*Ciencias de la Tierra y el Espacio, 2000, Vol.1, pp.22--30, ISSN 1729-3790*

# Caracterización geoeléctrica de un polígono experimental para el estudio preliminar del comportamiento de los aterramientos eléctricos

José L. Cuevas Ojeda [(1)], Lázaro A. Díaz Larrinaga [(1)], Ana I. Hung Blanco, Mario Rubio Sauvalle [(1)]

[(1)] Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212. No.2906 entre 29 y 31, Rpto. La Coronela. La Lisa, Ciudad de La Habana. Cuba

| Recibido: enero-octubre, 2000 | Aceptado: noviembre, 2000 |
|---|---|

**Resumen**

En el presente trabajo se muestran los resultados de la caracterización geoeléctrica de un polígono experimental establecido en el Municipio de La Lisa por los Servicios Geofísicos (GEOSER) del Instituto de Geofísica y Astronomía, para el estudio del comportamiento de diferentes dispositivos de aterramiento eléctrico, los cuales se instalan para la protección contra descargas eléctricas naturales y sus efectos secundarios. El área fue estudiada tanto con métodos de Perfilaje Eléctrico (superficie), como con Sondeos Eléctricos Verticales (profundidad), demostrándose la importancia de los trabajos geoeléctricos como guía para la ubicación de los aterramientos. Se obtuvieron algunos resultados preliminares acerca del comportamiento de los diferentes dispositivos de aterramiento instalados en dicho polígono. Se ha observado, a través de mediciones periódicas de la resistencia, que los dispositivos compuestos por sistemas de barras metálicas (picas) resultan más estables en el tiempo que los de cinta o pletina.
Por otra parte, los ensayos realizados con electrodos de Grafito demuestran que estos exhiben un comportamiento bastante estable con el tiempo al mejorar previamente el terreno que lo circunda con una mezcla fluida de capa vegetal y sales especiales.

**Palabras clave:** geoelectricidad, aterramientos eléctricos.

# Geoelectrical characterization of a test site for the preliminar study of grounding devices behavior

**Abstract**

In this paper, the results of the geoelectrical characterization carried out in a test site are shown. This characterization was conducted by GEOSER (Geophysical Services Group), in order to study the behavior of several grounding devices which are used to protect civil installations from lightning and its secondary effects. The Electrical Profiling and Vertical Electrical Sounding techniques were used over the test area demonstrating that both techniques are suitable for the selection of the place where the grounding devices should be installed. Some preliminary results have been achieved such as: from the periodic measurements of ground resistivity for different devices is observed that the metallic bar electrodes shown the better stability and in case of the graphite electrodes, it is possible to get good stability when the soil is previously treated with a mix of ground cover and special salts.

**Key words:** geoelectricity, electrical grounding.

## 1. Introducción

Durante más de 25 años el Instituto de Geofísica y Astronomía ha venido trabajando en la realización de mediciones geoeléctricas para la caracterización de las propiedades resistivas del medio geológico en los primeros metros con fines de su empleo en el diseño de redes de aterramientos eléctricos para la protección necesaria a distintas instalaciones o construcciones contra descargas eléctricas naturales, así como para garantizar el aterramiento eléctrico de equipos electrónicos.

El conocimiento del comportamiento de la resistividad para distintos suelos o rocas es un elemento a tener en cuenta para el diseño de redes de aterramientos eléctricos, ya que de esta forma se garantiza que el mismo sea eficiente y económico. Es por esta razón que el Instituto, hoy bajo su marca comercial GEOSER, sigue prestando el servicio de diseño de aterramientos eléctricos a diferentes instituciones, organizaciones y asociaciones mixtas radicadas en el país y ha proyectado y comenzado a ejecutar un proyecto de establecimiento de un polígono experimental que sirva para el estudio del comportamiento de diferentes tipos de dispositivos de aterramientos eléctricos.

Es por ello, que en el presente trabajo se estudia el comportamiento de la resistividad tanto en superficie como en los primeros metros del corte geológico en el polígono experimental, ubicado en el área del Instituto.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Técnicas Geoeléctricas

El conocer los límites en profundidad de los diferentes estratos resistivos, así como las variaciones laterales de la resistividad en los primeros metros del corte, son elementos de gran importancia para el diseño de los dispositivos de aterramiento por lo que, dentro del conjunto de métodos geoeléctricos de corriente continua empleados, se incluyeron el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y el Perfilaje Eléctrico (PE), los que a continuación se abordan brevemente.

SEV. Inicialmente se planificó realizar dos ramas de SEV que cortaran en diagonal (NW-SE) el área de trabajo, para así lograr la mayor longitud posible de estudio; siendo imposible su ejecución total por problemas técnicos, se obtuvo sólo una rama compuesta por tres SEV (P19-7D, P23-13D y P7-14I). Para la medición de los SEV se empleó un dispositivo Schlumberger, con semiabertura máxima (AB/2) igual a 65 m y con dos aberturas de las líneas de potencial, M1N1/2 = 5 m y M2N2/2= 10 m.

Perfilaje Eléctrico. Se proyectó la realización de perfilaje eléctrico WENNER de forma tal que se pudiera usar uno de las configuraciones utilizadas en las mediciones para el diseño de los aterramientos eléctricos. El paso de medición escogido fue de 1 m, con la finalidad de conocer las heterogeneidades laterales del primer horizonte. Para lograr este objetivo se seleccionó la abertura óptima teniendo en cuenta los resultados de la interpretación de los SEV (que serán discutidos posteriormente) y en consecuencia se ejecutaron dos perfiles con aberturas diferentes (1 m y 4 m), obteniéndose similares resultados, por lo que seleccionó la abertura de 1 m, ya que con la misma se pierden menos puntos en los extremos de los perfiles y el trabajo es más económico, además de ser ésta la abertura más utilizada en los trabajos para aterramientos eléctricos.

### 2.2 Dispositivos de Aterramiento

El diseño, dimensiones y configuración de una puesta a tierra con todos sus elementos componentes, depende en mucho del valor de resistividad eléctrica del suelo en el que se instalarán, además del tipo de equipo que se necesite aterrar (proteger), sus requerimientos eléctricos o de voltaje y el tipo de electrodo que se utilizará.

La resistividad del terreno, como se sabe, puede variar considerablemente según su naturaleza (arcilla, arena, roca, etc.).

A raíz de todas las mediciones geoeléctricas que se llevaron a cabo en el área de estudio de nuestro Instituto, el grupo de Puestas a Tierra y Pararrayos decidió establecer un polígono experimental en dicha área, específicamente en su parte sudeste con el objetivo de comparar el comportamiento y la efectividad de diferentes dispositivos de aterramiento a través de mediciones periódicas de la resistencia de los mismos.

Fue objetivo inicial, colocar dispositivos en cada una de las tres zonas delimitadas según la resistividad, pero resultó imposible debido a la presencia de áreas cementadas alrededor del parque (ver Figura.3).

Se instalaron inicialmente una cinta o cable trenzado de cobre y una pletina o plancha delgada y alargada de bronce.

Posteriormente se instaló un dispositivo compuesto por cuatro barras o picas de bronce de 0,50 m de longitud y 32 mm de diámetro, unidas por un cable de cobre trenzado AGW-50 configurando un lazo cuadrado.

Este último dispositivo es semejante al ya instalado para aterrar el equipo de telex, pero que consta de once picas en configuración rectangular.

En el mismo polígono se ensayan dos electrodos especiales de grafito que se componen de una barra de grafito rígido dentro de un saco relleno de sales especiales cuyas dimensiones generales son: 0.60 m de largo y 0.15 m de ancho.

Con el ánimo de chequear el comportamiento de la resistencia de estos sistemas de aterramiento, fueron planificadas una serie de mediciones de comprobación las cuales se efectuaron durante un gran tiempo a un ritmo de una medición semanal primeramente, teniéndose muy en cuenta los días de lluvia, lo que corroboró la influencia de la misma en la disminución de la resistencia de todos los dispositivos en mayor o menor cuantía debido a la humedad del terreno.

Posteriormente, el intervalo entre las mediciones se estableció a razón de una cada quince días aproximadamente.

## 3. Resultados y discusión

Es amplia la utilidad del método geoeléctrico de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) para determinar la profundidad de las rocas sanas bajo las capas de suelo, los espesores y naturaleza de las capas superficiales del terreno en zonas de sedimentos recientes y como complemento del Perfilaje Eléctrico (PE). En este epígrafe se discuten los resultados obtenidos al aplicar los métodos de SEV y PE, para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados: 1- Interpretación de las curvas de SEV, 2- Corte Geoeléctrico, 3- Corte Geólogo-geofísico y 4- Mapa de Isohomas.

Primeramente se realizó la interpretación de los sondeos obtenidos en el área de estudio con la información aportada por las excavaciones someras, localizadas en las cercanías del área de los trabajos y realizadas con diferentes fines, información ésta que fue empleada para acotar algunos parámetros en el proceso de interpretación y así eliminar en parte las ambigüedades que se presentan al realizar la interpretación cuantitativa de los sondeos. Todo ello, unido al uso de los sistemas de computación SAISEV (Valdés et al., 1987) y SIS (Roche et al., 1990) hicieron posible obtener buenos resultados en la interpretación de los tres sondeos ejecutados, los mismos se recogen en las Figuras 1a, 1b y 1c. A partir de las curvas se lograron cartografiar tres horizontes diferentes atendiendo al comportamiento de la resistividad, excepto la curva perteneciente al sondeo P23-13D, que resultó ser de dos capas, (ver Tabla 1), no imposibilitando el buen desenvolvimiento del trabajo, ya que 2 m de profundidad son suficientes para el estudio del comportamiento de los diferentes dispositivos de aterramiento.

Obtenidos los resultados de la interpretación cuantitativa de los sondeos (P19-7D, P23-13D y P7-14I), Tabla 1, se confeccionó el corte geoeléctrico del área de interés (Figura 2), donde se detalla una primera capa de un espesor aproximado de 2 m, con una resistividad característica de 20 W -m, (arcilla). Dicha capa conserva estos parámetros a lo largo de los tres sondeos, y yace sobre otra capa mayor resistividad con valores que oscilan entre los 65 y 95 W -m (calizas entremezcladas con material arcilloso) y de un espesor de aproximadamente 8 m, según los sondeos P19-7D y P7-14I, ya que su límite inferior no es revelado en el sondeo P23-13D. Por último, los sondeos P19-7D y P7-14I, muestran una tercera capa cuya resistividad oscila entre 50 y 66 W -m.(calizas de la Formación Cojímar de edad Mioceno Medio Temprano).

**Tabla I**. Resultados de la interpretación de los sondeos.

| P7-14I | | P19-7D | | P23-13D | |
|---|---|---|---|---|---|
| r (W -m) | H(m) | r (W -m) | H(m) | r (W -m) | H(m) |
| 18 | 2.49 | 20 | 2.50 | 15 | 2.8 |
| 90 | 5.85 | 86 | 4.0 | 66 | |
| 50 | | 52 | | | |

Todos estos valores de resistividades se corresponden muy bien con los valores característicos de las rocas presentes en el corte. Hay que señalar la presencia de un suelo arcilloso en el que el comportamiento de la resistividad es muy inestable atendiendo a las épocas lluviosas en que la resistividad disminuye, ocurriendo lo contrario en épocas de secas.

Esclarecidos los parámetros físico-geométricos del primer horizonte se pasó a estudiar el comportamiento lateral del mismo con el uso del Método del Perfilaje Eléctrico (PE), para lo cual se confeccionó el Mapa de isolíneas de resistividad (isohomas), en el mismo (Figura 3), se refleja el comportamiento superficial de la resistividad en los primeros dos metros de profundidad (según la interpretación de los SEV). De forma general el área de estudio está dividida en tres zonas con características resistivas diferentes, lo que permite diferenciar el área atentendiendo al grado de alteración del suelo en: muy alterado (90-140 W -m) alterado (40 -90 W -m) y poco

alterado (10-40 W -m), recomendando las dos últimas para el estudio del comportamiento de los dispositivos de aterramiento

Para comprobar la validez de los resultados anteriormente expuestos, se determinó la precisión del levantamiento, mediante la repetición del 15 % del total de puntos del levantamiento (55 puntos) y empleando la siguiente fórmula:

Ec= [S (Rm-Rl)2/n-1]1/2 (1)

donde:
Ec = Error medio cuadrático del levantamiento.
Rm = Valor medido.
Rl = Valor repetido
n = Total de puntos repetidos.

Se alcanzó un Ec = 15,7 W -m, siendo éste permisible para que el resultado final del levantamiento cumpla su objetivo principal, aún más, si tenemos en cuenta la presencia de un primer horizonte arcilloso, el cual presenta un comportamiento muy inestable al factor humedad, por lo que se evitó realizar mediciones en días lluviosos.

Si consideramos la anomalía a interpretar, aquella que resulte ser tres veces superior al error del levantamiento y además que sea correlacionable en más de dos perfiles, entonces podemos confirmar la existencia de una anomalía dentro del área de estudio, la cual pudiera estar relacionada a los fenómenos kársticos presentes en el área, los que no deben ser descartados, ya que en los límites del polígono existen varios indicios de la existencia de los mismos, como por ejemplo: presencia de agrietamientos en las paredes de la casa principal y la existencia en los límites exteriores del polígono de un hueco, con aproximadamente 20 m de profundidad, motivado por la existencia primaria de una fosa y su posterior derrumbe.

Para evaluar la estabilidad del comportamiento de los diferentes dispositivos de aterramiento, a través de los valores de su resistencia medida periódicamente, se realizó un análisis estadístico el cual se resume en la siguiente tabla:

**Tabla II**. Comportamiento estadístico de los dispositivos de aterramiento.

| Parámetros estadísticos | Cinta | Grafito | Cuatro picas | Pletina | Once picas |
|---|---|---|---|---|---|
| Media | 22.33 | 5.42 | 10.13 | 33.91 | 5.45 |
| Mediana | 20 | 5.28 | 9.75 | 35.5 | 5.3 |
| Desviación estándar | 8.72 | 2.38 | 3.57 | 13.67 | 1.41 |
| Varianza de la muestra | 76.17 | 5.69 | 12.80 | 186.91 | 2.00 |
| Coeficiente de asimetría | 0.32 | 0.25 | 0.001 | -0.18 | 0.26 |
| Rango | 29.5 | 6.92 | 14.5 | 37.5 | 4.5 |
| Mínimo | 10 | 2.28 | 1.5 | 14.5 | 3.3 |
| Máximo | 39.5 | 9.2 | 16 | 52 | 7.8 |
| Suma | 893.3 | 81.36 | 385 | 678.3 | 202 |
| Cuenta | 40 | 15 | 38 | 20 | 37 |

Como se puede observar, el dispositivo compuesto por el conjunto de once picas resulta ser el más estable. Este presenta la menor varianza y el menor rango, siendo además mínima la diferencia entre la mediana y la media. En la Figura 4 se muestra el comportamiento de los valores temporales de la resistividad, los cuales se mantienen muy cercano al valor de resistencia teórica calculada para este dispositivo (5 W ).

Si observamos, el electrodo de Grafito presenta estadísticamente las mismas características que el conjunto de once picas, con el valor de la media inferior al valor de la resistencia teórica (Figura 5).

Por otra parte, el electrodo de Pletina resulta ser el de menor estabilidad. Nótese que su rango y varianza presentan los valores más altos de todo el conjunto estudiado (Figura.6).

El dispositivo de cuatro picas mantiene un comportamiento similar al electrodo de Grafito, mientras que el de Cinta se asemeja al de pletina (Figuras 7 y 8).

Se constató además, que los períodos lluviosos son favorables a los electrodos de picas lográndose mantener los valores de resistencia por debajo del valor teórico por un período de tiempo relativamente prolongado en dependencia de la humedad del terreno.

Para evaluar la variabilidad absoluta del comportamiento de los diferentes dispositivos, se determinó el error medio cuadrático con respecto a la resistencia teórica de cada configuración, obteniéndose como resultado que los electrodos de picas son más estables respecto a las variaciones temporales que los electrodos de Cinta y Pletina.

**Tabla III**. Comportamiento del error medio cuadrático con respecto al valor de la resistencia teórica.

| *Electrodo* | Resistencia Teórica | Emc |
|---|---|---|
| Cinta | 18 | 1.47 |
| Pletina | 30 | 3.10 |
| Grafito | 10 | 0.66 |
| Cuatro picas | 10 | 0.57 |
| Once picas | 5 | 0.24 |

En la práctica se ha comprobado que buscando mayor separación entre las picas, se logra bajar la resistencia del sistema, pero en la práctica y con mucha frecuencia no se dispone del espacio suficiente para instalar un sistema de aterramiento compuesto por picas y que ofrezca una resistencia entre 0.1 W y 2 W , que es la más solicitada actualmente debido a la creciente necesidad de aterrar y proteger redes de computadoras, equipos eléctricos sensibles, de comunicación, etc. que requieren de una tierra con estos rangos de resistencia para su buen funcionamiento. Sería necesario entonces aumentar el número de electrodos, de ahí la posibilidad de utilizar los de Grafito, que hasta el momento han exhibido un comportamiento bastante estable de la resistencia con el tiempo.

**Conclusiones**

Atendiendo al comportamiento superficial de la resistividad el área de estudio quedó dividida en tres sectores diferentes: uno caracterizado por valores de resistividad entre 0 W -m y 40 W -m , otro con valores más altos que oscilan entre los 40 y 90 W -m y el último con valores entre 90 y 140 W -m, sector este no recomendado para los trabajos de aterramiento.

En el polígono experimental se obtuvo como resultado de las mediciones de perfilaje una anomalía circular con una amplitud de 140 W -m, la que puede estar relacionada con los fenómenos kársticos presentes.

El tipo de electrodo más estable en suelos con resistividad de 30 W -m y un espesor arcilloso de 2 m es el de Pica o barras, seguido de los electrodos de Grafito, los de mayor inestabilidad resultaron ser los de Cinta y Pletina.

Observando el comportamiento de los electrodos de grafito y comparándolo con el resto podemos inferir que resultan ideales para sustituir a los sistemas de picas en aquellos lugares en que el espacio no lo permita y haya necesidad de un aterramiento con valores de resistencia bajos, ya que solamente es necesario cavar un hueco de aproximadamente de 0.64 m3 de volumen para instalar uno en cualquier tipo de suelo, pues el grafito se coloca dentro del medio o material que se decida como relleno circundante, dando la posibilidad de escoger uno de baja resistividad (sales especiales).

**Bibliografía**

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA (ACC) & INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA (IGP) (1990): Mapa Geológico de Cuba (1: 250 000)

COTILLA, M. O. (1995): Caracterización Geólogo-Ambiental del municipio La Lisa. Anteproyecto, IGA-CITMA, 5 pp.

CUEVAS, J. L. , J. L. GIL (1988): Utilización del perfilaje eléctrico de resistividad empleando una configuración cuadrada de electrodos en las investigaciones. Voluntad Hidráulica No. 77 p. 22-34.

LLUSÁ, J. C., M. SERRANO & J. L. CUEVAS (1995): Diseño y Construcción de un Resistivímetro. Anteproyecto, IGA-CITMA, 3 pp.

PROYECTO DE NORMA UNE 21186 (1988): "Protección de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivo de cebado", Cap. 4: Tomas de Tierra, 4 pp.

ROCHE, A., N. PÉREZ & W. CEBRIÁN (1991): Sistema de interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales (SIS), (Versión 1.0).

VALDÉS, J.J., J.L. CUEVAS, J.L. GIL, A. LANG (1989): SAISEV: Un sistema automatizado de sondeos eléctricos verticales. (Versión 2.86). Voluntad Hidráulica No. 80 p. 35-41.

**FIGURAS**

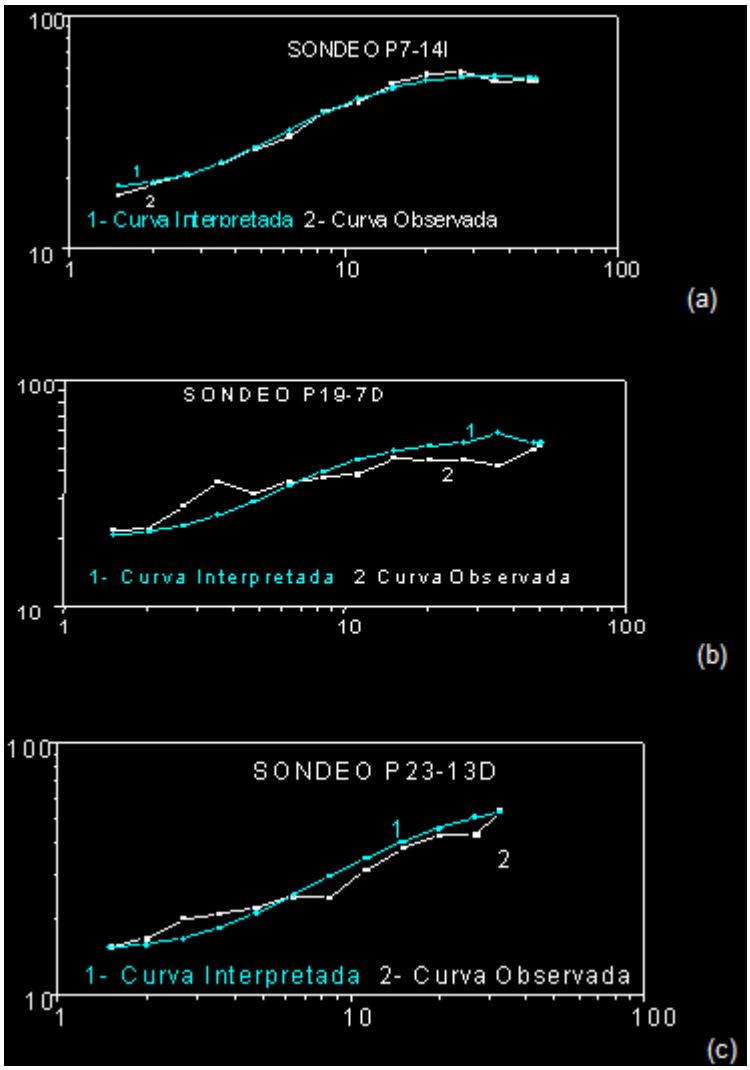



**Fig1**: Interpretación de los Sondeo Eléctricos Verticales: a - Sondeo P7-14 I, b - Sondeo P19-17D y c - Sondeo P23- 17D.

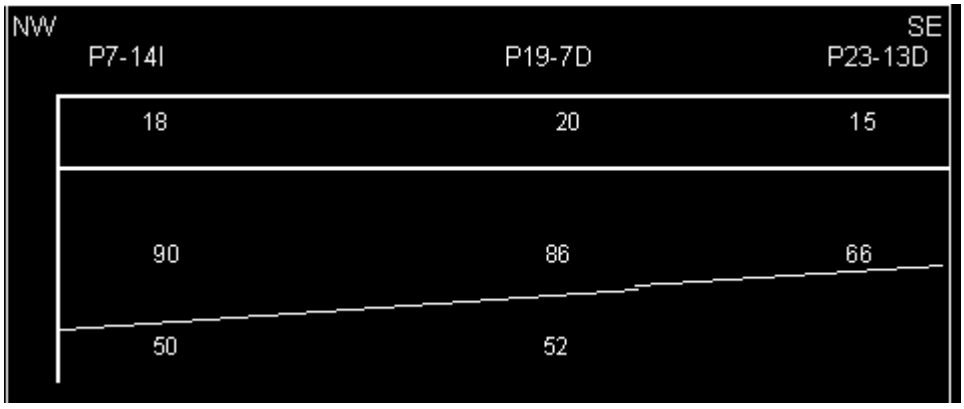



**Fig 2**: Corte geoeléctrico

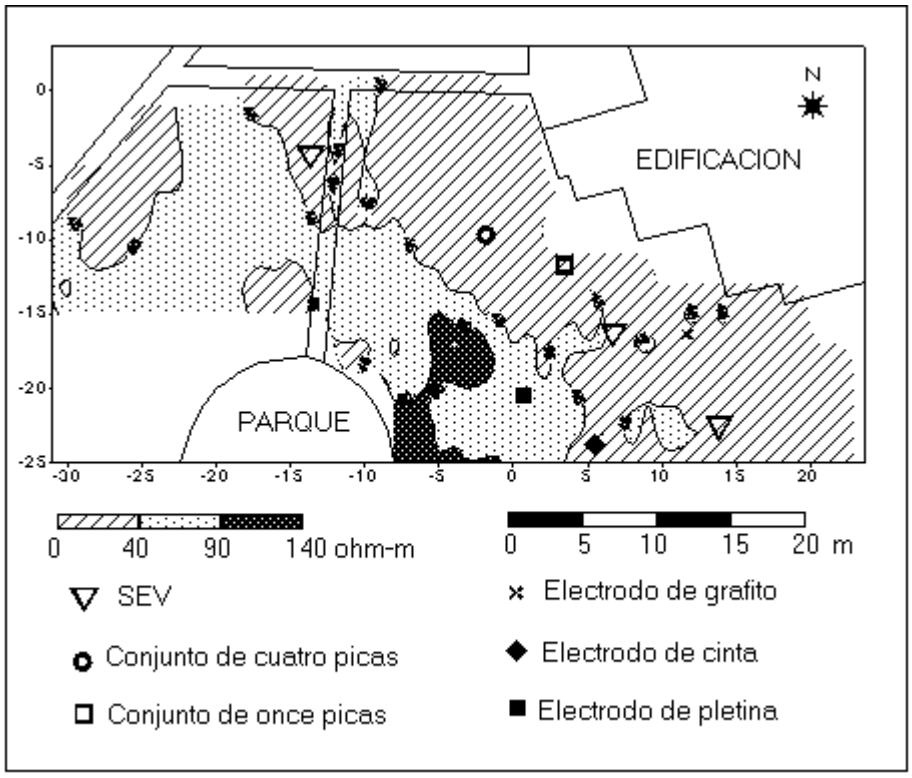



**Fig 3**: Mapa de Isohomas.

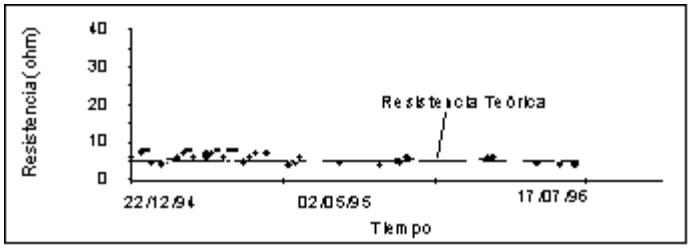



**Fig 4**: Comportamiento temporal de la resistencia del conjunto de once picas.




**Fig 5**: Comportamiento temporal de la resistencia del electrodo de Grafito.

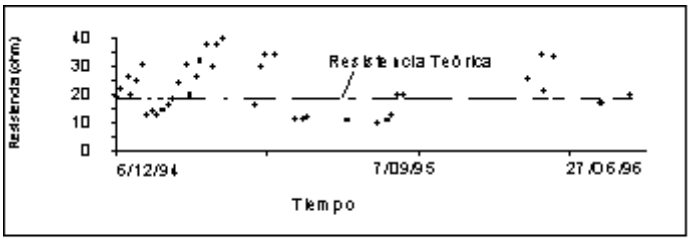



**Fig 6**: Comportamiento temporal de la resistencia del electrodo de Pletina.

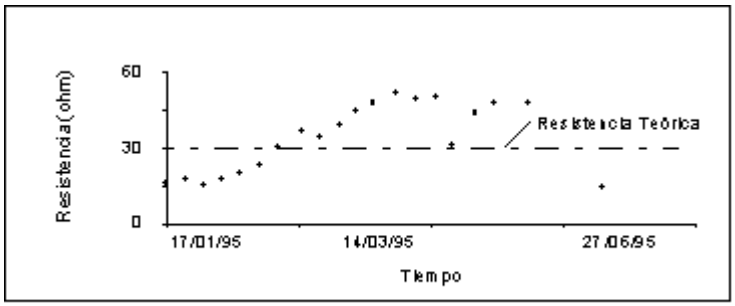



**Fig 7**: Comportamiento temporal de la resistencia del conjunto de cuatro picas.

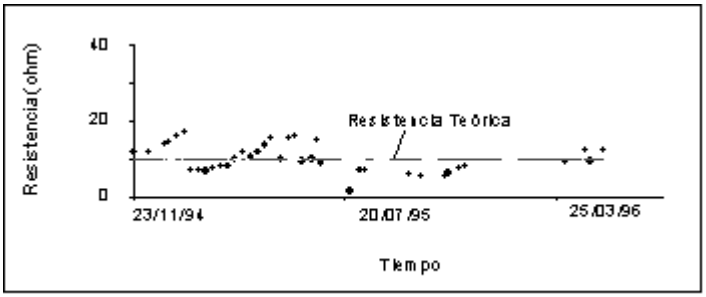



**Fig 8**: Comportamiento temporal de la resistencia del electrodo de Cinta.