

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.

2. Características eléctricas efectivas del suelo

El término características eléctricas efectivas se utiliza en relación con la propagación de la onda de superficie para resaltar el hecho de que los valores de la conductividad, σ , y la permitividad (constante dieléctrica), ϵ_r , que deben utilizarse para los cálculos de la intensidad de campo de la onda de superficie, pueden ser distintos de los valores que se obtienen en mediciones de laboratorio. En numerosos casos, los valores de las características eléctricas en la superficie deben modificarse debido a la influencia de las irregularidades del terreno y de las capas sub-superficiales. En frecuencias bajas y en conductividades de superficie bajas, la pérdida de propagación por la onda de superficie puede determinarse por el valor de la conductividad de las capas sub-superficiales.

2.1 Importancia relativa de la conductividad y de la permitividad

En un suelo homogéneo, el valor de la permitividad, ϵ , ejerce escasa influencia sobre la pérdida de transmisión por la onda de superficie de las ondas hectométricas y kilométricas si $\epsilon_r \ll 60 \lambda \sigma$. En la mayoría de los casos basta utilizar los valores de ϵ asociados con las gamas de la conductividad calculada que aparecen en la Recomendación 527. También se puede utilizar la relación empírica hallada por Hanle [1966] $\epsilon_r = 50 \sigma^{1/5}$, en la que la conductividad se expresa en S/m.

Sin embargo, sobre un terreno con capas estratificadas horizontalmente, la permitividad efectiva puede resultar muy amplia o incluso negativa [Eliassen, 1957; Wait, 1970]. Puede ser así que la relación $\epsilon_r \ll 60 \sigma \lambda$ no sea satisfecha por las características eléctricas efectivas, incluso aunque lo sea por la capa superficial y las capas sub-superficiales. Wait [1970] ha elaborado una relación teórica para las características eléctricas efectivas sobre un terreno estratificado horizontalmente. En el Informe 716 se examina la necesidad de utilizar el total de la impedancia superficial efectiva compleja al calcular la fase de la onda de superficie para los sistemas de radionavegación de precisión [Johler y Horowitz, 1974].

2.2 Dependencia respecto a la frecuencia de las características eléctricas

La conductividad de las muestras del suelo presenta una dependencia con respecto a la frecuencia por encima de 10 MHz, como se ilustra en la Recomendación 527 (fig. 1). En frecuencias más bajas, la conductividad del suelo no muestra una dependencia intrínseca respecto a la frecuencia.

Sin embargo, las características eléctricas efectivas mostrarán una dependencia de la frecuencia cuando los valores de la superficie se hallen modificados por capas sub-superficiales y por las irregularidades del terreno. La dependencia respecto a la frecuencia de las características eléctricas del suelo, con las capas subyacentes, es una función de la relación entre el espesor de la capa superior y la profundidad de penetración. Así, las constantes efectivas del suelo en ondas kilométricas pueden ser significativamente distintas de las halladas en ondas decamétricas. La influencia de las irregularidades del terreno sobre las características eléctricas efectivas depende de la relación entre las variaciones de altura del terreno y la longitud de onda. En el Informe 1145 se encuentra información adicional sobre este asunto.

2.3 Profundidad de penetración

De lo expuesto se desprende que las características eléctricas efectivas están determinadas por la amplitud de la penetración en el suelo del campo electromagnético, amplitud que se caracteriza por la profundidad de penetración indicada en la fig. 2 de la Recomendación 527. En la banda de ondas hectométricas, la profundidad de penetración es en condiciones típicas de 5 a 100 m. Por consiguiente, cualquier método de medición utilizado para determinar las características eléctricas efectivas debe emplear métodos radioeléctricos en la frecuencia apropiada o medir el suelo hasta una profundidad equivalente a la profundidad de penetración en la frecuencia que interesa.

3. Estimaciones de primer orden de la conductividad efectiva

Pueden obtenerse estimaciones iniciales de la conductividad efectiva en una región para la banda de ondas hectométricas a partir de los conocimientos sobre la estructura geológica y litológica de la región. Este método se basa en la asociación observada entre las conductividades efectivas de las ondas hectométricas determinadas en los Estados Unidos de América y el Canadá, y las propiedades estructurales del suelo [Barghausen y otros, 1966]. Puede utilizarse la fig. 1 para obtener tales estimaciones iniciales. También se han hallado asociaciones análogas entre la conductividad y la estructura en la Unión Soviética [Yakupov y otros, 1969] y en Noruega [Eliassen, 1957].

Dado que dichas estimaciones iniciales de la conductividad abarcan amplias gamas, las estimaciones de la intensidad de campo de la onda de superficie en la banda de ondas hectométricas, en las que se empleen valores de la conductividad de la parte media de la gama, tendrán una incertidumbre de ± 10 dB a distancias inferiores a 100 km. Sin embargo, esas estimaciones son útiles para calcular la cobertura de la radiodifusión cuando no se dispone de datos medidos y para planificar mediciones sobre el terreno de la conductividad efectiva. El *Mapa del suelo del mundo* de UNESCO-FAO es una valiosa fuente de datos geológicos y litológicos.

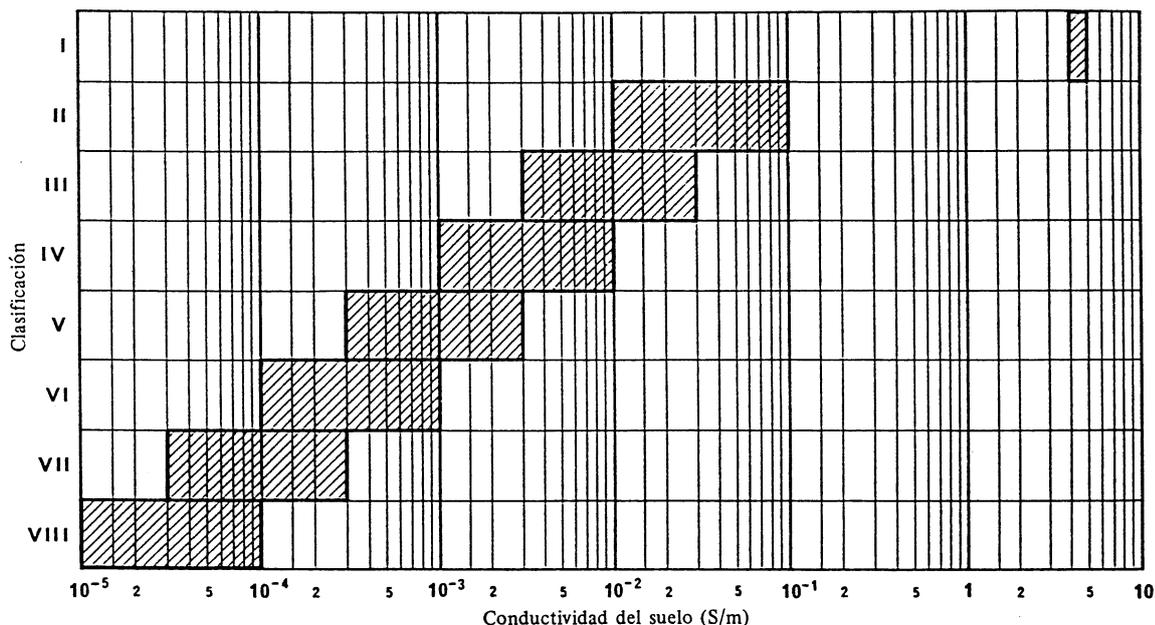


FIGURA 1 – Gamas previstas de conductividades efectivas del terreno

Clasificación	Descripción del terreno
I	Agua de mar*
II	Suelo muy húmedo; tierras cultivadas húmedas
III	Pantanos (agua dulce); tierras cultivadas
IV	Agua dulce; greda; país montañoso en climas templados
V	Terreno semiseco; rocas; arena; ciudades medianas
VI	Terreno seco; desiertos
VII	Terreno muy seco; montañas de granito en regiones frías; zonas industriales
VIII	Glaciares secos en zonas montañosas; suelo permanentemente helado; hielo polar; montañas rocosas elevadas en climas templados y fríos.

* En algunas zonas determinadas, por ejemplo en el Mar Báltico, la conductividad del agua salada puede ser mucho menor (véase el § 5 del Informe 229).

4. Medición sobre el terreno de las características eléctricas efectivas

En los puntos siguientes se examinarán el método de la inclinación de la onda y el método de la atenuación para medir las características eléctricas. Estos son los métodos preferidos para aplicaciones relativas a la propagación porque los resultados pueden relacionarse directamente con los valores efectivos necesarios para los cálculos de la intensidad de campo de la onda de superficie.

En terrenos homogéneos pueden utilizarse con facilidad tales métodos. El método de la inclinación de la onda exige la medición de tres cantidades en cada punto estudiado, pero las características eléctricas pueden derivarse directamente de tales datos. Por el contrario, el método de la atenuación requiere sólo una única medición de la intensidad de campo en cada punto estudiado, pero el análisis de los datos exige la comparación de una serie de puntos del terreno con las curvas teóricas de propagación de la onda de superficie.

Sin embargo, en el caso de un terreno no homogéneo puede resultar muy difícil la interpretación de los datos de medición. El problema surge a causa de los cambios bruscos de las intensidades de campo en el límite entre dos regiones de distinta conductividad; estos efectos de transición asociados a un límite tienden a disminuir al alejarse del transmisor; por ello se ha de cuidar de efectuar las mediciones a distancia suficiente del límite para establecer las condiciones de «estado constante» que son características del suelo, y no las condiciones de la zona limitrofe. Teniendo en cuenta que se conoce bien el comportamiento de los campos electromagnéticos en terrenos horizontalmente no homogéneos (Recomendación 368), se prefiere el método de la atenuación en tales situaciones. En cualquier caso, es muy importante efectuar mediciones en un número de puntos a lo largo de un trayecto radial a partir del transmisor, de modo que pueda identificarse con facilidad la transición a una región de distinta conductividad.

4.1 Método de la inclinación de la onda

4.1.1 Métodos de medición

El método de la inclinación de la onda ha sido revisado por King [1976], acompañando una bibliografía que abarca 40 años. Eliassen [1957] facilita asesoramiento práctico detallado sobre las técnicas de medición. El método se basa en el hecho de que, en una superficie de conductividad finita, el campo eléctrico producido por una fuente de polarización vertical tendrá una pequeña componente horizontal en la dirección de propagación. Por ello, el vector del campo eléctrico total experimenta una inclinación respecto a la vertical local, como se indica en la fig. 2. Dado que las componentes vertical, E_z , y horizontal, E_x , del campo no están en fase, el campo traza una elipse en el plano definido por la vertical y la dirección de propagación. Existe una relación simple entre las características eléctricas y las dos componentes del campo:

$$\epsilon_r = |E_z/E_x|^2 \cos 2\varphi \quad (1a)$$

$$\sigma/f = |E_z/E_x|^2 (\sen 2\varphi)/18\,000 \quad (1b)$$

donde φ es el ángulo de fase eléctrica entre las componentes del campo y f es la frecuencia de la onda de superficie expresada en MHz.

Sin embargo, en la práctica es muy difícil medir la componente horizontal, E_x , del campo porque en general es mucho más pequeña que la componente vertical, E_z . Una pequeña falta de alineación de la antena de medición introduce un importante error derivado de E_z . Además, la medición del ángulo de fase, φ , requiere un costoso equipo.

Un método corriente de medición de la inclinación de la onda consiste en utilizar un aparato medidor de la intensidad de campo conectado a un dipolo corto que puede girar alrededor de su centro sobre un eje normal a las componentes del campo. Entonces se miden las intensidades de campo máxima, E_1 , y mínima, E_2 , a medida que gira la antena, y se registra su relación $r = E_2/E_1$. Además, se registra también el ángulo de inclinación θ , que es el ángulo entre la vertical y la dirección de E_1 . Como sólo se precisa la relación de las componentes de la intensidad de campo, r , este método tiene la ventaja de que no se necesita utilizar una antena y un medidor de la intensidad de campo calibrados.

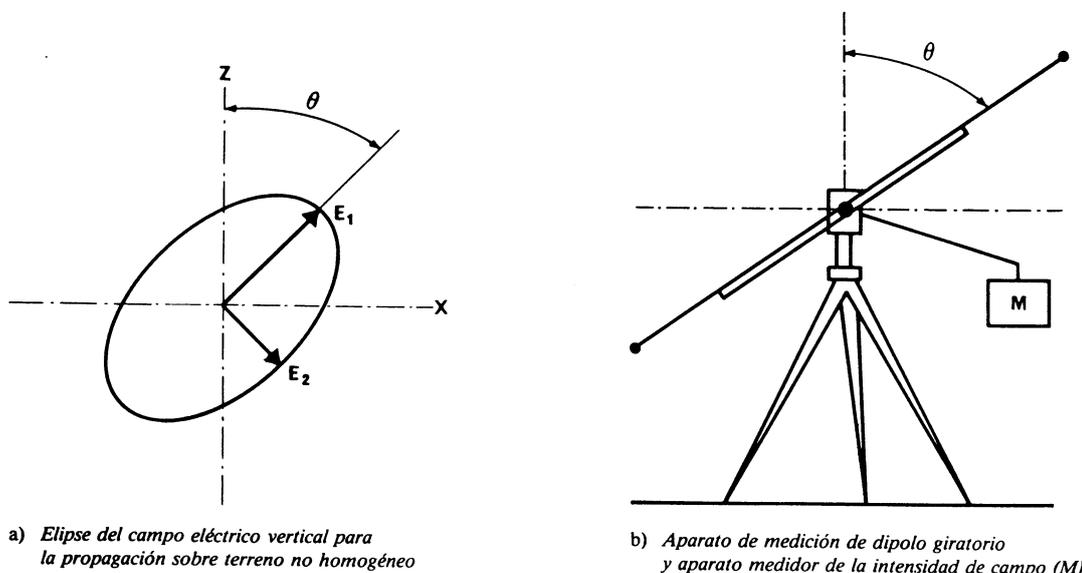


FIGURA 2

4.1.2 *Análisis de los datos sobre la inclinación de la onda*

Las variables de la ecuación (1) se relacionan con las cantidades medidas r y θ mediante la fórmula:

$$|E_x/E_z| = \sqrt{\frac{r^2 + \operatorname{tg}^2 \theta}{1 + r^2 \operatorname{tg}^2 \theta}} \quad (2a)$$

$$\cos 2\varphi = \frac{(1 - r^2) \operatorname{sen} 2\theta - 4r^2}{(1 - r^2) \operatorname{sen} 2\theta + 4r^2} \quad (2b)$$

Como alternativa al análisis numérico de los datos, las características eléctricas pueden obtenerse directamente de r y θ por medio de la fig. 3 [Eaton, 1976].

4.1.3 *Precisión de las mediciones de la inclinación de la onda*

El rectángulo sombreado A de la fig. 3 corresponde a un error de medición de $\pm 1^\circ$ en el ángulo de inclinación y de ± 1 dB en la relación axial. Puede deducirse de la figura que la precisión de determinación de la conductividad efectiva depende principalmente de la precisión con que se mide el ángulo de inclinación de la onda. Asimismo, la precisión de la permitividad efectiva guarda estrecha relación con la exactitud de la relación axial. Para los fines de las telecomunicaciones, el efecto de este error experimental debe evaluarse más a fondo en función de la incertidumbre que introduce en los cálculos de la intensidad de campo.

Si bien el método de la inclinación de la onda da valores para las características eléctricas obtenidos con la medición en un solo punto, importa tener en cuenta que el estudio de una zona comprende una serie de mediciones efectuadas a lo largo de la línea radial procedente del origen del campo. Ello se necesita para que puedan identificarse las transiciones de una región con una serie de características eléctricas a otra región con distintas constantes del suelo. Sobre un terreno homogéneo, el ángulo de inclinación y la relación axial serán independientes de la distancia a la fuente, suponiendo que las mediciones se efectúan a una distancia superior a varias longitudes de onda. En el caso de trayectos no homogéneos, el ángulo de inclinación y la relación axial variarán bruscamente en la frontera de la conductividad. Los valores cambiarán entonces lentamente con arreglo a la distancia radial hasta que se alcancen los valores finales que son típicos de la nueva región [Blomquist, 1975]. Estas distancias pueden ser muy largas. Si se encuentra una tercera región de conductividad antes de haber establecido los nuevos valores de equilibrio, la interpretación de los datos sobre la inclinación de la onda puede resultar muy difícil [Stokke, 1978].

Sin embargo, si se tienen en cuenta estas limitaciones, el método de la inclinación de la onda arroja resultados satisfactorios. Las mediciones efectuadas en la República Federal de Alemania indican una muy buena concordancia entre los valores medidos y los valores calculados por el método de Millington, cuando se utiliza el método de la inclinación de la onda para medir la conductividad del suelo [Damboldt, 1981].

4.2 *El método de la atenuación*

El método de la atenuación para medir las características eléctricas efectivas consiste en efectuar mediciones de la intensidad de campo a lo largo de una línea radial que parte de una antena transmisora de polarización vertical, y en comparar los datos experimentales con curvas teóricas tales como las halladas en la Recomendación 368. Si las curvas coinciden, las constantes efectivas del suelo a lo largo de la línea radial son iguales a las utilizadas para calcular las curvas teóricas.

4.2.1 *Métodos de medición*

En el Informe 227 se describen métodos generales de medición de las intensidades de campo. Es importante que ésta se efectúe en un número suficiente de puntos a lo largo de la línea radial para que pueda obtenerse una curva experimental suave y para que se reconozcan los cambios rápidos en la pendiente de la curva. Este último punto es importante para identificar el límite entre regiones de distinta conductividad en trayectos no homogéneos. Un problema práctico planteado por el método de la atenuación consiste en hallar un número suficiente de vías de tráfico o de otros accesos que lleven a los puntos situados a lo largo de un trayecto radial dado.

En Finlandia se ha empleado con éxito una técnica moderna para efectuar mediciones por el método de la atenuación [Laiho, 1976; Koskenniemi y Laiho, 1975]. El aparato de medición de la intensidad de campo se lleva en una pequeña aeronave, como un helicóptero o un aeroplano ligero, con la antena de medición montada en el exterior de la aeronave. La intensidad de campo y los datos de navegación pueden registrarse continuamente a medida que la aeronave vuela a lo largo de un trayecto radial utilizando un registrador de gráfica en banda. Las mediciones de este tipo suelen ser muy económicas porque puede cubrirse una amplia zona en unas pocas horas de vuelo utilizando sólo un piloto y un navegador-operador del equipo.

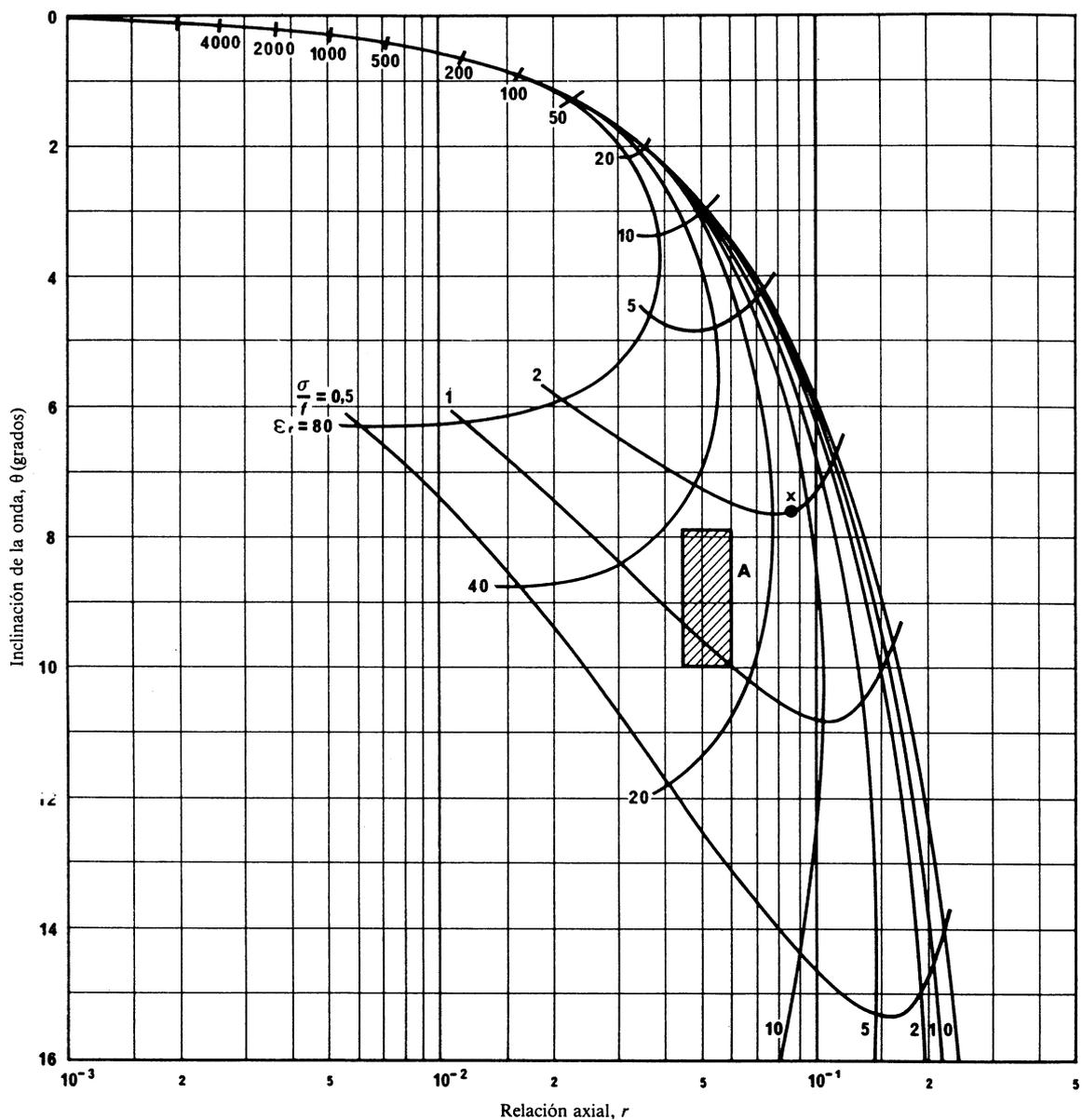


FIGURA 3 – Relación entre el ángulo de la inclinación de la onda (θ), la relación axial de la elipse (r) y las características eléctricas del suelo

(La conductividad, σ , está expresada en mS/m y f es la frecuencia utilizada en la medición en MHz)

La altitud a la que se efectúan estas mediciones desde aeronave es importante debido a las consideraciones referentes a la ganancia de altura. La mayoría de las curvas teóricas de la onda de superficie se calculan para ambos terminales en la superficie. Si el terminal receptor está elevado, el campo medido será superior al valor en la superficie a causa del efecto de la ganancia de altura. Los datos medidos no pueden corregirse con respecto a la ganancia de altura porque ello exige un conocimiento de las constantes del suelo. Sin embargo, Laiho [1976] estima que la ganancia de altura es inferior a 1 dB para las frecuencias inferiores a 1400 kHz y las alturas menores de 100 m. Esto sugiere que las mediciones de la conductividad efectiva en ondas hectométricas efectuadas con una aeronave deben hacerse utilizando el transmisor de frecuencia mínima disponible y a la menor altura compatible con la seguridad en el vuelo.

4.2.2 Análisis de los datos obtenidos con el método de la atenuación

Las curvas teóricas tales como las halladas en la Recomendación 368 se han calculado para una potencia radiada de referencia supuesta; por ello, los datos medidos deben normalizarse con respecto a esta referencia. Si se utilizan las curvas de la Recomendación 368, basadas en una potencia radiada aparente de un monopolo (p.r.a.m.) de 1 kW, debe añadirse un factor de $20 \log p_{ap}$ a los datos medidos en dB(μ V/m) antes del análisis. p_{ap} es la potencia radiada aparente del transmisor utilizado en la medición. Si no se conoce esta potencia, se sugiere [Laiho, 1976 y Gregorač y Budin, 1976] que se compare la pendiente de la curva experimental con las curvas teóricas para distancias cercanas al transmisor. Entonces, tomando las intensidades de campo, E_r , medidas en n puntos a lo largo de un trayecto radial y los valores calculados en esas mismas distancias, A_{sr} , que corresponden a la curva de conductividad cuya pendiente se ajusta a los datos medidos, se puede determinar la potencia radiada aparente a partir de la siguiente ecuación:

$$p_{ap}^{1/2} = \left(\sum_{r=1}^n A_{sr} E_r \right) / \sum_{r=1}^n A_{sr}^2 \quad (3)$$

y determinar la conductividad media en las cercanías del transmisor.

Este método de análisis de datos puede utilizarse con gran facilidad en trayectos homogéneos. En los trayectos no homogéneos, el análisis resulta muy difícil cuando hay más de un cambio de la conductividad a lo largo del trayecto radial. En el caso de las mediciones efectuadas en Finlandia antes citadas [Laiho, 1976], el análisis se efectuó utilizando un computador digital para efectuar cálculos teóricos en trayectos mixtos utilizando el método de Millington (Recomendación 368), aplicando el procedimiento de ajuste de la curva de los mínimos cuadrados. En Yugoslavia [Gregorač y Budin, 1976] se ha utilizado un procedimiento casi idéntico. Con posterioridad se ha concebido un procedimiento perfeccionado [Grosskopf, 1981] que se vale de un procedimiento numérico especial de optimización para salvar esas dificultades.

La fig. 4 ilustra las dificultades con que se tropieza para analizar datos de un trayecto mixto; esta figura procede del trabajo de Stokke [1975] de desarrollo de un método gráfico para calcular la pérdida de transmisión de la onda de superficie, que se halla en el anexo II a la Recomendación 368. La figura muestra el caso simple de un campo eléctrico en un trayecto que tiene un cambio de conductividad a la distancia d_1 del transmisor.

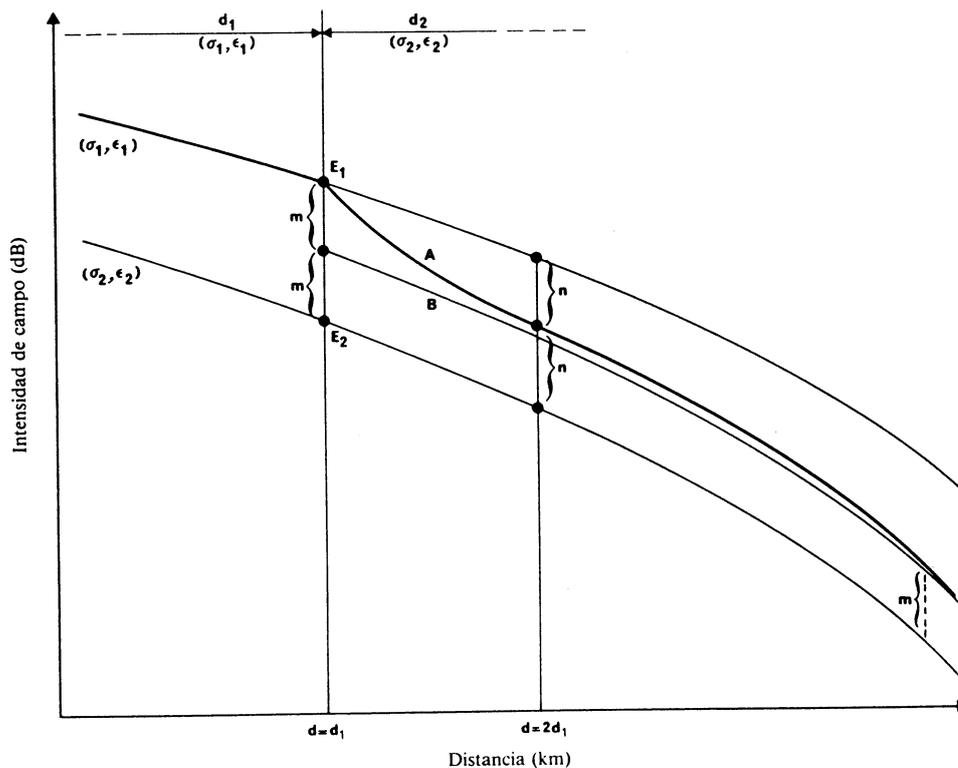


FIGURA 4 - Comportamiento del campo eléctrico cerca del límite entre regiones de distintas características eléctricas efectivas del suelo

Obsérvese que, cuando la conductividad varía de un valor a otro valor inferior, la curva de intensidad de campo, pasa por el valor medio entre las dos curvas de tierra homogénea a la distancia $d = 2 d_1$, y se aproxima a un valor que es paralelo a la curva de tierra homogénea inferior. Esta asíntota está situada por encima de un valor igual a la semidiferencia en dB entre las dos curvas en $d = d_1$.

Puede encontrarse en [Stokke, 1978, 1984] una descripción detallada de cómo pueden interpretarse las mediciones de intensidad de campo, especialmente cuando hay muchos cambios en la conductividad.

Si no se dispone de los recursos de un computador o no resultan económicos, entonces debe trazarse un mapa de conductividad utilizando datos de una serie de transmisores. Se emplean los datos de cada transmisor para definir los límites de las regiones homogéneas emplazadas alrededor de cada transmisor.

4.2.3 Precisión del método de la atenuación

Las mediciones de la intensidad de campo en la banda de ondas hectométricas pueden efectuarse en general con una precisión de ± 2 dB, lo que implica un error de análisis de ± 2 dB en la conductividad sobre un terreno homogéneo para la banda de ondas hectométricas, como puede observarse en las figuras de la Recomendación 368. Se introducirán errores adicionales en los cálculos de la conductividad en trayectos mixtos por los motivos antes examinados. Las irregularidades del terreno producirán más errores si la altura del terreno por encima del valor medio a lo largo del trayecto es muy superior a una longitud de onda. Las pequeñas irregularidades del terreno provocarán una conductividad efectiva inferior a la que se mediría en un terreno liso que tuviera la misma estructura del suelo [Barrick, 1971].

Además, los resultados se aplicarán únicamente al trayecto particular utilizado, o a uno muy similar. El método no es adecuado para mediciones detalladas de características eléctricas sobre pequeñas áreas determinadas.

5. Otros métodos

Entre otros métodos ensayados para fines de telecomunicación, se puede identificar el de la medida de la impedancia de entrada de una antena. Este método se basa en el hecho de que las características eléctricas del suelo pueden deducirse de las mediciones de la impedancia de entrada de la antena. Estas mediciones pueden realizarse para antenas situadas debajo, sobre, o justo encima de la superficie de la Tierra. Algunas mediciones de laboratorio [Iizuka, 1964], y recientes investigaciones teóricas [Popovič y Gavrilov, 1976], indican la posibilidad de deducir las características eléctricas del suelo a partir de mediciones de la impedancia de una antena cilíndrica (o de cinta equivalente), con las antenas fijas sobre el interfaz tierra-aire. Al aplicar este método, debería prestarse una especial atención al alineamiento del eje de la antena exactamente en el interfaz. La ventaja consiste en que ya no es necesario hundirla.

Existen algunos otros métodos para medir la conductividad o la constante dieléctrica de la superficie del suelo, varios de los cuales están descritos en el Informe 229. Pueden encontrarse descripciones generales de tales métodos, con amplias bibliografías, en una revisión efectuada por Lytle [1974] y en IEEE [1974].

Tales métodos no suelen ser apropiados para la planificación de la radiodifusión. Muchos están destinados a trabajos de exploración geofísica y no pueden aplicarse económicamente al establecimiento de mapas de las constantes del suelo en amplias zonas. Otros métodos dan valores de las constantes eléctricas del suelo que son difíciles de relacionar con los valores efectivos que han de emplearse para los cálculos de la pérdida de propagación por la onda de superficie. Por este motivo se prefieren los métodos de la atenuación o de la inclinación de la onda.

Sin embargo, los métodos de sondeo pueden ser útiles al planificar instalaciones de antena. Es útil conocer en detalle la conductividad del suelo alrededor del emplazamiento propuesto de una antena para ondas decamétricas en el momento de determinar los requisitos de un sistema de apantallamiento del suelo que aumente al máximo la eficiencia de la antena. Al efectuar tales mediciones, las separaciones del sondeo deben ajustarse de modo que las mediciones den la conductividad efectiva [Grant y West, 1965] de una capa igual en profundidad a la profundidad de penetración de la frecuencia que interesa.

6. Resultados de las mediciones

La medición real sobre el terreno de las características eléctricas efectivas presentará una variación significativa en los resultados a causa de distintos factores que influyen en los valores efectivos. El mapa de la conductividad efectiva de las ondas hectométricas en los Estados Unidos de América [Fine, 1954] se elaboró a partir de datos obtenidos con el método de la atenuación; se analizaron por métodos manuales los datos procedentes de más de 7000 mediciones radiales en las que se emplearon 621 estaciones de radiodifusión por

ondas hectométricas. La conductividad efectiva muestra por lo menos un factor de dos variaciones para distintos trayectos radiales alrededor de cada transmisor, incluso en trayectos que son geográficamente análogos. En Finlandia, la reducción de los datos con la ayuda de un computador con correcciones para trayectos mixtos [Laiho, 1976], dio un mapa de mayor resolución con menos datos. Los resultados generales de esta experiencia sugieren que los cálculos de la intensidad de campo de las ondas hectométricas utilizando determinaciones en terreno liso homogéneo tendrán una incertidumbre de 5 dB asociada a los errores en los datos de la conductividad del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W. y FISHER, R. M. [1966] Radio broadcasting on medium frequencies. NBS Rep. 9196, Accession No. PB 269533, National Technical Information Service, Springfield, Va., Estados Unidos de América.
- BARRICK, D. E. [1971] Theory of HF and VHF propagation across the rough sea. *Radio Sci.* Vol. 6, 5, 517-526.
- BLOMQUIST, Å. [1975] Seasonal effects on ground-wave propagation in cold regions. *J. Glaciology*, Vol. 15, 73.
- DAMBOLDT, T. [13-16 de abril de 1981] HF ground-wave field-strength measurements on mixed land-sea paths. IEE Second International Conference on Antennas and Propagation. Heslington, York, Reino Unido.
- EATON, J. L. [1976] The wave-tilt method of measuring electrical ground constants in the LF and MF bands. BBC Rep. RD 1976/15, UDC 621.396.673.
- ELIASSEN, K. E. [1957] A survey of ground conductivity and dielectric constant in Norway within the frequency range 0.2-10 Mc/s. *Geofysiske Publikasjoner*, Vol. 19, 11.
- FINE, H. [septiembre de 1954] An effective ground conductivity map for the continental United States. *Proc. IRE*, Vol. 42, 9, 1405-1408.
- GRANT, F. S. y WEST, G. F. [1965] *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw-Hill, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- GREGORAČ, L. y BUDIN, J. [junio de 1976] Calculation of the efficiency of an MF transmitting aerial and of the average soil conductivity in its immediate vicinity. *EBU Rev. Tech.*, 157.
- GROSSKOPF, R. [1981] Eine verbesserte Methode zur Berechnung des Wirkungsgrades und der Leitfähigkeiten in der näheren Umgebung einer Mittelwellensendeantenne (Un método mejorado para calcular la eficacia y las conductividades del suelo en las inmediaciones próximas de una antena que transmite en la Bm). *Rundfunktechn. Mitt.*, Vol. 25, 2.
- HANLE, E. [1966] The complex impedance of the earth's surface at radio frequencies and its measurement. *NTZ-Comm. J.*, Vol. 3, 136-143.
- IEEE [1974] *IEEE Guide for Radio Methods of Measuring Earth Conductivity*. IEEE Standard 356-1974.
- IIZUKA, K. [enero de 1964] An experimental investigation on the behaviour of the dipole antenna near the interface between the conducting medium and free space. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-12, 27-35.
- JOHLER, J. R. y HOROWITZ, S. [1974] Propagation of a Loran pulse over irregular inhomogeneous ground. AGARD Conf. Proc. No. 144, 28-1 a 28-13, SHAPE Technical Centre, La Haya, Países Bajos.
- KING, R. J. [1976] Wave-tilt measurements. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-24, 115-119.
- KOSKENNIEMI, O. y LAIHO, J. K. [octubre de 1975] Measurements of the effective ground conductivity at low and medium frequencies in Finland. *EBU Rev. Tech.*, 153, 237-240.
- LAIHO, J. K. [1976] Measurement of the effective ground conductivity in Finland. *SÄHKÖ* (Electricity in Finland), Vol. 49, 509-512.
- LYTLE, R. J. [1974] Measurement of earth medium electrical characteristics: techniques, results and applications. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, Vol. GE-12, 81-101.
- POPOVIČ, B. D. y GAVRILOV, T. [1976] A simple method for analysis of cylindrical antennae at the interface between two media. *Radio Electron. Engr.*, Vol. 46, 553-554.
- STOKKE, K. N. [1975] Consideraciones gráficas sobre el método de Millington para el cálculo de la intensidad de campo sobre un suelo heterogéneo. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 42, III, 157-163.
- STOKKE, K. N. [junio de 1978] Problems concerning the measurement of ground conductivity. *EBU Rev. Tech.*, 169, 106-111.
- STOKKE, K. N. [noviembre de 1984] Mediciones de la conductividad del suelo. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 51, XI, 611-613.
- WAIT, J. R. [1970] *Electromagnetic Waves in Stratified Media* (2.^a edición). Pergamon Press, MacMillan, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- YAKUPOV, U. S., BYALOBZKESKIY, S. G., GASSANOV, SH. SH., IZMAYLOV, L. I. y ALPSHIN, G. U. [1969] Maps of the electric conductivity of rocks in the permafrost zone of the northeastern part of the USSR. *Acad. Sci. U.S.S.R. Izvestia Phys. (Solid Earth)*, 8, 537.