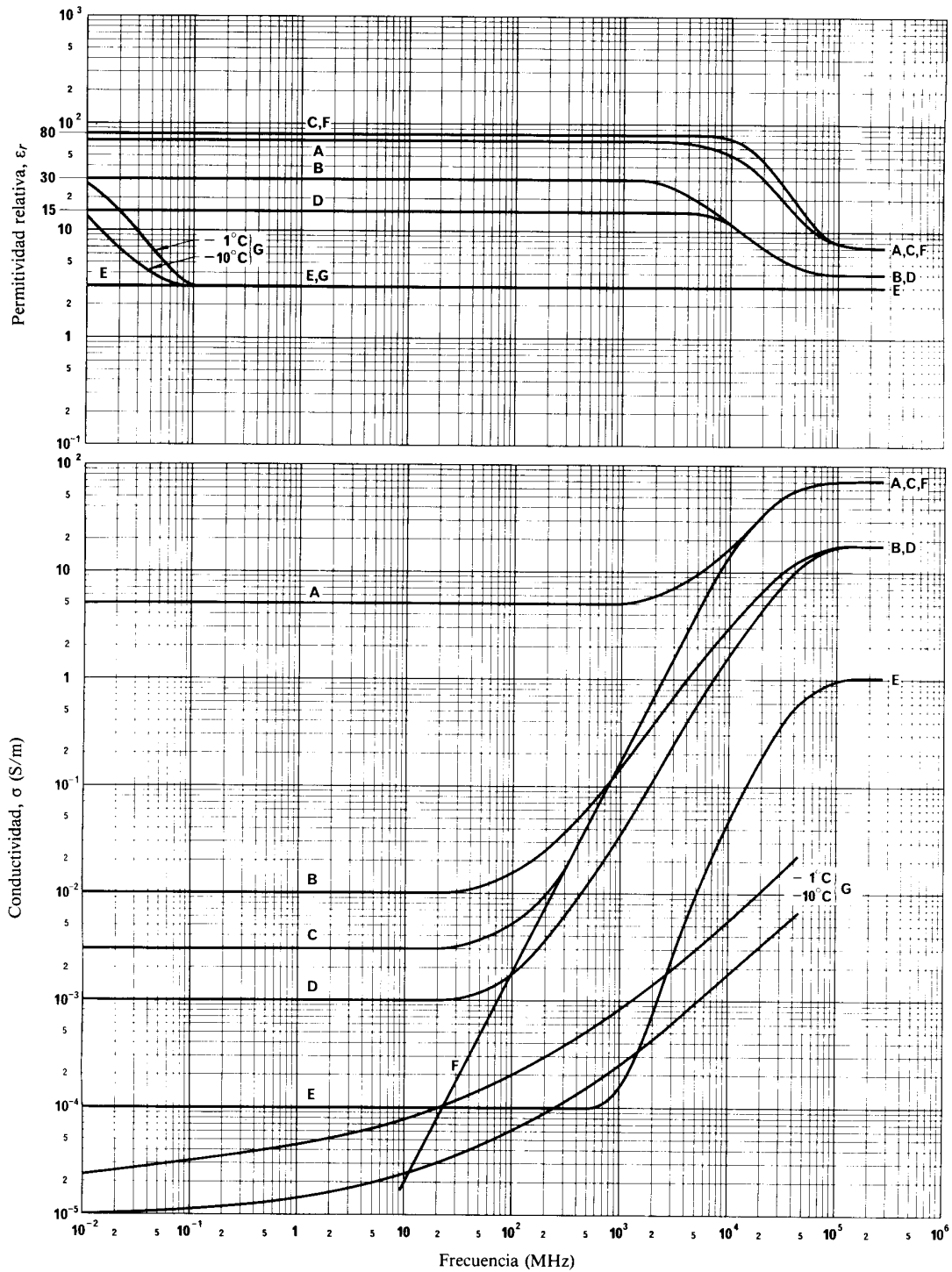
Sin embargo, la estructura subsuperficial rara vez es homogénea, sino que está integrada más bien por dos o más capas de distinto espesor y diferentes conductividades y permitividades. Esta característica se debe tomar en consideración y para ello es conveniente introducir el concepto de parámetros efectivos. Este concepto permite utilizar las curvas de propagación por onda de superficie sobre terreno liso homogéneo que figuran en la Recomendación UIT-R P.368. El suelo subsuperficial no homogéneo se reemplaza por una estructura homogénea equivalente cuyos parámetros son la conductividad efectiva y la permitividad efectiva. Se podrán determinar estos parámetros si se conocen los valores de los parámetros de cada capa.

Los valores de la permitividad relativa (constante dieléctrica) y de la conductividad mostrados en la fig. 1 para diferentes tipos de suelo indican la gama aproximada de valores que pueden encontrarse en diversas condiciones, pero en casos extremos pueden encontrarse valores no comprendidos en dicha gama. En regiones fértiles muy húmedas se darán valores más altos, en tanto que en regiones montañosas y árticas, la conductividad, a frecuencias inferiores a 100 MHz, puede ser de tan sólo 10^{-5} S/m. En casos de suelos recubiertos de nieve pueden hallarse valores de permitividad inferiores a los mostrados en la curva E de la fig. 1. La conductividad del agua de los lagos y ríos aumenta con la concentración de impurezas.

* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

FIGURA 1

Permitividad relativa, ϵ_r , y conductividad, σ , en función de la frecuencia



- A: Agua salada (salinidad media), 20° C
- B: Suelo húmedo
- C: Agua dulce, 20° C
- D: Suelo moderadamente seco
- E: Suelo muy seco
- F: Agua pura, 20° C
- G: Hielo (agua dulce)

3. Penetración y dispersión de las ondas

3.1 El grado en que las capas inferiores influyen en las características eléctricas efectivas depende de la profundidad de penetración de la energía radioeléctrica, δ , que se define como la profundidad a la cual la onda queda atenuada a $1/e$ (ó 37%) de su valor en la superficie. En la fig. 2 se muestra la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diferentes tipos de terrenos y aguas.

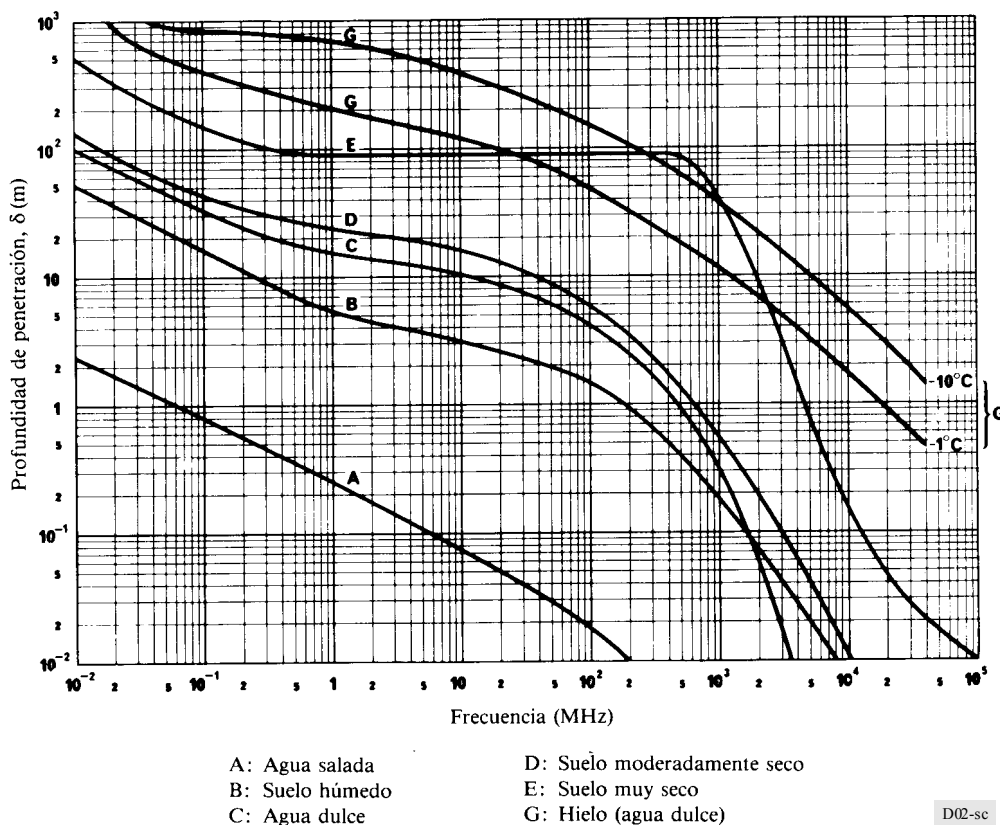
3.2 Si la profundidad de penetración, δ , es menor que el espesor de la capa, los estratos subyacentes tienen escasa influencia. Si δ es mucho mayor que el espesor de la capa superior, la propagación viene determinada por las características eléctricas de los estratos inferiores.

La fig. 2 muestra que en las frecuencias más bajas, exceptuado el caso del agua de mar, hay que tener en cuenta los estratos de hasta 100 m de profundidad o más. Este hecho tiene especial importancia cuando la conductividad de los estratos superiores es más baja y la energía puede, por tanto, penetrar más fácilmente en las capas inferiores. Tales casos se dan, por ejemplo, en regiones lacustres y oceánicas cubiertas de hielo.

3.3 La energía radioeléctrica recibida en un punto no se propaga únicamente por el trayecto directo desde el transmisor, sino también por un gran número de trayectos indirectos distribuidos a cada lado del mismo. Por tanto, es necesario tener en cuenta las características eléctricas, no sólo en el propio trayecto, sino también en la zona cubierta por la dispersión lateral de la onda. No se pueden establecer límites definidos para esta zona, pero se ha sugerido que se trata de hecho de la primera zona de semionda Fresnel.

FIGURA 2

Profundidad de penetración, δ , en función de la frecuencia



4. Mar

4.1 Agua de mar

La conductividad eléctrica del agua de mar es función del contenido de sal (salinidad) y de la temperatura. En frecuencias por debajo de 1 GHz su valor viene dado por la expresión:

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

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

A 20°C se utiliza 5 S/m como valor medio 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 utiliza a menudo un valor de 80 para la permitividad relativa del agua de mar a 20°C, aunque el valor real a baja frecuencia es de 70 aproximadamente. Sin embargo, en frecuencias inferiores a unos 100 MHz, ϵ_r es mucho menor que $60 \lambda \sigma$, y se pueden utilizar ambos valores para calcular los factores de propagación de la onda de superficie sobre el mar, sin diferencias mensurables en los resultados.

4.2 Hielo de mar

El hielo de mar es una sustancia compleja cuyas características eléctricas varían en un amplio margen en función de la temperatura y de la edad del hielo. En la fig. 3 se muestra la gama de valores de esas características eléctricas y las profundidades de penetración para frecuencias entre 0,1 y 30 MHz. Por encima de 30 MHz aproximadamente, las características eléctricas del hielo de mar se aproximan asintóticamente a las características del hielo de agua dulce.

5. Factores que determinan las características eléctricas efectivas

Los valores efectivos de las constantes del suelo vienen determinados, no sólo por la naturaleza del suelo, sino también por su contenido de humedad y su temperatura, por la frecuencia, por la estructura geológica general del terreno y por la profundidad de penetración efectiva y la dispersión lateral de las ondas.

5.1 Naturaleza del suelo

Si bien se ha establecido, en numerosas mediciones, que los valores de las características eléctricas varían con la naturaleza del suelo, parece probable que esta variación se deba no tanto a la composición química del suelo, como a su capacidad para absorber y retener la humedad. Se ha demostrado que la greda, que normalmente tiene una conductividad del orden de 10^{-2} S/m, puede llegar a tener una conductividad de 10^{-4} S/m, que es del mismo orden que la del granito.

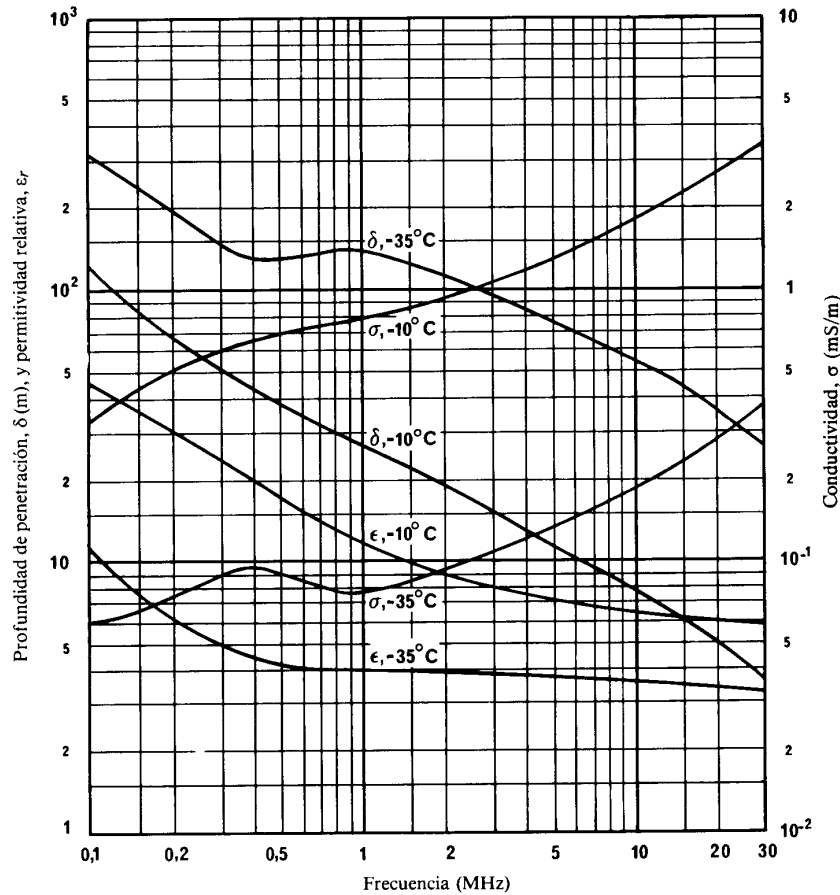
5.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo es probablemente el factor que más determina sus constantes eléctricas. Se ha demostrado en mediciones de laboratorio que, a medida que aumenta el contenido de humedad a partir de un valor bajo, los valores aumentan, alcanzando rápidamente el punto máximo al aproximarse el contenido de humedad a los valores normales del suelo de que se trata. A profundidades de 1 m, la humedad del suelo en un lugar determinado parece ser sustancialmente constante todo el año y, si bien puede aumentar durante la lluvia, el drenaje del suelo y la evaporación superficial hacen que la humedad vuelva pronto a su valor normal luego de cesar la lluvia.

Sin embargo, el contenido de humedad de un suelo puede variar considerablemente de un lugar a otro, ya que las diferencias en la formación geológica general hacen que haya un mejor drenaje en un sitio que en otro.

FIGURA 3

Gama de valores de profundidad de penetración, δ , la permitividad relativa, ϵ_r , y la conductividad, σ , del hielo de mar



D03-sc

5.3 Temperatura

Las mediciones en laboratorio de las características eléctricas del suelo han demostrado que, a bajas frecuencias, el coeficiente de temperatura de la conductividad es del orden del 3% por grado Celsius, mientras que el correspondiente a la permitividad es despreciable. En el punto de congelación se produce generalmente una gran disminución tanto de la permitividad como de la conductividad. Aunque estas variaciones son apreciables, se debe tener en cuenta que la gama de variación de la temperatura durante el año disminuye rápidamente con la profundidad, de manera tal que los efectos de la temperatura pueden ser importantes sólo en frecuencias elevadas, para las cuales la penetración de las ondas es pequeña, o cuando la tierra está helada hasta una profundidad considerable.

5.4 Variación estacional

El efecto de la variación estacional sobre la pérdida de propagación de la onda de superficie depende de la relación entre la profundidad del suelo que acusa cambios estacionales y la profundidad de penetración. Todo efecto estacional de este tipo dependerá de la frecuencia.

5.5 Absorción de energía por objetos en la superficie

Si bien los objetos situados en la superficie no tienen una influencia directa sobre las características eléctricas del suelo, pueden contribuir en forma apreciable a la atenuación de las ondas de superficie. Por tanto, en los cálculos de propagación se pueden tener en cuenta los efectos de esas pérdidas de energía utilizando valores adecuadamente modificados de las características eléctricas.