

CAPITULO II

TECNICAS DE PUESTA A TIERRA

1. Relación de los Sistemas Eléctricos y Tierra (Suelo)

Toda instalación eléctrica convencional opera referida a Tierra en forma natural y utiliza el suelo para el retorno de las corrientes de fuga, desbalance o falla, hacia la fuente respectiva; se opta por la conexión sólida a Tierra, para aprovechar los beneficios de dicho flujo.

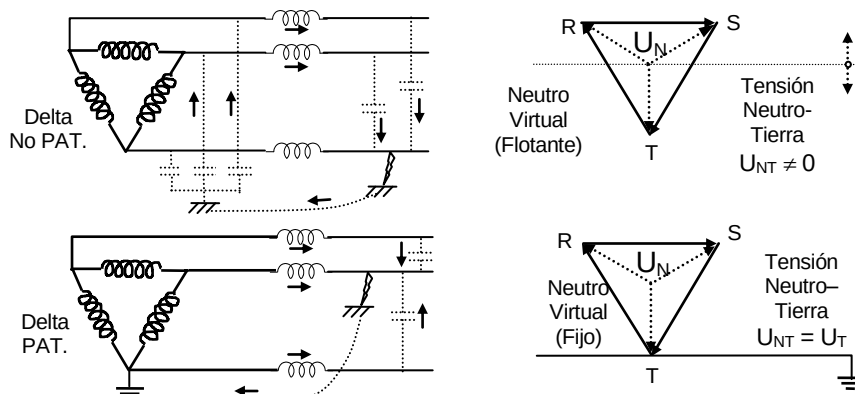
1.1. Puesta a Tierra (PAT) o Aterramiento Eléctrico

Armado de conductores diseñado según el desempeño eléctrico requerido, para ser instalado enterrado en suelo firme, al cual se conectan según Reglamento (CNE) en cada caso:

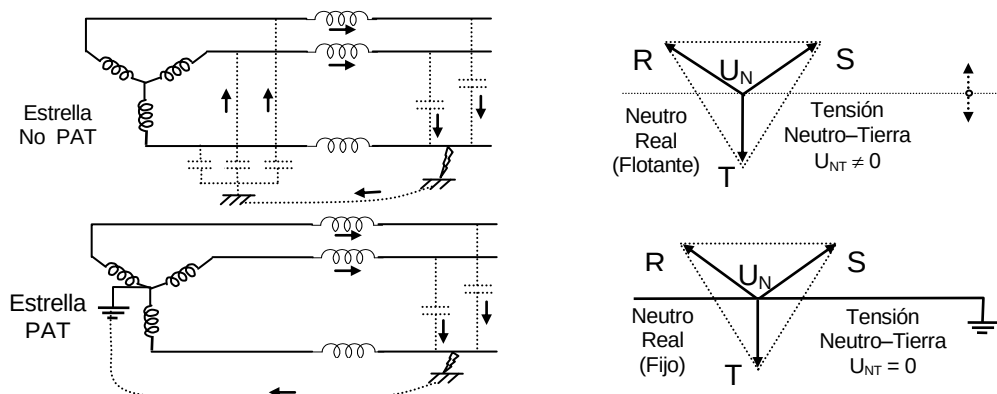
- a. Los Puntos Neutros de los Transformadores y del Sistema o del Suministro Eléctrico.
 - Neutros reales de centro estrella, de conexión zig zag o de bobinado partido.
 - Neutros intermedios o corridos de los alimentadores de distribución eléctrica.
 - Neutros ficticios de unión de soportes de aisladores del conductor en Líneas y SS.EE.
- b. Las Masas metálicas de todos los equipos, de la infraestructura y demás instalaciones.
 - Bornes de Masa energizable por falla y carcasas de equipos directamente alimentados.
 - Puntos próximos de Masa pasiva, de estructuras o partes metálicas permanentes.
 - Puntos próximos de Masa Adyacente, de otras instalaciones y estructuras enterradas.

Los sistemas Triángulo o Estrella no conectados a Tierra, no son estandarizados para el servicio público, su uso en el servicio particular se posibilita con una protección de señal no activa.

Esquemas Típicos de Sistemas Triángulo (Delta), Flotante y Puesto a Tierra



Esquemas Típicos de Sistemas Estrella, Flotante y Puesto a Tierra



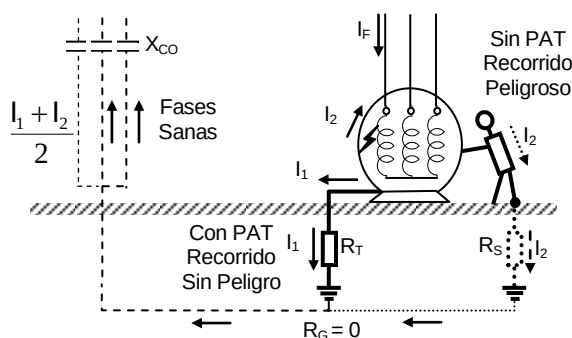
1.2. Finalidad de las Puestas a Tierra (PAT), o Aterramientos

Permiten que las instalaciones eléctricas según su tipo cumplan con las exigencias técnicas de seguridad para las personas y el equipo, asimismo aseguran la confiabilidad de la operación y el correcto desempeño de los sistemas y subsistemas, mediante las siguientes prestaciones:

a. Control de las Corrientes de Carga o de Falla que Circulan Hacia Tierra

Proporcionando el Potencial de Referencia ($V=0$) en los puntos Neutro y en las Masas que se le conectan, de modo que durante operación normal o durante fallas, indistintamente del fenómeno y del nivel de tensión en el que pueda ocurrir, se asegure:

- La protección de las personas contra la energización accidental de las masas, ya sea por la acumulación de carga estática, por fuga o por falla directa o indirecta, asegurando que desde el punto de contacto circule por el cuerpo una mínima corriente a tierra.
- El correcto funcionamiento del propio sistema con sus auxiliares y de los subsistemas periféricos de protección, control, comunicaciones, automatismos, flujo y procesamiento de datos, así como de todas las cargas menores conectadas a ellos.



b. Control de Potenciales en la Superficie del Suelo

Limitación según diseño, de los Potenciales entre puntos del suelo y partes metálicas de las instalaciones eléctricas y entre puntos cualquiera del suelo, debido a la dispersión de corrientes de falla a tierra o de rayo, brindando protección.

- Protección a las Personas: asegurando Tensiones de Toque y Paso, menores o como máximo iguales que las similares que se consideran admisibles por el ser humano.
- Protección a Equipos de BT: en especial a subsistemas electrónicos, controlando las elevadas diferencias de tensión y descargas inversas entre masa y partes energizadas.

c. Derivar a Tierra o Tomar desde Tierra Corrientes y Cerrar Circuitos

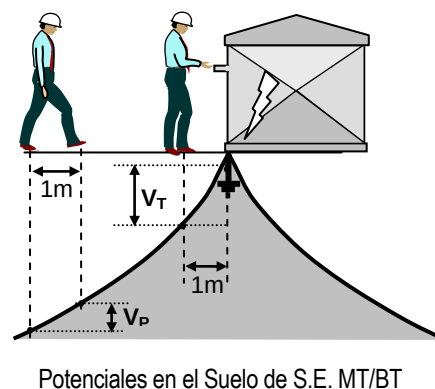
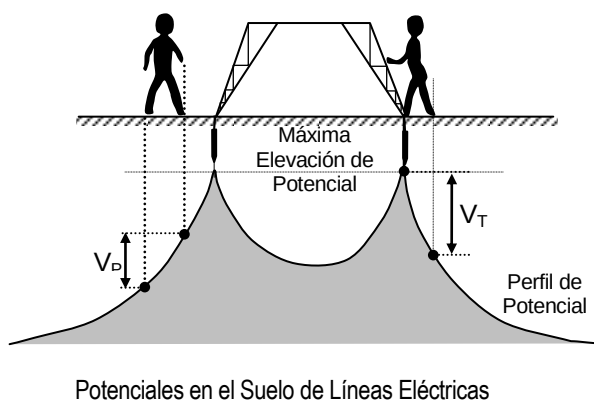
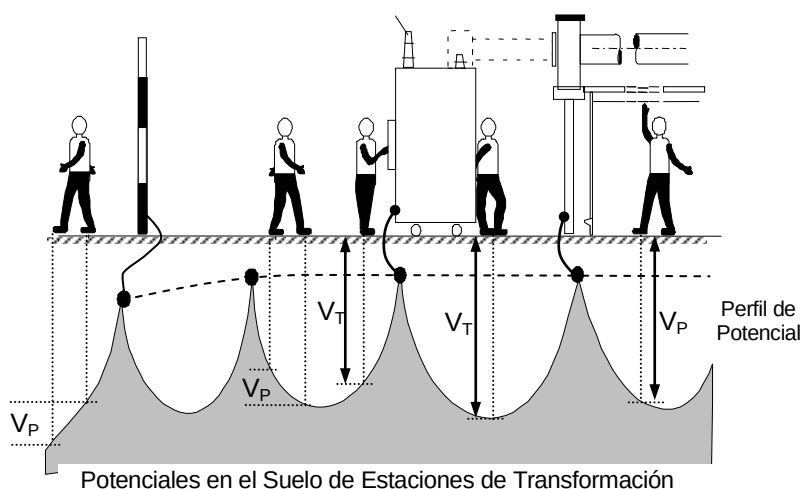
Dispersando o concentrando por el suelo con mínima Impedancia (Resistencia), la carga adquirida y las corrientes del sistema eléctrico tanto permanentes como ocasionales, que forman el circuito, facilitando el funcionamiento de la protección; estas corrientes son:

- Elevadas y **ocasionales**; de fallas a Tierra (FI) e impulsionales de rayo y maniobra (HF).
- Moderadas **variables**; desbalance de carga, procesos continuos, inducción, armónicas.
- Bajas **permanentes**; de carga inducida, fuga en aislamientos, fuente externa, erráticas

d. Servir de Base al Sistema Equipotencial de Referencia

Cuando las instalaciones eléctricas, electromecánicas o mecánicas, pueden ser afectadas por descargas atmosféricas directas o indirectas, en cuyo caso se conforman y enlazan los siguientes circuitos equipotenciales:

- De electrodos enterrados; de la Puesta a Tierra convencional, del anillo perimétrico de PAT para descargas atmosféricas, aquellos que están embutidos en el concreto, otros de la periferia próxima y los previstos para retorno metálico de corrientes de falla.
- De electrodos de superficie; de la PAT de servicio <recorrido aéreo>, de las bajadas a Tierra de protección y servicio de subsistemas de BT, de los armados del concreto; de tuberías de agua, desagüe, drenaje (excepto combustibles), ductos aire acondicionado



1.3. La Conexión del Neutro a Tierra

En sistemas de Alta Tensión (AT) es indispensable conectar el Neutro de los Transformadores de Potencia (TP) a Tierra en las Subestaciones (SE), a ambos extremos de toda Línea eléctrica (salida y llegada); se trata de los Neutros del Centro Estrella o de Bobinado Partido, que son accesibles por un borne aislado de salida para conexión; también se conectan a Puestas a Tierra otros puntos Neutros denominados <intermedios> o <falsos> a lo largo de la progresiva (estructuras, soportes) de la ruta de una Línea. Rara vez se utiliza hasta 60 KV el Neutro aislado o la conexión mediante Resistencias o Reactancias Inductivas o el esquema Delta.

a. Conformación y Denominaciones del Neutro

El Neutro puede tomar **distintas** denominaciones, según el **caso** y el desempeño que tiene:

- Los Neutros **Reales**, son accesibles por separado en los Transfos. de Potencia
- El Neutro **Corrido**, acompaña a los conductores de fase en los Alimentadores de MT.
- El Neutro **Ficticio**, une en cada soporte las masas del aislamiento de las fases.
- El Neutro **Virtual**, propio del sistema Delta, se le accede con una conexión Zig Zag

b. El Neutro en Sistemas de Distribución de Media Tensión (MT)

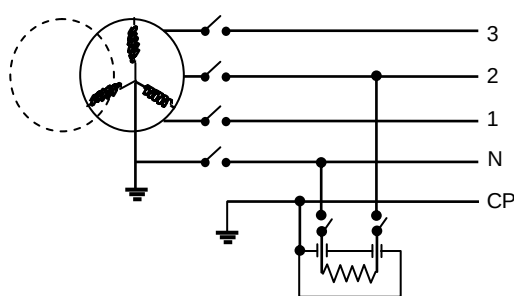
El neutro conectado a través de Resistencias o Impedancias en redes de servicio público, tiene la finalidad de evitar los daños por las fallas (por corriente, por arco, o por transitorios).

En sistemas particulares, puede ser necesaria la conexión con Resistencias o Impedancias o utilizar el Neutro aislado (generadores, industrias, químicas, papel, vidrio, refinerías etc).

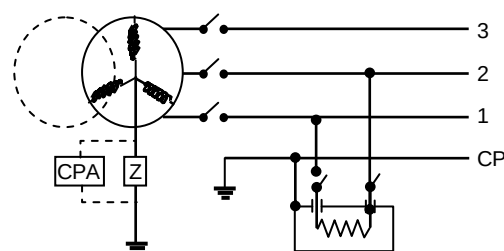
c. El Neutro en Sistemas de Distribución de Baja Tensión (BT)

Indistintamente del régimen que tiene el Neutro del Primario, siguen al Estandar IEC-60364 que reconoce tres esquemas de conexión a Tierra (TN, TT, IT)

- En los esquemas (TN, TT); el Neutro de BT del TP se conecta sólidamente a Tierra y va junto con las fases, mientras que en el esquema (IT) el Neutro está aislado y debe ser dotado de un Controlador de Aislamiento (CPA) para señalar una primera falla.
- Los esquemas (TT, IT); en el lado de la utilización prevén acompañar a las fases con un conductor de Protección (CP) ($\geq 10\text{mm}^2\phi$) independiente y sólidamente conectado a una PAT propia, formando el Circuito equipotencial al cual se conectan las masas.
- El Circuito de Protección del esquema (TN) cambia; en la forma (TN-S) corre paralelo al Neutro como (CP), y en la forma (TN-C) es también el Neutro (CPN), ambos se conectan a la PAT de la fuente; con falla a Tierra, crean corrientes similares a un Corto Circuito.



Conexión de Cargas en Sistemas de Distribución (TT)



Conexión de Cargas en Sistemas de Distribución (IT)

Nomenclatura IEC-60364

1ª.Letra: Conexión de la Fuente

- T: Conexión a Tierra
- I: Sin Conexión a Tierra

2ª.Letra: Conexión de Utilización

- T: Masa conectada a Tierra
- N: Masa conectada al Neutro

Letras Adicionales

- S: N y CP circuitos separados
- C: N y CP es el mismo circuito

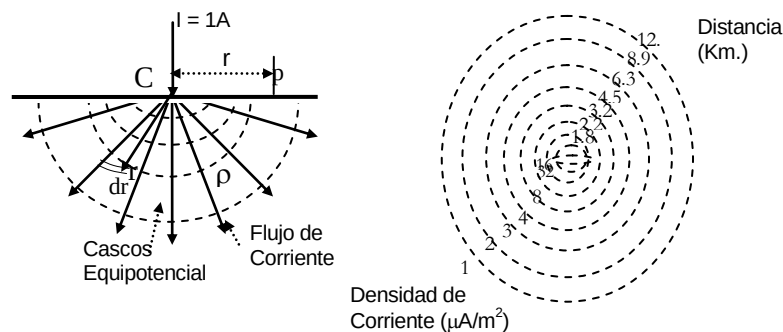
Acronimos

- CP: Circuito de Protección
- CPN: Circuito de Prot. y Neutro
- CPA: Control del Aislamiento

1.4 Funcionamiento de los Aterramientos de Corriente Alterna

De acuerdo a su Diseño, todas las PAT proveen la Referencia de Potencial Cero de la Tierra Remota en los puntos del Sistema que se le conectan (Neutros, Masas), pero según la finalidad de cada instalación aparte una baja Resistencia, se les asignan distintos desempeños, siendo:

- a. **Aterramientos de Control de Potenciales, de Subestaciones de AT**
 - Controlan los gradientes peligrosos en la superficie del suelo (Tensiones: Toque y Paso)
 - Exigen, muy bajas ($<1\Omega$) Resistencias (Impedancias) de Dispersión cuyo valor está asociado al Potencial Máximo de Dispersión-PMD, estipulado según Reglamentos.
 - El tiempo de conducción de la Falla lo definen los Interruptores (o Reconectores).
- b. **Aterramientos de Referencia de Potencial, de Instalaciones de BT**
 - No tienen por finalidad el Control de los potenciales o gradientes peligrosos en el suelo.
 - Pueden tener bajas ($<5\Omega$) Resistencias de Dispersión, cubren la necesidad de contar con el Potencial de Referencia cero para equipos eléctricos y electrónicos.
 - El tiempo de conducción de la falla lo definen los Fusibles, Interruptores TM o DD,
- c. **Aterramientos de Acumulación Transitoria de Carga[®], Para Corrientes de Rayo.**
 - Se diseñan para el control o sin control de potenciales en el suelo, su armado asegura la atenuación de la onda reflejada del rayo de intensidad crítica que llega al Soporte.
 - Inhiben la falla Inversa del aislamiento o limitan la permanencia de la falla Directa.
 - Pueden tener mediana a baja Resistencia ($<25\Omega$), con baja Impedancia y componentes mínima Inductancia y una gran Capacitancia efímera, a través de rellenos conductivos.
 - El tiempo de carga y conducción es de la onda de impulso del rayo incidente ($<100\mu s$).



d. Condiciones para el Funcionamiento de las Puestas a Tierra

Inicialmente desde una PAT, la corriente se dispersa en el suelo formando hemisferios, y su densidad disminuye con la distancia ($1/r^2$), hasta lograr la sección de conducción.

- Conducen y dispersan pequeñas corrientes permanentes, en intervalos cortos ($<0,5s$) elevadas corrientes de falla a FI. o en breves instantes ($<3ms$) corrientes de Impulso.
 - Para dispersar Corrientes Alternas (FI) se considera su Resistencia de Dispersión.
 - Para dispersar Corrientes Impulsionales se considera su Impedancia de Impulso.

1.5 Puestas a Tierra en Líneas Eléctricas

El enlace de los accesorios metálicos que sostienen el aislamiento forma el Neutro Ficticio ($\Sigma i_r=0$) que se debe conectar a Tierra en cada soporte de Línea de AT o de MT Industrial o Urbana; en Líneas Rurales por lo menos dos veces por Kilómetro y en tramos proclives a fallas por rayo.

- Las Puestas a Tierra de Líneas son de Referencia de Potencial, salvo que se requiera el Control de los Potenciales (Cruces de pistas, carreteras, caminos, ríos, zonas habitadas).
- La finalidad de la conexión a Tierra es asegurar el correcto funcionamiento de la protección en el extremo emisor (fuente), en caso de fallas del aislamiento en media Línea.
- La corriente de falla se dispersa por la PAT y retorna por el suelo a la fuente (TP) en la SE, por el Neutro conectado a la PAT, o a los conductores, por las Capacitancias parásitas.
- La conexión del Cable de Guarda a una PAT de baja Impedancia y mínima Resistencia, permite la evacuación de la Energía con mínima onda reflejada y menor posibilidad de falla.
- La PAT en los soportes de Líneas debe tener en lo posible una mediana Resistencia de dispersión, el Reglamento (CNE) establece ($R \leq 25 \text{ Ohm}$) medido en Baja Frecuencia.
- Los suelos de roca no trabajable, (pizarras, fracturadas, fragmentadas, monolíticas), impiden lograr PAT de medianas Resistencias ($\leq 25 \text{ Ohm}$), se debe mejorar o proteger el aislamiento.
- Al no tener PAT o siendo alta su Resistencia, la falla ocurrirá con baja Corriente, siempre a través de un Arco Eléctrico y no será detectada por la protección de sobrecorriente, luego:
 - Puede establecerse el funcionamiento de una Falla con Arco Intermitente.
(Se transmiten por los conductores hacia las SE. y deterioran los aislamientos).
 - Puede mantenerse la Falla con Arco hasta la rotura y caída del conductor por fusión.
(Ello justifica en parte la necesidad de contar con Relés de protección de Distancia).
 - Puede perforarse el aislamiento por rayo y crear un espectro de Tensiones en la base.
(En Líneas de MT. dichos potenciales en el suelo pueden alcanzar niveles de kilovoltios).

Cuando las Líneas con Postes de Madera utilizan las ménsulas y el mismo cuerpo superior como parte del aislamiento (USA: REA), se forma el Falso Neutro enlazando las abrazaderas de metal colocadas en puntos previstos de dichas partes del poste, con una bajada a la PAT.

- Las corrientes de fuga del Aislamiento que circulan por la madera, ante la falta de humedad (clima seco), desecan tramos y pueden carbonizarlos por acumulación de energía.
- En Postes de Concreto, se debe disponer de una bajada independiente a la PAT, dado que el uso del armado de refuerzo de Acero para dicho fin, propicia su deterioro por corrosión.
- En Líneas eléctricas de sistemas Delta o Estrella con Neutro Aislado, el Neutro Ficticio en cada soporte tiene un Potencial propio por encima del potencial de Tierra, que propicia las fallas en el aislamiento contaminado, con o sin sobretensiones internas bajo humedad.
- La descarga y recarga de las Capacitancias parásitas Mutuas entre conductores y Propias (a Tierra), se facilita con o sin PAT, por los gradientes en la línea de fuga del aislamiento.

2.- Corrientes y Potenciales en el Suelo

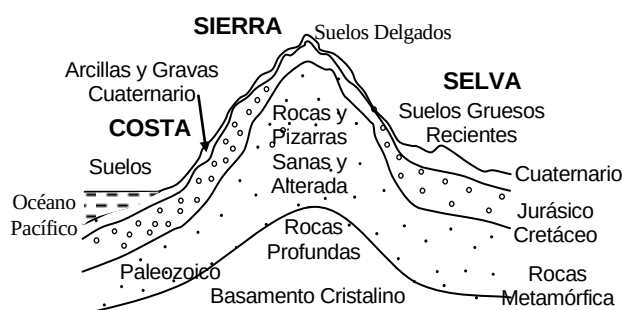
La parte de la tierra (suelo) que se relaciona con las instalaciones y los parámetros eléctricos de funcionamiento de un sistema eléctrico, es una capa superficial estratificada en la que es necesario colocar una Puesta a Tierra que permita:

- **Interceptar** la superficie equipotencial del suelo, que se **toma** como Referencia.
- **Conducir** cuando se requiere, las distintas corrientes que **provienen** del sistema.

2.1. Comportamiento Eléctrico del Suelo

Los Suelos tienen diferentes conformaciones geológicas con basamentos y estratos de distinta formación cuya composición y características varían según la topografía del sitio.

- Los suelos planos, tienen estratos laminares a veces gruesos; mientras que los Suelos accidentados, tienen estratos delgados que pueden ser irregulares o discontinuos.
- Los suelos tienen entre 70% y 80% de óxidos Resistivos de (Si) y (Al); su aptitud conductiva es muy variable con el clima y está dada su contenido de sales solubles y humedad.



- El suelo superficial normal contiene pequeños porcentajes ($\approx 0.1\%$ a 2.0%) de sales solubles, necesitan humedad y aún así no son buenos conductores de la electricidad.
- Su Conductividad (o su Resistividad) dependen de su contenido de humedad, que es de ($\geq 10\%$) para tierra de cultivo y ($< 1\%$) para suelos secos sin recarga de agua.
- La conducción eléctrica en suelos húmedos es en parte **Electrolítica** a través de **soluciones** acuosas y/o Electroquímica debido a reacciones químicas, al predominar la conducción Electrónica con corrientes permanentes de más de 10A, puede crear su desecamiento; las corrientes de falla con alta Resistencia de PAT, producen la vitrificación del suelo.
- Otros **factores** que influyen en la **conducción** de los suelos obedecen a las características físicas del material o del conglomerado que lo forma, o a su estado; son:
 - La **Porosidad**; es determinante para la **retención** de la humedad, por largo tiempo.
 - La **Granulometría**; el grano fino provee más conductividad que el grano grueso.
 - La **Compactación**; la existencia de aire intersticial incrementa su Resistividad.
 - La **Temperatura**: a ($< 4^\circ\text{C}$) adquieren altas Resistencias; en el Perú a menos de 4700m de cota, solo se conocen suelos de baja temperaturas ($\approx 10^\circ\text{C}$), no suelos congelados.
- La profundidad de instalación de las Puestas a Tierra en suelos no congelables se elige según las Resistividades del suelo y su conveniencia (superficial o profunda).

2.2 Unidades de Medidas y Rangos de la Conducción Eléctrica del Suelo

La aptitud de conducción eléctrica del suelo, se mide mediante su Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) que implica magnitudes pequeñas de difícil medida directa en el campo y con procesamiento de fractales, por lo que conviene utilizar su Resistividad cuyas unidades son ($\Omega\cdot\text{m}$) o bien ($\Omega\cdot\text{cm}$).

a.- Resistividades Referenciales de Suelos Genéricos.

La información de fuente Geológica muestra rangos típicos de Resistividad de alcance local, de los Suelos y Rocas, que grosso modo se pueden resumir según tipo, como referenciales:

Suelos Naturales Terrosos Conglomerados y Rocosos	ρ (Ohm.m)
Suelos húmedos; Lamas, Limos, Arcillas, tierra Vegetal y de Cultivo	10 - 100
Tierra fina, Turbas, Fangos y Concretos Porosos enterrados húmedos	100 - 300
Suelos Aluviales, Arenas firmes, Concreto de Cimentación monolítica	300 - 800
Arena Eólica, gravillas, Cascajo, piedra menuda, Concreto externo	800 - 3 000
Rocas alteradas, Pizarras, Fracmentadas, Fracturadas, Volcánicas	3 000 - 10 000
Suelos granulados; Feldespatos, Micas, Cuarzos, Rocas Monolíticas	10000 - 30 000
Roca Andesítica, Concreto Ciclópico Estructural Aéreo (Seco)	30000 - más

- Dichos rangos no siempre coinciden con los valores reales obtenidos con medidas de campo en suelos similares, que para aplicar al Diseño es necesario procesar los datos.
- La medida de Laboratorio (ASTM: G-57) exige reproducir las condiciones naturales de la muestra o los errores son grandes; en cambio, es confiable para amasados artificiales.

b.- Resistividades Referenciales de Aguas Genéricas.

En PAT se puede utilizar cualquier agua, las aguas minerales naturales o salobres son óptimas para el tratamiento previo de las excavaciones antes del relleno que también debe ser húmedo.

Tipo de Agua	ρ (Ohm.m)
Aguas Superficiales Puras (filtraciones del suelo)	$\approx 3\,000$
Aguas Meteóricas (lluvia atmósfera limpia)	800 - 1 200
Agua de Filtraciones Rocosas, cristalinas y puras	30 - 1 000
Aguas Meteóricas (lluvia atmósfera industrial)	30 - 400
Aguas Estancadas o agua con materia orgánica	30 - 150
Aguas Superficiales Salobres (mar y minerales)	≈ 0.1
Aguas de Anomalías Geotérmicas (no utilizables)	0.03 - 0.3

En **Laboratorio** se suele medir la Conductividad en ($\mu\text{S}/\text{cm}$); de las **aguas** y también de los Suelos, en este último caso dicha medida es **indirecta**, corresponde a una solución de 20 gr de muestra de suelo **disuelto** en 100 cc de agua destilada, no es aplicable al diseño de PATs

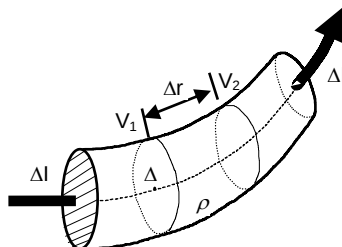
c.- Variaciones de Otros Parámetros Eléctricos del Suelo

- La Permitividad; se incrementa con el contenido de humedad; ej, para suelo seco es ($\epsilon_r=3,5$) y su Conductividad ($\sigma=10\mu\text{S}/\text{cm}$), ($\rho=1000\Omega\cdot\text{m}$) y para el agua pura ($\epsilon_r=80$) ($\sigma=0$), ($\rho=\infty$).
- El Gradiente Disruptivo; varía poco, para suelos húmedos de baja Resistividad ($E=300\text{kV}/\text{m}$), suelos secos y aluviales ($E=350\text{kV}/\text{m}$), rocas ($E=400\text{kV}/\text{m}$), suelos granulados ($E=450\text{kV}/\text{m}$).

2.3 Modelo Básico de Suelo Conductor

Se determina las condiciones eléctricas bajo las cuales ocurre la conducción de corriente en el suelo, mediante un modelo matemático que asimila un volumen de suelo; a partir de:

- Un segmento volumétrico (Δr) de Suelo de sección (ΔS) y de Resistividad homogénea (ρ).
- Una d.d.p. (ΔV) aplicada en sus extremos, que hace circular una corriente (ΔI).



La Resistencia (R) a lo largo de (Δr), en el volumen de suelo que se toma como conductor, al ser recorrido por la corriente (ΔI), está dada por la siguiente relación de Pouillet, en función de (ΔS) y (ρ).

$$R = \rho \frac{\Delta r}{\Delta S}, \quad \text{y de otro lado, según la Ley de Ohm,} \quad R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Igualando ambas expresiones de (R), e intercambiando términos, se evidencia el Gradiente de Potencial (E) y por ende la expresión básica del Campo Eléctrico con la Densidad de corriente:

$$\frac{dV}{dR} = \rho \frac{dI}{dS}, \quad \text{luego} \quad -E = \rho J, \quad \text{y reemplazando} \quad -E = \rho J = \frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

- Entonces la intensidad del Campo Eléctrico (E) o el Gradiente de Potencial en la dirección (r) se cumplen de idéntica forma que en el aire o en el vacío, es decir el Campo varía en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.
- Consecuentemente el análisis eléctrico aplicado al comportamiento de las Puestas a Tierra seguirá las mismas pautas que un Campo Conservativo, dado que la corriente electrónica será la que circule predominantemente.

Otras Características de Comportamiento de los Suelos

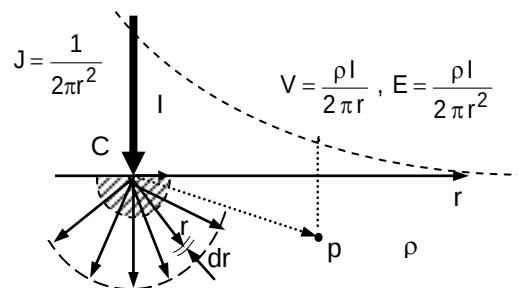
- El hielo por debajo de ($<0^\circ\text{C}$), las rocas graníticas monolíticas y los suelos de granos dieléctricos e inertes, se comportan casi como medios dieléctricos, dispersando mínimas corrientes, el espectro de Potenciales varía moderadamente.
- Los suelos de tierra fina que contienen sales y humedad ($<10\%$ en peso) se comportan casi como medios conductores para densidades de corriente ($200\text{A}/\text{m}^2$); en ellos el espectro de potenciales varía bruscamente.
- En suelos homogéneos (estrato Superficial grueso) la corriente es radial a los hemisferios pero en suelos estratificados, cambia según la Resistividad del estrato Subyacente:
 - Cuando ($\rho_2 > \rho_1$), la corriente **penetra** verticalmente, forma hemisferios agudos.
 - Cuando ($\rho_2 < \rho_1$), la corriente se **expande** lateralmente, forma hemisferios aplanados.

2.4 Parámetros derivados de la Corriente en el Suelo.

La dispersión de la corriente en el suelo desde una PAT puntual, permite hallar el Potencial Absoluto al pie del electrodo y su variación fuera del Electrodo; asimismo su Resistencia de Dispersión absoluta; a partir de un nuevo modelo, establecido con las siguientes hipótesis:

- El suelo conductivo es considerado homogéneo y representado por su Resistividad (ρ).
- El Electrodo que permite inyectar al suelo en el punto (C) una Corriente (I), es puntual.
- Toda PAT puede representarse por un hemisferio virtual o básico de radio (r_0).
- La dispersión de la corriente (I) es radial y forma hemisferios de Potencial cuyas superficies son $S=2\pi r^2$, y que se manifiestan en la superficie del suelo.

Según lo indicado, la Densidad de Corriente (J) a una distancia (r) del punto (C) será:



- **Reemplazando** (J) en la expresión de (E), se obtiene la variación del Gradiente de Potencial en forma radial desde la **superficie** del electrodo de PAT a lo largo del eje de abscisas (r); y al integrar, se obtiene la expresión análoga del **Potencial** variable hasta el **infinito**.

$$E = \frac{dV}{dr} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad \text{que al ser integrado entre } (r, \infty) \text{ resulta,} \quad V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

- Luego, si (C) fuese una **PAT** de radio (r_0), la d.d.p. (ΔV) con respecto a **un punto** cualquiera (p) del suelo a distancia (r_p), se **determinará** haciendo participar los potenciales absolutos:

$$\Delta V = V_{r_0} - V_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_p} \right)$$

- Si (p) tuviese un **potencial** ($V_p=0$), (r_p) se hallaría en el **infinito**, luego ($\Delta V=V_0$), sería el **Potencial** del propio Electrodo en el suelo, y ($R_0=V_0/I$) su **Resistencia** de Dispersión.

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi r_0}, \quad \text{y finalmente} \quad R_0 = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

- Luego **conociendo** la corriente inyectada (I) y la d.d.p. entre **dos** puntos cualesquiera del suelo, se podrán **medir** sus parámetros eléctricos a **través** de su Resistencia (R).
- Las Puestas a Tierra en la práctica, pueden tener armados de **diferente** geometría; para la determinación de **Radio** (r_0) del hemisferio que las representa, se procede según el caso:

-PATs puntuales; se la despeja al igualar R_0 con $R_d=f(r_0)$, (Resistencia de Dispersión).

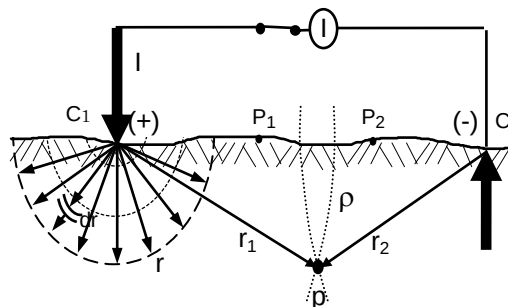
-PATs extensas; se la despeja al igualar R_0 con $S_e=2\pi r_0^2$, (Superficie de Hemisferio).

2.5 Principio de Caída de Potencial (PCP)

Para determinar la Resistencia eléctrica entre dos puntos (P_1 y P_2) de un suelo de Resistividad (ρ), se aplica la Ley de Ohm ($R=V_s/I$), midiendo la d.d.p. (V_s) entre ellos, al hacer circular una Corriente (I) entre otros dos puntos del suelo (C_1 y C_2), distantes (r_1, r_2) de (P_1) y (R_1, R_2) de (P_2).

El circuito de medidas permite inferir lo siguiente:

- Las características de los Potenciales que desde (C_1) y (C_2) varían en oposición, según el sentido de circulación de la corriente, manifestándose siempre en forma conjunta (suma).
- El Potencial Total inducido en dos puntos (p) cualquiera del subsuelo, que pertenecen a distintas superficies equipotenciales que interceptan la superficie del suelo en (P_1) y (P_2).
- La Resistencia del suelo involucrado entre (P_1 y P_2), mediante la asociación de la corriente (I), la diferencia de los potenciales (V_p) y las distancias (r y R) a los puntos (C_1 y C_2)



- Los **Potenciales** en uno de los puntos (p) **inducidos** desde (C_1) y (C_2) por (+I), (-I), serán:

$$V_{p(1)} = \frac{\rho I}{2 \pi r_1} \quad , \quad V_{p(2)} = -\frac{\rho I}{2 \pi r_2}$$

- El Potencial inducido total (V_p) en dicho punto (p) estará dado por : $V_p = V_{p(1)} + V_{p(2)}$

$$V_p = \frac{\rho I}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

- Idénticamente para dos puntos en la superficie del suelo, definidos desde (C_1 y C_2) como (P_1) con distancias (r_1, r_2) y como (P_2) con distancias (R_1, R_2), la d.d.p. entre ambos será (V_s):

$$V_s = \frac{\rho I}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{\rho I}{2 \pi} F(r_n)$$

- El término $F(r_n)$, denominado "Factor de Forma" es totalmente geométrico y en la práctica interesa ser simplificado para minimizar los esfuerzos del trabajo de campo.
- Conociendo (I) y (V_s) se calcula la Resistencia ($R=V_s/I$) del suelo involucrado, parámetro que también se puede medir directamente con un Telurómetro, o con un Geómetro.
- Dicha Resistencia está en función de $F(r_n)$; luego, según el Método de conexión aplicado a la medida, se pueden calcular según el caso, tanto la Resistencia de Dispersión (R) como la Resistividad del suelo (ρ); la precisión dependerá de la geometría de medida $F(r_n)$.

$$R = \frac{\rho}{2\pi} F(r_n) \quad \quad \rho = 2\pi R \frac{1}{F(r_n)}$$

3.- Medidas para Determinar la Resistividad del Suelo

Se aplican los métodos y técnicas de la Geofísica por Sondeos Geoelectricos Verticales (SGV), pero no todos los métodos se adecuan bien a la obtención de las Resistividades para el diseño de PATs de uso eléctrico; el método de Wenner (Estandarizado) es el más recomendable.

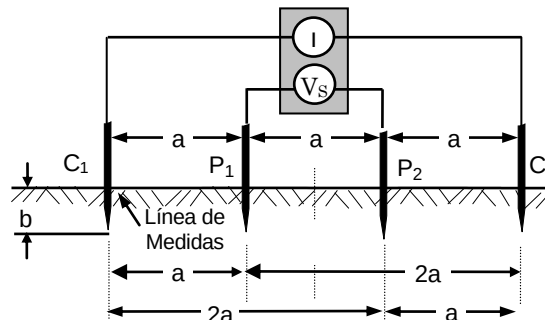
3.1 Disposición de Medidas - Método WENNER.

Aplica el principio de Caída de Potencial y simplifica el término entre paréntesis $F(r_n)$ - Factor de Forma, para facilitar en el campo los Sondeos Geoelectricos de la siguiente manera:

- Utiliza una disposición de (4) electrodos de sondeo clavados en el suelo en Línea Recta
- Los electrodos de medida se ubican equidistantes entre ellas con una separación (a)
- La profundidad de clavado de los electrodos en el suelo será $(b \leq a/20)$, para mínimo error
- Se debe lograr la mejor interfase conductiva entre los electrodos (C_1 y C_2) con el suelo
- Se inyecta y mide la Corriente de Medida (I) en el circuito entre electrodos (C_1) y (C_2)
- Se mide la d.d.p. (V_S) entre los electrodos de Potencial intermedios (P_1) y (P_2)

Se obtiene la Resistencia (R) midiendo (I y V_S) con una fuente autónoma, o bien directamente ($R = V_S/I$); cuando se utiliza un Telurómetro, con dicho valor se calcula la Resistividad (ρ)

$$V_S = \frac{\rho I}{2\pi} F(r_n) \quad , \quad F(r_n) = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



- Condición de las **conexiones** del Método Wenner: $r_1 = R_2 = a$, $r_2 = R_1 = 2a$
- Reemplazando y operando en el Factor de Forma se obtiene: $F(r_n) = 1/a$, luego:

$$V_S = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad , \quad \text{y siendo conocido } R = V_S/I \text{ , se puede despejar } (\rho) \text{ en función de } (a).$$

- De donde se obtiene la expresión que permite calcular la Resistividad cuyo valor Aparente (ρ_a), solamente es válido para el punto de la característica del suelo a la distancia de medida (a), y es dependiente de los estratos del suelo involucrados en dicha medida.

$$\rho_a = 2\pi a R_a \quad \text{Resistividad Aparente del suelo Estratificado}$$

$$\rho_a = \rho \quad \text{Se cumple en suelos Homogéneos}$$

$$\rho_a \neq \rho \quad \text{Se cumple en suelos Estratificados}$$

- Es indispensable procesar las características (ρ_a , a), para obtener las Resistividades de los estratos del suelo (para Diseño), que fueron alcanzados por la corriente de medidas (I),

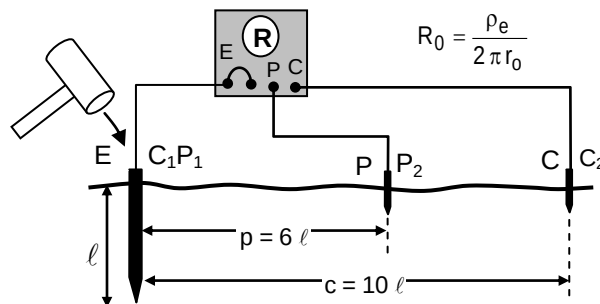
3.2 Disposición de Medidas - Método de Electrodo Piloto

Se basa en la medida de la Resistencia Absoluta (R_0) de un Electrodo (varilla) de Radio Eléctrico (r_0) respecto de la Tierra remota, permite obtener Resistividades equivalentes (ρ_e), próximas a las Resistividades aparentes (ρ_a) de Wenner o Schlumberger; en el pasado hasta los años 80, se le utilizó (sin procesamiento) como un método de medida directa de la Resistividad del suelo.

- Utiliza el Principio de Caída de Potencial, con un electrodo explorador (E) cuya longitud clavada es (ℓ), y dos circuitos auxiliares, tendidos desde los bornes de Corriente (C) y de Potencial (P) que corren en paralelo separadas a 1m de distancia.
- Para obtener en forma simplificada con una medida, la Resistividad de valor aproximado a la de diseño, la varilla (E) será clavada en el suelo natural a la misma profundidad prevista para la PAT; ello sólo se cumple en suelos llanos y de baja Resistividad ($<200 \Omega.m$).
- Los electrodos de medida (C) y (P) se clavan en suelo firme a ($\approx 0,15$ m), interesa el mejor contacto del electrodo (C) con el Suelo; las distancias de medida desde (E), son:

Circuito de **Corriente** : $EC=d = 20 \ell$ (mínimo: 25 m, normal: 45 m)

Circuito de **Potencial** : $EP=p = 12 \ell$ (mínimo: 15.5 m, normal: 28m)



Para una mejor aproximación, se hace una segunda medida cambiando a una distinta directriz, los circuitos de Corriente y Potencial, con nuevos puntos (C) y (P).

$$\rho_e = 2\pi r_0 R_0 = \rho_a \quad ; \quad \rho_e = \frac{\rho_e(1) + \rho_e(2)}{2} \quad , \text{ de dos medidas}$$

- Los valores aproximados de Resistividad que se obtienen con una medida o con el promedio de dos medidas, serán siempre valores de Resistividad aparente que en éste caso se aproximan en valor a la Resistividad media del suelo hasta la profundidad (ℓ).
- La característica de puntos de Resistividades equivalentes (ρ_e vs ℓ) obtenidas a distintas profundidades (ℓ), se puede procesar con el Método de TAGG para valores aparentes (ρ_a), pero la base de datos no asegura una buena resolución de las Resistividades obtenidas.
- La dificultad del clavado muchas veces no posibilita medidas progresivas a diferentes profundidades para obtener la característica de puntos requerida para el procesamiento, además el propio método de medidas es lento muy laborioso y costoso.
- Actualmente ésta alternativa no se utiliza ni se acepta para determinar las Resistividades de diseño de Puestas a tierra según Estándares internacionales.

3.3 Líneas de Medidas Wenner, Electrodo Piloto

Las medidas de Wenner se hacen sobre directrices rectilíneas denominadas Líneas de medida, cada una de ellas estará conformada por una serie de Sondeos Geoelectrónicos Verticales (SGV), que conforman los puntos de una característica (ρ_a vs a) que debe ser procesada para obtener las Resistividades de suelo estratificado para Diseño.

- Para PATs de CA sólo se requieren sondeos hasta las profundidades medias que normalmente alcanzan los electrodos en el suelo, a menos que se requiera hallar estratos profundos de muy baja Resistividad para diseño de electrodos especiales.
- El mínimo número de Sondeos en cada Serie de Medidas de una Línea es cuatro, porque menos puntos no permiten traducir bien la directriz ni la pendiente de una característica; no obstante, es aconsejable ampliar el cuadro de medidas con puntos intermedios y externos.
- De preferencia se deben hacer el mayor número de Sondeos en cada Línea de Medidas, para propiciar la mejor definición de la característica de puntos obtenida; aquellos que se sugieren en la Tabla se pueden completar o ampliar por encima del límite mínimo.

a. Distancias (a) Entre Electrodos – Medidas con Método de WENNER

Cada sondeo (SGV) de medida a una distancia (a) entre electrodos, entrega el valor de una Resistividad aparente media; es decir, traduce la exploración de dicho parámetro a una profundidad doble de la distancia (a); se sugieren las siguientes series (en negrita van las distancias aplicables a una serie básica de número mínimo de medidas).

Distancias Wenner entre Electrodos Según Series de Medidas, (a)m											
SS.EE.	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	12	16
LL.TT.	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	12			

- El Método de Wenner (ASTM: G57), que recomiendan los Estándares Internacionales:
 - No exige alta sensibilidad de los Instrumentos de Medida, cada medida toma la diferencia de potencial según la distancia (a) del sondeo.
 - Es aplicable y muy confiable para despliegues cortos, exploración poco profunda
 - Las variaciones laterales del suelo sólo distorsionan su precisión, en sondeos de gran profundidad que no se usan para el diseño de PATs de CA.
 - Facilita el Procesamiento multiestrato simplificado a partir de los datos de campo, utilizando dos patrón de características uno Estándar y otro Auxiliar

b. Profundidades de Clavado (ℓ) - Medidas con Método de Electrodo Piloto

Cada sondeo (SGV) de medida a una profundidad (a) del electrodo piloto, entrega un valor de Resistividad equivalente (ρ_e) propio de dicha profundidad.

Profundidades de Clavado (ℓ) metros, Para Toda Finalidad (Para esquemas de medida; $d = 25$ m, $p = 15.5$ m)							
ℓ (m)	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0

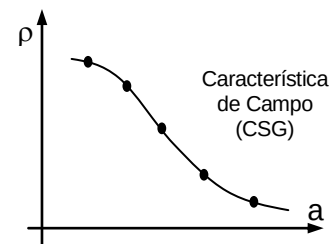
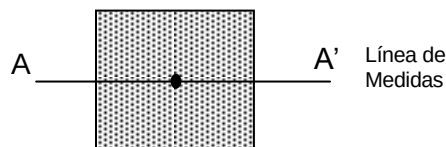
4.- Medidas y Procesamiento de la Resistividad Aparente

Las medidas Wenner para obtener las Resistividades aparentes del suelo, está destinada a la obtención de las Resistividades para el diseño de instalaciones de Puesta a Tierra, luego del procesamiento de las características de puntos de cada serie de Medidas de Campo.

4.1 Desarrollo de las Medidas Sobre el Terreno

Se hacen a lo largo de una “Línea” de medidas con diferentes distancias (a), para obtener Resistividades aparentes (ρ_a) y tener una “serie” de puntos (ρ_a vs a) con los cuales se grafica una Característica de campo - CSG que deberá ser procesada en gabinete.

- En suelos planos, la aplicación de los valores de Resistividad obtenidos a partir de una Línea de medidas tiene alcance circular, con un radio igual al del circuito de Corriente.
- En suelos de topografía irregular como, laderas de cerro, para el alcance circular de los valores obtenidos de Resistividad, será necesario realizar dos Líneas de medidas.
- La cobertura ampliable de los valores procesados de Resistividad aplicables al diseño de Puestas a Tierra, tiene también un alcance circular según la naturaleza del suelo:
 - Radio en suelos planos y **llanos** : >2 distancias de circuito de Corriente
 - Radio en suelos accidentados o **laderas** : <2 distancias de circuito de Corriente



4.2. Medidas para Puestas a Tierra Puntuales

Son medidas para **muestreo** o para Puestas a Tierra de **pequeña** cobertura; el número de sondeos de la **serie** se define según su importancia y la Resistencia de dispersión **objetivo**.

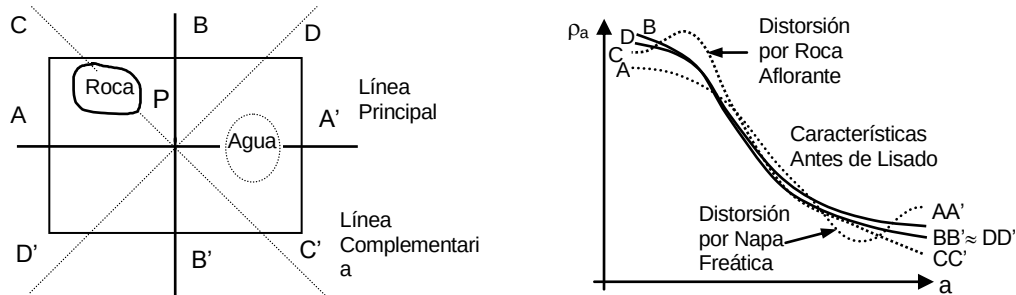
a. Para Puestas a Tierra Puntuales de Armado Simple

Donde el diseño es de mínima cobertura (PAT de Líneas o usos puntuales de BT) y utilizará electrodos unitarios verticales (varilla o tubos de 2,0m a 2.5m) u horizontales (conductores o pletinas de 3.5m, siendo 0.5m para la salida), o también mixtos cuya Resistencia se exige sea de mediana a más baja posible ($<25 \Omega$).

- En el sitio se selecciona una trayectoria recta representativa (AA') para las medidas.
- Sobre la línea (AA') se efectúa una serie de medidas con diferentes valores de (a).
- Se observa y anotan los datos físicos, estado y conformación del suelo en el sitio.
- Se grafican los datos de medidas (ρ_a vs a), Resistividad (ρ_a) contra Distancia (a)
- Se lisan los puntos aberrantes de la curva, según lo observado sobre el terreno.
- La curva de puntos así obtenida constituye la Característica de sondeos geoelectricos (CSG) que se destina al procesamiento para obtener el perfil de suelo estratificado.

b. Para Puestas a Tierra Puntuales de Sistema

Donde el diseño es de pequeña a mediana cobertura, generalmente destinadas a SE de Distribución de hasta 600 m², PAT de LE de Alta Tensión en zonas transitables y PAT de muy baja Resistencia que deben instalarse utilizando armados de electrodos mallados.



- En el sitio se eligen para las medidas, sólo dos trayectorias rectilíneas ortogonales que forman las líneas de medida (AA' y BB'), se toman datos característicos del suelo.
- En ambas trayectorias, se efectúan sendas series de medidas y se grafican los datos respectivos en la misma hoja; Resistividad (ρ_a) vs Distancia (a).
- En caso de discordancia entre ambas curvas, se hace una serie de medidas en una nueva trayectoria diagonal (CC'), si aparecen nuevas discordancias se hará otra serie de medidas en la otra trayectoria diagonal (DD').
- Por lo menos dos de las tres o cuatro curvas con los datos de campo (ρ_a vs a), deben resultar próximas o coincidentes para ser representativas del suelo.
- Dichas características se lisan conjuntamente analizando los puntos aberrantes de ambas, para obtener una sola característica (CSG) representativa del sitio.
- La característica (CSG) única final es de puntos con valores promediales (ρ_a), de las características parcialmente coincidentes, será destinada al procesamiento.

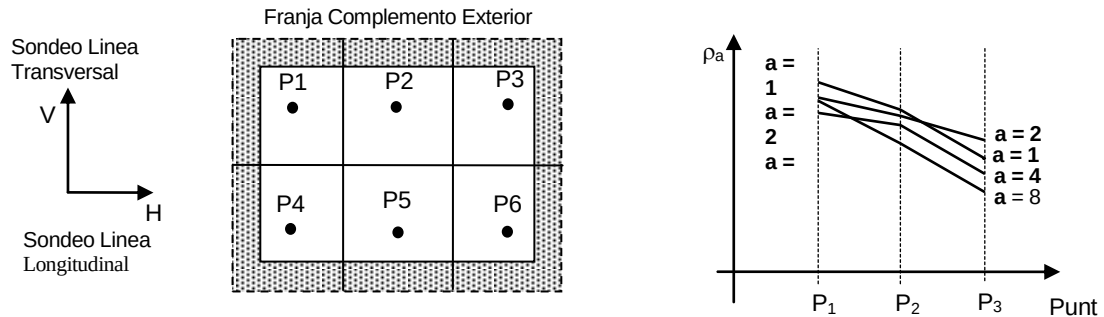
Nota: Se simplifican las medidas en áreas muy extensas con el Método de Triangulación ®, que permite la caracterización del Suelo Estratificado en cualquier punto intermedio.

4.3. Medidas Para Puestas a Tierra Extensas

Las medidas Wenner se hacen en idéntica forma que para PAT puntuales; aparte ello, dada la extensión de las áreas cubiertas y las bajas o muy bajas Resistencias objetivo, su ejecución debe prever la lotización del terreno y series de medida con mayor número de puntos.

- El área debe subdividirse en lotes cuadrangulares idénticos para ser representativos, para la mejor adecuación se pueden incluir franjas imaginarias exteriores de hasta 10m de ancho.
- Se traza el cuadrillado de lotes de medidas, según la extensión del área, con una longitud lateral única para todos los lotes cuadrados que podrá tener de 25m hasta 35m.
- Los puntos centrales de cada uno de los lotes definen los puntos de medida: P1, P2, ..., donde se cruzan las Líneas ortogonales de medidas (habrán dos curvas de campo a tratar).

- La característica (CSG) resultante de cada lote con puntos de valores promediales ($\bar{\rho}_a$), será procesada y definirá la densidad del mallado de la PAT en dicho lote.
- Igualmente la característica (CSG) representativa de toda el área, puede ser elegida entre entre las de los lotes más desfavorables.
- También, yuxtaponiendo los gráficos ($\bar{\rho}_a$ vs P_i) con su parámetro (a), se halla el perfil de espesores de estrato del suelo del área, ello muestra el perfil de espesores.

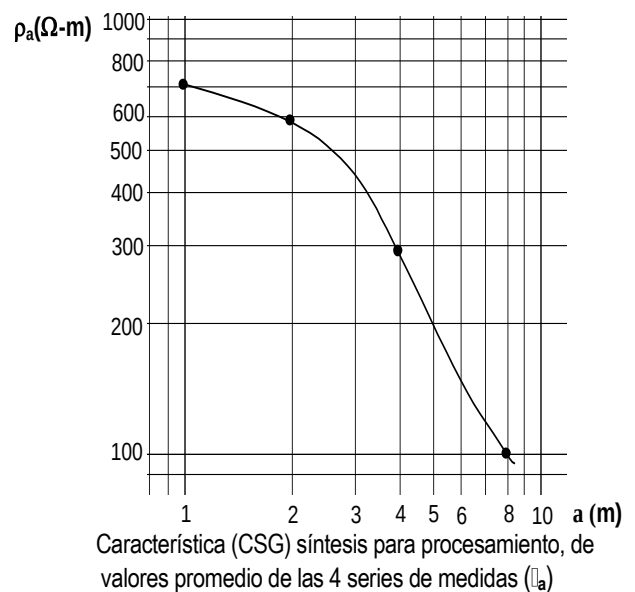
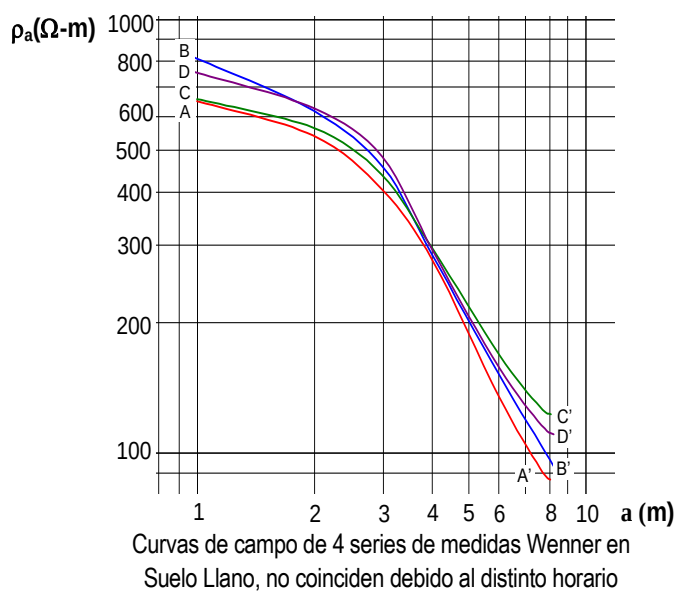


a. Para Puestas a Tierra Extensas de Uso Industrial

Estas áreas aparte la distribución de equipo de manufactura, tienen subsistemas de Control, Automatización, Protección, Medida, Comunicaciones, flujo de Data; prevén Puestas a Tierra con armados de electrodos horizontal en mallado irregular y eventual adición de una cama de electrodos verticales para cumplir con bajas a muy bajas Resistencias objetivo ($\ll 5\Omega$).

b. Para Puestas a Tierra extensas de Alta Tensión

Se destinan al Diseño de sistemas de PAT de muy baja Resistencia objetivo ($< 1\Omega$) tales como distintos tipos de Estaciones de Transformación, Patios de llaves, Centrales Eléctricas, todas con extremas exigencias de seguridad de las personas por las elevadas corrientes de falla a Tierra y de confiabilidad de la operación de los subsistemas de automatización.



4.2 Interpretación de las Características de Resistividad Apparente (CSG)

Se hace examinando las tendencias y máximos y mínimos de las características lisadas (ρ_{ai} , a_i), conformadas por los puntos procesados de una o más Líneas de medidas de campo; reciben el nombre de Curva o Gráfico de Campo, o Característica de Sondeos Geoelectricos (CSG)

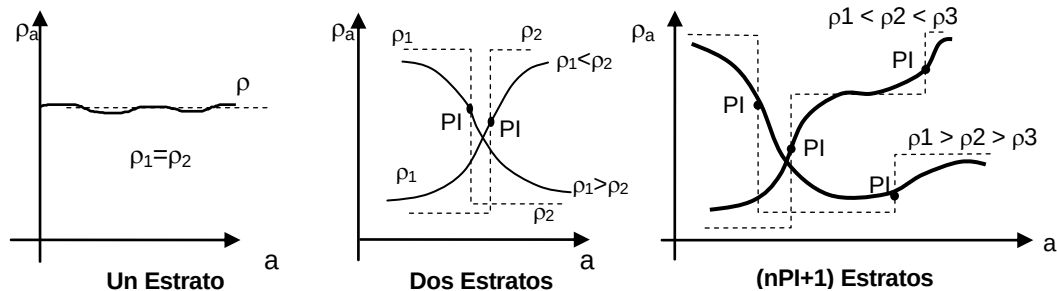
a.- Características Típicas de Conformación Resistiva de los Suelos

Curva (CSG) de Suelos que Presentan Un Solo Estrato:

- Tienen una tendencia horizontal independiente de la distancia de medidas (a)
- Sólo identifican la existencia de un Estrato Superficial grueso ($h_1 > 3a_{\max}$); 3% de casos.
- En este caso la Resistividad de Diseño (ρ_1) es igual a la Resistividad Apparente (ρ_a)

Curvas (CSG) de Suelos que Presentan Dos Estratos

- Tienen tendencia inicial ascendente o descendente con extremidades asintóticas.
- Su doble concavidad opuesta, presentará un Punto de Inflexión (PI); 95% de casos.
- Las Resistividades de Diseño (ρ_1 y ρ_2), se hallan mediante procesamiento biestrato.



Curvas (CSG) de Suelos que Presentan de Tres o más Estratos

- Su progresión presenta variaciones a veces ascendentes a veces descendentes.
- Tienen (PI) entre máximos y mínimos, indican el número total de Estratos ($nPI + 1$)
- Aparecen con series de medidas Wenner donde las distancias son ($a > 8m$).
- Las Resistividades de Diseño (ρ_1 , ρ_2 , ρ_3), se hallan mediante procesamiento multiestrato.
- Rara vez es necesario procesar suelos de más de tres estratos para el diseño de PATs puntuales, ello es para el diseño de PATs con control de potenciales y muy baja RPT.

4.3 Modelo Matemático de TAGG Para Suelo de Dos Estratos

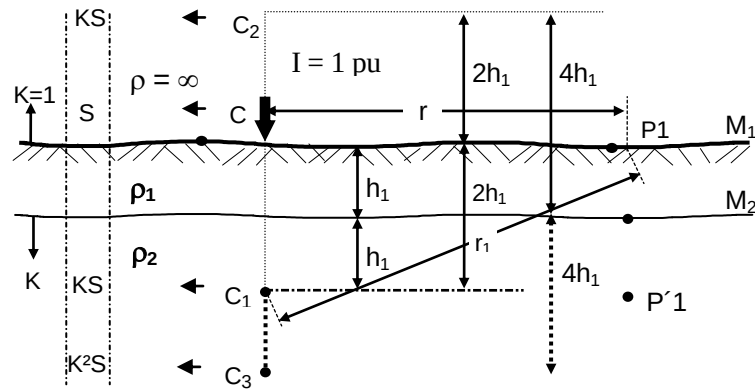
Considera que los Estratos (ρ_1) y (ρ_2) son paralelos a la superficie del Suelo Plano (M_1), y (h_1) es el espesor del Estrato Superficial (ρ_1), sobre la Interfase Plana (M_2)

- Toda inyección de Corriente (I) en el Suelo origina una respuesta de éste
- Aparece una serie infinita de imágenes formadas respecto de los Planos (M_2) y (M_1)

a.- Determinación del FACTOR DE REFLEXION (K)

La inyección de la Corriente (I) en el punto (C) del Suelo, crea la fuente ($S = I \cdot \rho_1 / 2l$) cuya energía se propaga, se puede analizar el fenómeno en la directriz vertical.

- El punto (C) se refleja en (M_2) como (C_1) y luego (C_1) a su vez se refleja en (M_1) como (C_2) y continua (C_2) reflejándose en (M_2) como (C_3) y así sucesivamente continúan.



- (K) constante de Atenuación que afecta a la fuente (S) al pasar ésta como imagen desde (ρ_1) a (ρ_2); cuando esa imagen se refleja a su vez en (M_1), ($K=1$) es del aire.
- La Imagen virtual (KS) de (S) que está en (C_1), dista también (h_1) del plano de interfase (M_2), mientras que La Imagen virtual (KS) de (C_1) que está en el aire (C_2), dista ($2h_1$) del plano de interfase (M_1), y no cambia de valor porque el aire solo le afecta con ($K=1$).
- El Potencial (U_{P1}) en el punto de superficie ($P1$) debido a la Fuente (S), más el de la Imagen (KS) es:

$$U_{P1} = \frac{I \rho_1}{2 \pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{K}{r_1} \right) \quad (\text{En el estrato } \rho_1)$$

- El Potencial ($U_{P'1}$) en el punto profundo ($P'1$) debido a la Fuente (S), menos el de la Imagen (KS) será:

$$U_{P'1} = \frac{I \rho_2}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{K}{r} \right) \quad (\text{En el estrato } \rho_2)$$

- Siendo iguales ambos potenciales (U_{P1}), ($U_{P'1}$) en la interfase (M_2), para determinar (K) se igualan las expresiones, considerando grandes las distancias; $r \approx r_1 \approx r_2$; luego:

$$\text{Para } r = r_1 = r_2 \quad K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{o} \quad K = \frac{(\rho_2 / \rho_1) - 1}{(\rho_2 / \rho_1) + 1}, \text{ entonces } \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1+K}{1-K}$$

- La relación de Resistividades $K_0 = \rho_2 / \rho_1$, se elegirá como parámetro, de curvas.
- Variación del Factor de Reflexión (K)
 - Si $\rho_2 > \rho_1$ se obtiene (+ K)
 - Si $\rho_2 < \rho_1$ se obtiene (- K)
 - Si $\rho_2 = \rho_1$ se obtiene (K = 0)
 - Si $\rho_2 = \infty$ Estrato Aislante (K = +1)
 - Si $\rho_2 = 0$ Estrato Conductor (K = - 1)

b.- Potencial de Superficie en Suelo Estratificado

- Las distancias de observación ($r_n = \overline{P1C_n}$) a cada reflexión (C_n), se calculan a partir del triángulo rectángulo genérico, donde ($2h_1$) es la menor distancia a la interfase (M_1).

$$r_n^2 = r^2 + (2nh_1)^2$$

- La Fuente Real en (C) y sus Imágenes en (C_{2n-1}), (C_{2n}) participan en pares, con iguales distancias (r_n) y respectivas emisividades ($K^n S$), siendo (n) el número de reflexiones.

- El Potencial (U_{P1}) en el punto (P1) a la distancia (r) de la fuente, será igual a la suma de los Potenciales de la Fuente Real (C) más los potenciales de las (n) Imágenes vistas desde la superficie del suelo en (ρ_1).

$$U_{P1} = \frac{I \rho_1}{2 \pi} \cdot \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I \rho_1}{2 \pi} \cdot \frac{K^n}{r_n} \quad U_{P1} = \frac{I \rho_1}{2 \pi} \cdot \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1)^2}} \right]$$

- Para las medidas Wenner, con base en la expresión (U_{P1}) del punto (P1), se establece el potencial en (U_{P2}) del punto (P2), cuya d.d.p. se expresa como (V_s), es decir el parámetro que con la corriente inyectada (I) permite hallar la Resistividad aparente.

c.- Resistividades (ρ_a) para Modelo de Suelos de Dos Estratos (Ecuación de Tagg)

Siendo (V_s) la d.d.p. entre (V_{P1}) y (V_{P2}), al ser remplazada en la formula de Wenner ($\rho_a = 2\pi a V_s/I$), da la expresión operativa:

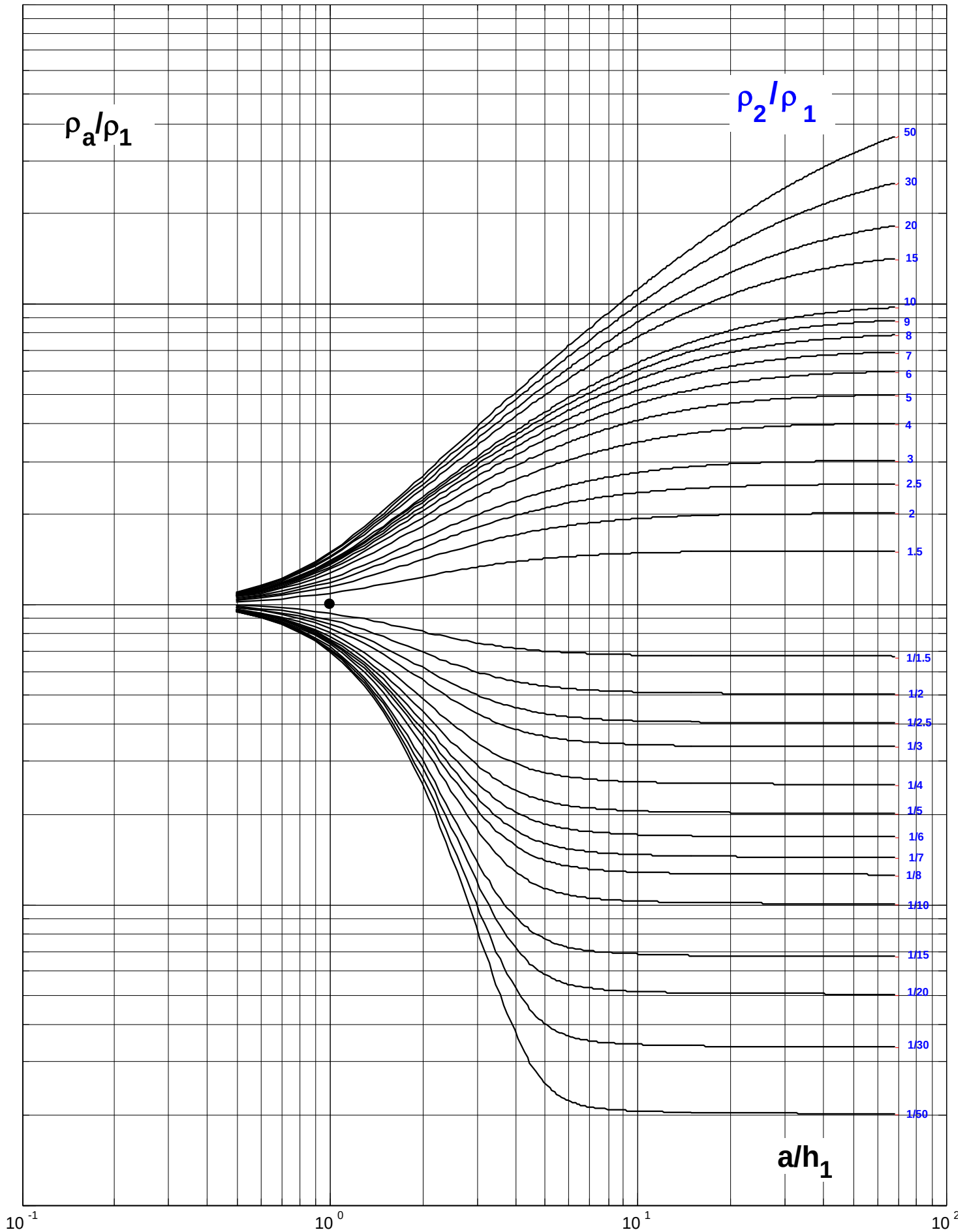
$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{(1+u^2)^{1/2}} - \frac{K^n}{(4+u^2)^{1/2}} \right], \quad \text{donde: } u = 2 n h_1 / a$$

- Dicha expresión origina la familia de características Estándar-STD, identificadas cada una mediante el parámetro ($K_0 = \rho_2/\rho_1$), al hacer variar en el coeficiente (K) las Resistividades de ambos estratos (ρ_1) y (ρ_2) entre cero e infinito.
- La familia (STD) representa todas las innumerables posibilidades de características de suelos de dos estratos, con las que pueden compararse las curvas (CSG) obtenidas a partir de datos de campo, para la identificación de sus parámetros biestrato (ρ_1 , ρ_2 , h_1).
- Luego, al reproducir dicha familia (STD) en transparencia impresa o magnética, permite la caracterización gráfica (por comparación) que da resultados muy aproximados.

4.4 Caracterización Gráfica de los Suelos Estratificados

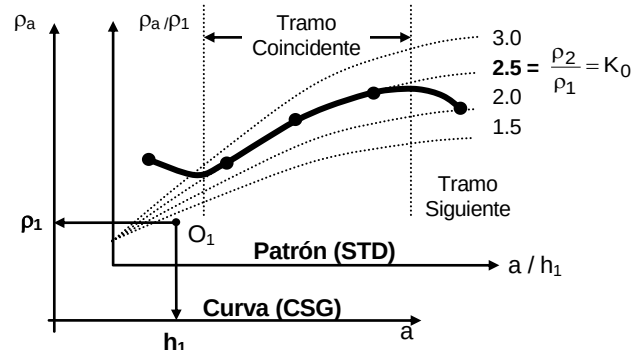
La caracterización de los suelos en modelo estratificado a partir de las medidas de Resistividad aparente (ρ_a), expresadas en el gráfico de campo (CSG), puede hacerse en dos formas:

- a.- Con Métodos Numéricos: El programa procesa directamente los valores (a , ρ_a) que se le suministran, ello exige el ingreso de datos de medidas de campo precisas
- b.- Con Métodos Gráficos: Utilizando las curvas patrón de comparación que permiten corregir las desviaciones o puntos aberrantes de las medidas de campo que aún siendo realizadas por especialistas tienen errores; se aconseja preferir estos métodos.
 - El Gráfico de Campo (CSG) se compara con las Características Patrón (STD), para determinar el perfil del suelo con sus parámetros (ρ_1), (h_1) y (ρ_2) en modelo biestrato.
 - La Familia (STD) relaciona en Abscisas Log (a/h_1) y en Ordenadas Log (ρ_a/ρ_1) para valores (+) y (-) de (K), siendo $K_0 = \rho_2/\rho_1$ el parámetro nominal de cada curva.



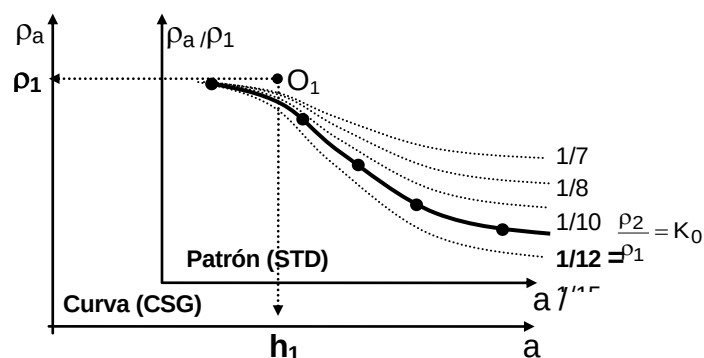
Familia de Características Patrón ESTÁNDAR

- La Condición es que los gráficos Patrón (STD) y de Campo (CSG) deban estar a igual escala, y la comparación por superposición mantenga el paralelismo de los ejes.
- No siempre toda la directriz de la curva (CSG) simple, coincide con una de la Familia Estándar (STD), se procesa el segmento coincidente, empezando desde la izquierda.



c. **Procesamiento de Suelos de Dos Estratos, Wenner, Schlumberger**

- La curva de Campo (CSG), tendrá como mínimo 4 puntos en una directriz regular o entre un máx-mín o un min-max, se analizan los puntos discordantes.
- La Comparación de la curva (CSG) se hace con la característica de la familia (STD) que sea más parecida o próxima; todo punto que esté fuera de la trayectoria, es erróneo.
- Empezando, primero se compara desde el tramo izquierdo de la (CSG), recordar que a veces el primer punto puede ser aberrante por ser de la superficie aireada ($a \leq 0.7m$)
- La coincidencia total o parcial con una de las características de la familia (STD) muestra un suelo de dos o más estratos, luego sobre el gráfico (CSG), se hace lo siguiente:
 - Se marca el origen virtual (O) de la Familia (STD), denominándolo Punto (O_1)
 - Se calca toda la curva coincidente (STD), anotando al final su parámetro (K_0).
 - Desde (O_1) en la CSG se hallan, leyendo en Ordenadas (ρ_1), y en Abscisas (h_1).
 - Para hallar (ρ_2) se toma el valor de (K_0), de la curva STD coincidente y se le calcula.



Nota; En la Tabla comparativa de gráficos de puntos de medidas de campo y su procesamiento de la siguiente página, se consignan en (4) columnas, las series de datos de suelos típicos con los resultados de su procesamiento por distintos métodos que existen; de ellos se aprecia que los procedimientos Numérico y Gráfico de suelo en modelo estratificado, con el método de Tagg, descalifican a todos los demás.

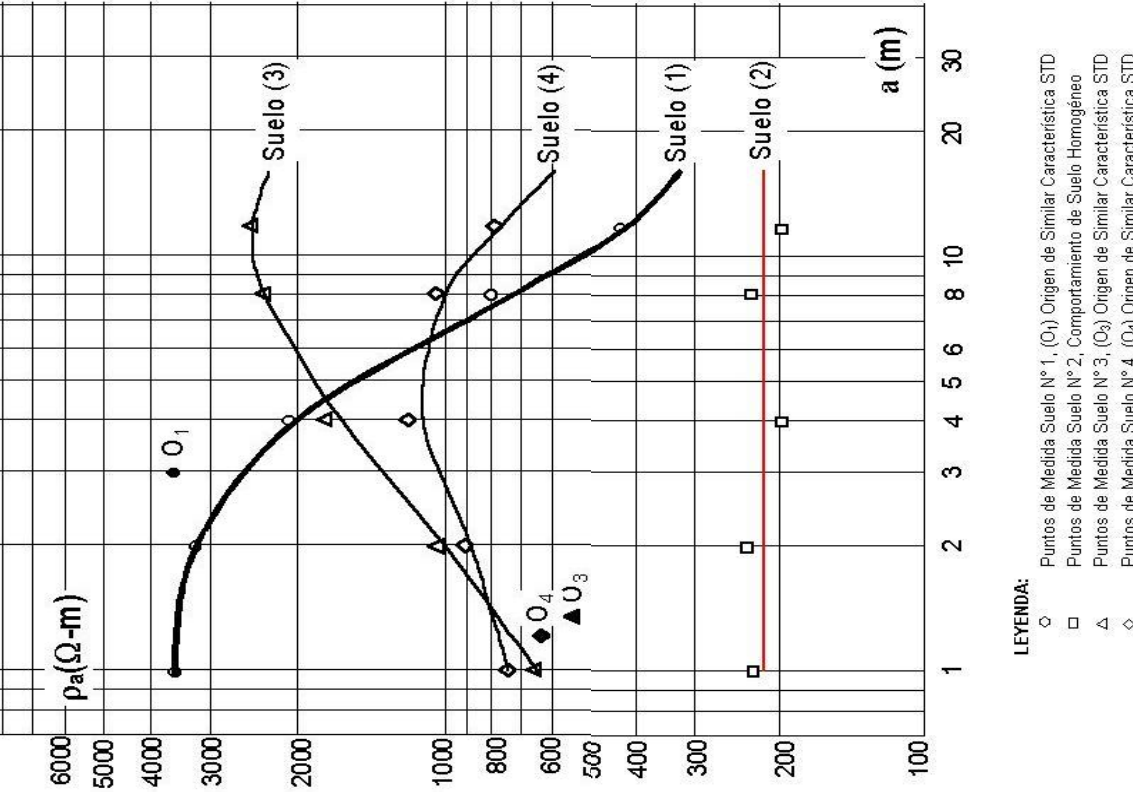
COMPARACION DE RESISTIVIDADES DE DISEÑO, OBTENIDAS CON DIFERENTES METODOS, A PARTIR DE MEDIDAS WENNER

Medidas (*) de Campo WENNER (ASTM G57-78)	DISTANCIAS ELECTRODOS a (m)	Suelo (1) p _a (Ω-m) Descendente	Suelo (2) p _a (Ω-m) Homogéneo	Suelo (3) p _a (Ω-m) Ascendente	Suelo (4) p _a (Ω-m) Sube - Baja
		3688	224	653	735
	1	3179	238	1040	906
	2	2013	197	1857	1251
	4	794	236	2292	1040
	8	423	200	2405	791
	12				
RESULTADO					
Método PROMEDIAL	$\sum \frac{\rho_{am}}{n}$ h (m)	2019	219	1649	944
		∞	∞	∞	∞
Método de Electrodo Piloto l = 1.0 m	ρ _{eq} (Ω-m) h (m)	2560	226	733	870
		∞	∞	∞	∞
Método de Medida UNICA	ρ _{20m} (Ω-m) ρ _{10m} (Ω-m) ρ _{5m} (Ω-m) h (m)	320 560 1500	220 220 230	2000 2400 2050	500 900 1200
		∞	∞	∞	∞
Método NUMERICO (PROG. RESIS)	p ₁ (Ω-m) p ₂ (Ω-m) h ₁ (m)	3647 319 3.05	221 201 4.12	657 3687 1.59	810 954 1.59
Método de GRAFICO (SUPERPOS.)	p ₁ (Ω-m) p ₂ (Ω-m) p ₃ (Ω-m) h ₁ (m) h ₂ (m)	3600 300 - 3 -	220 220 - ∞ -	560 6720 3225 1.35 8.00	625 1875 362 1.2 7.0

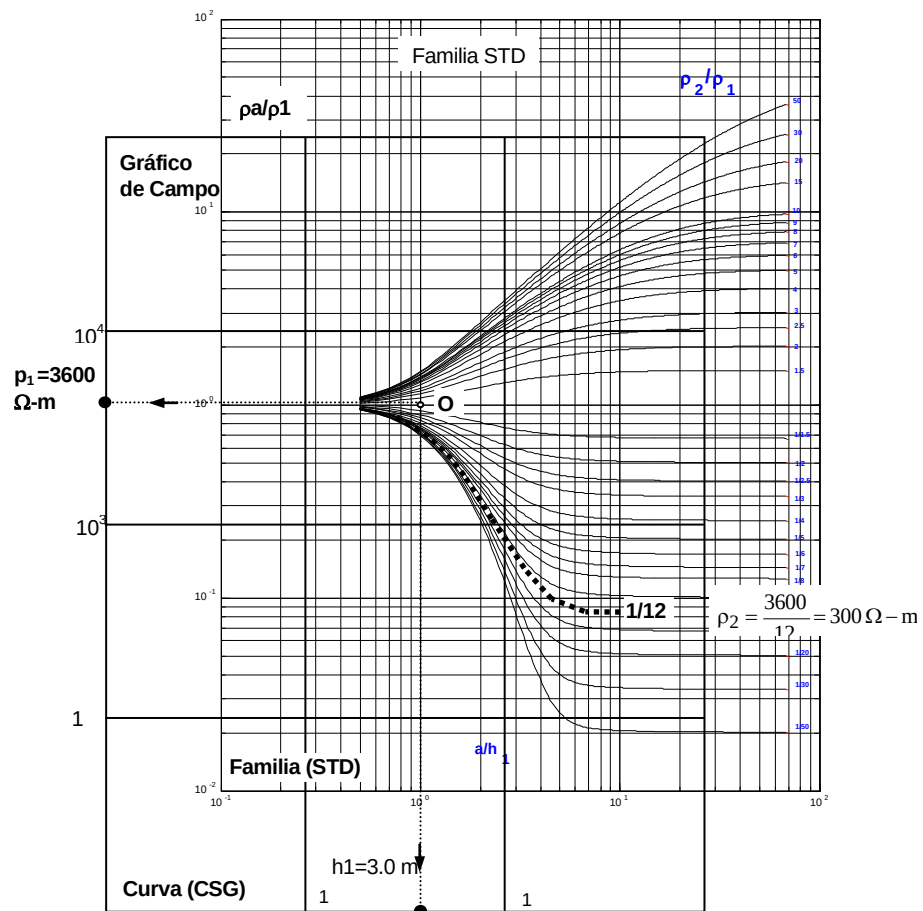
- ρ_a, ρ_{am} : Resistividades Aparentes, Medida Wenner (n), (Ohm-m)
p₁, p₂, p₃ : Resistividades de Diseño, Estratos 1, 2, 3 (Ohm-m)
ρ_{20m}, ..., ρ_{5m} : Resistividades de Medida Unica Wenner con (a = 20m, 10m, 5m) (Ohm-m)
b₁, b₂ : Espesores, Estrato Superficial (ρ₁), Estrato Subyacente (ρ₂), (m)
h : Espesor del Estrato para Resistividad Unica de Diseño (m)
a : Distancia entre Electrodo Medida Wenner, (m)
n : Número de Medidas de Resistividad Wenner

(*) RUTA L.T. LIMA-PISCO 220 KV - SISTEMA MANTARO (1982)

GRAFICA DE PUNTOS DE MEDIDA DE RESISTIVIDAD WENNER OBTENIDOS PARA (4) TIPOS DE SUELOS DIFERENTES



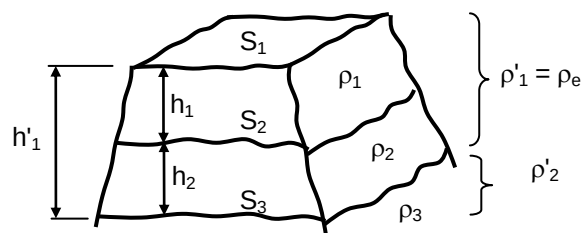
- LEYENDA:
◊ Puntos de Medida Suelo N° 1, (O₁) Origen de Similar Característica STD
□ Puntos de Medida Suelo N° 2, Comportamiento de Suelo Homogéneo
△ Puntos de Medida Suelo N° 3, (O₃) Origen de Similar Característica STD
◇ Puntos de Medida Suelo N° 4, (O₄) Origen de Similar Característica STD



4.5 Suelos de más de dos Estratos-Criterio de HUMMEL

El Criterio de Hummel permite Caracterizar según Modelo de dos Estratos, los suelos que presentan 3 o más estratos, agrupando sucesivamente los estratos superiores.

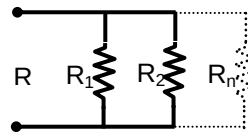
- Primero se asume que los Estratos (ρ_1) y (ρ_2) están conectados en paralelo formando un estrato equivalente de Resistividad ($\rho_e = \rho'_1$), con un espesor ($h'_1 = h_1 + h_2$).



- Considerando al suelo conductor, las **superficies** (S_1) y (S_2) de los estratos (ρ_1) y (ρ_2), con espesores (h_1) y (h_2), representan sus respectivas secciones y longitudes de conducción.
- Se puede entonces determinar sus **Resistencias** (R_1) y (R_2) al paso de la corriente, así como la **Resistencia Equivalente** (R_e) con (ρ'_1), de su conexión en paralelo.

$$R_1 = \rho_1 \frac{h_1}{S_1} \quad , \quad R_2 = \rho_2 \frac{h_2}{S_2} \quad , \quad R_e = \rho'_1 \frac{h'_1}{S_e}$$

- La Conductancia total es igual a suma de las Conductancias individuales de los estratos involucrados que como mínimo serán dos, al procesar suelo de 3 estratos



$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

- El nuevo estrato subyacente (ρ_3) será determinado como si fuese el segundo estrato (ρ'_2) de un suelo de dos estratos (ρ'_1 y ρ'_2); reemplazando y operando se tiene:

$$\frac{S_e}{\rho_e h'_1} = \frac{S_1}{\rho_1 h_1} + \frac{S_2}{\rho_2 h_2}, \text{ Si se asume que } S_1 = h_1^2, \quad S_2 = h_2^2, \quad S_e = (h'_1)^2$$

Reemplazando con: $h_2 = h'_1 - h_1$ se puede despejar (ρ_2)

$$\frac{h'_1}{\rho'_1} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h'_1 - h_1}{\rho_2},$$

$$\frac{\rho_1}{\rho'_1} = \frac{\rho_2 h_1 + \rho_1 h'_1 - \rho_1 h_1}{\rho_2 h'_1} \quad \text{obteniendo } (\rho_2)$$

Dividiendo el segundo miembro entre ($\rho_1 h_1$), resulta la expresión de transición para la caracterización de un suelo en modelo de tres estratos: $\frac{\rho_1}{\rho'_1} = \frac{(\rho_2 / \rho_1) + (h'_1 / h_1) - 1}{(\rho_2 / \rho_1) \cdot (h'_1 / h_1)}$

Del mismo modo, al poner en paralelo los tres estratos superiores, se desarrolla:

$$\frac{h''_1}{\rho''_1} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h'_1 - h_1}{\rho_2} + \frac{h''_1 - h'_1}{\rho_3}$$

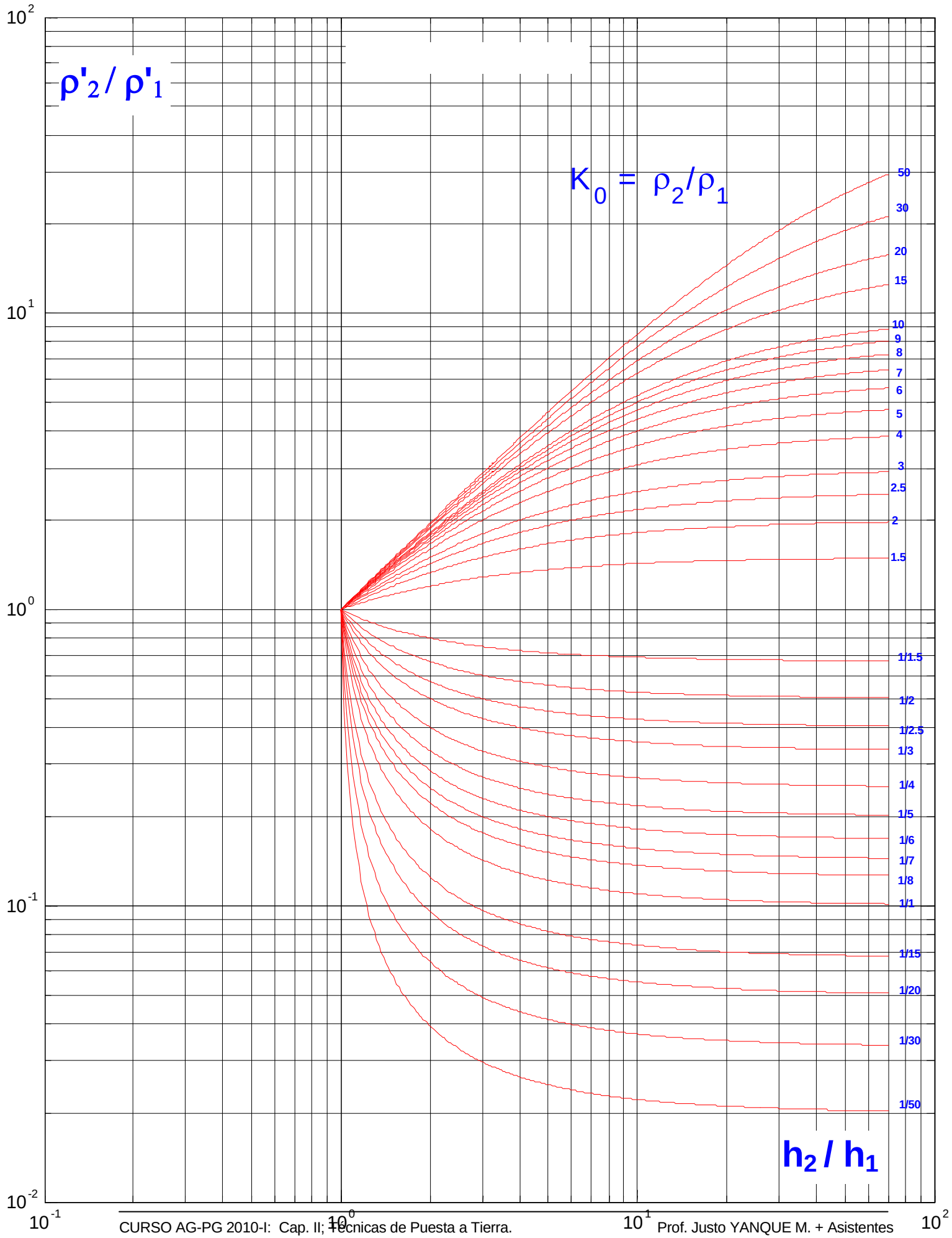
Multiplicando por (ρ_1) y dividiendo entre (h''_1) y resolviendo resulta también la expresión de transición que permite la caracterización de un suelo en modelo de 4 estratos:

$$\frac{\rho_1}{\rho''_1} = \frac{h_1}{h''_1} + \frac{\rho_1(h'_1 - h_1)}{\rho_2 h''_1} + \frac{\rho_1(h''_1 - h'_1)}{\rho_3 h''_1}, \quad \text{que permite obtener } (\rho_3).$$

- En ambos casos reemplazando en la ecuación (ρ_2 / ρ_1) de Tagg, y aplicando el mismo proceso, a la misma escala, permiten obtener las mismas Características de la Familia Patrón AUXILIAR, que posibilita el procesamiento gráfico:
 - Relacionando (ρ'_1 / ρ_1) con (h'_1 / h_1), para valores positivos (+) y negativos (-) del Parámetro básico de denominación ($K_o = \rho'_2 / \rho'_1$), y
 - Reproducida en transparencia, permite caracterizar junto con la familia Patrón (STD) sucesivamente las Resistividades de Suelos de tres, cuatro o más estratos.
- Las Resistividades del Estrato (ρ_2) cuando ($\rho'_2 = \rho_3$), o del Estrato (ρ_3) cuando ($\rho''_2 = \rho_4$), ..., etc se determinan con el criterio de Hummel arriba desarrollado, obteniendo las expresiones (ρ_2 / ρ'_1) mostrada primero, luego (ρ_3 / ρ''_1) y así sucesivamente, y calculando:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 \rho'_1 (h'_1 - h_1)}{\rho_1 h'_1 - \rho'_1 h_1}, \quad \rho_3 = \frac{\rho_1 \rho_2 \rho''_1 (h''_1 - h'_1)}{\rho_1 \rho_2 h''_1 - \rho''_1 \rho_2 h_1 - \rho_1 \rho'_1 (h'_1 - h_1)} \dots, \text{etc}$$

- Una curva (CSG) multiestrato, requiere por lo menos (≥ 8) puntos de medida con distancias ($a > 1\text{m}$).



4.6 Procesamiento de Suelos MULTIESTRATOS

Se identifican los máximos y los mínimos de la curva (CSG), de modo que quede segmentada en tramos ascendentes o descendentes que se procesan separadamente.

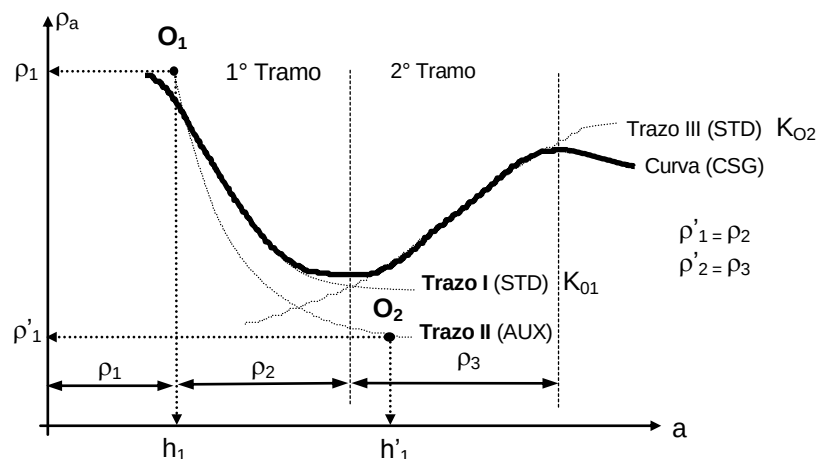
a.- Procesamiento del Primer Tramo de la (CSG): Wenner

Es idéntico al procesamiento aplicado para Suelo de dos Estratos.

- Se marca la curva de la Familia (STD) coincidente con los puntos de la curva (CSG), con el Trazo I, anotando al final de la misma su Parámetro (K_0)
- Se marca simultáneamente (O_1) en la hoja de la curva (CSG), y luego desde dicho punto se hallan (ρ_1) en ordenadas, (h_1) en abscisas y (ρ_2) con el valor de (K_0).

b.- Procesamiento Segundo Tramo - Método Wenner.

- Se coloca el Origen de la Familia (AUX) sobre el Origen (O_1) de la hoja de (CSG).
- Se calca en la hoja de (CSG) con un Trazo II, la curva (AUX) de igual K_0 que la (STD)
- El Segundo tramo de la curva (CSG) se compara con la familia (STD) desplazando el origen de ésta sobre el Trazo II, buscando una nueva curva (STD) coincidente.
- Luego de calzar el segundo tramo con la nueva curva (STD), marcar en la hoja de (CSG), el nuevo origen de la familia (STD), dicho punto (O_2) estará sobre el Trazo II.
- Desde (O_2) en la hoja de (CSG), se leen en forma similar (ρ'_1), (h'_1) y $K'_0 = \rho'_2 / \rho'_1$
- Para un nuevo Estrato adicional se procede en forma idéntica; luego los espesores de los estratos sucesivos se obtienen de la siguiente forma:
 - Para O_1 : Se tendrán; ρ_1 , h_1 , ρ_2 donde $h_1 = h_1$, para ρ_1
 - Para O_2 : Se tendrán; ρ'_1 , h'_1 , ρ'_2 donde $h_2 = h'_1 - h_1$, para ρ_2
 - Para O_3 : Se tendrán; ρ''_1 , h''_1 , ρ''_2 donde $h_3 = h''_1 - h'_1$, para ρ_3

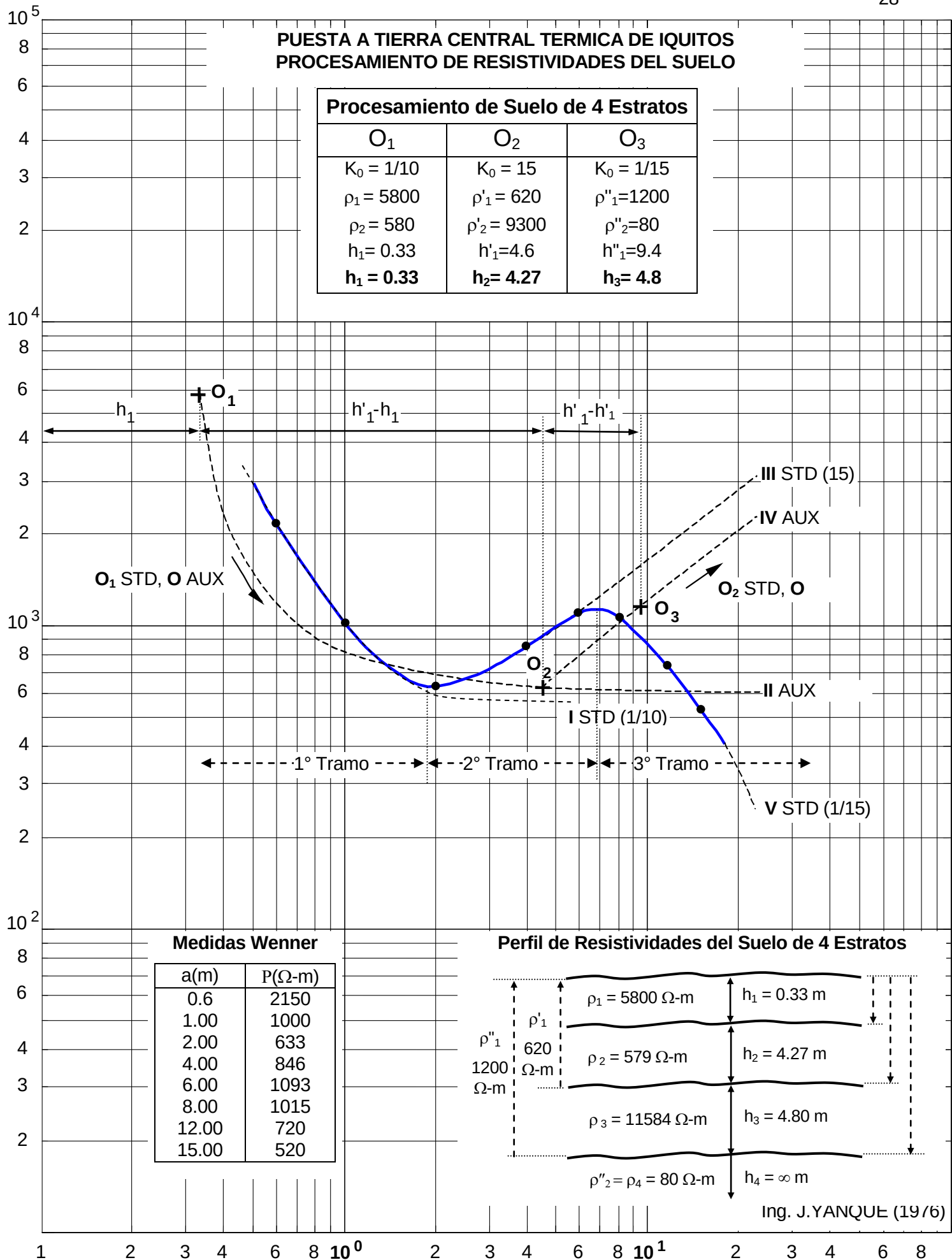


- Si el propósito principal es hallar primero un estrato de baja Resistividad, se pueden colocar en el esquema, las Resistividades Equivalentes ($\rho_e = \rho^{n_1}$) hacia la superficie, determinando enseguida los valores de (ρ_2), (ρ_3),..., (ρ_{n-1}).
- El ejemplo muestra el desarrollo del método para un caso real, de un suelo de alta Resistividad (4) estratos (3 PI), de Selva Baja (fino limoso, húmedo, con vegetación).

PUESTA A TIERRA CENTRAL TERMICA DE IQUITOS PROCESAMIENTO DE RESISTIVIDADES DEL SUELO

Procesamiento de Suelo de 4 Estratos

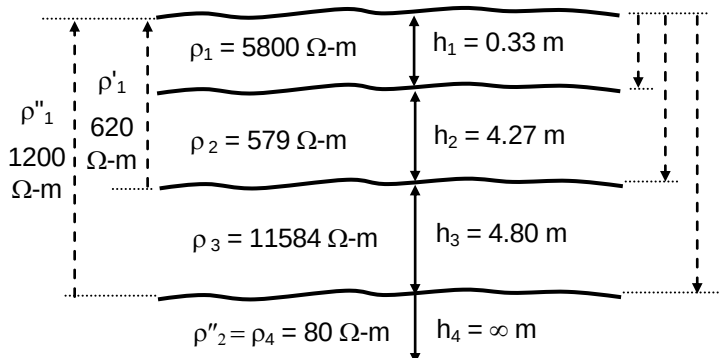
O_1	O_2	O_3
$K_0 = 1/10$	$K_0 = 15$	$K_0 = 1/15$
$\rho_1 = 5800$	$\rho'_1 = 620$	$\rho''_1 = 1200$
$\rho_2 = 580$	$\rho'_2 = 9300$	$\rho''_2 = 80$
$h_1 = 0.33$	$h'_1 = 4.6$	$h''_1 = 9.4$
$h_1 = 0.33$	$h_2 = 4.27$	$h_3 = 4.8$



Medidas Wenner

$a(m)$	$P(\Omega\cdot m)$
0.6	2150
1.00	1000
2.00	633
4.00	846
6.00	1093
8.00	1015
12.00	720
15.00	520

Perfil de Resistividades del Suelo de 4 Estratos



Ing. J. YANQUE (19/6)