

La ionización de los suelos y las corrientes de los rayos a tierra

Cuando un rayo cae a tierra a través de una estructura puesta a tierra o bien directamente a campo abierto, su corriente impulsiva ioniza el suelo circundante al electrodo de puesta a tierra o al punto de impacto del rayo en la superficie del suelo. En esta nota, los autores presentan la física básica de este fenómeno físico, y algunas de sus consecuencias prácticas

Por Juan Carlos Arcioni y Jorge Francisco Giménez

Introducción

El suelo y los sistemas de puesta a tierra

En los sistemas de puesta a tierra (SPAT), la dispersión por el suelo de las corrientes eléctricas alternas de un cortocircuito a tierra (a la frecuencia del sistema o red eléctrica de 50 o de 60 Hz) produce fenómenos físicos que son distintos de los que ocurren cuando por el sistema de puesta a tierra (redes de mallas o jabalinas) se dispersan por el suelo. Las corrientes impulsivas de los rayos a tierra que producen las descargas eléctricas atmosféricas entre las nubes y la tierra durante las tormentas eléctricas (truenos, relámpagos, rayos, centellas), tal como lo describimos en el siguiente apartado, a continuación de esta introducción.

La diferencia esencial entre las corrientes eléctricas alternas a 50 o 60 Hz y las corrientes impulsivas $i = f(t, I_{máx}; t_1; t_2)$ es que las corrientes impulsivas pueden ionizar el suelo cuando se dispersan mediante uno o más electrodos (jabalinas, mallas, etc.) durante la conducción a tierra de la corriente de los rayos.

Las corrientes alternas calientan el suelo pero las corrientes impulsivas calientan, ionizan y pueden perforar/atrasar esa interfaz electrodo-suelo y algunas capas (estratos) del terreno y evaporar el agua de la humedad del suelo circundante a los electrodos de puesta a tierra.

La corriente impulsiva $i = f(t, I_{máx}; T_1; T_2)$, cuando pasa de un electrodo metálico hacia el suelo donde está enterrado, produce un campo eléctrico (gradiente de potencial) que puede ionizar este suelo circundante haciéndolo más electroconductor durante el tiempo que dure la ionización de los cuatro componentes del suelo: aire, agua, materia mineral, materia orgánica (ver figura 1).

Los valores del campo eléctrico crítico de ionización (E_c) en la historia de la electrotecnia de la alta tensión

En la tabla 1 presentamos a los investigadores en los años desde 1929 al 2006 (¡77 años!) con nueve referencias [19] que tabulamos junto a los valores del campo eléctrico crítico de ionización de suelo en sus valores límites (menores a mayores o el único considerado). Esta síntesis histórica de la tabla 1 permitirá al lector ubicarse en el tiempo histórico de la ciencia de la alta tensión. Además, tendrá una idea de los valores límites o del único valor considerado por el investigador y sus colegas.

Investigador	Año	Campo eléctrico crítico de ionización del suelo (valores límites)	Referencia bibliográfica
H. M. Towne	1929	160 a 520 kV _c /m	[1]
P. L. Bellaschi	1941	120 a 420 kV _c /m	[2] [3]
A. C. Liew, M. Darveniza	1974	300 kV _c /m	[4]
M. Loboda; Z. Pochanke	1985	560 a 900 kV _c /m	[5]
E. E. Oettle	1988	600 a 1850 kV _c /m (600 a 800 suelos muy húmedos)	[7]
CIGRE	1991	400 kV _c /m	[8]
A. M. Mousa	1994	300 kV _c /m	[9]
I. F. Gonos et al	2004	200 kV _c /m	[10]
N. M. Nor et al	2006	550 kV _c /m para celda hemiesférica, 790 para placas paralelas	[11]

Tabla 1. Valores del campo eléctrico crítico (E_c) de ionización de suelos según varios investigadores desde 1929 a 2007 [19].

Tipo de suelo	Campo eléctrico (gradiente) de ionización del suelo (E_c). Valores límites probables	Resistividades volumétricas estimadas. Valores típicos y límites normales
Arcilla plástica (húmeda)	1870-3900 kV _c /m	50 (8 a 70) Ωm
Arena seca	1710-1880 kV _c /m	5000 (3000 a 8000) Ωm
Arena húmeda	1300-2340 kV _c /m	800 (200 a 3000) Ωm
Grava seca	2080-2280 kV _c /m	15.000 (3000 a 30.000) Ωm
Grava húmeda	1140-1920 kV _c /m	3000 (40 a 10.000) Ωm

Tabla 2. Valores límites probables del campo eléctrico de ionización del suelo según los tipos de suelos y sus resistividades volumétricas estimadas [21] [22].

El campo eléctrico (gradiente) de ionización del suelo y las resistividades volumétricas estimadas del suelo (ρ) que pueden corresponder a los valores del campo eléctrico ionizante (E_c) para cinco tipos de suelos

En la tabla 2 se presentan esos valores límites probables de E_c y los de ρ (Ωm) adaptados de [21] y [22] en carácter de orientación del lector para una aplicación práctica o bien para tener alguna idea del tema.

El suelo y las corrientes

Introducción

El suelo está formado por materias en estado sólido, líquido y gaseoso. La materia en estado sólido la componen los diferentes minerales que contiene el suelo y algunos compuestos orgánicos. La mate-

ria en estado líquido corresponde al agua con diferentes tipos de sales disueltas. El aire y el vapor de agua constituyen la materia en estado gaseoso. La interacción de estas diferentes sustancias en sus diferentes fases hace que el comportamiento del suelo sea complejo (sin tener en cuenta los diferentes cambios fisicoquímicos que en el suelo se dan gracias a la actividad de los seres vivos).

En la figura 1 se ilustra una representación esquemática simplificada de un suelo de textura media. Según Cabrera, el 50% del volumen es materia sólida, que es mineral y orgánica. Dentro del otro 50% se encuentra agua y aire en proporciones del 25% cada uno, que están presentes dentro de los espacios vacíos dejados por los granos del suelo. La flecha en la parte superior de la figura indica la variación que se puede presentar entre los contenidos

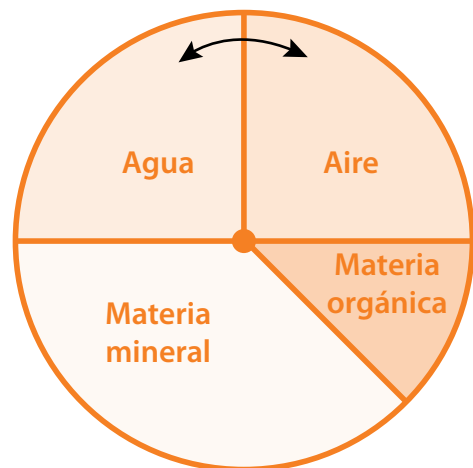


Figura 1. Representación esquemática por volumen de un suelo de textura media según Cabrera.

del agua y del aire, indicando que el incremento de una cantidad está asociado con el decrecimiento de la otra.

Comportamiento del suelo ante descargas eléctricas impulsivas

Cuando la corriente de las descargas eléctricas atmosféricas es conducida a tierra y la forma en que el sistema de puesta a tierra responde a esta corriente es de vital importancia tanto para el control de las sobretensiones que puedan ocurrir en el sistema de potencia, como para la determinación de los niveles de protección adecuados a los descargadores de sobretensión en los sistemas de distribución. La respuesta del suelo a esta inyección de corriente es fuertemente dependiente de algunas variables como son el tipo de suelo, su conductividad eléctrica, el contenido de humedad, la capacidad térmica del suelo, la geometría del electrodo y la magnitud y la duración del impulso del rayo, entre otros factores. Se ha observado que ante la presencia de ondas de rayos la no linealidad de la impedancia del suelo se debe a fenómenos de io-

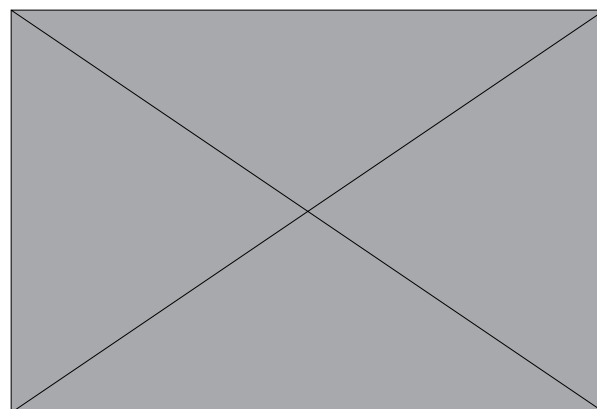


Figura 2. Curvas típicas para la tensión, la corriente y la impedancia del fenómeno de descarga eléctrica impulsiva en suelos.

nización o descargas eléctricas (arcos) alrededor del electrodo, que producen un decrecimiento apreciable en la impedancia de puesta a tierra del conjunto electrodo-suelo durante la dispersión de la corriente impulsiva de los rayos a tierra.

Descripción del fenómeno de la descarga eléctrica en arena ante impulsos de rayos

En diferentes aplicaciones de diseño eléctrico, la mayoría de las veces se utiliza un valor fijo de resistencia eléctrica del suelo sin tener en cuenta los efectos de interrupción que aparecen cuando se inyectan ondas de impulso de rayos dentro del sistema de puesta a tierra. Varios estudios realizados por diferentes autores muestran que el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra ante ondas de energía de impulso es no lineal. Durante décadas, se trató de llegar a una explicación física de este comportamiento y se han realizado numerosos trabajos que nos acercan al modelo buscado.

En la figura 2 se muestran unas curvas típicas del comportamiento del suelo ante impulsos de rayos y se destaca el comportamiento de la resistencia que

presenta varios estados de disminución y de recuperación de la resistencia en el tiempo.

La mayoría de los suelos consisten en numerosas partículas con un cierto grado de humedad y también puede haber una cantidad de sales disueltas. El aire también forma parte de esa composición física que llena los espacios vacíos disponibles en el conjunto de partículas que forman la composición del suelo. Es decir que el suelo está conformado principalmente por granos, agua y aire, que son los que regulan el proceso de inicio y desarrollo de la descarga eléctrica en el interior del suelo. El agua cumple un papel fundamental en la conductividad eléctrica del suelo y de cuya cantidad depende la buena conducción eléctrica del suelo junto con la cantidad de sal disuelta en dicha agua. La cantidad de aire está determinada por los volúmenes de espacio disponible dejado por los granos y cantidad de agua contenida en la arena. El aire contenido en esta arena es parte importante del estudio en los trabajos de investigación ([19] y [20]).

Los suelos con granos de gran tamaño (grava) tienen espacios de aire mayores comparados con aquellos suelos donde los granos son del orden de los milímetros. Entonces los espacios de aire contenidos son también espacios no homogéneos, sin un tamaño predefinido y sin geometrías regulares. La configuración de electrodos utilizada también determina el comportamiento de estos tres elementos (agua, granos, aire) dentro de una muestra de suelo. Es el caso de la configuración de electrodos coaxiales utilizada en estas investigaciones.

Configuración electródica experimental de ensayos con tensiones impulsivas de muestras de suelos

Una configuración de dos cilindros coaxiales como se muestra en la figura 3 se utilizó en los trabajos de investigación [19] y [20], que son de las décadas de 2000 y 2010.

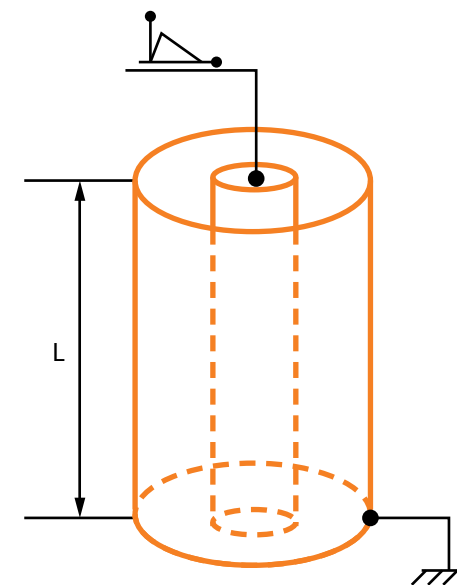


Figura 3. Configuración coaxial electródica experimental

Medidas de los electrodos de la figura 4 según [19] y [20]:

- » L (largo): 60 y 70 cm
- » a (radio de electrodo interno): 0,5 y 0,48 cm
- » b (radio de electrodo externo): 7,3 y 12,7 cm

En ninguno de los trabajos experimentales se calculan los valores del campo eléctrico de ionización E_c del suelo en las muestras de suelos ensayadas con distintos grados de humedad (entre el 0 y el 10%). Por este motivo, del excelente trabajo colombiano [20], los autores pudieron estimar la función monómica siguiente:

$$E_c = a \cdot \rho^b \tag{1}$$

que da el valor del campo eléctrico como E_c (kV/m) de ionización de las muestras de suelos alrededor del electrodo central de radio " a ", cuando se aplican las tensiones impulsivas $U_a = f(t, U_{m\acute{a}x}; T_1; T_2)$ contra la tierra conectada al electrodo exterior. El campo eléctrico de ionización de cada uno de los suelos tiene su valor crítico E_c (kV/m), que es el va-

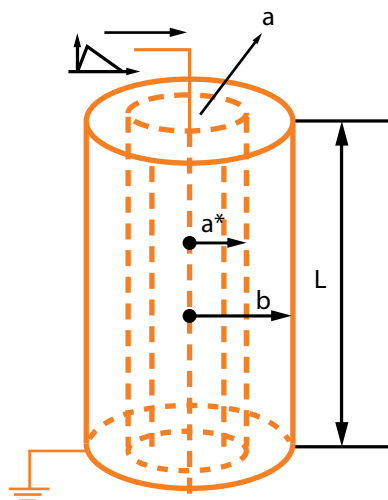


Figura 4. Configuración del modelo de Pedro Pineda. Dimensiones de los electrodos: a: radio del electrodo interno | a*: radio de la zona ionizada | b: radio del electrodo externo | L: largo de los electrodos

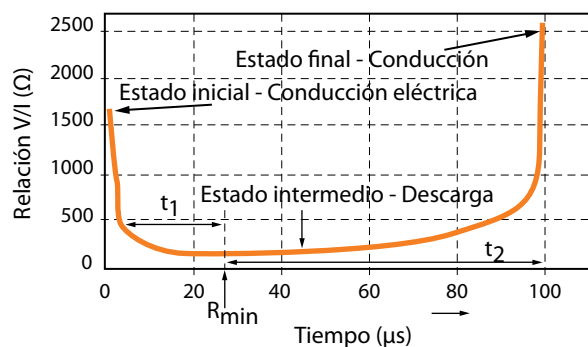


Figura 5. Curva experimental $(V/I) = f(t)$. t_1 : tiempo hasta alcanzar la R_{min} de la curva (V/I) en la descarga. t_2 : tiempo hasta llegar al estado final de la descarga impulsiva y que el suelo recupere la conducción de la corriente eléctrica

lor que tiene el campo eléctrico cuando comienza la ionización que ocurre en el suelo después de la conducción electrolítica en la interfaz electrodo-suelo, que es la que inicia la ionización según el ilustrado Karl Berger [22].

La conducción electrolítica ocurre solamente cuando es baja la densidad de corriente que fluye desde la superficie electrodica metálica hacia la tierra adyacente. Así, la intensidad del campo eléctrico

E_a , en la interfaz electrodo-suelo $E_a = \rho \cdot J_a$ no supera los $2 \text{ kV/cm} = 200 \text{ kV/m}$

Cuando la corriente aumenta, se produce calor en la interfaz electrodo-suelo y aumenta la temperatura del suelo contiguo a la interfaz (por efecto Joule). De esta manera, se evapora el agua que humedecía el suelo circundante al electrodo y simultáneamente aumentan la resistividad superficial y la intensidad del campo eléctrico $E_a = \rho \cdot J_a$ con gran velocidad.

Línea de la figura	Figura (nomo-grama bilog)	Coefficiente a de la ecuación (1)	Exponente b de la ecuación (1)	Autores	Referencia bibliográfica
A	6 (A, B)	241	0,215	Oettle	[7]
B	6 (A, B)	1986	0,124	Manna	[15], [17]
C	7 (A, B, C, D)	75	0,476	Nor	[13], [18]
D	7 (A, B, C, D)	62,4	0,52	Loboda	[6]
E	8 (A, B, E)	68	0,5	Arcioni	Media geométrica C y D en esta nota
F	9 (A, B, E, F)	59,8	0,61	Rincón Ávila	[20]

Tabla 3. Cuadro de resumen de las ecuaciones del campo eléctrico crítico E_c (kV/m) de ionización de los suelos de resistividad volumétrica ρ (Ωm)

Nota: en la función monómica $E_c = a \cdot \rho^b$, el coeficiente "a" tiene la unidad kV/m como el campo E_c , pero el exponente "b" es adimensional y la resistividad tiene la medida (número) del parámetro ρ (Ωm)

En la interfaz electrodo-suelo circundante, se crea una zona de descargas: primero en forma de canales de chispas paralelos entre sí, y después, en la forma de canales de arcos eléctricos precedidos de los canales de chispas, a medida que aumenta la intensidad del campo electrocinético E_a que adquiere un valor crítico E_c .

Es posible que la zona de canales (de chispas y de arcos) cause un aumento aparente en las dimensiones (principalmente el diámetro) del electrodo dispersor con lo que resulta una disminución de la

resistencia de dispersión hasta llegar a un mínimo que es la R_{min} (Ω) (figuras 4 y 5).

Esta disminución de la resistencia se debe a que la caída de tensión en la zona de canales es mucho menor que la que hay en el caso de conducción electrolítica.

Los canales de chispas y de arcos son rápidamente enfriados por el suelo circundante, y a medida que los canales se alargan, aumenta también la caída de tensión a lo largo de ellos. Esto limita el radio a^* de alcance de la zona de canales (figura 4).

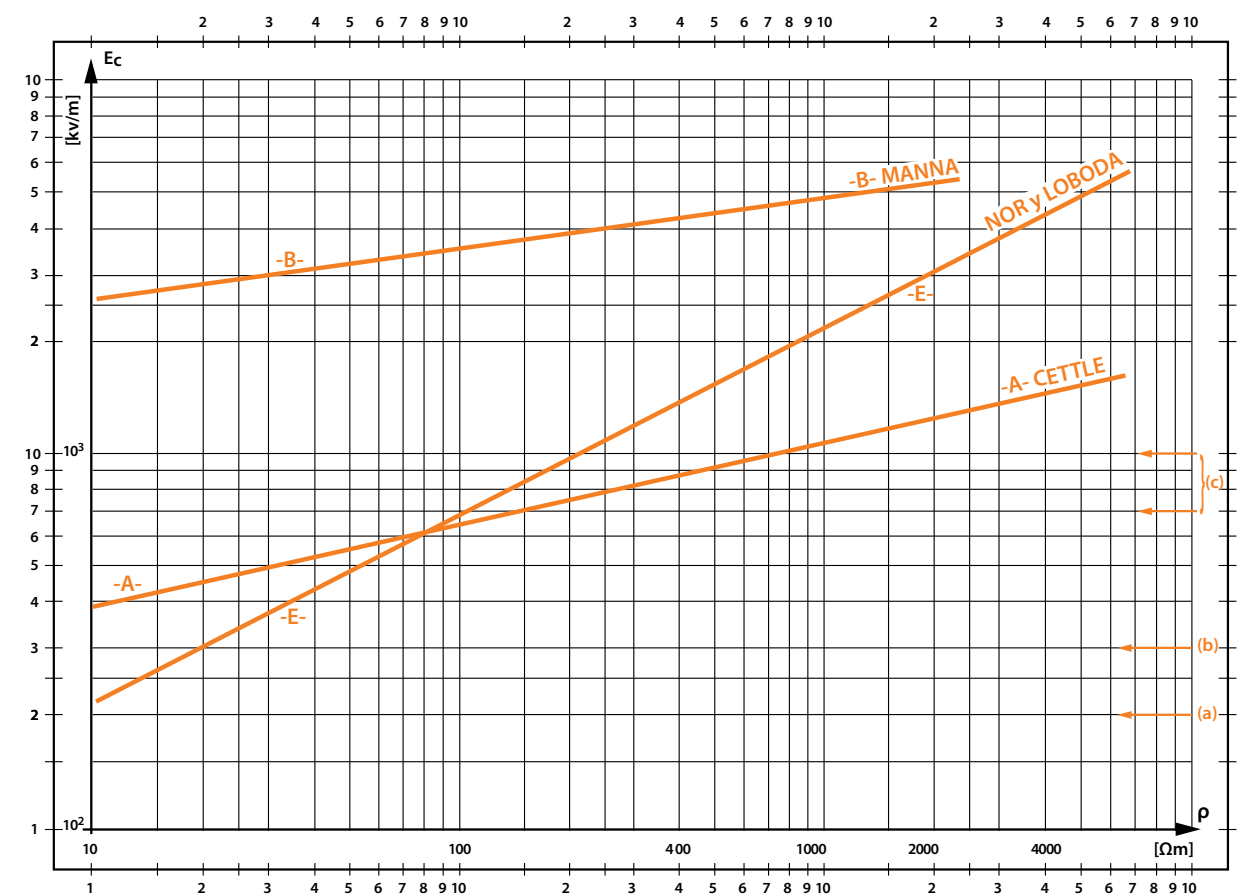


Figura 6. Nomograma bilogármitico de la función E_c (kV/m) = $a \cdot \rho^b$ del campo eléctrico crítico de ionización del suelo alrededor de un electrodo de puesta a tierra en función de la resistividad volumétrica ρ (Ωm). Autor: Oettle (A). Manna (B)

Línea: A, B | Valores: a, 241 y 1986 kV/m ; b, adimensional 0,215 y 0,124, y ρ , valor numérico (medida) de Ωm
 Notas: en el gráfico bilogármitico se marcan a la derecha los valores siguientes:
 a: $E_{meq} = 200 \text{ kV/m}$ = valor máximo para la conducción electrolítica (Kostaluk, Loboda et al.)
 b: $E_{dep} = 300 \text{ kV/m}$ = valor mínimo para producir descargas en poros o entre partículas del suelo (Berger)
 c: $E_{pc} = 700 \text{ a } 1000 \text{ kV/m}$ = valores para producir descargas entre capas del suelo (Berger)

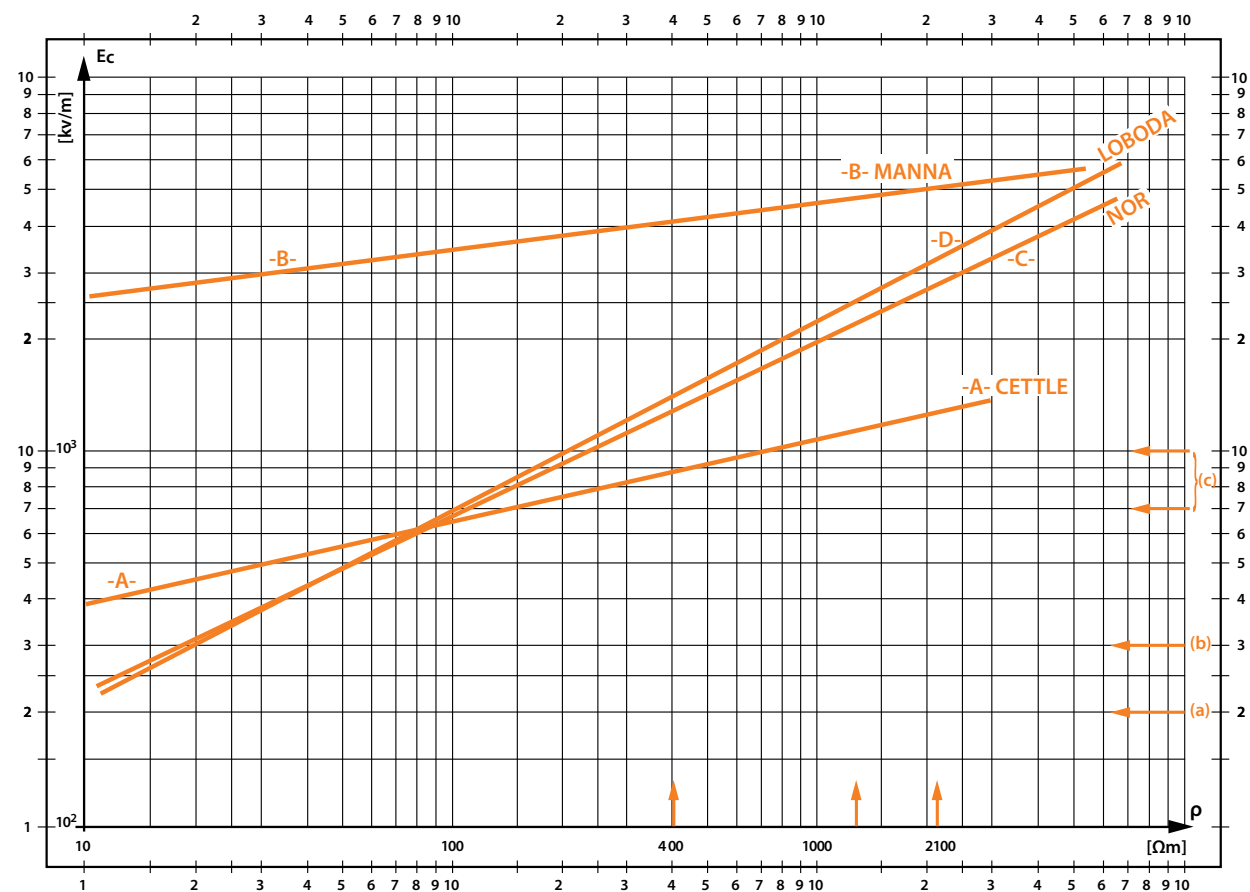


Figura 7. Nomograma bilogarítmico de la función E_c (kV/m) = $a \cdot \rho^b$ del campo eléctrico crítico de ionización del suelo alrededor de un electrodo de puesta a tierra en función de la resistividad volumétrica ρ (Ωm). Autores: Oettle, Manna, Nor, Loboda
 Línea: A, B, C, D | Valores: a, 241 y 1986 kV/m; b, adimensional 0,215, 0,124, 0,476 y 0,520, y ρ , valor numérico (medida) de Ωm
 Notas: en el gráfico bilogarítmico se marcan a la derecha los valores siguientes:
 a: $E_{mce} = 200$ kV/m = valor máximo para la conducción electrolítica (Kostaluk, Loboda et al.)
 b: $E_{dep} = 300$ kV/m = valor mínimo para producir descargas en poros o entre partículas del suelo (Berger).
 c: $E_{pc} = 700$ a 1000 kV/m = valores para producir descargas entre capas del suelo (Berger).

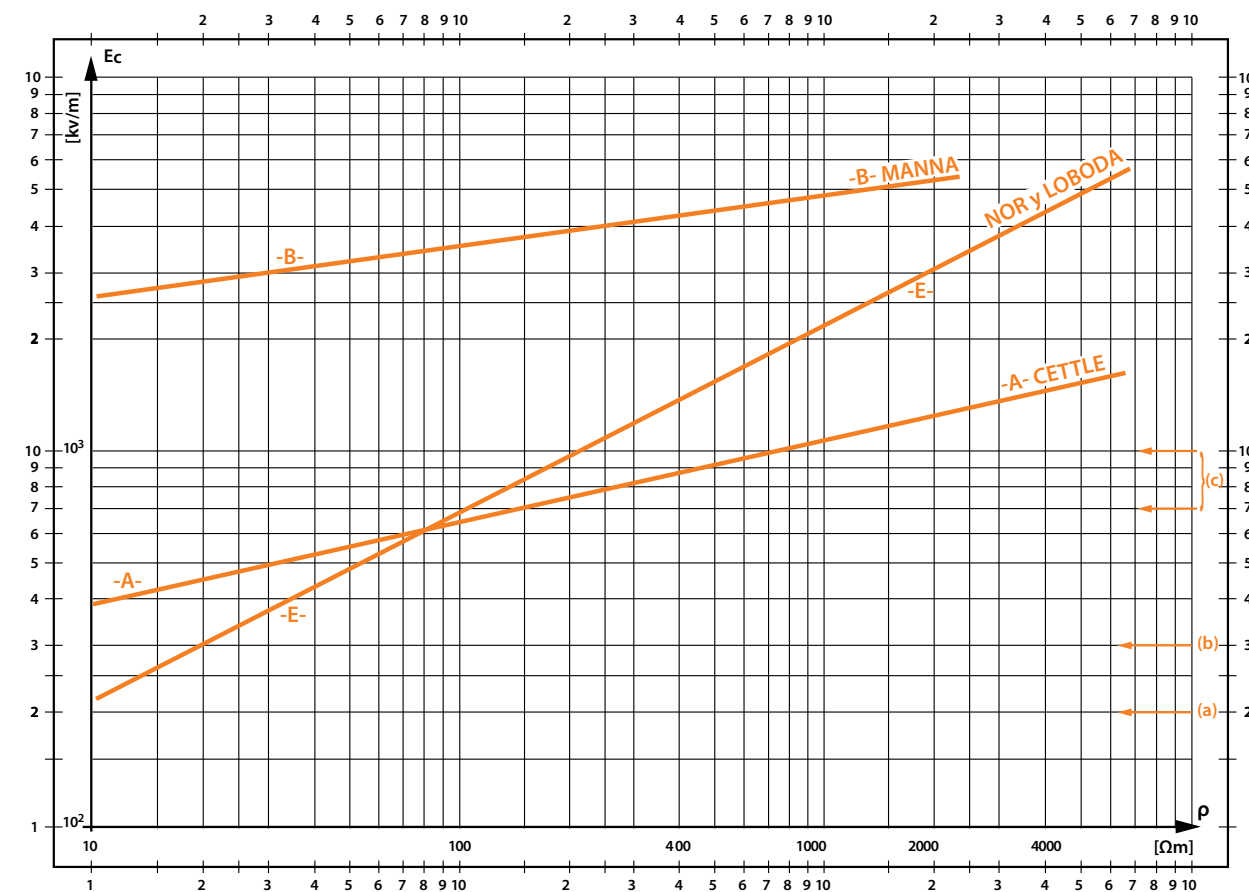


Figura 8. Nomograma bilogarítmico de la función E_c (kV/m) = $a \cdot \rho^b$ del campo eléctrico crítico de ionización E_c del suelo alrededor de un electrodo de puesta a tierra en función de la resistividad volumétrica ρ (Ωm). Autores: Oettle, Manna, Nor, Loboda
 Línea: A, B, E | Valores: a, 241, 1986 y 68 kV/m; b, adimensional 0,215, 0,214 y 0,5, y ρ , valor numérico (medida) de Ωm
 Notas: en el gráfico bilogarítmico se marcan a la derecha los valores siguientes:
 a: $E_{mce} = 200$ kV/m = valor máximo para la conducción electrolítica (Kostaluk, Loboda et al.)
 b: $E_{dep} = 300$ kV/m = valor mínimo para producir descargas en poros o entre partículas del suelo (Berger).
 c: $E_{pc} = 700$ a 1000 kV/m = valores para producir descargas entre capas del suelo (Berger).

ρ (Ωm)	E_{mg} (kV _c /m)
10	373
100	958
1000	2462
2000	3272
4000	4347

Tabla 4. Algunos valores de la función G.

Nomogramas bilogarítmicos de las funciones monómicas $E_c = a \cdot \rho^b$ (1)

Estas cinco funciones (1) se representan en las figuras 6 a 9 mediante las líneas A, B, C, D, E y F tal como se tabulan en la tabla 3.

Conclusiones

Los autores proponen que para estimar $E_c = f(\rho)$ se utilice una función monómica que sea una función intermedia entre las seis funciones monómicas de la tabla 3 representadas por las líneas de letras A, B, C, D, E y F en las figuras 6 a 9. Para tal fin se puede utilizar la media geométrica de las seis funciones A, B, C, D, E y F, que es la G siguiente: $E_{mg} = A_{mg} \cdot \rho^b$

En la (G) tenemos: $b = 1/6 \sum (b_i)$ y $A_{mg} = [\prod (a_i)]^{1/6}$. Hacemos los cálculos y así resultan estos valores:

- » $A_{mg} \approx 145$ kV/m
- » $b \approx 0,41$

de donde sale $E_{mg} = 145 \cdot \rho^{0,41}$, que tabulamos en la tabla 4.

En la figura 10 representamos a la función G juntamente con A y B. Se puede apreciar que la función G para el intervalo de valores ($11 \leq \rho \leq 8000$) está entre las funciones A y B. Es decir que para $\rho \approx 11$ Ωm, A y G se cortan en un punto, y para $\rho \approx 8000$ Ωm, B y G se cortan en otro punto distinto. ■

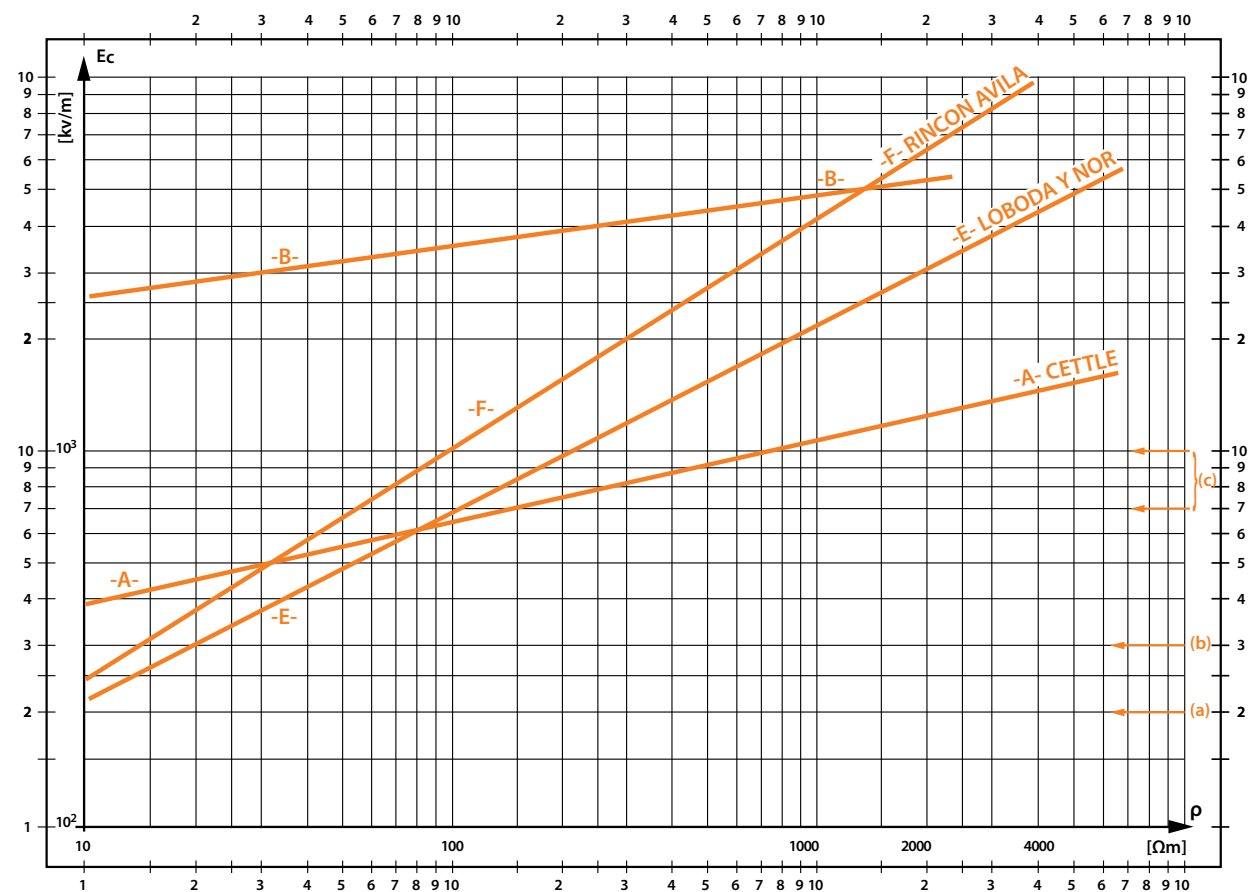


Figura 9. Nomograma bilogarithmico de la función E_c (kV/m) = $a.p^b$ del campo eléctrico crítico de ionización E_c del suelo alrededor de un electrodo de puesta a tierra en función de la resistividad volumétrica ρ (Ωm). Autores: Oettle, Manna, Nor, Loboda, Rincón Ávila. Línea: A, B, E, F | Valores: a, 241, 1986, 68 y 59,8 kV/m; b, adimensional 0,215 y 0,124, y ρ , valor numérico (medida) de Ωm .

Notas: en el gráfico bilogarithmico se marcan a la derecha los valores siguientes:

- a: $E_{mce} = 200$ kV/m = valor máximo para la conducción electrolytica (Kostaluk, Loboda et al.)
- b: $E_{dep} = 300$ kV/m = valor mínimo para producir descargas en poros o entre partículas del suelo (Berger)
- c: $E_{pc} = 700$ a 1000 kV/m = valores para producir descargas entre capas del suelo (Berger)

Bibliografía

[1] Towne, "Impulse characteristics of driven grounds", Gen. Electr. Rev. pp. 605-609, Nov. 1929.
 [2] Bellaschi, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds", Transactions Am. Inst. Electr. Eng., vol. 60, pp. 123-128, Mar. 1941.
 [3] Bellaschi; Armington; Snowden, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds II", Transactions Am. Inst. Electr. Eng., vol. 61, pp. 349-363, 1942.
 [4] Liew; Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths", en Proc. IEE, vol. 121, núm. 2, pp. 123-135, Feb. 1974
 [5] Loboda; Pochanke, "Experimental study of electric properties of soil with impulse current injections" en Proc. of 18^o International Conference of Lightning Protection, pp. 191-198, Múnich, 1985,

[6] Loboda; Scuka, "On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes in soil", en Proc. of 23^o International Conference on Lightning Protection, pp. 539-544, 1966.
 [7] Oettle, "A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated Earth electrodes", en IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, núm. 4, pp. 2020-2029. 1988.
 [8] CIGRE Working Group on Lightning, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRE, 1991.
 [9] Mousa, "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes", en IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, núm. 3, pp. 1669-1677, 1994.
 [10] Gonos; Stathopoulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages", IET Proceedings Science, Measurement and Technology, vol. 151, núm. 5, pp. 343-346, Sept. 2004

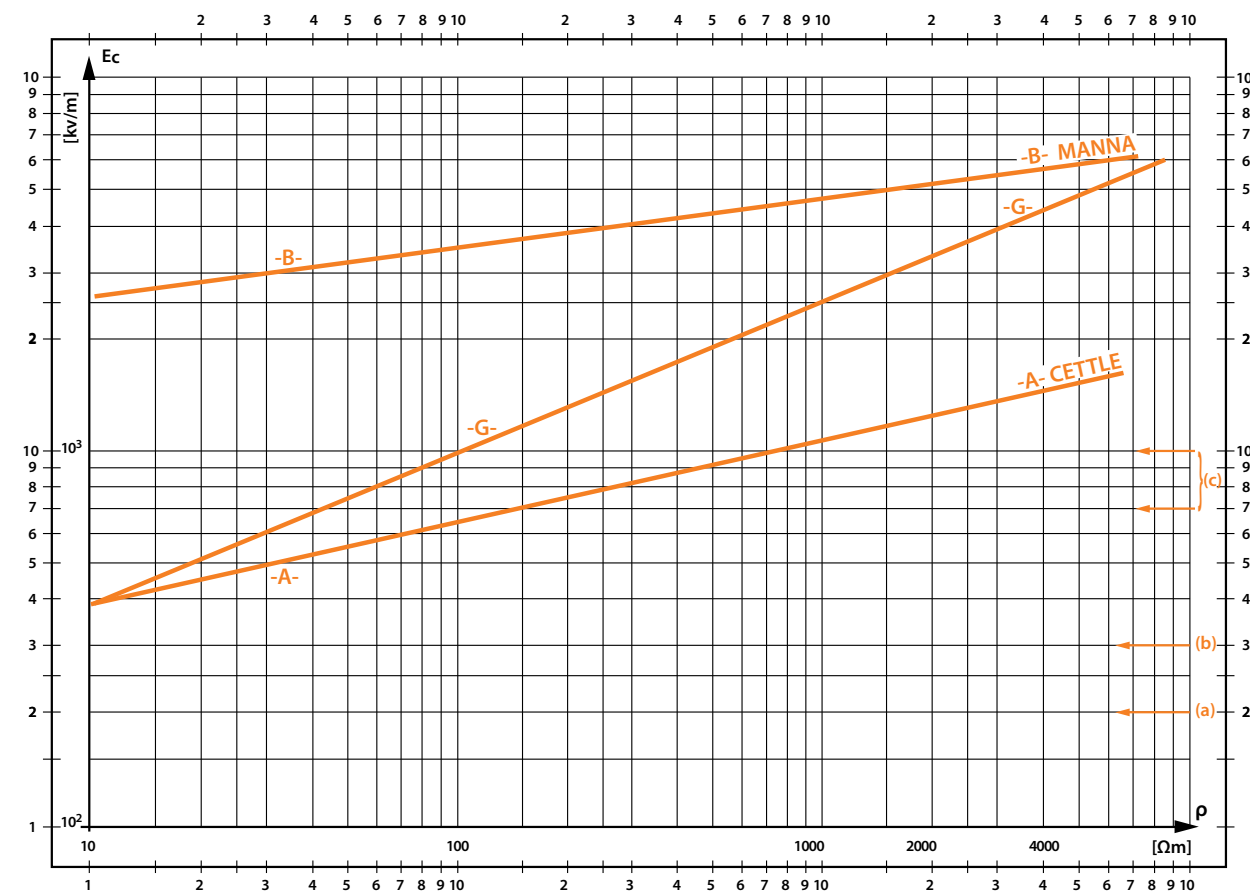


Figura 10

[11] Nor; Haddad; Griffiths, "Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses", en IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, núm. 1, pp. 353-361, Ene. 2006.
 [12] Nor; Haddad; Griffiths, "Performance on earthing systems of low resistivity soils", en IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, núm. 4, pp. 2039-2047, Oct. 2006.
 [13] Nor; Ramli, "Electrical properties of dry soil under high impulse currents", en Journal of Electrostatics 65, pp. 500-505, Elsevier, 2007.
 [14] Lima; Visacro, "Experimental developments on soil ionization" en Proc. of International Conference on Grounding and Earthing y 3^o International Conference on Lightning Physics and Effects, pp. 174-179, Brasil.
 [15] Manna; Chowdhuri, "Generalized equation of soil critical electric field E_c based on impulse tests and measured soil electrical parameters", IET Generation Transmission and Distribution, vol I, núm. 5, pp. 811-817, 2007.
 [16] IEC-60-1, Guide on high voltage testing techniques. Standards, 1989
 [17] Manna, "Impulse impedance of grounding systems and its effects on tower crossarm voltage", dissertation, Ago. 2006.

[18] Nor; Ramli, "Effects of moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions", ETEP Transactions on Electrical Power, vol. 18, pp. 461-475, Jun. 2007.
 [19] Asimakopoulou; Gonos; Stathopoulos, Experimental investigation on soil ionization, NTUA, Atenas.
 [20] Rincón Ávila, Edisson Javier, Estudio termo-eléctrico de la disrupción eléctrica en arena bajo impulsos tipo rayo, Universidad de Colombia, Bogotá, 2010.
 [21] Kindermann, Geraldo; Campagnolo, Jorge Mario, Aterramento elétrico, Sagra-DC Luzzatto Editores, RS, Brasil, 1992
 [22] Arcioni, Juan Carlos, Puesta a tierra de instalaciones y sistemas eléctricos de BT, MT y AT, Universitas, Córdoba, 2006.