

Interpretación de las Mediciones de Resistividad

Prof. Claudio González Cruz
Serie de Apuntes Técnicos
SAT-ELEC03-2025
Edición 2025

Los datos que entrega el instrumento que se utiliza para el sondeo de terrenos por el método de los cuatro electrodos, son valores de resistencia de diferentes puntos del suelo en función de la separación entre ellos utilizada. Estos datos deben insertarse en la expresión de Wenner o Schlumberger para la obtención de la resistividad aparente para cada muestra del terreno. La forma como cambia esta al variar la separación entre electrodos, da la pauta para interpretar y determinar la constitución del terreno investigado.

Los terrenos en general se componen de varios estratos horizontales (o con cierta inclinación hacia esto), compuestos de materiales de distinta constitución, por lo que su resistividad varía notoriamente con la profundidad. La distribución vertical de las resistividades dentro de un volumen determinado del subsuelo recibe el nombre de corte geoelectrico. Para muchos fines, la geología bajo la superficie puede representarse aproximadamente por un corte constituido por una sucesión de capas uniformes y horizontales.

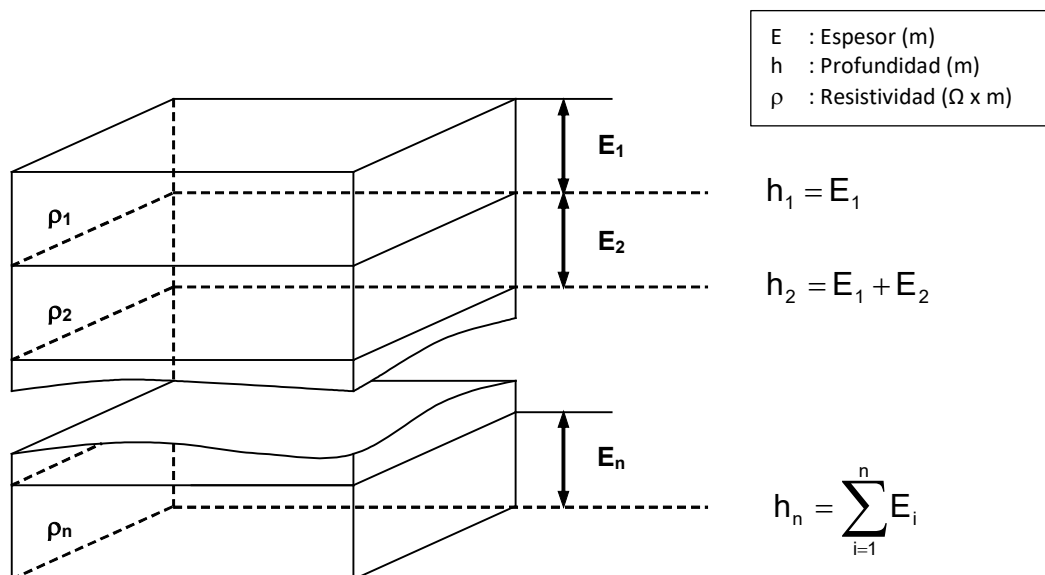


Figura 1 – Corte geoelectrico de “n” capas

Los cortes geoelectricos pueden clasificarse según su número de capas, y subdividirse conforme la variación de la resistividad con la profundidad. Para analizarlos y clasificarlos, vamos a comenzar por establecer algunos criterios generales que nos permitirán simplificar la comprensión y el análisis del tema.

La clasificación tradicional de curvas de resistividad aparente mediante letras como A, H, K, Q y sus posibles combinaciones responde a una necesidad de resumir visualmente la geometría resistiva de los cortes geoelectricos, siendo en general una convención práctica y ampliamente aceptada en geofísica eléctrica (caso del gran trabajo contenido en el texto "*Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered Structures*" de Enrique Orellana y H.M. Mooney de 1966). Sin embargo, la abundancia de combinaciones puede generar redundancia interpretativa y complejidad innecesaria en modelos sistemáticos, considerando que en la actualidad utilizamos programas informáticos que nos permiten desarrollar análisis mucho más precisos para interpretar rápidamente la forma de las curvas de resistividad aparente obtenidas en Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

Este trabajo propone una simplificación mediante el uso exclusivo de dos letras en todas sus combinaciones:

- A : Curva de resistividad ascendente ($\rho_{i+1} > \rho_i$)
- D : Curva de resistividad descendente ($\rho_{i+1} < \rho_i$)

La clasificación se basa en el análisis comparativo entre resistividades sucesivas, sin considerar inflexiones locales o transiciones intermedias. Los casos mixtos (sistemas de varias capas), se agrupan según el predominio resistivo (ascendente o descendente), priorizando la tendencia global del corte.

Las ventajas que se pueden señalar del presente modelo simplificado son las siguientes:

- **Reducción de redundancias:** evita la proliferación de combinaciones complejas tales como las de tipo AK, HA, KQ, etc.
- **Mayor sistematicidad:** facilita la tabulación y comparación de modelos multicapas, especialmente en terrenos de varios estratos.
- **Adaptabilidad al análisis de perfil:** útil para estudios de contraste resistivo más que para interpretación litológica detallada.
- **Transparencia metodológica:** el criterio es explícito, reproducible y defendible en entornos académicos y técnicos.

En general, un corte de “ n ” capas puede clasificarse en uno de 2^{n-1} tipos posibles, los cuales se identifican mediante “ $n - 1$ ” letras.

Un modelo de **dos capas** representa un subsuelo compuesto por una capa superficial con una resistividad ρ_1 y una segunda capa más profunda con resistividad ρ_2 , en el que aplicando la consideración anterior (2^{n-1}), nos daría dos posibles alternativas ($2^{2-1} = 2^1 = 2$), identificadas cada una por una sola letra ($n - 1 = 2 - 1 = 1$). Este tipo de corte es ideal para escenarios simples donde el contraste eléctrico entre ambas unidades es claro.

Tabla 1
Tipos de curvas para suelos de 2 capas

Tipo de Curva	Relación de Resistividad	Descripción
A	$\rho_1 < \rho_2$	La resistividad aumenta con la profundidad: sugiere una capa superficial más húmeda, arcillosa o alterada sobre un horizonte más seco, consolidado o rocoso.
D	$\rho_1 > \rho_2$	La resistividad disminuye con la profundidad: indica una capa superficial seca o resistiva sobre material más húmedo, arcilloso, fracturado o conductivo en profundidad.

Las descripciones indicadas en la tabla anterior son sólo referenciales por lo que, en estudios reales, deben ajustarse según el contexto hidrogeológico, litológico o climático del área de estudio. Por ejemplo, si la descripción de la curva tipo “A”, fuera dedicada a un lugar de la comuna de Huechuraba de la Región Metropolitana de Santiago de Chile, se podría decir que el contexto geológico incluye depósitos aluviales, coluviales y presencia de rocas volcánicas del tipo andesítico-basáltico provenientes de la Cordillera de los Andes, además que el perfil sugiere una capa superficial más conductiva (por humedad y mineralogía), sobre una base más resistiva, como roca volcánica alterada o parcialmente meteorizada, lo cual es coherente con zonas cercanas al Parque Metropolitano Norte o sectores como Pedro Fontova, donde se han reportado perfiles similares en estudios geoeléctricos.

En un corte de **tres capas**, el subsuelo se representa con tres unidades diferenciadas con su propia resistividad: ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 agrupados en 4 combinaciones posibles ($2^{n-1} = 2^{3-1} = 2^2 = 4$). Este enfoque permite interpretar formaciones más complejas que los modelos de dos capas, mostrando variaciones internas que pueden reflejar cambios litológicos, contenidos de humedad o niveles de compactación, utilizando para su identificación 2 letras ($n - 1 = 3 - 1 = 2$).

La primera letra representa cómo varía la resistividad desde la superficie hacia la segunda capa, mientras que la segunda letra muestra la transición entre la segunda y la tercera capa.

Tabla 2
Tipos de curvas para suelos de 3 capas

Tipo de Curva	Relación de Resistividad	Descripción
AA	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	Aumento progresivo de resistividad: suelo arcilloso húmedo sobre sedimentos secos y roca más resistiva.
AD	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	Lente resistiva intermedia: arcilla $\rightarrow$ grava seca $\rightarrow$ zona saturada o arcillosa profunda.
DA	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	Lente conductiva intermedia: suelo seco $\rightarrow$ zona húmeda $\rightarrow$ base resistiva.
DD	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	Descenso continuo: secuencia de materiales cada vez más conductores, típico de perfiles arcillosos o zonas saturadas profundas.

Los suelos de **cuatro capas** pueden dividirse en ocho tipos distintos ($2^{n-1} = 2^{4-1} = 2^3 = 8$), los que se designan mediante una combinación de 3 letras ($n - 1 = 4 - 1 = 3$).

Tabla 3
Tipos de curvas para suelos de 4 capas

Tipo de Curva	Relación de Resistividad	Descripción
AAA	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	Aumento continuo: suelo húmedo $\rightarrow$ sedimento seco $\rightarrow$ roca consolidada $\rightarrow$ base resistiva.
AAD	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$	Subida en 2 capas, descenso final: materiales secos sobre una base conductora (arcilla, acuífero).
ADA	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$	Lente resistiva intermedia entre dos capas conductoras: grava entre limos o arcillas húmedas.
ADD	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	Subida inicial, seguido de descenso progresivo: presencia de roca seca sobre zona saturada.
DAA	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	Bajada superficial, seguido de incremento resistivo: suelo seco sobre sedimentos húmedos $\rightarrow$ base seca.
DAD	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$	Conductividad intermedia entre dos resistivas: arcilla $\rightarrow$ sedimento húmedo $\rightarrow$ roca $\rightarrow$ arcilla profunda.
DDA	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$	Descenso inicial, luego ascenso: perfil saturado sobre base más resistiva.
DDD	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	Descenso continuo: progresiva presencia de arcillas o zonas de saturación profunda.

Los cortes de **cinco capas** pueden dividirse en 16 tipos usando una combinación de 4 letras.

Tabla 4
Tipos de curvas para suelos de 5 capas

Tipo de Curva	Relación de Resistividad	Descripción
AAAA	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$	Perfil de aumento continuo: capas progresivamente más secas o consolidadas.
AAAD	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	Base conductiva debajo de secuencia resistiva creciente.
AADA	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$	Lente conductora intermedia entre capas resistivas.
AADD	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 > \rho_5$	Dos capas superiores resistivas sobre formación conductora.
ADAA	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$	Formación resistiva intermedia rodeada por conductores superficiales.
ADAD	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	Secuencia alternada, posible estratificación de sedimentos y rocas.
ADDA	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$	Zona doblemente resistiva entre materiales conductores.
ADDD	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 > \rho_5$	Pico resistivo en la segunda capa, seguido de descenso.
DAAA	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$	Conductividad superficial que va disminuyendo en profundidad.
DAAD	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	Conductora → secuencia resistiva → capa final conductora.
DADA	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$	Alternancia resistiva entre capas conductoras.
DADD	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 > \rho_5$	Pico resistivo intermedio, capas inferiores más conductoras.
DDAA	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$	Descenso resistivo con posterior incremento: posible base más consolidada.
DDAD	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	Formación resistiva profunda entre capas conductivas.
DDDA	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$	Descenso continuo con transición resistiva final.
DDDD	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 > \rho_5$	Perfil altamente conductivo: arcillas, acuíferos, sedimentos saturados.

Como se ha mencionado en el apunte SAT-ELEC02-E2025 “Medición de la Resistividad de los Suelos”, una vez realizado el sondeo del terreno, se debe construir el tablero de valores respectivo según la configuración de electrodos utilizada. En adelante, seguiremos con Schlumberger para los diferentes ejemplos y explicaciones.

Supongamos que realizamos una medición de terreno y logramos los valores de Resistencia para cada punto según lo indicado en la tabla siguiente, la que nos permite calcular la Resistividad Aparente para cada uno de dichas muestras:

N° de Orden Lecturas	Separación “L” (m)	Separación “a” (m)	Resistencia “R” (Ω)	Variable auxiliar “n”	n+1	ρ_{ASH} ($\Omega \times m$)
1	0,6	1,0	217,029	0,1	1,1	75,0
2	0,8	1,0	41,625	0,3	1,3	51,0
3	1,0	1,0	19,099	0,5	1,5	45,0
4	1,6	1,0	5,787	1,1	2,1	42,0
5	2,0	1,0	4,244	1,5	2,5	50,0
6	2,5	1,0	3,183	2,0	3,0	60,0
7	3,0	1,0	2,910	2,5	3,5	80,0
8	4,0	1,0	1,859	3,5	4,5	92,0
9	5,0	1,0	1,389	4,5	5,5	108,0
10	6,0	1,0	1,033	5,5	6,5	116,0
11	8,0	1,0	0,589	7,5	8,5	118,0
12	10,0	1,0	0,335	9,5	10,5	105,0
13	16,0	1,0	0,100	15,5	16,5	80,0
14	20,0	1,0	0,068	19,5	20,5	85,0
15	25,0	1,0	0,049	24,5	25,5	96,0
16	30,0	1,0	0,037	29,5	30,5	105,0
17	40,0	1,0	0,025	39,5	40,5	126,0
18	50,0	1,0	0,019	49,5	50,5	149,0
19	60,0	1,0	0,016	59,5	60,5	181,0
20	80,0	1,0	0,011	79,5	80,5	221,0
21	100,0	1,0	0,009	99,5	100,5	283,0

Con los datos mostrados en la tabla anterior, debemos confeccionar una gráfica con escala logarítmica que nos permita determinar en un primer paso, el corte geoelectrico que posee el terreno en el que se realizó la medición. Utilizar este tipo de gráficas, en la representación de las resistividades aparentes en cada SEV, no es sólo una convención gráfica, sino una decisión técnica con fundamento físico y metodológico.

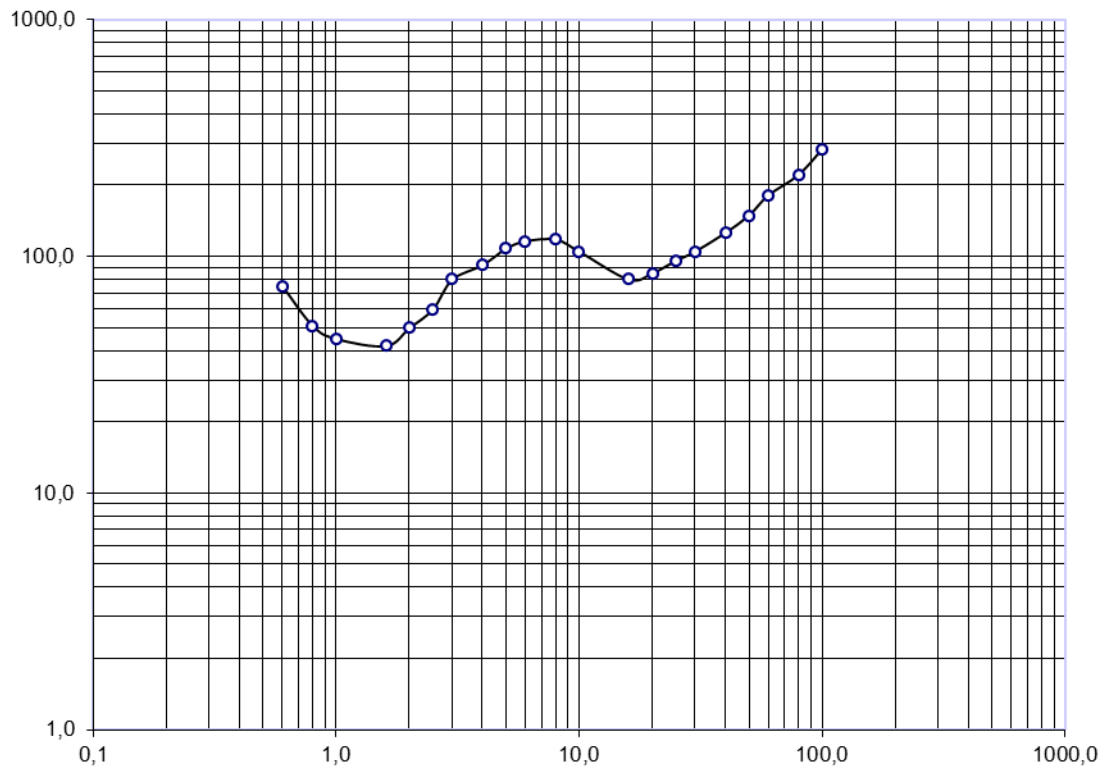
Amplio rango de resistividades: En estudios geoelectricos es común encontrar valores que van desde unos pocos Ωm (arcillas), hasta varios miles de Ωm (rocas volcánicas secas). Una escala lineal no puede representar estos contrastes de forma legible.

Mejor visualización de transiciones: La escala logarítmica permite apreciar pequeñas variaciones en resistividad dentro zonas de interés, sin que se pierdan frente a valores extremos.

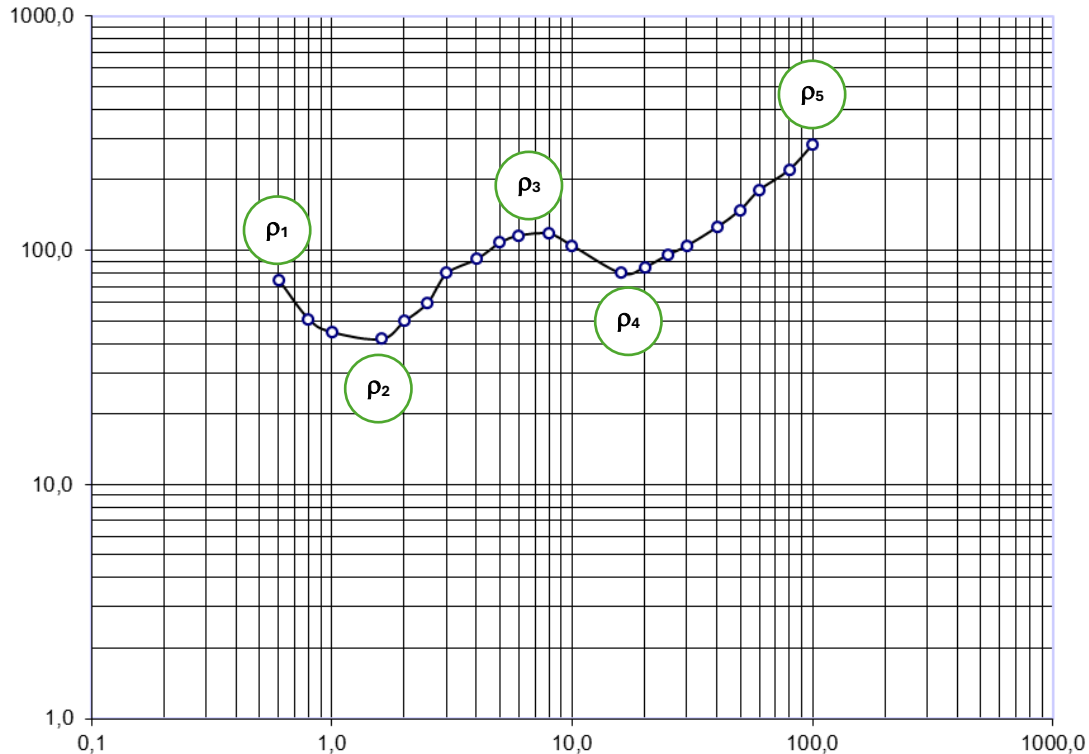
Comportamiento proporcional: Muchos modelos de inversión y análisis geoelectrico se basan en razones de resistividad entre capas (ρ_2/ρ_1), por lo que es más coherente representarlas en escala logarítmica.

Compatibilidad con la curva de profundidad: En los SEV, también el eje de profundidad se suele representar en escala logarítmica. Al usar log-log, se obtiene una visualización más homogénea y útil para detectar inflexiones.

La gráfica resultante de la tabla SEV indicada anteriormente se presenta a continuación:



Si partimos asumiendo que el primer punto nos dice el inicio de la primera capa resistiva y que los cambios de ascenso y descenso nos llevan a establecer la existencia de otras capas, terminando en el extremo final de la gráfica con el último estrato (esto es sólo una consideración de clasificación mas no representa un valor específico de resistividad y/o espesor de cada capa), podemos decir que por simple inspección, la gráfica representa a un terreno de 5 estratos con la siguiente relación de resistividades: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ es decir corresponde a un tipo DADA.



Desde este punto Excel que es la herramienta con la cual hemos construido la gráfica anterior, deja de ser efectiva en la determinación del valor de las resistividades y espesores de cada uno de los estratos pertenecientes al terreno (o es muy poco práctica), debido principalmente a que el proceso para obtener valores reales requiere aplicar algoritmos de inversión no lineal, como el de inversión por mínimos cuadrados de Levenberg–Marquard que dicho programa no puede ejecutar con precisión, además que, graficar en escala logarítmica solo visualiza la distribución de resistividades aparentes versus separación de electrodos, pero no infiere propiedades de las capas.

En este punto debemos resolver el problema de interpretación que se nos presenta: *“dada una curva SEV obtenida mediante mediciones de campo y cálculo teórico de resistividad, averiguar cuál es el corte geoelectrico que la ha producido”*.

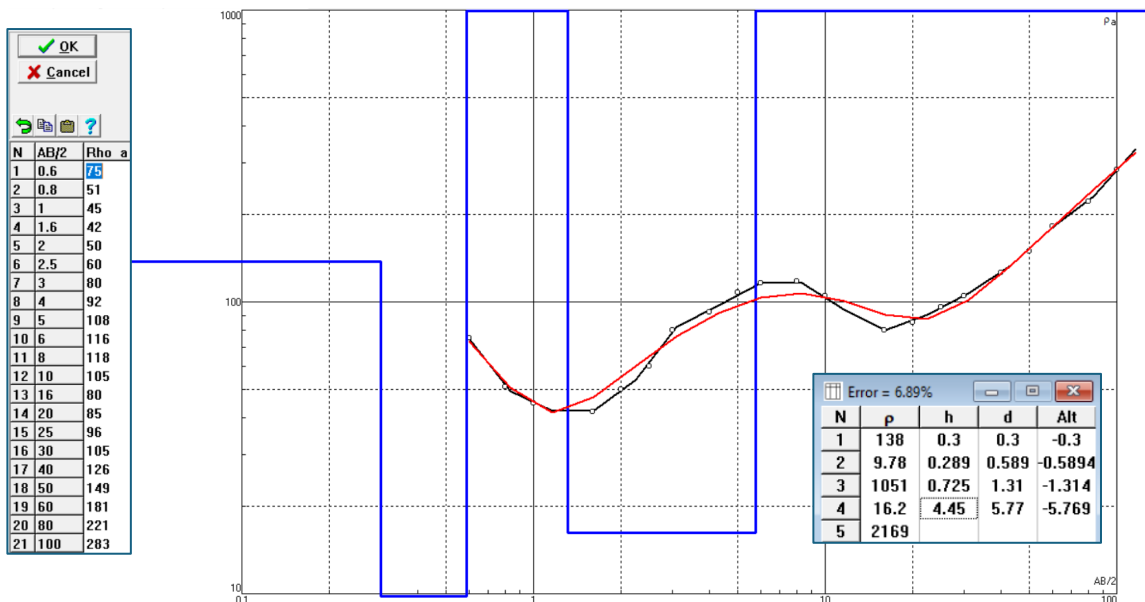
La fórmula básica para solucionar el problema dicho se debe a Stefanescu (1930), quien describe la distribución del potencial eléctrico “ $V(r)$ ” en la superficie de un semiespacio estratificado generado por una fuente puntual de corriente de intensidad “ I ” ubicada en la superficie. Esta solución se basa en la ecuación de Laplace y considera la variación vertical de resistividad en capas horizontales.

$$V(r) = \frac{\rho_1 I}{2 \pi r} \left[1 + 2r \int_0^{\infty} \theta(t) j_0(rt) dt \right]$$

En la expresión indicada “ ρ_1 ” es la resistividad de la capa superficial, “ j_0 ” es la función de Bessel de primera clase en orden cero y “ θ ” es la función núcleo (Kernel function), que depende de las resistividades y espesores de las capas y del parámetro de integración “ t ”.

La expresión de Stefanescu es útil de aplicar en medios estratificados con pocas capas (típicamente 2 ó 3), donde la integral se puede manejar analíticamente o con cálculos razonables con un margen de error aceptable. Pero para más de 3 capas, la función “ θ ” se vuelve altamente compleja, ya que requiere una propagación recursiva de impedancias desde la capa más profunda hasta la superficie.

Es desde este punto en donde la recomendación es el uso de programas informáticos especializados que nos permitan modelar y ajustar la curva de terreno a una solución lo mas cercana a la realidad del terreno en estudio. Un ejemplo se muestra a continuación (IPI2WIN), utilizando los datos de “ L ” ($AB/2$) y de Resistividad Aparente de la tabla de mediciones de suelo presentada anteriormente:



Como puede verse en la imagen anterior, nuestro terreno de ejemplo es un suelo compuesto de 5 capas paralelas con las resistividades y espesores siguientes:

$\rho_1 =$	138,00 (Ωm)	$E_1 =$	0,300 (m)
$\rho_2 =$	9,78 (Ωm)	$E_2 =$	0,289 (m)
$\rho_3 =$	1.051,00 (Ωm)	$E_3 =$	0,725 (m)
$\rho_4 =$	16,20 (Ωm)	$E_4 =$	4,450 (m)
$\rho_5 =$	2.169,00 (Ωm)	$E_5 = \infty$	(m)

Nota: El espesor de la última capa, siempre se considera de valor infinito.

Otro de los datos interesantes que nos presentan los programas informáticos para el análisis de los datos de resistividades, es el error tras realizar una inversión geoelectrica, considerando la complejidad de las ecuaciones a utilizar para el análisis (algoritmos de inversión como Levenberg–Marquardt), y que a mayor distorsión de datos de resistividades aparentes (puntos fuera de tendencia), es mas difícil calcular una curva teórica representativa al del terreno en estudio.

El error señalado es el denominado RMS (Root Mean Square), que cuantifica qué tan bien se ajusta la curva calculada por el modelo a los datos medidos de resistividad aparente, y nos da una pauta de tolerancia a la hora de establecer los valores de resistividades y espesores a usar en cálculos posteriores (también se puede interpretar como la confiabilidad del modelo obtenido). Este porcentaje de error es el resultado de:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{a,i}^{medida} - \rho_{a,i}^{modelo}^2}{\rho_{a,i}^{medida}}} \times 100$$

$\rho_{a,i}^{medida}$: Resistividad aparente real (dato de campo).

$\rho_{a,i}^{modelo}$: Resistividad aparente calculada por el modelo.

n : Número de puntos medidos.

Como dato orientativo se puede decir lo siguiente respecto a los valores de error obtenidos:

0 a 5% : Muy buen ajuste y bajo error (valores son confiables)

5 a 10% : Buen ajuste y error moderado (valores son aceptables)

>10% : Mal ajuste y error alto (no confiables)

Cuando el error de inversión es alto ($>10\%$), significa que el modelo geoelectrico propuesto no representa adecuadamente los datos medidos, lo cual pone en duda la confiabilidad de las resistividades y espesores obtenidos. En estos casos, es fundamental tomar acciones correctivas para mejorar el ajuste, evitar malas interpretaciones y garantizar un modelo geofísico más realista.

Entre las acciones posibles de implementar para disminuir el error de un modelo y hacerlo mas confiable, se señalan las siguientes:

- Verificar errores de medición (contactos de electrodos, valores atípicos, error humano).
- Eliminar datos extremos o sospechosos (outliers) que distorsionan la curva.
- Suavizar puntos aislados si hay oscilaciones no justificadas.
- Ajustar el número de capas.
- Volver al lugar y tomar nuevas muestras en otros sentidos.
- Apoyarte en datos geológicos, sondajes, calicatas o históricos para validar o forzar ciertas capas.

Referencias Bibliográficas

Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain a couches horizontales, homogènes et isotropes (1930).

S. Stefanescu, C. Schlumberger, M. Schlumberger

Journal de Physique et le Radium, Société Française de Physique

Use of Schlumberger Sounding Curves in the Interpretation of Resistivity Data (1974)

Amal A. R. Zohdy

United States Geological Survey Bulletin

Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered Structures (1966)

Enrique Orellana y Harold Mooney

Editorial Interciencia

Prospección Geoeléctrica para Geólogos (2013).

Prof. Ing. Luis A. Estrada

Departamento de Geodesia y Topografía, Universidad Nacional de Tucumán