

Determinación de la conductividad eléctrica de los suelos de la República de Cuba

Armando Pascual, Omar Delgado y Nelson Fuentes
Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, Cuba.

Recibido: 9 agosto, 1993; aceptado: 9 septiembre, 1994.

RESUMEN

Se presenta un mapa de la conductividad eléctrica de la República de Cuba a escala 1: 500 000, a partir del mapa preliminar confeccionado teniendo en cuenta las mediciones de cubrimiento de los transmisores de onda media realizado por el ICRT y el MINCOM, y una campaña de mediciones de la intensidad del campo realizado a lo largo de todo el país. Para la realización de las mediciones y la elaboración de las mismas se utilizó un método experimental simplificado, que permitió un uso óptimo de toda la información disponible. Finalmente se realiza un análisis del mapa de acuerdo con los tipos de suelos y el relieve del terreno.

PALABRAS CLAVE: Conductividad eléctrica equivalente, tipo genético de suelos, atenuación del campo, ondas de radio.

ABSTRACT

The electric conductivity map of Cuba on a 1: 500 000 scale is presented. Estimates are based on the preliminary mapping of medium wave transmitter measurements and electromagnetic field strength measurements covering the whole country.

KEY WORDS: Equivalent electrical conductivity, genetic type of soil, field attenuation, radio waves.

INTRODUCCION

El conocimiento de la conductividad eléctrica es necesario para la planificación del desarrollo de la radiodifusión en ondas medias (540-1700 kHz). En Cuba se presentan dificultades para la elaboración de un mapa nacional de la conductividad eléctrica aparente o equivalente de los suelos por lo costoso de su realización. Este problema es particularmente importante debido a la cantidad de transmisores instalados y los que se prevé adquirir por el Ministerio de Comunicaciones (MICOM), por lo que se hace necesario planificar sobre bases objetivas el área de cobertura de los servicios que se quieren modificar o instalar. El Comité Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR), del cual Cuba es miembro, ha planteado la necesidad de tener en cuenta la conductividad eléctrica del terreno en la planificación regional de los servicios (CCIR, 1982a).

Muchos países han preparado mapas de la conductividad eléctrica basándose en las características geológicas y litológicas para asignar valores de conductividad, lo que en la práctica puede conducir a errores significativos (Fernández, 1975).

El objetivo principal de este trabajo es la obtención del mapa de la conductividad eléctrica equivalente de la República de Cuba a escala 1: 500 000.

La conductividad depende de la naturaleza del medio en que se transmite la onda, la humedad del terreno, la vegetación y el relieve existente entre el transmisor y el punto de medición. En este trabajo se analizarán de forma muy general los valores de la conductividad eléctrica equivalente obtenidos y su correspondencia con el tipo genético de suelo y el relieve.

MATERIALES Y METODOS

Existen varios métodos para medir la conductividad eléctrica de la superficie de la Tierra (Lytle, 1974; IEEE,

1974; Keller y Frischknecht, 1966). Tales métodos no suelen ser apropiados para la planificación de la radiodifusión, ya que están destinados a trabajos de exploración geofísica y no pueden ser aplicados económicamente al establecimiento de mapas en amplias zonas. Para el problema que nos ocupa, son recomendados a nivel internacional dos métodos que utilizan ondas de radio para la determinación de la conductividad eléctrica equivalente. Estos son: el método de atenuación del campo (MAC), el cual consiste en estudiar cómo se atenúan las ondas de radio al propagarse sobre el suelo (Lytle, 1974; Fernández, 1975; Keller y Frischknecht, 1966; Mazzard, 1975), y el método de inclinación de la onda, que se basa en determinar la inclinación que experimenta el campo eléctrico total con respecto a la vertical local al propagarse por el medio (King, 1976; Eliassen, 1957; Stokken, 1978; CCIR, 1982b Kashprovskii y Kuzubov, 1971). De ambos métodos el más conveniente para realizar una campaña de mediciones efectiva y económica es el MAC (Pascual *et al.*, 1989).

El algoritmo utilizado (Kashprovskii y Kuzubov, 1971) parte de la expresión para la intensidad del campo generada por transmisor. En este caso, las antenas transmisoras utilizadas eran del tipo dipolo vertical, que son las empleadas por la radiodifusión en ondas medias:

$$E = \frac{300 \sqrt{P}}{R} W(R, \lambda, \sigma_{eq}) \quad (1)$$

donde: E - intensidad de la componente vertical del campo a la distancia R del transmisor medida en mV/m.

P - potencia del transmisor en Kw.

W - función de atenuación (adimensional).

λ - longitud de onda de la señal transmitida en kilómetros.

σ_{eq} - conductividad eléctrica equivalente del suelo en mS/m.

R - distancia entre el punto de recepción y el transmisor en Km.

Para el caso de una onda que se propague sobre un terreno plano y homogéneo se puede obtener una expresión aproximada de la conductividad eléctrica equivalente:

$$\sigma_{eq} = 52.36 * 10^3 \frac{R}{\lambda^2 \rho}, \quad (2)$$

donde necesitamos conocer el parámetro adimensional ρ para determinar la conductividad eléctrica equivalente. Este parámetro puede obtenerse de forma sencilla utilizando la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{(0.3 - W) + \sqrt{0.09 + 4.2W - 3.2W^2}}{1.2 * W} \quad (3)$$

Para determinar W en cada punto medido sólo es necesario medir la intensidad de campo a la distancia de 1 km, donde W se puede considerar igual a la unidad, ya que prácticamente la onda no sufre atenuación.

Al medir varias veces a lo largo de un radial, de forma que tengamos $n + 1$ pares de valores E_i, R_i (donde $i = 0, \dots, n$) utilizando a (1) y dividiendo por esta misma expresión para la medición que denominaremos de referencia (E_0, R_0), tendremos:

$$\begin{aligned} \frac{E_1 R_1}{E_0 R_0} &= \frac{W_1}{W_0} \\ &\vdots \\ \frac{E_i R_i}{E_0 R_0} &= \frac{W_i}{W_0} \\ &\vdots \\ \frac{E_{n-1} R_{n-1}}{E_0 R_0} &= \frac{W_{n-1}}{W_0} \\ \frac{E_n R_n}{E_0 R_0} &= \frac{W_n}{W_0} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde W_0, \dots, W_n es la función de atenuación obtenida en cada punto. Si suponemos que el punto de referencia en el que medimos [E_0, R_0] se encuentra tan cerca del transmisor como para que W_0 se aproxime a la unidad (por ejemplo para $\rho = 0.35, W = 0.97, W_0$ difiere de la unidad en un 3%). Por lo cual, si se toma una distancia R_0 para la cual se cumpla $\rho < 0.35$, se puede considerar $W_0 = 1$ y determinar así la función de atenuación en los demás puntos.

$$W_i = \frac{E_i R_i}{E_0 R_0} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Denominaremos R_{max} aquella distancia para la cual se cumple $\rho = 0.05$. Es fácil demostrar de (2) que $R_{max} = \lambda^2 \sigma$. Mientras más cerca nos encontremos del transmisor, el error en considerar W_0 igual a la unidad será menor. Sin embargo si nos acercamos demasiado W_0 puede ser mayor que la unidad ya que se estaría midiendo, además de la componente radiada, la componente inducida y la estática por lo que la fórmula (1) no se podría utilizar. Esto se evita teniendo en cuenta un $R_{min} = 1.5\lambda$ que garantice que el campo medido sea puramente radiado (Kashprovskii y Kuzu-

bov, 1971). Cuando se toma el primer punto bajo las siguientes condiciones: $1.5\lambda \leq R_0 \leq \lambda^2 \sigma$, se puede considerar W_0 igual a la unidad y utilizar el algoritmo indicado. En la práctica, para la mayoría de los transmisores utilizados, esta condición se cumple a la distancia de 1 km y (5) queda entonces simplificado:

$$W_i = \frac{E_i R_i}{E_0} \quad (6)$$

Esto se conoce con el nombre de Método Simplificado (Mazzaro, 1975) y fue programado en ordenador personal logrando homogenizar los valores de la conductividad por rangos (Tabla 1), partiendo del comportamiento de la conductividad y la dispersión de éstos (Fine, 1954).

Tabla 1

Valores de la conductividad eléctrica equivalente y su dispersión. En los intervalos el extremo superior es abierto.

VALOR DE σ (mS/m), ASIGNADO AL RANGO	RANGO DE VALORES DE σ (mS/m)
0.5	0-0.707
1	0.707-2.5
3	2.5-4.5
5	4.5-6.5
7	6.5-8.5
10	8.5-11.5
15	11.5-20
30	20-40

La elaboración de los datos según el algoritmo planteado tiene ventaja respecto al método gráfico (Stokke, 1975). Aún cuando tengamos pocos puntos y que no estén ubicados a lo largo de un radial, la información puede ser elaborada y valorada para ser utilizada en la confección del mapa. Sin embargo, cuando existe cambio de conductividad no debe ser aplicado.

En la práctica se midieron diferentes transmisores simultáneamente; cuando existe un cambio de conductividad se comienza a interpretar respecto a otro transmisor ubicada en un lugar diferente.

En cada punto del radial (Figura 1), la medición se realiza con respecto a los dos transmisores (del Punto 1 al Punto n). Una vez calculada la conductividad eléctrica y detectado el cambio de la misma, la interpretación de los resultados a partir del punto $i+1$ se hará tomando en cuenta las mediciones realizadas respecto al transmisor T_{x2} mientras que para los puntos anteriores se tomará en consideración las mediciones realizadas a partir del transmisor T_{x1} .

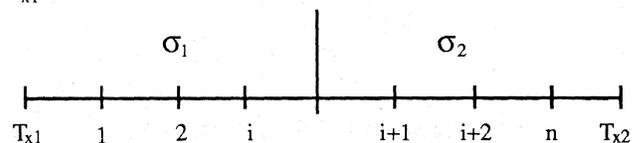


Fig. 1. Radial medido con respecto a dos transmisores. T_{x1} es el transmisor que se enlaza con el transmisor T_{x2} .

Se midió respecto a todos los transmisores existentes en cada provincia. En la mayoría de los casos la información fue comprobada en más de un transmisor, lo que disminuyó el error de interpretación considerablemente.

El error en W_i está supeditado al error con que se ubique el punto. Si tenemos en cuenta que los puntos de medición fueron seleccionados, entre otros factores, por su fácil ubicación en el terreno, el error en el cálculo de W_i no superó por regla general el 5%.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los factores más conocidos que influyen en el valor de la conductividad eléctrica del suelo son: el tipo de suelo, el relieve, la vegetación, la estructura geológica, y objetos presentes sobre la superficie de la tierra. En cuanto al tipo de suelo, es probable que la variación no esté relacionada a su composición química, sino a sus propiedades de absorción y retención de la humedad, ya que un aumento de la humedad provoca un incremento de la conductividad del suelo. La variación de la temperatura del suelo sólo influye para el caso de frecuencias mucho más elevadas que las que nos ocupan en este trabajo (Romero, 1975). La absorción de la energía por el relieve provoca una disminución del valor de la conductividad eléctrica equivalente, lo que es más significativo en el caso de zonas montañosas (Kashprovskii y Kuzubov, 1971).

Esto ha sido comprobado en trabajos experimentales, en los cuales se estimaron valores de la conductividad eléctrica equivalente con buena precisión, considerando sólo la conductividad eléctrica intrínseca del suelo (dada por tipo de suelo) y el relieve (Delgado *et al.*, 1989).

El mapa se muestra en la Figura 2. Se comparó este con el mapa de tipos de relieve que se muestra en la Figura 3 (Nuevo Atlas de la República de Cuba, 1989).

Podemos observar que los valores altos de la conductividad están asociados generalmente a llanuras donde existe un drenaje deficiente, debido a que en estos suelos se formaron sedimentos arcillosos y arcillo-limosos sustentados por arcillas impermeables que condicionan una lenta evacuación de las aguas. Estos tipos de suelo son muy húmedos por regla general.

En las alturas y zonas montañosas juega un papel predominante el relieve en la aparición de valores bajos de la conductividad. Los suelos son muy erosionados y poco potentes, y los valores van a estar determinados por las rocas de baja conductividad que los sustentan.

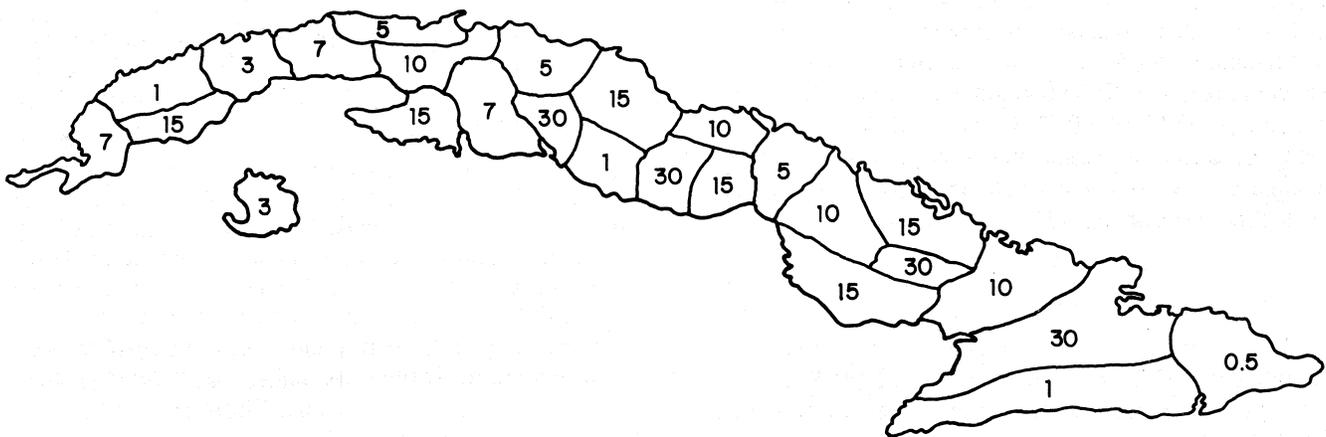
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El mapa de conductividad eléctrica equivalente obtenido mediante mediciones sistemáticas a lo largo de Cuba concuerda con los valores esperados de acuerdo con la distribución de los tipos de suelos y las características topográficas del relieve.

En ocasiones se observaron zonas en que el comportamiento de la conductividad eléctrica equivalente no se podía explicar a partir de estos dos factores; en estos casos se manifiesta la influencia de embalses, presas, poblados y otros factores locales.

En un suelo homogéneo el valor de la permitividad ejerce escasa influencia sobre la pérdida de transmisión en ondas de superficie para esta gama de frecuencias (CCIR, 1982 a). Sin embargo, en el caso de un suelo con capas estratificadas horizontalmente, la permitividad equivalente puede tomar valores muy amplios y debe tenerse en cuenta en los cálculos (Eliassen, 1957; Wait, 1970).

Las variaciones estacionales no afectan mayormente los resultados de este mapa. La humedad del suelo es uno de los factores que más influye, pero en un punto determi-



Los valores están dados en mS/m .

Fig. 2. Mapa de la conductividad eléctrica equivalente.



Fig. 3. Mapa de tipos de relieve.

nado del terreno no existe una variación marcada de la humedad a lo largo del año; las diferencias están determinadas por cambios en cuanto al tipo genético del suelo y/o de la estructura geológica de la región.

Se recomienda el uso oficial del mapa obtenido para la planificación de los servicios de radiodifusión u otros sistemas radioeléctricos que requieran un conocimiento de la conductividad eléctrica.

En un futuro, cuando se realicen nuevas mediciones de intensidad del campo, se recomienda que esta información se incorpore para la confección de mapas a escala 1: 250 000 de las provincias que aún no lo poseen y la corrección, en caso que sea necesario, de los mapas obtenidos.

BIBLIOGRAFIA

- CCIR, 1982a. Atlas mundial de la conductividad del suelo, informe 717. Asamblea Plenaria, Ginebra, 5 pp.
- CCIR, 1982b. Método para calcular las características eléctricas efectivas de la superficie de la Tierra. Informe AA 15 (MODF).
- DELGADO, O., A. PASCUAL, N. FUENTES y L. ITURRIAGA, (1989). Estimación de la conductividad eléctrica equivalente a partir del comportamiento de la conductividad eléctrica efectiva y la corrección topográfica. *Rev. Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 10, 10 pp.
- EATON, J. L., 1976. The wave-tilt method of measuring electrical ground constants in the lf and mf bands. *BBC Rep RD 115*.
- ELIASSEN, K. E., 1957. A survey of ground conductivity and dielectric constant in Norway within the frequency range 0.2-10 MHz. *Geofysiske Publikasjoner*, 19, N. 11.
- FERNANDEZ, M. Q., 1975. La carta de la conductividad eléctrica del terreno de la República Mexicana. (UIT/PNUD). Reunión Regional de Trabajo Sobre Relevamiento de Datos de la Conductividad del Suelo y Ruido Radioeléctrico.
- FINE, H., 1957. An effective ground conductivity map for the continental United States. *Proc-IRE*, 42, 1405.
- IEEE, 1974. IEEE guide for radio methods of measuring earth conductivity.
- KASHPROVSKII, V. E. y F. A. KUZUBOV. Propagación de las ondas medias sobre la superficie de la Tierra. Ed. Comunicación, Moscú.
- KING, R. J., 1976. Wave-tilt measurements. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AO-24, 115-119.
- KELLER, G.V. y F.C. FRISCHKNECHT, 1966. Electrical methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, New York.
- LYTLE, R. J., 1974. Measurement of earth medium electrical characteristics: techniques, results and applications. *IEEE Trans. Geoscience Electron.*, G5-12, 22 pp.
- MAZZARO, N., 1975. Gound conductivity, its influence on the range of medium-wave broadcasting and methods of measuring it.
- NUEVO ATLAS DE LA REPUBLICA DE CUBA, 1989. Ed. A.C.C., 153 pp.

- PASCUAL, A., O. DELGADO y N. FUENTES., 1989. Experiencias en la determinación de los parámetros eléctricos del suelo a partir del método de inclinación de la onda. *Rev. Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 17, 10 pp.
- STOKKE, K. N., 1975. Consideraciones gráficas sobre el método de Nillington para el cálculo de la intensidad del campo sobre un terreno heterogéneo.
- STOKKE, K. N., 1978. Problems concerning the measurement of ground conductivity. *E.B.U. Rev. (Technical)*, 169, pp.
- WAIT, J. R., 1970. *Electromagnetic waves in stratified media. (2d Edition)*. Pergamon Press, MacMillan, Nueva York.

Armando Pascual, Omar Delgado y Nelson Fuentes
Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 # 2906 entre 29 y 31, Rpto. "La Coronela". La Lisa. C. de la Habana. Cuba.

