



## APLICACIONES INDUSTRIALES

Metodología basada en redes neurales para interpretación de la resistividad del suelo en zonas urbanas

*Methodology based on neural networks for earth resistivity interpretation in congested urban areas*

**Miguel - Martínez Lozano**

**Recibido:** Diciembre del 2012

**Aprobado:** Mayo del 2013

### **Resumen/ Abstract**

Uno de los problemas que se afronta durante el diseño de un sistema de puesta a tierra (PAT) en zonas urbanas, es la obtención de los parámetros eléctricos del suelo, ya que los métodos tradicionales de medición de resistividad no se pueden aplicar por problemas de espacio. En este trabajo, se plantea una alternativa para la obtención de la resistividad, mediante sondeo eléctrico introduciendo una barra vertical y registrando cómo varía la resistencia de PAT del electrodo en función de la profundidad; con esos resultados se desarrolla una metodología basada en redes neurales, para estimar los parámetros del suelo para un modelo biestratificado del mismo. Se estudia por tanto, el tema de las complicaciones de medición en zonas urbanas y se plantea en detalle la metodología empleando técnicas modernas de medición y procesamiento. Los resultados obtenidos, tanto en fase de simulación digital como con ensayos de campo, muestran la validez.

**Palabras clave:** medición de resistividad de suelos en zonas urbanas, sistemas de puesta a tierra, redes neuronales.

*One of the main troubles for grounding system design in an electrical installation on congested urban areas is obtaining the soil parameters, since the traditional measurements techniques are not applicable due to the limited space. In the present work, an alternative procedure based on introducing a driven rod into the soil and registering the variation of ground resistance versus the depth, is presented; with the field measurements obtained, a procedure were evaluated to estimate the soil parameters in a simplified bi-stratified model (two vertical layers) using a trained neural network to minimize the effort and time to obtain the respective results. The trouble about the measurement and estimation of electrical soil properties in congested urban areas is solved with the detailed methodology presented, based on non conventional measurement techniques and computational processing. The results obtained during both digital simulation and field measurements, demonstrates the validity of the proposed procedure and making feasible its application to engineering projects.*

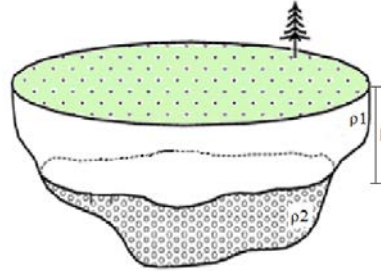
**Key Words:** soil resistivity estimation on congested urban areas, grounding systems, neural networks.

### **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas de puesta a tierra son fundamentales en instalaciones eléctricas de potencia, control, medicina, comunicaciones y otros; y sobre ellos se soportan gran cantidad de premisas como seguridad, confiabilidad, calidad, etc. El diseño se basa en cada caso particular en ciertas especificidades según su aplicación; así, por ejemplo en sistemas de potencia, para controlar las tensiones de toque y de paso; en sistemas de control y comunicación, como referencia de potencial, etc. Los electrodos de puesta a tierra (EPT) son parte de los elementos constitutivos de un sistema de puesta a tierra (SPAT) y son estos los que entran en contacto directo con el suelo y en función de la superficie o área neta de contacto, de su geometría y de las propiedades eléctricas del suelo, tendrán el efecto deseado: baja resistencia o impedancia de dispersión (resistencia de puesta a tierra), control efectivo de los potenciales de malla, de

toque y de paso, etc. Las características elementales en cuanto a superficie de contacto (tamaño del sistema a implementar) y su geometría particular, son datos que maneja y desarrolla el propio diseñador y su selección a mínimo costo y máxima confianza, dependen del buen conocimiento del comportamiento eléctrico del terreno donde se va a construir el sistema de dispersión (fig. 1).

Por tanto, el diseño de un SPAT necesita conocer de manera confiable, los valores de conductividad o resistividad del suelo y su estructura fundamental (fig. 1). Un error en estos datos, conlleva a grandes diferencias entre los valores obtenidos y los requeridos poniendo en riesgo la seguridad a personas y cosas.



**Fig. 1. Características eléctricas del suelo para un modelo de dos capas ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ ).**

Para determinar las características eléctricas del suelo, existen diversos métodos [1-3]. De todos ellos, los más empleados son: el de los cuatro electrodos (que según su configuración de barrido, son mejores conocidos como: Wenner y Schlumberger) y el de la caja de Miller. Existe un tercero que es poco desarrollado en [1] y es conocido como el método de variación de la profundidad. Es importante destacar que los tres métodos mencionados, son aceptados por diferentes documentos normativos internacionales y permiten de forma confiable en la mayoría de los casos, determinar las características eléctricas del suelo. Cada método de los indicados, tiene sus ventajas y desventajas. En el caso particular estudiado (zonas urbanas altamente congestionadas), es difícil disponer del espacio físico suficiente para las mediciones convencionales y se le adiciona el hecho de que si existiera espacio, este posiblemente cuente con gran cantidad de elementos enterrados desconocidos en características y rutas, haciendo prácticamente imposible obtener resultados confiables.

El problema de medir en zonas complicadas, especialmente urbanas ha sido poco cubierto en la literatura y en las prácticas comunes, dejando la mayoría de las veces en los diseñadores y a su propio criterio, la selección y aplicación de la mejor técnica en cada caso [4]. En función de las prácticas comunes, en zonas urbanas se emplea el método de la inspección vertical o de variación de la profundidad [4], el cual trata de la colocación de una jabalina o electrodo vertical, que se va introduciendo en el suelo en pasos discretos; de este proceso, se registra el valor de sus resistencias de puesta a tierra y se obtiene un gráfico de resistencia versus profundidad. La complejidad surge en el manejo y procesamiento de los datos obtenidos de las mediciones, a fin de obtener los parámetros eléctricos del suelo para un modelo dado del mismo. El modelo generalmente aceptado es el de los dos estratos (biestratificado), como sugiere [1].

Para el método de los cuatro electrodos, la estimación de estos tres parámetros es bastante conocida y en [1], se plantea en su anexo un procedimiento computacional para su implementación. Existen una gran variedad de programas disponibles en internet que realizan estos cálculos, por ser esta la técnica más empleada y conocida [5]. Este método se basa en tener como datos, las resistividades aparentes del suelo en función de la apertura de los electrodos auxiliares. Para el método de la inspección vertical, se propone una procedimiento en [6], que en general no es sencillo de aplicar y manejar ya que es iterativo y ciertas decisiones se dejan a la pericia o experiencia de quien lo maneje. En función de todo lo indicado anteriormente, el presente trabajo busca desarrollar una metodología que permita con la técnica de la variación de la profundidad propuesta en [1], detallando los cuidados en su implementación y el uso de redes neurales (reconocimiento de patrones), determinar de forma adecuada las características eléctricas del suelo para un modelo biestratificado.

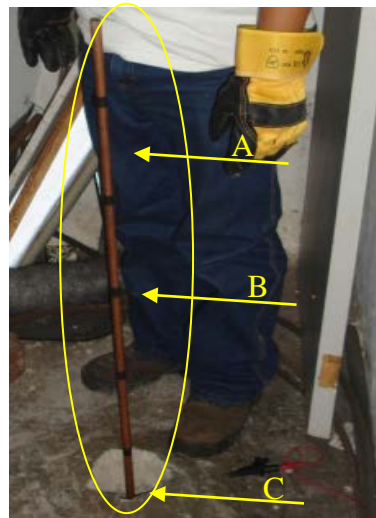
Esta metodología se desarrolla por etapas: método de medición y cuidados particulares, procesamiento de los datos de campo, diseño, entrenamiento y uso de las redes neurales, validación y análisis de los resultados que se obtuvieron con datos de modelación computacional y con mediciones de campo.

## PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO POR SONDEO VERTICAL

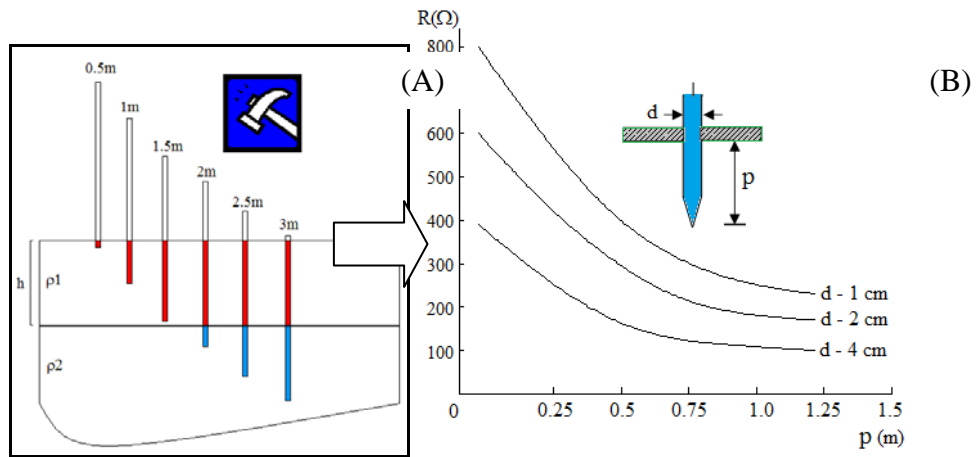
El método de inspección vertical o variación de la profundidad descrito en [1] como técnica de aplicación en campo se debe dividir en dos partes fundamentales: El electrodo vertical (jabalina) que se va a ir introduciendo al terreno en pasos discretos, y el método que se decida emplear para medir la resistencia de puesta a tierra en cada uno de esos pasos. La importancia de este tema está centrada en el primero de los dos tópicos y es el que da el nombre de variación de la profundidad en [1].

Para llevar a cabo de manera adecuada la medición que se va a desarrollar, el primer paso es la selección del lugar donde la barra se va a introducir, por lo que una inspección preliminar del lugar en cuestión es necesaria, para evitar la rotura del suelo (concreto, asfalto u otro material) en múltiples ocasiones. La idea es que la zona seleccionada esté libre de materiales enterrados (posibles escombros de construcción, tuberías, mallas metálicas, etc.). En general, el acceso se obtiene mediante el uso de equipos eléctricos o hidráulicos especializados y el calibre del acceso no tiene que ser superior al de la barra a introducir, haciendo que el método sea factible de implementar en cuartos de basura de edificios, salas de máquinas de ascensores o de bombeo, puestos de estacionamiento en sótanos de edificios, etc., siempre con la menor necesidad de interrumpir los procesos que suelen efectuarse en esas áreas y que podrían complicar los permisos para este tipo de mediciones si se hicieran de manera convencional (ver figura 2).

En la figura 3, se detalla con un ejemplo, el procedimiento de introducción de la barra en pasos de 0,5 m. El método necesita los datos de la resistencia del electrodo vertical en cada paso de introducción, obteniéndose una gráfica de Resistencia de puesta a tierra ( $R$ ), versus profundidad de enterramiento ( $p$ ). Respecto al método a emplear para la medición de la resistencia de puesta a tierra del electrodo que se está introduciendo, el tema es amplio, ya que la selección de la alternativa más adecuada depende nuevamente de las características del lugar; lo importante es que éste puede realizarse con cualquiera de las técnicas convencionales o no convencionales descritas en [1 y 4]. Desde el punto de vista práctico, se pudiera indicar como método sencillo, rápido y prácticamente siempre factible de ser empleado, el de triangulación.

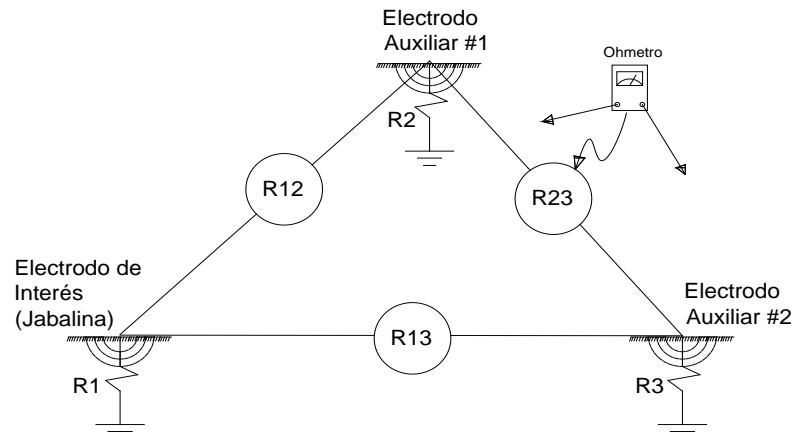


**Fig. 2. Método de inspección vertical. (A) Jabalina, (B) Marcas para los pasos de introducción y (C) perforación del suelo (losa, cemento, asfalto, etc.)**



**Fig. 3. Método de inspección vertical para estimación de la resistividad del suelo. (A) Visualización del proceso discreto de introducción de la jabalina en el suelo a inspeccionar y (B) Característica  $R$  vs  $p$  que debería ser obtenida como resultado de las mediciones.**

El método de triangulación (o de los tres puntos según la IEEE Std81), es sencillo de implementar, puesto que se basa en la necesidad de disponer de dos electrodos auxiliares, adicionales al de interés, para poder hacer una medición conjunta entre el electrodo que se está introduciendo y éstos. Lo más conveniente es que dichos electrodos auxiliares se obtengan directamente del lugar de medición; así, pudieran ser: el neutro o la puesta a tierra de un sistema eléctrico existente, una tubería de agua o de gas, el acceso a alguna parte metálica de la estructura o edificación, alguna cabilla que pertenezca a las fundaciones o pilotes de alguna edificación cercana o electrodos que sean introducidos específicamente para esta aplicación. Su aplicación puede resumirse en los siguientes pasos: primeramente se ubican los electrodos auxiliares; posteriormente, se mide la resistencia entre cada par de electrodos, como indica la figura 4 y finalmente se estima el valor de la resistencia del electrodo de interés empleando la ecuación (1).



**Fig. 4. Método de triangulación descrito en la IEEE Std 81, para medición de la RPAT de pequeños sistemas (reducido número de electrodos), especialmente útil en zonas urbanas congestionadas.**

Como se observa en la figura 4, si se identifica  $R_1$ , como la resistencia que se desea medir (electrodo que se está introduciendo),  $R_2$  y  $R_3$  como las resistencias de los electrodos auxiliares (cuyo valor no es de interés). Con un telurímetro o un medidor de resistencia (preferiblemente empleando el método de cuatro electrodos para no incluir el valor de la resistencia de los cables de medición), se registran las mediciones conjuntas  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  y  $R_{13}$ . A partir de estas tres mediciones es posible obtener el valor de  $R_1$ , empleando la ecuación (1):

$$R_1 = \frac{1}{2} (R_{12} + R_{13} - R_{23}) \tag{1}$$

Con este procedimiento, es factible obtener una gráfica confiable de Resistencia de puesta a tierra versus profundidad de introducción de la jabalina de sondeo,  $R$  vs  $p$ , como la mostrada en la figura 3 (B). Una de las características que permite revisar la validez de las mediciones obtenidas en campo es que la característica o gráfica de  $R$  vs  $p$ , debe ser siempre decreciente, con mayor o menor pendiente, ya que eso varía con la propia resistividad del suelo. Esto se debe a que a mayor profundidad, siempre hay mayor superficie de contacto del electrodo con el suelo y por tanto, la resistencia no puede incrementarse. Si eso ocurriera, lo que implica es que en el proceso de introducción (martilleo manual o maquinado), se generan espacios de aire interfaciales entre el electrodo y el suelo (generalmente con forma cónica) y estos deben ser eliminados agregando alguna solución líquida en mínima cantidad o cuidando el proceso mecánico. Debe resaltarse que con el procedimiento descrito (medición de campo), solo se obtiene una característica  $R$  vs  $p$ ; ahora hace falta a partir de estos datos, obtener la estructura biestratificada del suelo con sus parámetros de caracterización ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ ). Con los métodos convencionales, el resultado sería una característica de resistividad aparente,  $\rho_a$ , en función de apertura de electrodos,  $a$ , por lo que igualmente se necesita una segunda fase de procesamiento [1].

Finalmente, desde el punto de vista práctico, la ventaja de esta técnica al compararse con las convencionales es que la necesidad de espacio es mínima y como establece [1], da un buen estimado del comportamiento del suelo en el entorno de colocación de la jabalina (5 a 10 veces su longitud), por lo que es válida como herramienta para obtener datos que permitan conocer la estructura eléctrica del mismo. Tiene como limitación, la longitud de la jabalina, aunque se pudiera asumir que con una inspección de hasta 3 ó 5 m, pudiera ser suficiente para la mayoría de las aplicaciones en SPAT, por lo que con jabalinas comerciales de 2,4 ó 3 m, es suficiente.

## ESTIMACIÓN DE LA RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL SUELO CON LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO

A partir de la gráfica  $R$  vs  $p$  obtenida, es factible calcular una gráfica de resistividad promedio,  $\rho_m$  vs  $p$ , empleando la expresión analítica de la Resistencia de puesta a tierra de un electrodo vertical (jabalina) en un suelo uniforme (por eso el nombre de resistividad promedio para cada profundidad). Dicha ecuación (2), es extensamente conocida y puede ser obtenida en [1 y 6].

$$R(p) = \frac{\rho_m}{2\pi \cdot p} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot p}{d}\right) \quad (2)$$

Donde:

$R(p)$ : es la Resistencia de puesta a tierra para una profundidad,  $p$ , de la jabalina ( $\Omega$ ).

$\rho_m$ : es la resistividad promedio del suelo ( $\rho$ -m).

$p$ : es la profundidad de enterramiento actual de la barra en m.

$d$ : es el diámetro de la jabalina empleada (m).

Lo que se necesita en este trabajo, es despejar para cada profundidad, el valor de la resistividad promedio,  $\rho_m$ , como lo indica la ecuación (3).

$$\rho_m(p) = \frac{2\pi \cdot p \cdot R(p)}{\ln\left(\frac{4 \cdot p}{d}\right)} \quad (3)$$

Aplicando (3), se convierte el gráfico  $R$  vs  $p$ , en  $\rho_m$  vs  $p$ . De esta manera se posee información directa para valorar cualitativamente la estructura del suelo y los valores de resistividades presentes. Sin embargo, este paso no es suficiente para obtener el modelo de suelo, para lo que se requiere un análisis que posteriormente se describe y desarrolla.

## SOLUCIÓN ACTUAL PARA OBTENCIÓN DEL MODELO BIESTRATO DE SUELO

Para dos estratos, el suelo puede tener las siguientes consideraciones (3 tipos de estratificación):  $\rho_1 > \rho_2$ ,  $\rho_1 < \rho_2$  y  $\rho_1 = \rho_2$ . Para cada uno de estos, se puede tener cualquier valor de la profundidad del primer estrato,  $h$ . Es factible por inspección visual de la característica  $\rho_m$  vs  $p$ , distinguir cuál tipo de estratificación

está presente [6]; el problema se presenta para determinar confiablemente los valores de las resistividades. Sin embargo, identificar el valor de  $h$ , no es tan sencillo y es aquí donde [6] desarrolla un método iterativo mediante el cual, analizando la tasa de cambio de un indicador calculado empíricamente, es posible identificar el cambio de estrato y por ende determinar el valor de  $h$ . El método presenta complicaciones para establecer los criterios que demarquen la obtención numérica de los parámetros. No es objetivo de este trabajo presentar en detalle la metodología de [6], pero la misma se implementó para poder realizar comparaciones con la alternativa que se plantea y dado que es la única actualmente existente en la literatura especializada.

Adicionalmente, en [1] se dan algunas indicaciones para el procesamiento de estos datos, pero estos son subjetivos y deja a la experiencia del analista las consideraciones para la toma de los valores. Al iniciar la investigación y metodología presentada en este trabajo, los autores evaluaron una opción intermedia que trataba de adoptar que la curva  $\rho_m$  vs  $p$ , podía tener la misma información que la de métodos convencionales, como la  $\rho_a$  vs  $a$  del método de Wenner. Esto implica que a dichas mediciones se les aplica un ajuste de curvas a la función analítica de resistividades en suelos biestratificados presentada en el Anexo I de [1] y de ahí se obtienen los parámetros del suelo. Estos resultados arrojaron dudas, ya que a veces no se obtenían valores que representaran adecuadamente las mediciones de campo. De todo lo anterior, surge como propuesta, la aplicación de una técnica basada en inteligencia artificial, para facilitar la identificación de patrones y ajuste de curvas. La herramienta ampliamente empleada para este tipo de fines, es la red neuronal [7, 8].

## METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS EMPLEANDO REDES NEURONALES

### REDESNEURONALES

Una Red Neuronal Artificial, RNA, es un sistema de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida.

Las redes neurales simulan e imitan a sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales, con el objetivo de conseguir respuestas generales, similares a las que sería capaz de dar un cerebro humano como solución a un problema matemático complejo que sea difícil de representar analíticamente. [9]

La RNA emplea una aproximación basada en un conjunto de datos de entrada suficientemente significativo, y el objetivo es conseguir primeramente que la red “aprenda” automáticamente las propiedades deseadas. En este sentido, el diseño de una red neural no tiene que ver con flujos de datos y detección de condiciones, sino con la selección del modelo de red, de las variables a incorporar y el pre-procesamiento de la información que formará el conjunto de entrenamiento. Asimismo, el proceso por el que los parámetros de la red se adecuan a la resolución de cada problema no se denomina programación sino, entrenamiento. Por ello, la funcionalidad adecuada de una RNA para un problema particular, pasa por los siguientes pasos o etapas fundamentales: selección de un grupo de excitaciones (entradas) y respuestas (salidas) conocidas y suficientemente amplias en condiciones, la selección del tipo de arquitectura más adecuada para el problema y la etapa de entrenamiento, para que la RNA se adapte y aprenda a dar soluciones (salidas) coherentes con el patrón de aprendizaje inicialmente suministrado.

### Aplicación particular al caso de análisis de suelos

#### Metodología seleccionada

Para el caso planteado en el siguiente trabajo, se decidió estructurar la solución del problema mediante el esquema general presentado en la figura 5.

Como puede observarse, el esquema se estructuró en siete etapas (A-G) y necesita cuatro redes neuronales para obtener la solución. A continuación se describe cada una de las etapas:

A: Una vez obtenida la curva característica  $R$  vs  $p$  en campo, se aplica la ecuación (3), para convertirla en la función  $\rho_m$  vs  $p$ .

B: Se selecciona el mayor valor de  $\rho_m$  y se normaliza la característica en función de este valor, de manera que la misma esté acotada entre 0 y 1 (condición adecuada para el funcionamiento de las RNA en general). El valor seleccionado se denomina,  $p_{base}$ .

C: La primera etapa del trabajo es mediante la identificación de la curva, determinar el tipo de estratificación del suelo de dos capas con el que se va a trabajar. Para ello, se emplea la primera red (RNA 1), la cual dará como resultado uno de los siguientes tres valores (D): 1 ( $\rho_1 < \rho_2$ ), 2 ( $\rho_1 > \rho_2$ ) y 3 ( $\rho_1 = \rho_2$ ).

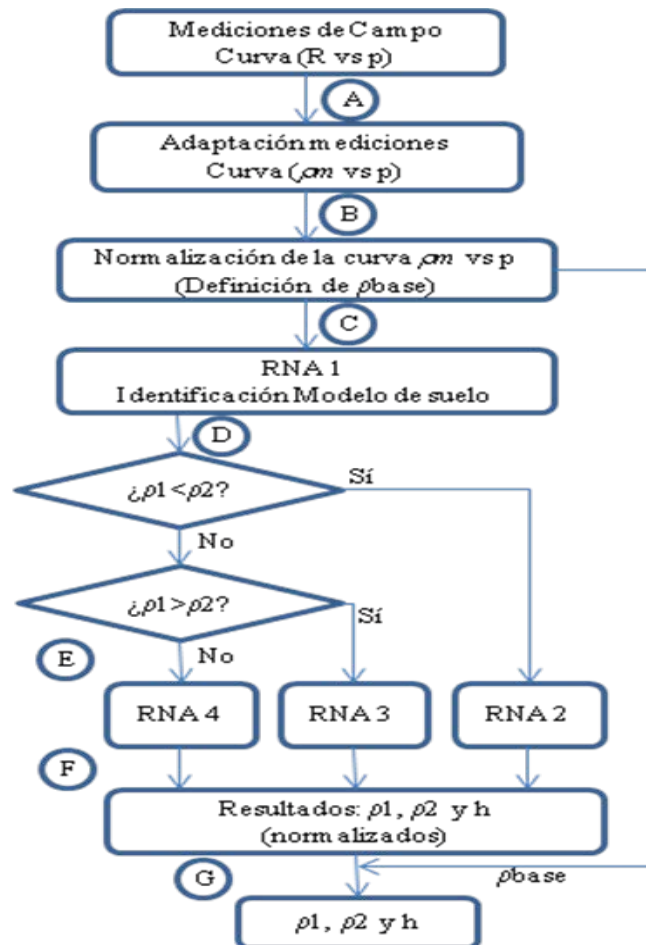


Fig. 5. Esquema de solución propuesto.

E: En función del resultado de RNA 1, conocida como red discriminadora, se seleccionará la siguiente RNA, es decir, hay una RNA para cada tipo de estratificación de suelo. Esto se decidió de esta manera, ya que se maximizaba el éxito de los resultados obtenidos.

F: El resultado de estas RNA, es el trío de valores  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ . Los dos primeros resultados están normalizados en función de  $\rho_{base}$ .

G: Multiplicando por  $\rho_{base}$ , se obtienen los resultados requeridos del modelo biestratificado del suelo evaluado.

El éxito del procedimiento descrito está soportado sobre dos aspectos fundamentales: la correcta selección de la arquitectura de cada RNA y el suficiente entrenamiento de las mismas para un rango significativo de casos probables.

#### Arquitectura y funciones seleccionadas

En total, se tienen cuatro redes y para su selección e implementación se empleó el "toolbox" de Matlab (Neural Networks Toolbox) [7]. Después de una revisión exhaustiva de posibilidades y de seguir las recomendaciones de [7-9], se seleccionaron las redes como lo indica la tabla 1.

Para todas las RNA, se empleó como arquitectura base, el tipo de red de retropropagación o "Backpropagation" y como función de entrenamiento general, la de Lenverberg-Marquardt [7].

Tabla 1 – Parámetros de las RNA (arquitectura y funciones).						
	Capas	Neuronas capa 1	Neuronas capa 2	Función de transferencia capa 1	Función de transferencia capa 2	Función de adaptación
RNA 1	2	11	1	Sigmoide	Purelin	BatchGradientDescentMoment
RNA 2, 3 y 4	2	11	3	Sigmoide	Purelin	BatchGradientDescentMoment

### Entrenamiento de cada RNA

El procedimiento para el entrenamiento de las RNA, puede resumirse en la figura 6.

**El paso 1**, corresponde a la selección de pares (entrada, salida), conocidos y que representen la variedad de casos que pueden presentarse en condiciones reales. Para ello, se seleccionaron los siguientes valores para las variables  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$  (salida conocida):

$\rho_1$  y  $\rho_2$ : de 40  $\Omega\text{m}$  a 1000  $\Omega\text{m}$  en pasos de 40  $\Omega\text{m}$ .

$h$ : de 0,2 m a 2,2 m, en pasos de 0,2 m.

Los datos de entrada (curva  $pm$  vs  $p$ ), se obtienen mediante la simulación en un programa de computación basado en las imágenes de Maxwell para suelos de dos estratos, donde se introducen los datos ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ ) y se simula una barra o jabalina que se va introduciendo al suelo en pasos de 0,2 m (desde 0,2, hasta 2,2 m). Esta simulación da como salida la curva  $R$  vs  $p$  y esta es convertida en la  $pm$  vs  $p$ , mediante la ecuación (3) y normalizada con  $p_{base}$ . Con estos datos, se arman dos vectores para cada caso; un vector de entrada con once datos de  $pm$  normalizada y un vector de salida con tres datos ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$  – normalizados). En total, el escenario de entrenamiento seleccionado posee 6875 casos, de los cuales, 3300 corresponden a  $\rho_1 < \rho_2$ , 3300 son para  $\rho_1 > \rho_2$  y 275 son para  $\rho_1 = \rho_2$ .

**El paso 2**, corresponde a introducir este par de vectores (entrada, salida) conocidos, a cada una de las cuatro redes seleccionadas; así, corresponden 6875 casos de entrenamiento para la RNA 1 (red discriminatoria), 3300 casos para RNA 2 y 3 y 275 casos para RNA 4.

El algoritmo de entrenamiento, funciona como un problema de ajuste de curvas, ya que busca calcular matrices de peso y factores constantes a cada neurona, para que arrojen el menor error general para todos los casos provistos.

El error obtenido en general está en el orden de  $10^{-4}$ , lo que se considera adecuado para el problema planteado.

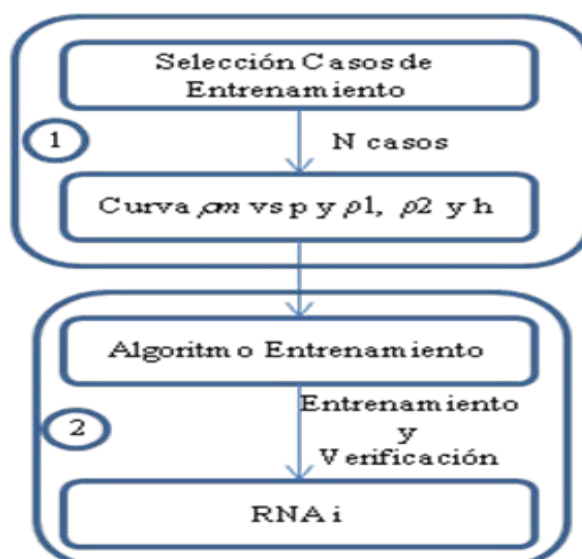


Fig. 6. Esquema para entrenamiento de las RNA.



## RESULTADOS

### Validación de la técnica propuesta con casos teóricos y de campo

Una vez desarrollada la herramienta y entrenadas las RNA, se verificó su comportamiento para un total de 150 casos, de los cuales, 140 corresponden a casos obtenidos teóricamente tras la modelación computacional de un electrodo vertical en un suelo biestrato (se tomaron casos no considerados dentro de los de entrenamiento) y diez casos de mediciones reales de campo, de las cuales, dos tienen además mediciones de resistividad convencionales por el método de Wenner.

En todos los casos empleados para la validación, se obtuvieron resultados correctos y adecuados para el fin perseguido con el trabajo. A continuación se presentan los resultados obtenidos para siete casos seleccionados de entre los 150 anteriormente mencionados.

#### Comprobación con casos teóricos:

En la tabla 2, se muestra un ejemplo de los datos de entrada a la red neuronal, específicamente para el caso 1 de comprobación.

En la tabla 3, se muestran los resultados para tres casos teóricos simulados, comparando los métodos de solución existentes y el planteado.

$\rho(m)$	$R(\Omega)$	$\rho m(\Omega m)$	$\rho m(p.u.)$
0,2	1463	469,0120	1,0000
0,4	824	448,9349	0,9572
0,6	563	422,9300	0,9017
0,8	208	197,0397	0,4201
1	141	160,2247	0,3416
1,2	108	142,5693	0,3040
1,4	87	130,4676	0,2782
1,6	66	110,5971	0,2358
1,8	53	97,9906	0,2089
2	33	66,6443	0,1421
2,2	30	65,6389	0,1400

Prueba	Método [6]			RNA			Teórico		
	$\rho_1(\Omega m)$	$\rho_2(\Omega m)$	$h(m)$	$\rho_1(\Omega m)$	$\rho_2(\Omega m)$	$h(m)$	$\rho_1(\Omega m)$	$\rho_2(\Omega m)$	$h(m)$
1	469,01	127,21	0,4	502,12	91,98	0,63	500	95	0,65
2	96,97	93,12	0,2	108,10	52,56	0,19	110	55	0,2
3	939,62	54,54	0,6	993,37	38,57	0,83	990	40	0,85

Los resultados obtenidos por el método propuesto, son más precisos que los arrojados con el descrito en [6]. Esto se justifica en el sentido de la necesidad de criterios subjetivos para obtener los parámetros de  $\rho_2$  y  $h$  y se tiene menor diferencia con  $\rho_1$ , debido a que su obtención procedimental no es dependiente de algún criterio cualitativo.

La comparación entre el método propuesto y los valores teóricos, indican correlaciones superiores al 97% en todos los casos estudiados.

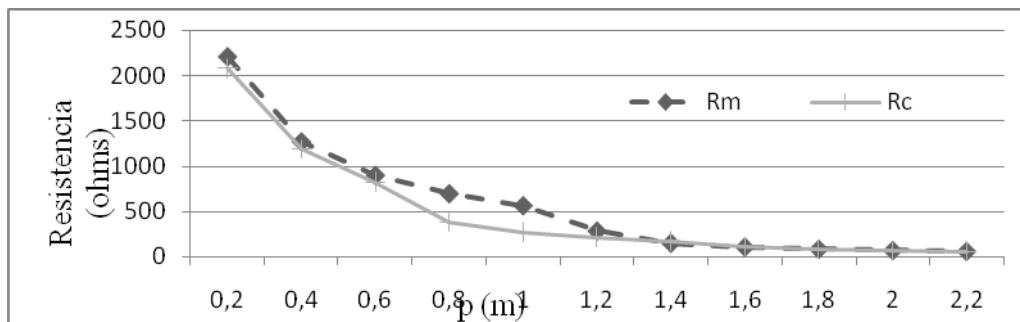
### Comprobación con casos de campo

A continuación se presentan los resultados obtenidos de tres mediciones efectuadas en campo. Dos de ellas, fueron en sótanos de edificios y la tercera en una carretera de asfalto. En todos los casos hubo que proceder con la metodología descrita al inicio del trabajo (apertura de hueco, marcaje de la barra cada 20 cm e introducción progresiva y medición de la resistencia de puesta a tierra empleando el método de triangulación). Los resultados obtenidos se presentan no solo en tabla, sino en una gráfica que muestra la curva  $R$  vs  $p$  de la medición y una curva  $R$  vs  $p$  obtenida con los datos de las RNA y luego simulados en un programa especializado para la modelación de electrodos en suelos biestratificados.

La tabla 4, muestra los resultados obtenidos por los dos métodos evaluados.

La figura 7, muestra la característica  $R$  vs  $p$  medida y obtenida con los resultados de la RNA. Se obtuvieron correlaciones superiores al 90% en todos los casos estudiados.

prueba	Método [6]			RNA		
	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$h$ (m)	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$h$ (m)
4	26,31	74,87	0,4	37,36	77,46	0,61
5	78,93	422,51	1	44,57	100,15	0,23
6	707,20	190,79	0,8	722,83	204,14	0,58



**Fig. 7. Curva  $R$  vs  $p$ .  $R_m$ : corresponde a la medida en campo y  $R_c$ : corresponde a la calculada a partir de los resultados de las RNA. Correlación 91%.**

### Comprobación caso completo en campo

El último caso de comprobación colocado, corresponde a una medición de campo, en la cual no solo se estimó la resistividad por el método propuesto, sino que también se pudo medir de manera convencional empleando el método de los cuatro electrodos en configuración simétrica (Wenner). Estos resultados se muestran en la tabla 5.

En la figura 8, se muestra la correlación entre las curvas  $R$  vs  $p$  medida y calculada. Para este caso en particular, se obtuvo una correlación de 99% y al comparar los resultados con los procesados por el método de los cuatro electrodos, se observa la correcta aproximación conseguida con el método de medición y aproximación propuesto.

prueba	Método [6]			RNA			Wenner		
	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$h$ (m)	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$h$ (m)	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$h$ (m)
7	372,51	170,22	1,2	386,38	191,97	1,33	393,52	185,43	1,28

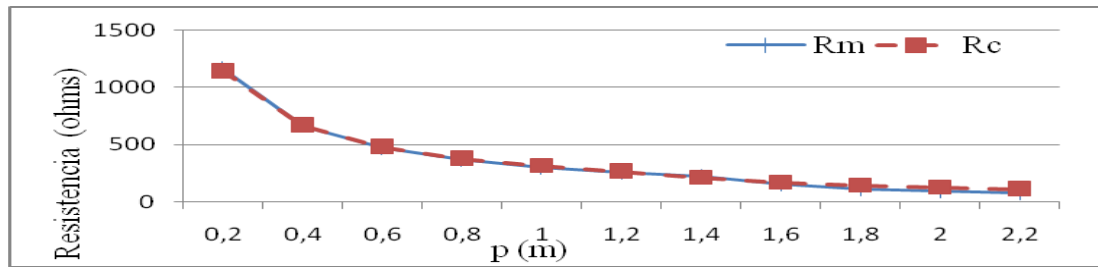


Fig. 8. Curva  $R$  vs  $p$ .  $R_m$ : corresponde a la medida en campo y  $R_c$ : corresponde a la calculada a partir de los resultados de las RNA. Correlación 99%.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha planteado una metodología novedosa que emplea redes neurales y ha descrito procedimentalmente el desarrollo incluyendo las labores de campo para recolección de datos confiables, a fin de poder obtener modelos eléctricos del suelo en zonas urbanas altamente congestionadas, donde las técnicas convencionales no se pueden aplicar. Para ello, se presentó detalladamente cada una de las etapas para creación, entrenamiento y pruebas de la red neural a fin de que el trabajo pueda ser imitado y por tanto aplicado en la ingeniería de diseño. La metodología fue validada con data teórica y experimental, mostrando buenos resultados al ser comparados con los datos conocidos o al ser comparados con otras metodologías. El tipo de problema planteado mostró ser adecuado para ser solucionado con este tipo de técnicas de inteligencia artificial por reconocimiento de patrones, ya que las arquitecturas más sencillas empleadas, funcionaron para los casos estudiados. Con la metodología propuesta, se logra procesar el modelo de suelo para dos estratos, aplicando una técnica especialmente útil en zonas donde las características de espacio y fronteras, pueden ser limitaciones importantes.

## REFERENCIAS

- [1] IEEE. "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System Part 1: Normal Measurements". IEEE Std 81, Mayo 1983.
- [2] ASTM. "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method". ASTM G57-06, 2006.
- [3] Melicyoulos, A.P.; et al., "Estimation of Soil Parameters from Driven Rod Measurements". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. September 1984, vol. PAS-103, n.9.
- [4] Agulleiro, I., "Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas". Trabajo especial para el título de Especialista en Instalaciones Eléctricas. Universidad Simón Bolívar, Enero 2012.
- [5] IPI2WIN. "Programa gratuito para la interpretación geoelectrica: 1D interpretation of VES profile". Versión gratuita completa. [consulta: 15 de Enero de 2011], Disponible en: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>
- [6] Nahman, J.; Salomón, D., "A Practical Method For The Interpretation of Resistivity Data Obtained From Driven Rod Tests". IEEE Transactions on Power Delivery, October 1988, vol.3, n.4, ISSN 0885 - 8977.
- [7] Matlab, "Neural Networks Toolbox". Mathsoft Inc., Versión 6, 2002, p5.
- [8] Cavuto, D., "An exploration and development of current artificial neural network theory and applications with emphasis on artificial life". PhD thesis. The Cooper Union Albert Nerken School of Engineering. Mayo 1997.
- [9] DUDA, R.; HART, P., "Pattern Classification". Nueva York: Jhon Wiley & Sons, 2da Edición, 2001.

## AUTOR

### Miguel Martínez Lozano

Ingeniero Electricista, MSc en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería Industrial. Departamento de Conversión y Transporte de Energía, Lab. A. Sección Alta Tensión. Caracas – Venezuela.

e-mail: [mmlozano@usb.ve](mailto:mmlozano@usb.ve)