

# METODOS ELECTRICOS

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODOS ELECTRICOS: RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

Los métodos eléctricos permite caracterizar las propiedades eléctricas de las rocas.

Las aplicaciones de los métodos geoelectricos cubren un amplio espectro:

- minería
- hidrogeología
- medio ambiente y contaminación
- hidrocarburos
- tectónica

La capacidad de conducir la corriente eléctrica depende de factores intrínsecos de la estructura y composición química de la roca, como así también de factores externos como la temperatura, presión y el grado de saturación de soluciones salinas.

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODOS ELECTRICOS: RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

Composición mineralógica : Las rocas se conforman de agregados de minerales de ocurrencia natural. Estos minerales conducen la corriente eléctrica si permiten el paso de los portadores de cargas eléctricas **electrones o iones**.

Dependiendo de esto es posible distinguir dos tipos de conductividad :

**electrónica** (metales y semiconductores)

**iónica** (dieléctricos y electrolitos), cuyo origen está controlado en última instancia por el tipo de enlace atómico dominante.

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODOS ELECTRICOS: RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

**Metales (Au, Ag, Cu, Sn, Grafito)** : enlace metálico con gran movilidad de los electrones de valencia, en consecuencia los electrones tienen gran capacidad de desplazamiento y la resistividad es muy baja ( $\sim 10^{-8}$ - $10^{-7}$  [OHM-m]).

**Semiconductores (Cpz, Bornita, Py, Magnetita, Pirrotita)** : No existe la misma facilidad para el movimiento de los electrones, siendo necesaria la presencia de campos eléctricos fuertes para producir la conducción.

**Dieléctricos (Micas, feldespatos, cuarzo, calcita, silicatos en general)** : En estos compuestos los electrones están fuertemente ligados a los átomos mediante enlaces covalentes o enlaces iónicos (electrolitos sólidos). La mayor parte de los minerales constituyentes de la corteza terrestre son dieléctricos con resistividades del orden de  $10^7$  [OHM-m].

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODOS ELECTRICOS: RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

**Electrolitos líquidos (soluciones salinas)** : En las soluciones acuosas los portadores de la corriente eléctrica son los cationes y aniones. Al aplicar un campo eléctrico los iones presentes en las soluciones acuosas tienden a desplazarse en la dirección de las carga opuestas neutralizando la polarización del medio.

En síntesis se aprecia que las propiedades eléctricas de los constituyentes de las rocas, parametrizadas en la resistividad eléctrica, presentan una variabilidad de mas de 10 ordenes de magnitud ( $\sim 10^{-7} - 10^{+7}$  [OHM-m]).

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODOS ELECTRICOS: RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

Si bien la mayor parte de los constituyentes de las rocas son dieléctricos, lo cual estaría implicando que la conducción eléctrica debería estar ausente en las estructuras corticales (medio aislante).

Afortunadamente todas las rocas presentan cierto grado de porosidad, volumen que generalmente esta ocupado total o parcialmente por electrolitos que condicionan una conducción iónica de resistividad muy variable, que dependen fundamentalmente de las características de las soluciones acuosas y el tipo de porosidad y grado de interconexión entre poros.

*Gonzalo Yañez 2005*

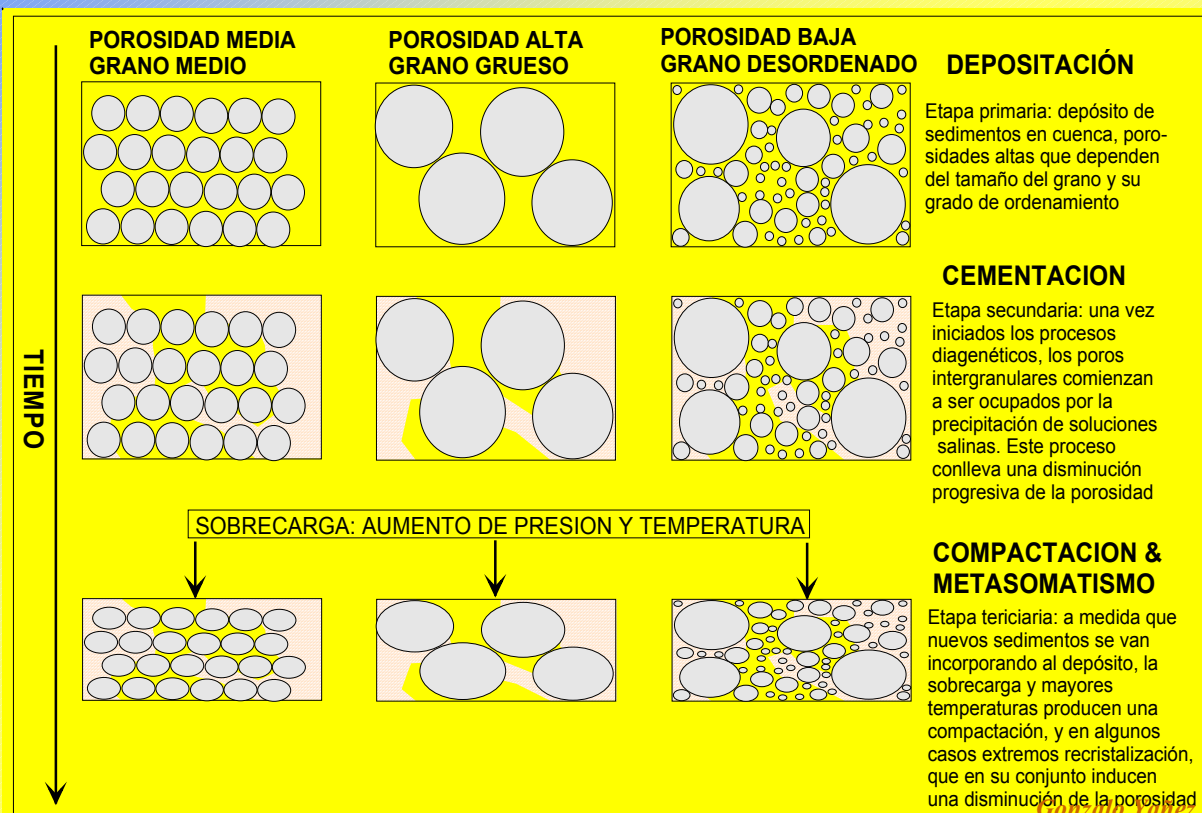
# PROPIEDADES ELECTRICAS DE LAS ROCAS: INSTRUMENTO DE MEDICION



**Abem RIPS3 resistivity/IP meter**

*Gonzalo Yañez 2005*

## RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS: POROSIDAD EN ROCAS SEDIMENTARIAS





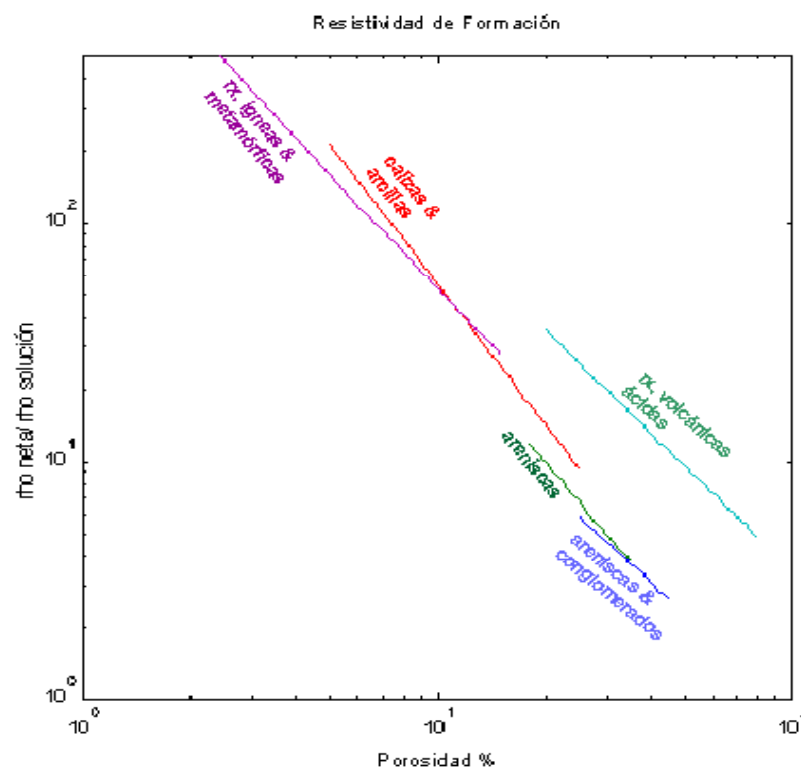
# RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS: POROSIDAD EN ROCAS

Tipo de roca	Rango de porosidad *
	100%
Suelo	50-60
Gravas	30-40
Arenas y gravas	30-35
Arena grano medio a grueso	35-40
Arena grano medio a fino	30-35
Areniscas	10-20
Arcillas no compactadas	45-55
Arcillas compactadas	1-10
Calizas	1-10
Basalto	2-10
Granito	1-2

*Gonzalo Yañez 2005*

## PROPIEDADES ELECTRICAS DE LAS ROCAS:

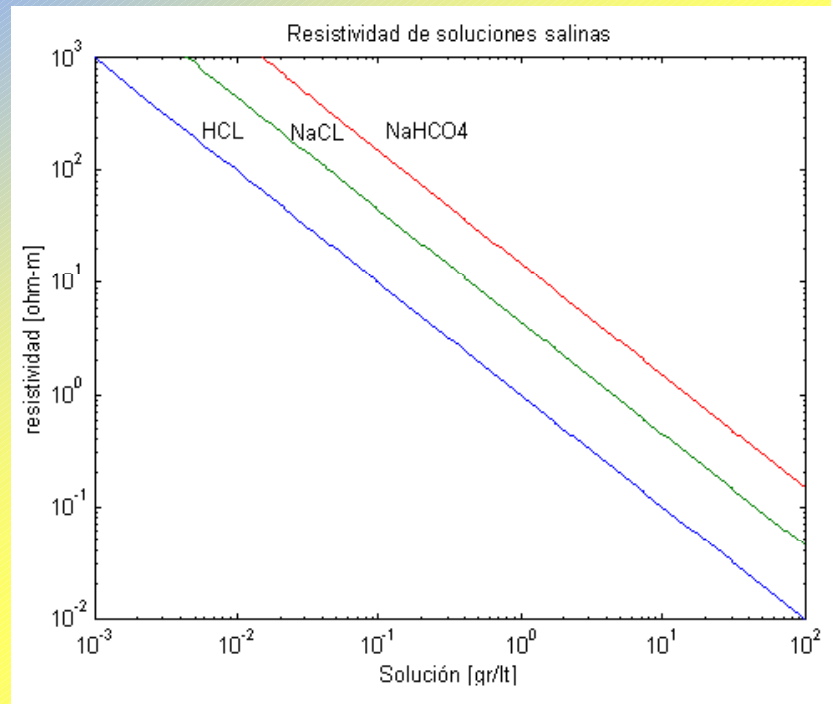
Resistividad de formación para litologías y rangos de porosidad



*Gonzalo Yañez 2005*

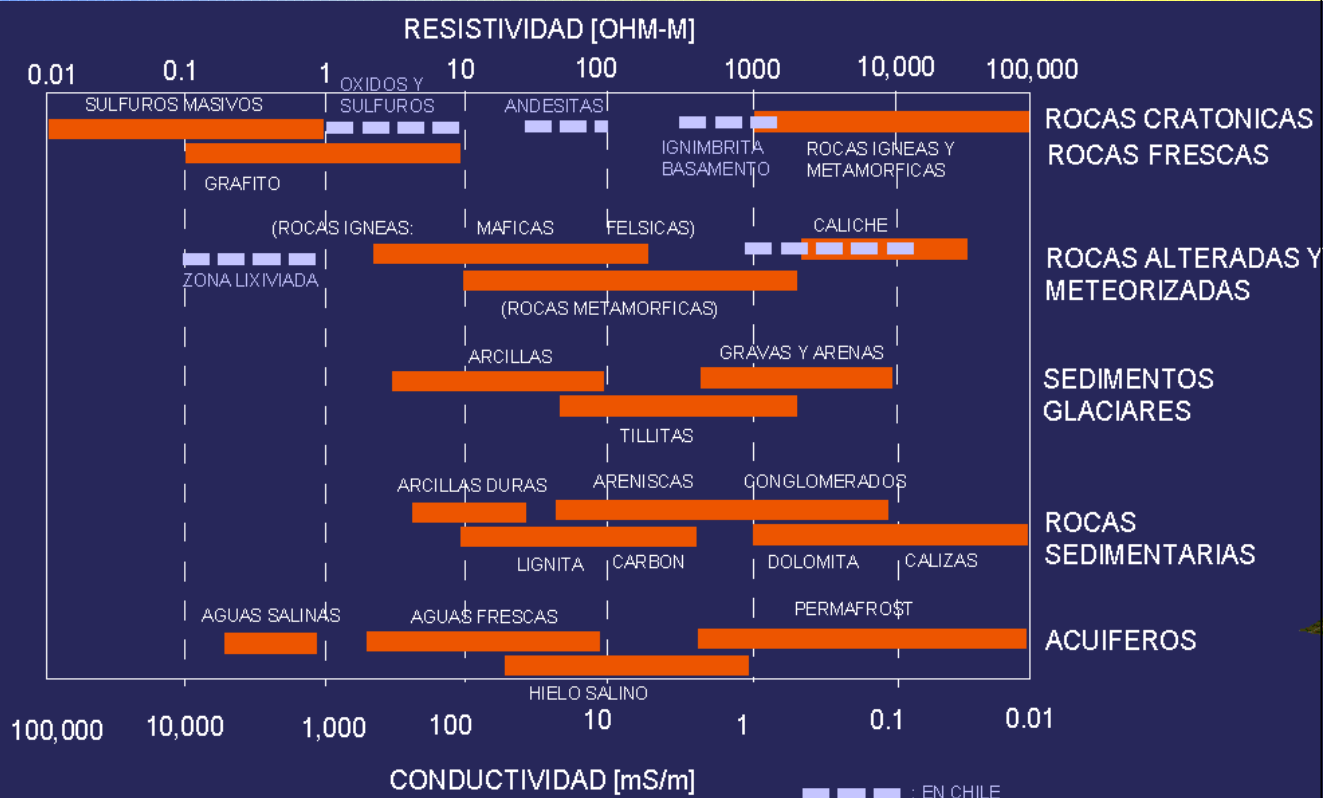
# PROPIEDADES ELECTRICAS DE LAS ROCAS:

## Resistividad de soluciones salinas



Gonzalo Yañez 2005

## RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS: LITOLOGIAS COMUNES

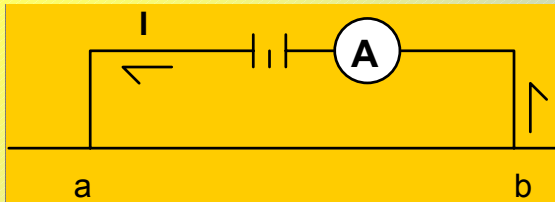


Gonzalo Yañez 2005

## PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

**Corrientes eléctricas en medios homogéneos y de capas horizontales en corriente continua (SONDAJE ELECTRICO VERTICAL: SEV)**

Para establecer un campo eléctrico en un medio de resistividad  $\rho$ , es necesario introducir una corriente eléctrica al terreno por medio de dos fuentes que se denominan electrodos de corriente. En la práctica un sistema de exploración geoelectrica se compone de un generador que transfiere la corriente por medio de sendos cables cuyos extremos se unen a barras conductoras que se insertan en el terreno generando un circuito eléctrico. Este transmite una corriente  $I$  a través de un medio disipativo (la corteza) de resistividad mayor que cero:



*Gonzalo Yañez 2005*

## PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

En el caso específico de un campo eléctrico producto de una fuente de corriente continua, las ecuaciones de Maxwell se reducen a un sistema vectorial estacionario :

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

De tal forma que el campo eléctrico es irrotacional, es decir deriva de un potencial escalar  $U$ , tal que :

$$\vec{E} = -\nabla U$$

*Gonzalo Yañez 2005*

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## Medio Uniforme

Si la conductividad en el medio es uniforme, el gradiente de la conductividad es cero, de tal forma que el potencial eléctrico en condiciones estacionarias cumple la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 U = 0$$

(en coordenadas esfericas con simetría radial se reduce a  $\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0$ )

Cuya solución esta dada por:

$$U = \frac{I\rho}{4\pi r}$$

Considerando la interfase tierra-aire, las condiciones de borde condicionan un flujo nulo de corriente perpendicular a la superficie. En consecuencia la determinación del potencial electrico se ve incrementada en un factor 2:

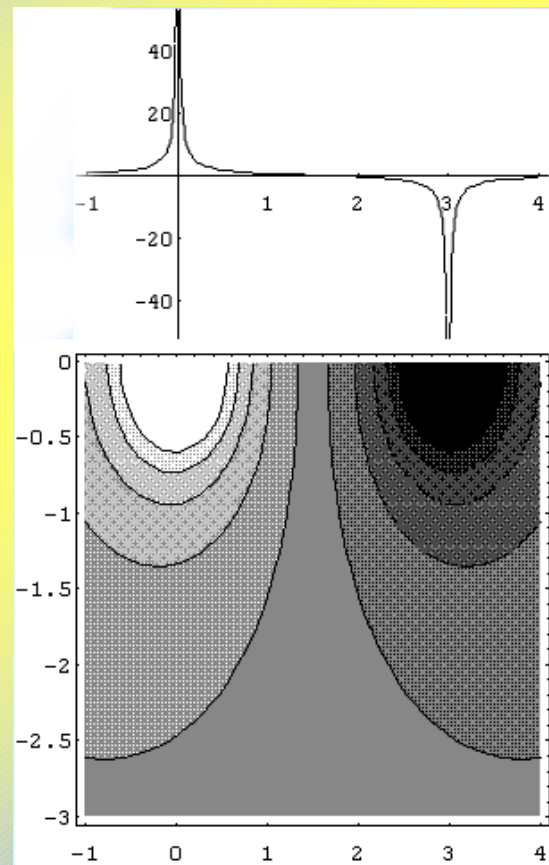
$$U = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

*Gonzalo Yañez 2005*

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## Medio Uniforme

En la práctica la inyección de corriente en la superficie terrestre involucra un par de electrodos por los que transita una corriente  $I$  desde el terreno y hacia el terreno, de tal forma que el potencial total es la suma de los potenciales monopoles (con signo cambiado y dependencia geométrica que es función de la posición relativa entre el punto de observación y cada polo):



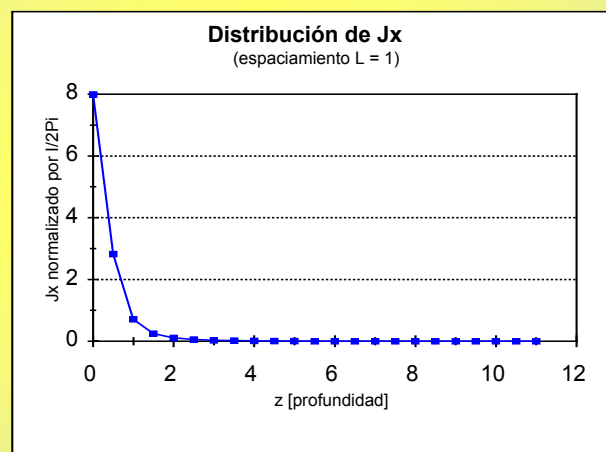
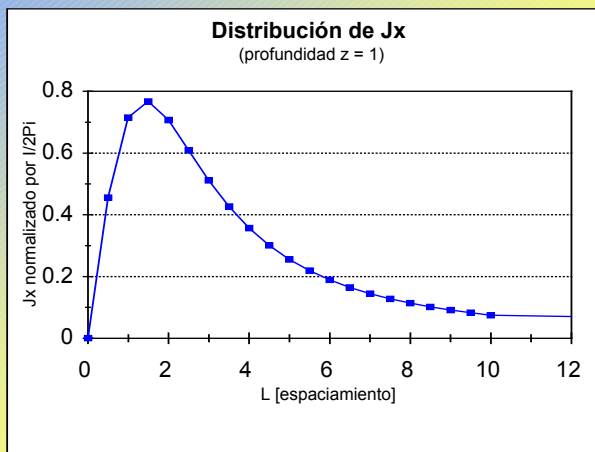
*Gonzalo Yañez 2005*



# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## Medio Uniforme: Distribución de Corriente

Dependencia de la densidad de corriente con la profundidad ( $z$ ) y el espaciamiento entre electrodos ( $L$ )



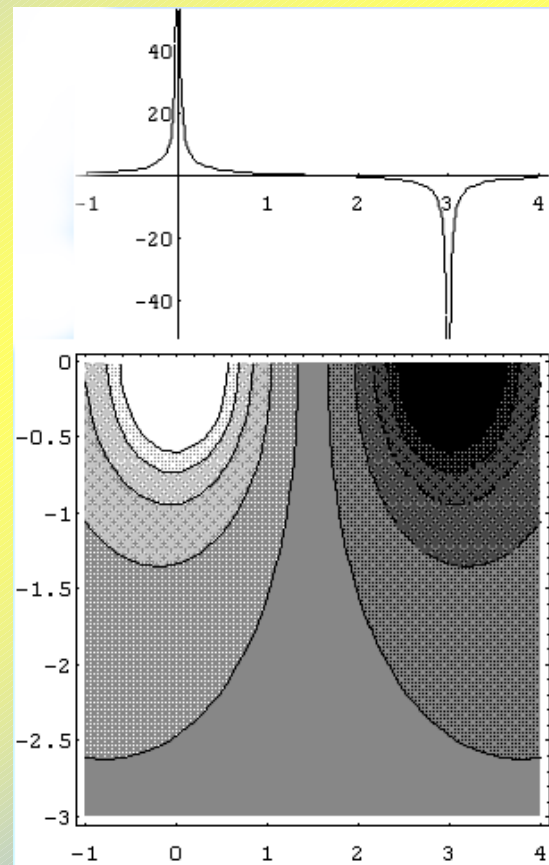
A medida que aumenta la profundidad para un determinado espaciamiento de electrodos, la densidad de corriente disminuye prácticamente en forma exponencial

*Gonzalo Yañez 2005*

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## Medio Uniforme

En la práctica la inyección de corriente en la superficie terrestre involucra un par de electrodos por los que transita una corriente  $I$  desde el terreno y hacia el terreno, de tal forma que el potencial total es la suma de los potenciales monopoles (con signo cambiado y dependencia geométrica que es función de la posición relativa entre el punto de observación y cada polo):



*Gonzalo Yañez 2005*

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## Medio Estratificado: Una capa sobre un semi espacio

En un medio estratificado de dos capas se debe resolver directamente la ecuación de Laplace, dadas las condiciones de simetría del problema se escoge un sistema cilíndrico en el cual las dependencias angulares son nulas:  $\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$  (10),

considerando como condiciones de borde:

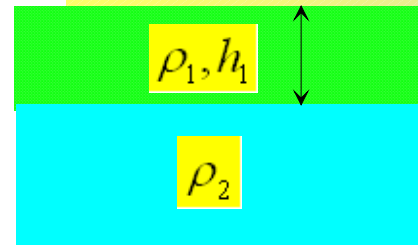
$$\frac{\partial U_1}{\partial z} = 0 \quad z=0 \quad (\text{b.1})$$

$$U_1 = U_2 \quad z=h_1 \quad (\text{b.2})$$

$$\sigma_1 \frac{\partial U_1}{\partial z} = \sigma_2 \frac{\partial U_2}{\partial z} \quad z=h_1 \quad (\text{b.3})$$

La ecuación (10) se resuelve en forma estandar usando separación de variables  $U(r,z)=R(r)*Z(z)$ , de tal modo que:

$$\frac{1}{R(r)} \left( \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) = -\lambda^2 = -\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (11)$$



### Solución:

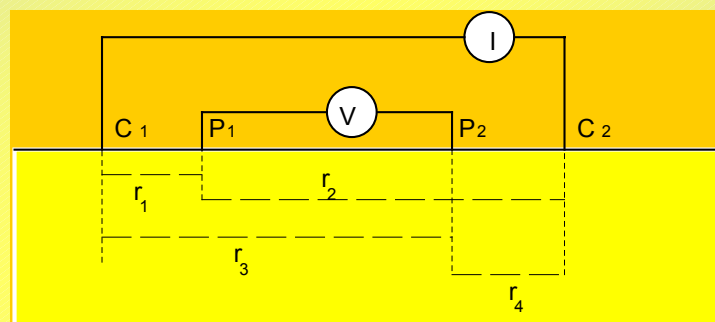
$$U_1(r, z=0) = \frac{I \rho_1}{2\pi} \int_0^\infty \left[ 1 + \frac{2k}{e^{2\lambda h_1} - k} \right] J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{I \rho_1}{2\pi r} \left\{ 1 + 2kr \int_0^\infty \left[ e^{2\lambda h_1} - k \right]^{-1} J_0(\lambda r) d\lambda \right\}$$

Gonzalo Yañez 2005

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## Medición del potencial eléctrico : definición de arreglos geo-eléctricos y resistividad aparente

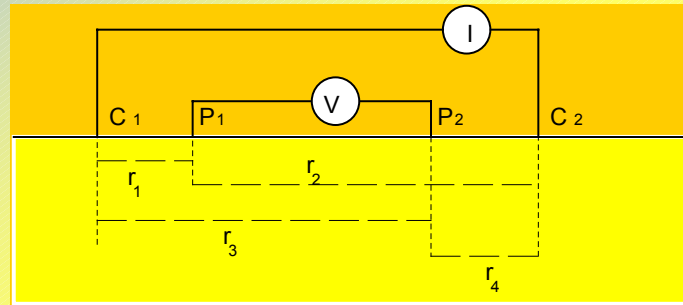
Para medir el potencial eléctrico se utilizan además de los electrodos de corriente un par de electrodos en los cuales se mide la diferencia de potencial entre dos puntos:



Gonzalo Yañez 2005

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Medición del potencial eléctrico :  
definición de arreglos geo-  
eléctricos y resistividad aparente



La diferencia de potencial entre los electrodos de voltaje (P1,P2) es la diferencia de la suma de los potenciales asociados a los electrodos de corriente (C1,C2) en cada punto (P1,P2):

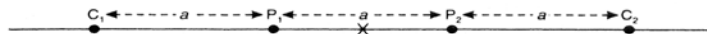
$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} = \frac{I\rho}{2\pi} G(r_1, r_2, r_3, r_4)$$

- a) Arreglo Werner :  $r_1=r_4=r_2/2=r_3/2=a$  ;  $G_W=1/a$
- b) Arreglo Schlumberger :  $r_1=r_4=(L-l)$ ;  $r_2=r_3=(L+l)$
- c) Arreglo dipolo-dipolo :  $r_1=r_4=2ln$ ;  $r_2=2l(n-1)$ ;  $r_3=2l(n+1)$  ( $n \ll 1$ ) ;

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA GEOMETRIA Y REPRESENTACION EN PSEUDO SECCIONES DE ARREGLOS ELECTRODICOS

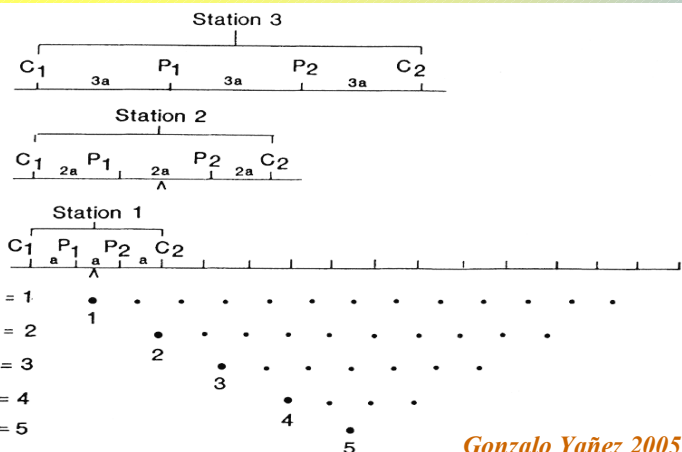
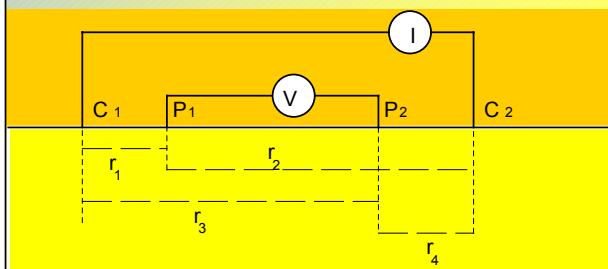
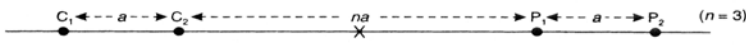
Wenner



Schlumberger



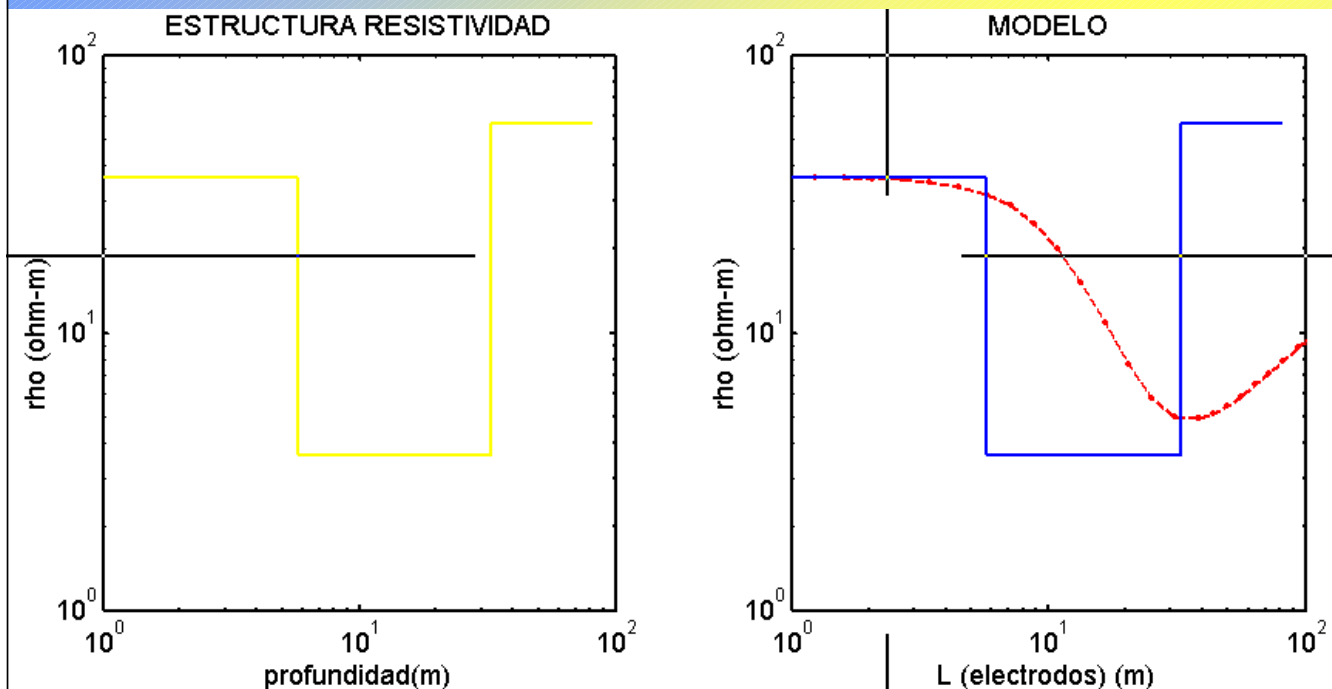
Dipole-dipole



*Gonzalo Yañez 2005*

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## MODELACION 1-D :



Gonzalo Yañez 2005

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

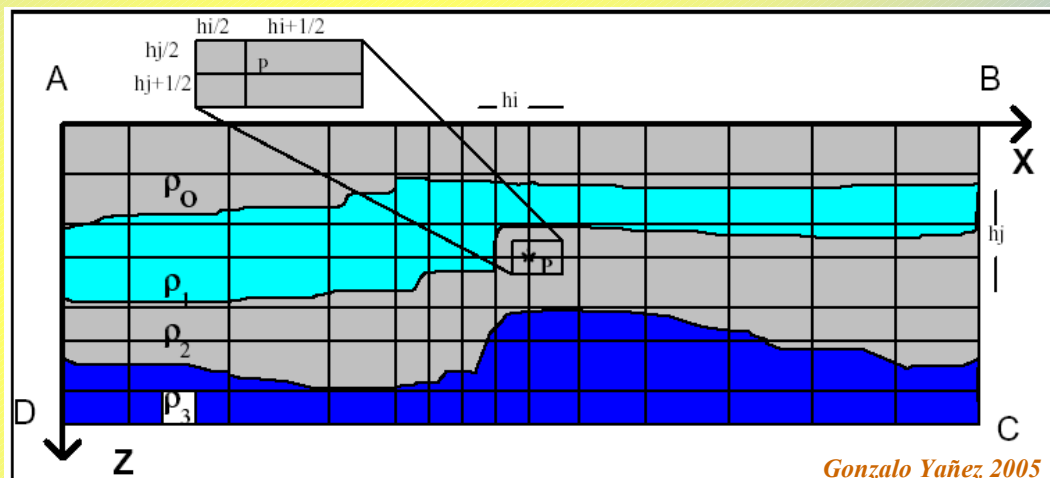
### MODELACION 2-D :

La ecuación de continuidad de campos electricos, puede escribirse en forma diferencial en terminos de un potencial electrico ( $U$ ), la densidad de corriente ( $q$ ), y la conductividad ( $\sigma$ ):

La solucion numérica  
De esta ecuacion exige  
Una discretizacion del  
Medio:

$$-\nabla \cdot (\sigma(x, z) \nabla U(x, z)) = q(x, z)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left[ \sigma(x, z) \frac{\partial U}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[ \sigma(x, z) \frac{\partial U}{\partial z} \right]}{\partial z} + q(x, z) = 0$$



Gonzalo Yañez 2005



# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## MODELACION 2-D :

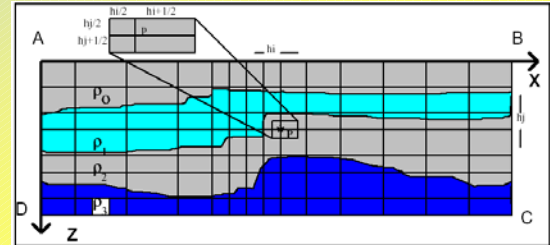
La densidad de corriente en el punto P donde se aplica corriente corresponde a:

$$q_p = \frac{4I}{(h_i + h_{i+1})(h_j + h_{j+1})}$$

Por otra parte la discretizacion permite expresar las derivadas parciales como sumas y productos de propiedades y campos en los nodos:

$$\left[ \frac{\partial \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right)}{\partial x} \right]_{(i,j)} = \frac{1}{2h} \left[ \sigma_{(i,j)} \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{h} - \sigma_{(i,j-1)} \frac{U_{i,j} - U_{i,j-1}}{h} \right]$$

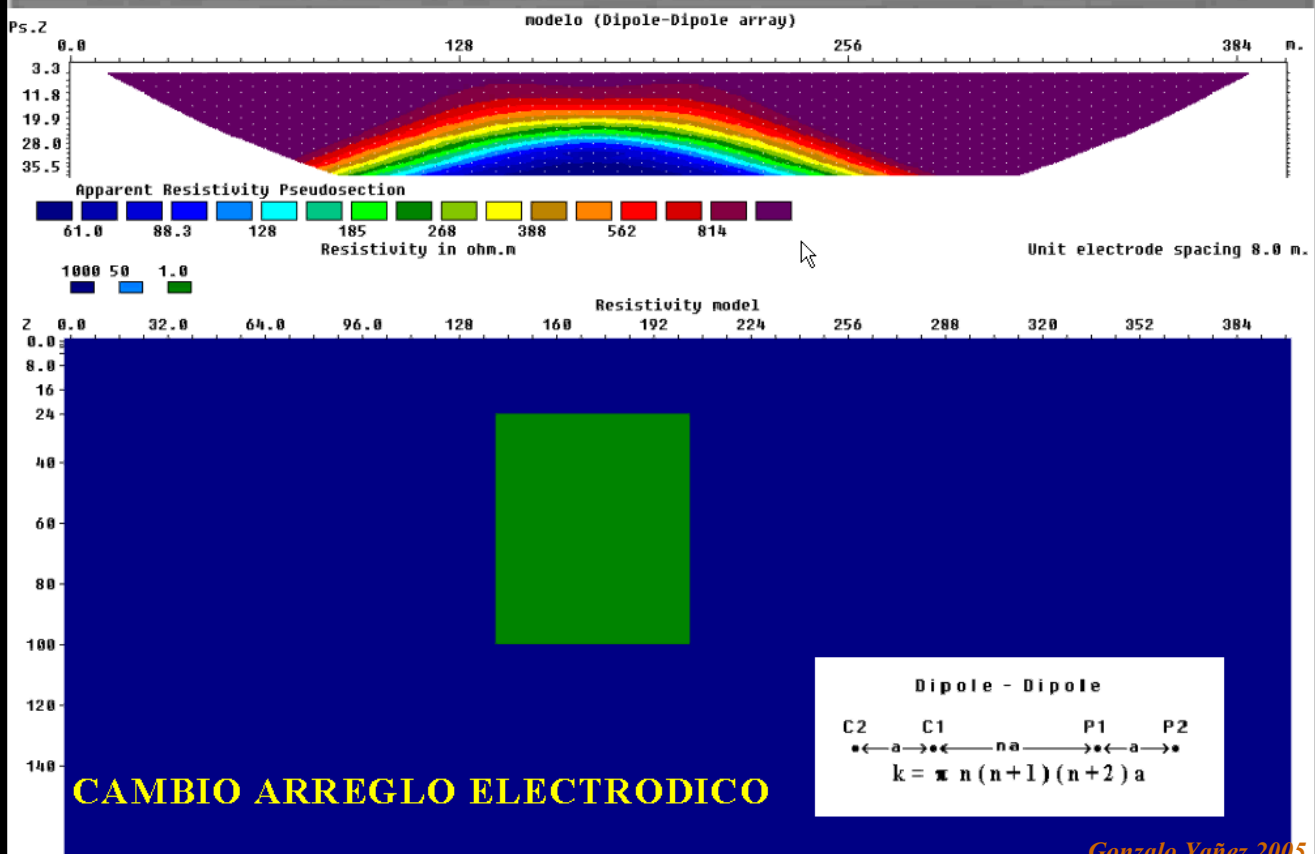
$$\left[ \frac{\partial \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right)}{\partial z} \right]_{(i,j)} = \frac{1}{2h} \left[ \sigma_{(i,j)} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{h} - \sigma_{(i-1,j)} \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{h} \right]$$



Gonzalo Yañez 2005

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS

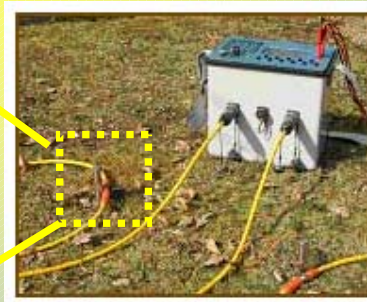
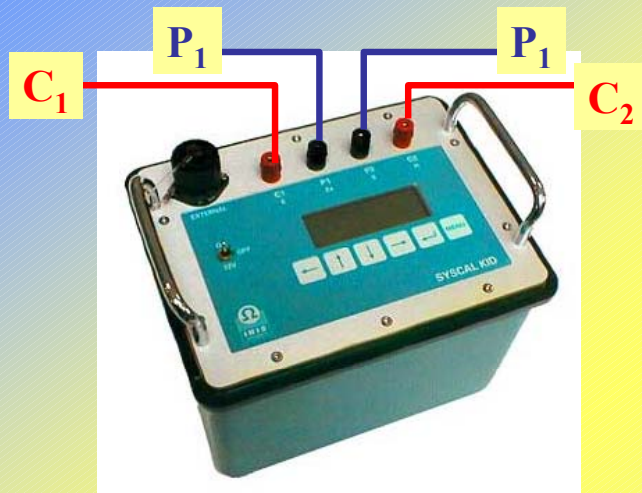
### MODELACION 2-D :



Gonzalo Yañez 2005

# PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

## INSTRUMENTACION



*Gonzalo Yañez 2005*

## PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

El método de polarización inducida ha sido ampliamente utilizado en exploración minera dada su capacidad de mapear las propiedades de polarización observadas en sulfuros diseminados.

El fenómeno de polarización inducida está íntimamente ligado a la presencia de soluciones acuosas en las cuales fluyen cargas eléctricas ante la presencia de un potencial eléctrico. En la conducción electrolítica se establece un equilibrio de cargas que demora un tiempo finito en producirse, el cual es inherente a la velocidad de transporte de los iones en un medio acuoso. Este tiempo de polarización o relajación (al eliminar la diferencia de potencial) es medible instrumentalmente. La constante de tiempo asociada a este proceso permite entonces inferir la presencia de cuerpos mineralizados.

Dos tipos de polarización han sido identificados:

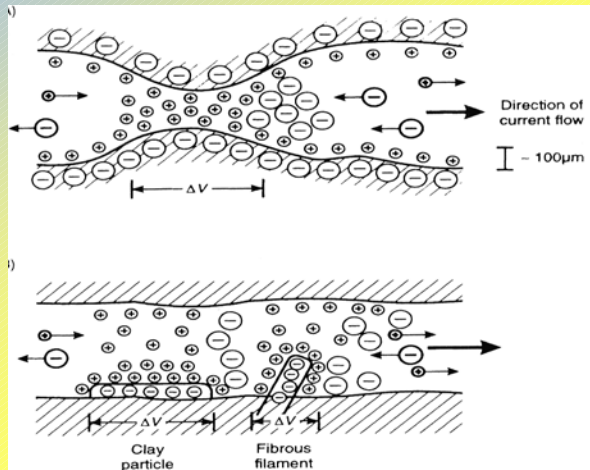
- Polarización de Membran
- Polarización Electrónica

*Gonzalo Yañez 2005*

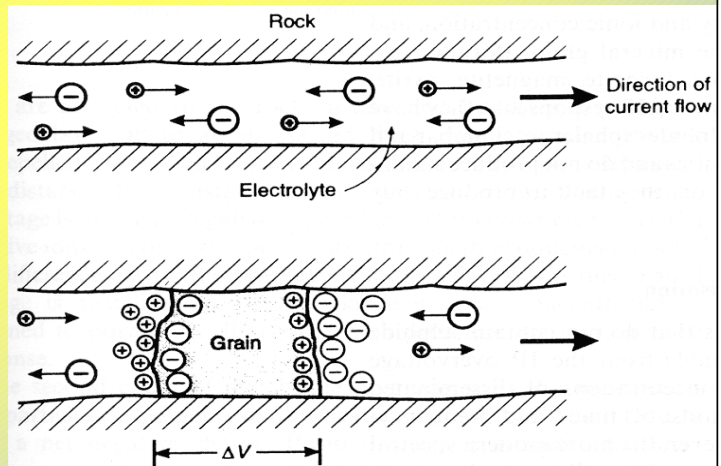
# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

En ambos casos el fenómeno puede esquematizarse en el flujo de iones en dirección opuesta al electrodo que presenta carga del mismo signo. Una vez establecido este flujo de iones la tortuosidad del medio acuoso induce la generación de barreras polarizadas con cargas de signo opuesto.

## POLARIZACION DE MEMBRANA



## POLARIZACION ELECTRODICA

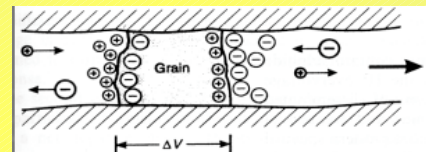
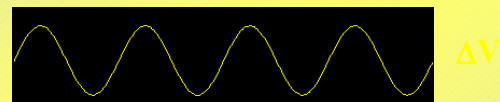


Gonzalo Yañez 2005

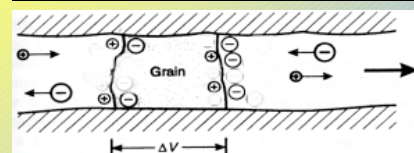
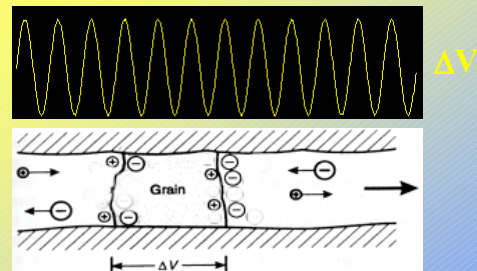
# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

## DEPENDENCIAS EXTERNAS:

- superficie de contacto  
(mayor en cuerpos diseminados)



- frecuencia de medición  
(a mayor frecuencia el efecto de polarización es menor: transporte inconcluso)



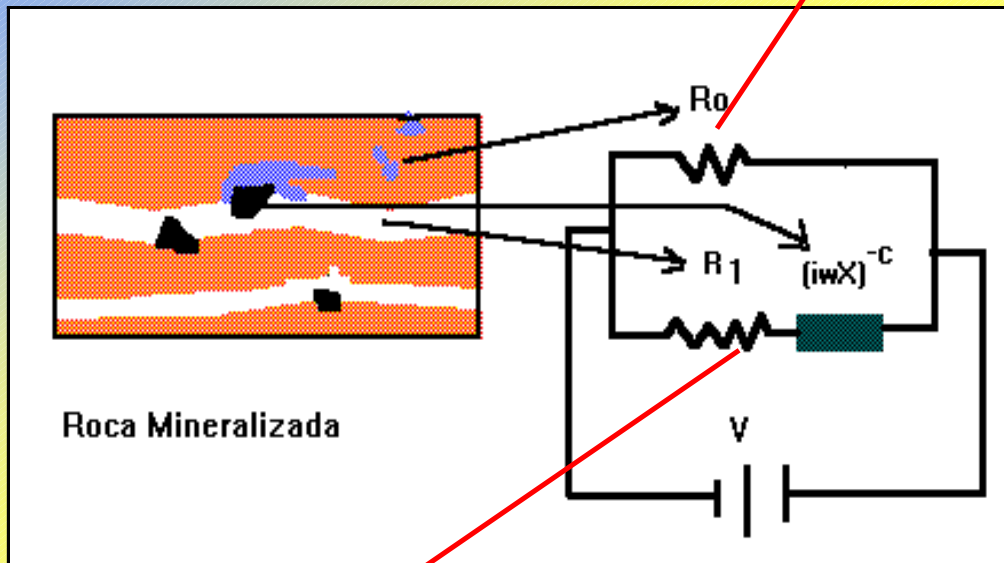
Gonzalo Yañez 2005



## PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

El fenómeno de polarización inducida puede esquematizarse en un circuito eléctrico paralelo:

Resistividad  $R_0$  (matriz rocosa)



arreglo en serie de resistividad  $R_1$  (resistividad de la solución acuosa para frecuencia cero) e impedancia  $(i\omega X)^{-c}$  (resistencia compleja asociada al fenómeno de polarización que depende de la frecuencia  $\omega$ )

Gonzalo Yañez 2005

## PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

La impedancia equivalente del circuito eléctrico es el reciproco de las impedancias (o resistencias) de cada rama del sistema paralelo:

$$Z(\omega) = \frac{R_0 [R_1 + (i\omega X)^{-c}]}{R_0 + R_1 + (i\omega X)^{-c}}$$

Que puede escribirse como:

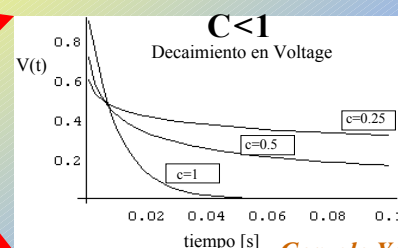
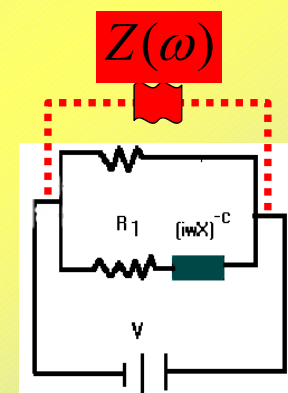
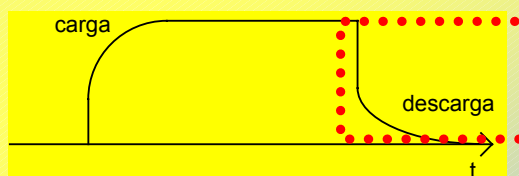
$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

$$\text{con: } m = \frac{R_0}{R_0 + R_1}; \quad \tau = X \left( \frac{R_0}{m} \right)^{1/c}$$

Considerando un factor  $c=1$ :

$$V(t)_{\text{descarga}} = I_o R_o - V(t)_{\text{carga}}$$

$$= I_o R_o m e^{-t/\tau} \quad \text{para } t \geq 0$$



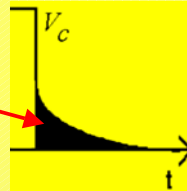
Gonzalo Yañez 2005



# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

## FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

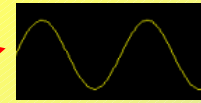
Dominio temporal (Cargabilidad (M)) :

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_c}$$


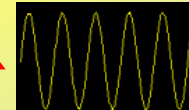
Dominio de las frecuencias (Efecto de frecuencia: FE):

$$FE = (\rho_{dc} - \rho_{ac}) / \rho_{ac}$$

$$= (\rho_{dc} / \rho_{ac}) - 1$$



~ 0.1 Hz



~10 Hz

MF (factor metalico):

$$MF = \frac{2\pi 10^5 FE}{\rho_{dc}}$$

Equivalencia:

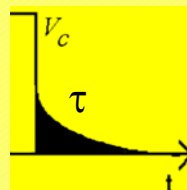
$$M \approx \frac{FE}{1+FE}$$

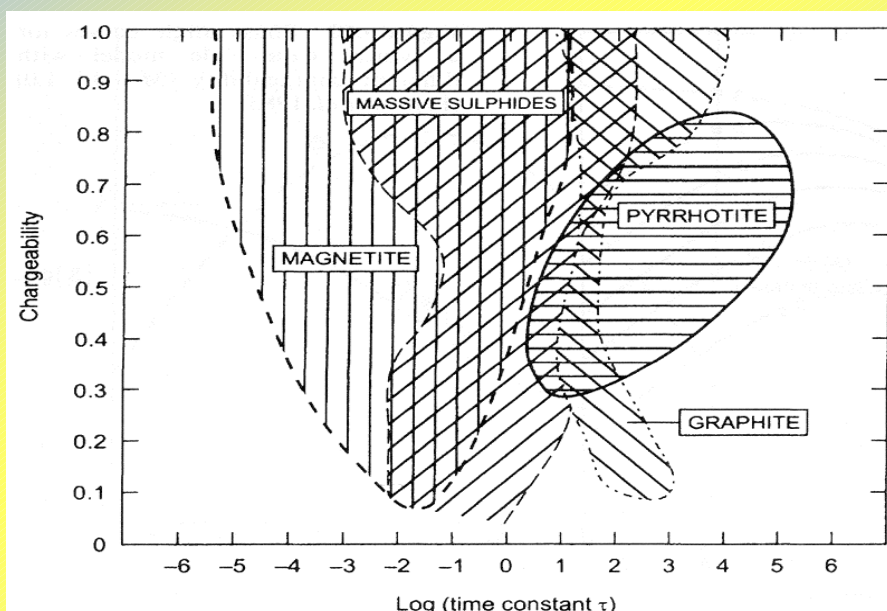
Gonzalo Yañez 2005

# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

## FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

Dominio temporal (Cargabilidad (M)) :

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_c}$$




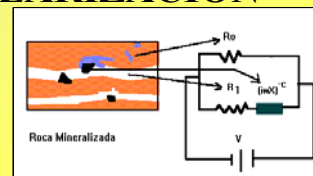
Gonzalo Yañez 2005

# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

## FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

### RESISTIVIDAD COMPLEJA:

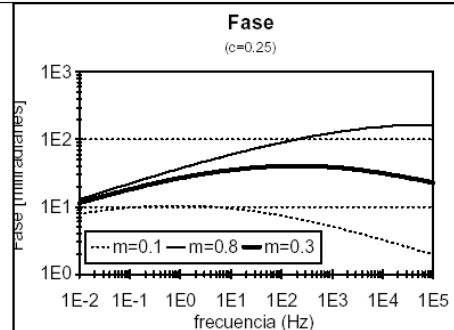
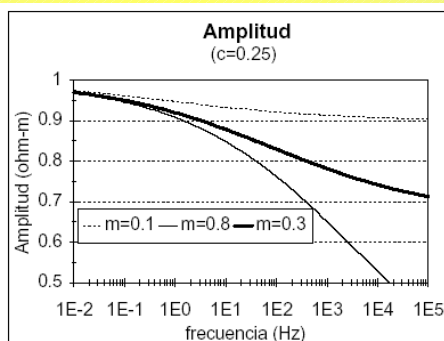
La impedancia del circuito equivalente:



Es una resistencia compleja que puede separarse en amplitud y fase, la anomalía de fase representa el efecto de polarización

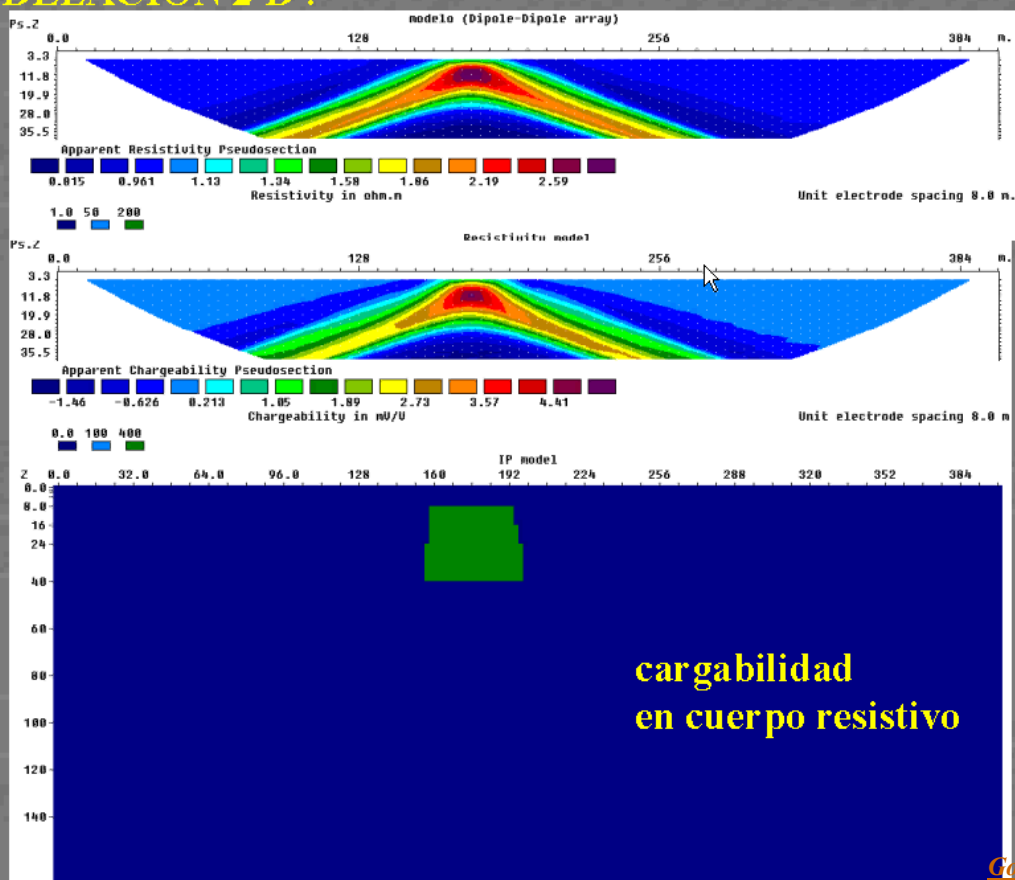
$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

con:  $m = \frac{R_0}{R_0 + R_1}$ ;  $\tau = X \left( \frac{R_0}{m} \right)^{1/c}$



Gonzalo Yañez 2005

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA MODELACION 2-D :



Gonzalo Yañez 2005

# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

## PROBLEMAS DE OPERACIÓN EN EL CAMPO

- INYECCION DE CORRIENTE:

**TERRENOS CON RESISTENCIA DE CONTACTO MUY ALTA (MEGA-OHM AMBIENTES DE CALICHE); POSIBLE SOLUCION:**

- HUMEDER ELECTRODOS DE CORRIENTE CON SOLUCIONES SALINAS
- CONECCION DE UN CONJUNTO DE ELECTRODOS DE CORRIENTE A UN TERMINAL
- ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNETICO:

**EN DOMINIO DE LA FRECUENCIA, EL EFECTO DE POLARIZACION SE ENMASCARA PARA SEPARACIONES ELECTRODICAS LARGAS Y ALTA FRECUENCIA: TRASLAPE CON INDUCCION MAGNETICA DE BAJA=>COPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO. PARA MINIMIZAR EFECTO:**

- SEPARAR LOS CABLES DE CORRIENTE Y POTENCIAL
- ELIMINACION ANALITICA: MEDIR FRECUENCIAS ALTAS PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO EN FRECUENCIA DEL ESPECTRO TOTAL

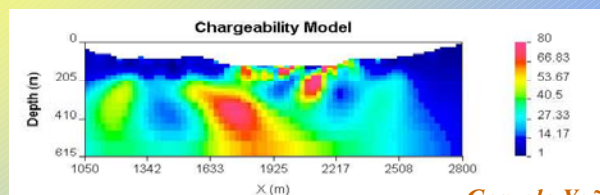
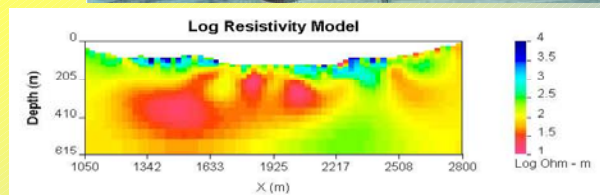
*Gonzalo Yañez 2005*

# PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACIÓN INDUCIDA

## INSTRUMENTACION:

### Sistema MIMDAS:

Resuelve los problemas de resolución del método IP-RES en ambientes de gran ruido cultural y con problemas de inyección de corriente (zonas caliche). Adicionalmente permite registrar a profundidades que duplica a los sistemas convencionales (500-700m).



*Gonzalo Yañez 2005*



## **METODO IP-RES: CONCLUSIONES**

- **Detección de propiedades eléctricas y polarización**
- **Perdida de resolución con la profundidad, penetraciones de 200-400m en sistemas tradicionales, 500-800m en sistemas de ultima generación**
- **Problemas de inyección de corriente en ambientes muy resistivos**
- **Modelamiento en imágenes de profundidad con programas de inversión de 2-D (interpretación cualitativa no es confiable)**
- **Costos de US\$ 800-1000/km en sistemas convencionales, en sistemas de ultima generación valores alcanzan mas de US\$ 2,000/km**

*Gonzalo Yañez 2005*

## **METODO MT: PRINCIPIOS**

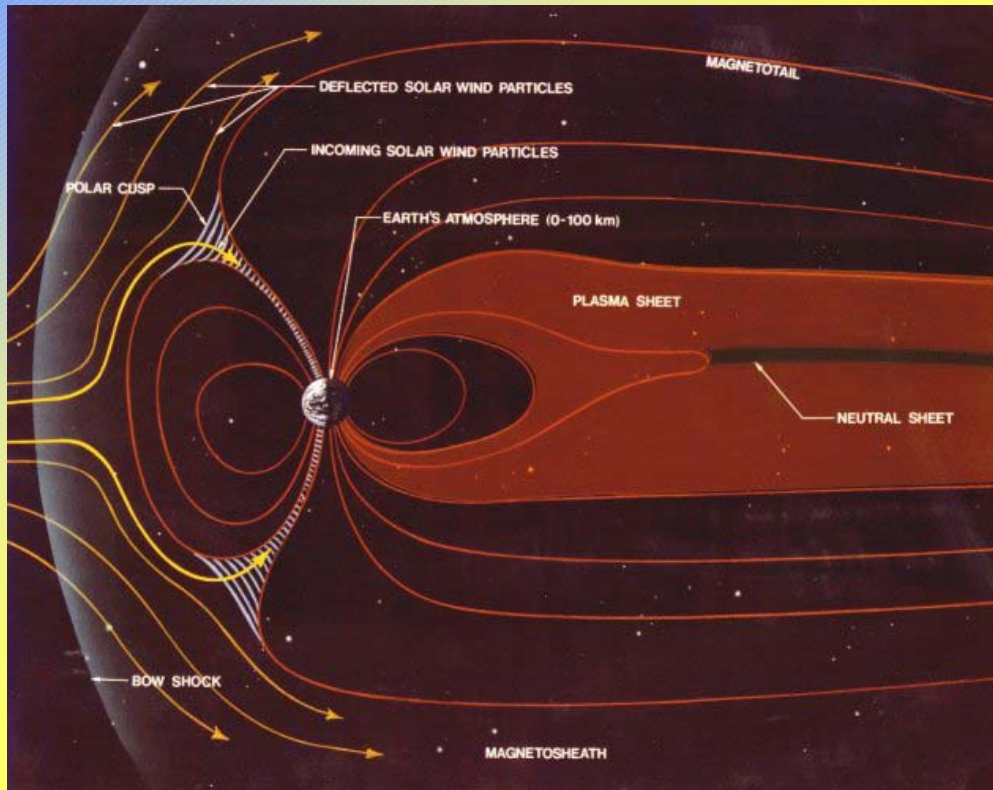
El método magnetotelúrico ha sido desarrollado independientemente por Cagniard (1953) y Tikhonov (1950). El método utiliza como fuente de poder el campo electromagnético generado en la ionosfera mediante la interacción del campo geomagnético y el viento solar.

*Gonzalo Yañez 2005*



# METODO MT: PRINCIPIOS

## INTERACCION DE IONOSFERA CON VIENTO SOLAR

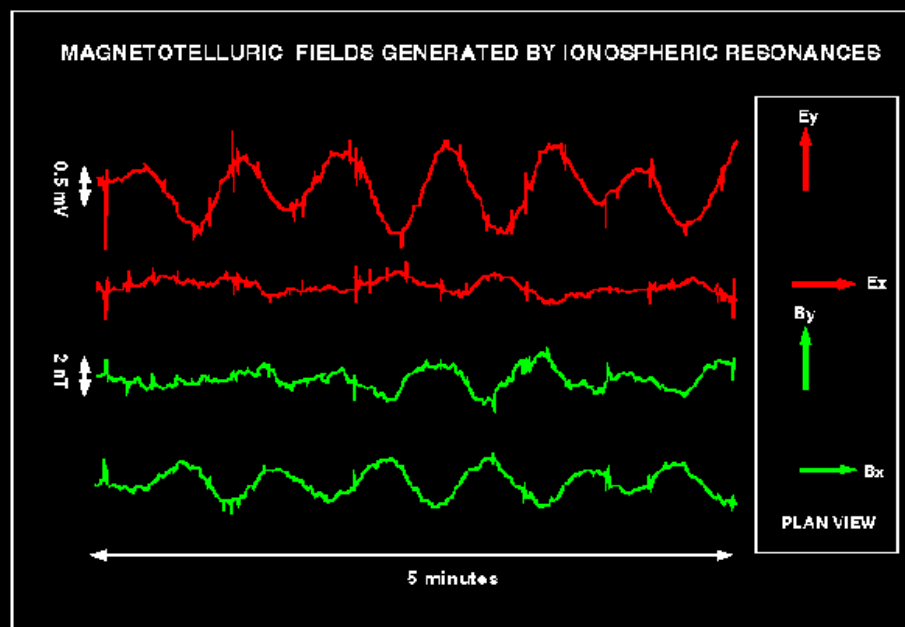


*Gonzalo Yañez 2005*

# METODO MT: PRINCIPIOS

## SEÑALES REGISTRADAS:

## CAMPO ELECTRICO Y MAGNETICO



*Gonzalo Yañez 2005*

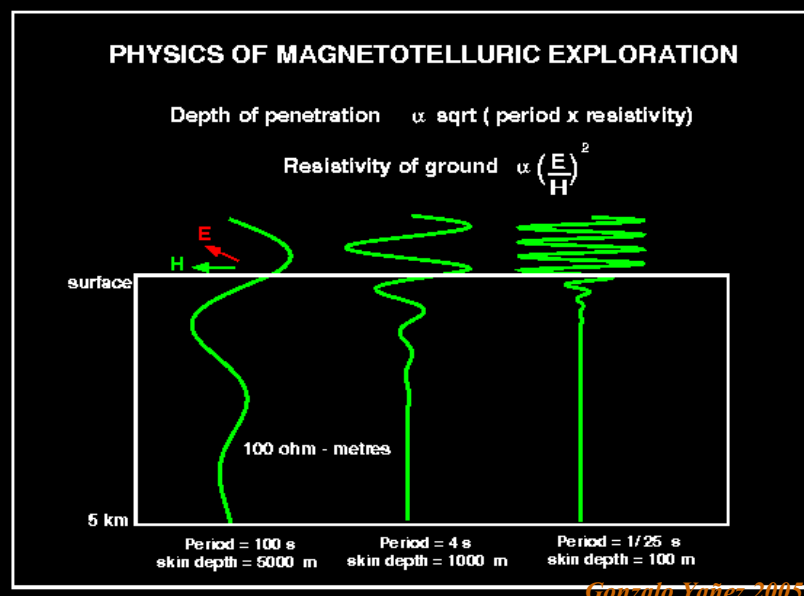
Una aproximación importante en el desarrollo conceptual de la metodología es el supuesto de una onda electromagnética incidente que se propaga en dirección vertical (polarización horizontal: onda plana). Bajo estas condiciones y el espectro de frecuencias utilizado (1000 Hz – 0.001 Hz), las ecuaciones de Maxwell se reducen a:

$$\nabla^2 \vec{E} - i\sigma\mu\omega\vec{E} = 0$$
$$\nabla^2 \vec{H} - i\sigma\mu\omega\vec{H} = 0$$

*Gonzalo Yañez 2005*

### ATENUACION DE SEÑAL

Las ondas de campo eléctrico y magnético son dispersivas: pierden amplitud con la profundidad. La atenuación es mayor para altas frecuencias y en medios conductores



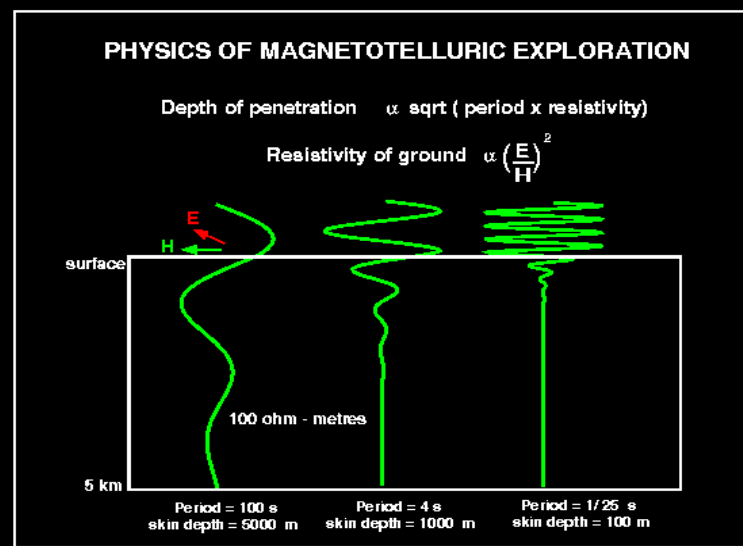
## METODO MT: PRINCIPIOS

### ATENUACION DE SEÑAL:

### DEPENDEN DE RESISTIVIDAD Y FRECUENCIA

$$\delta = 500 \sqrt{\rho [\text{ohm-m}] / f [\text{Hz}]} [\text{m}]$$

$\equiv$  "skin depth"



*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO MT: PRINCIPIOS

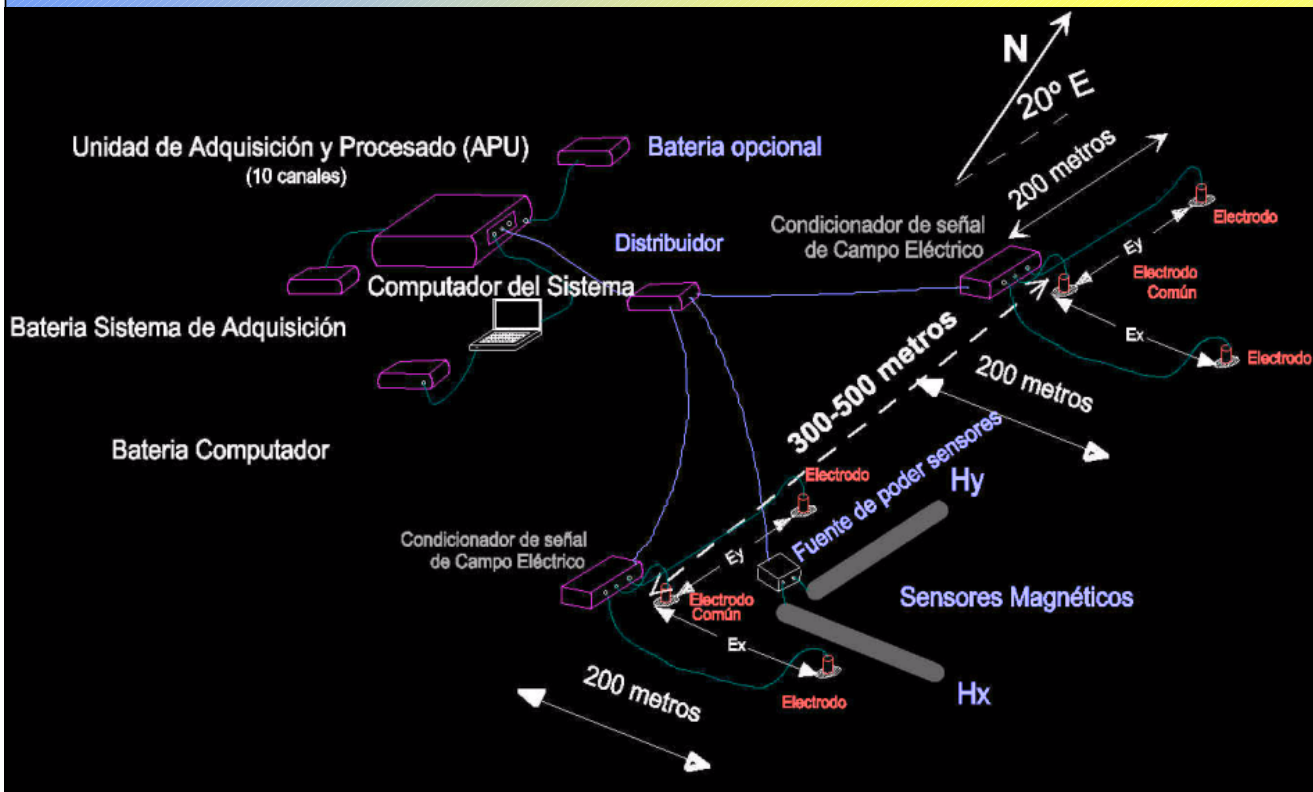
LA ONDA ELECTROMAGNETICA ESTA POLARIZADA EN UNA DIRECCION ARBITRARIA, EN CONSECUENCIA LA RELACION ENTRE EL CAMPO ELECTRICO Y MAGNETICO ES TENSORIAL

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y \\ E_y &= Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y \end{aligned} ;$$
$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} ;$$
$$\vec{E}(\omega) = Z(\omega) \vec{H}(\omega)$$

*Gonzalo Yañez 2005*

# METODO MT: PRINCIPIOS

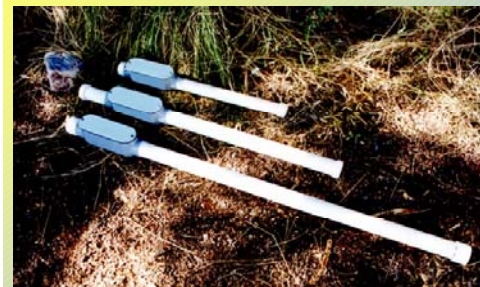
## DISPOSITIVO DE TERRENO



Gonzalo Yañez 2005

# METODO MT: PRINCIPIOS

## EQUIPOS

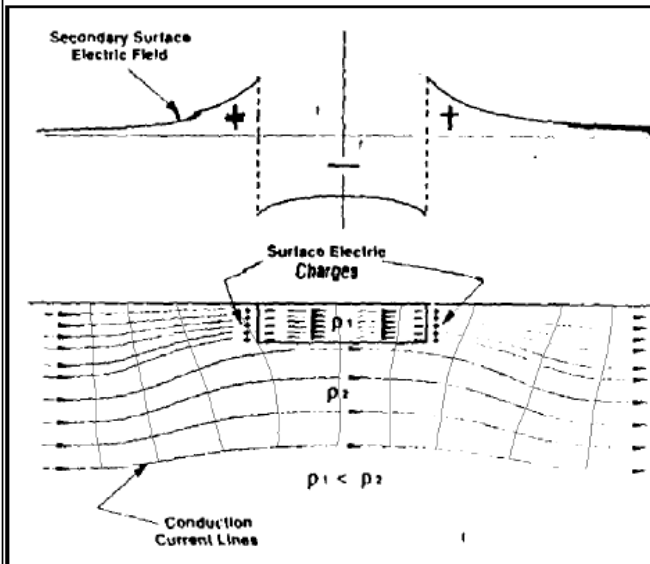


Gonzalo Yañez 2005

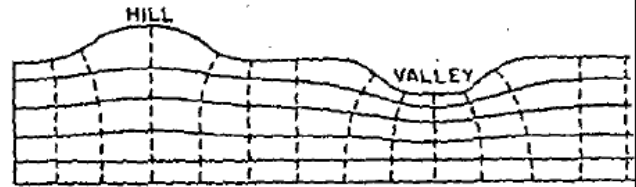


# METODO MT: PRINCIPIOS

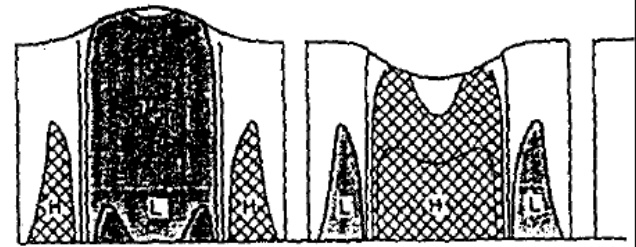
## PROBLEMAS DE ESTATICA



a) Schematic Current Flow Patterns



b) TM Mode Pseudosections

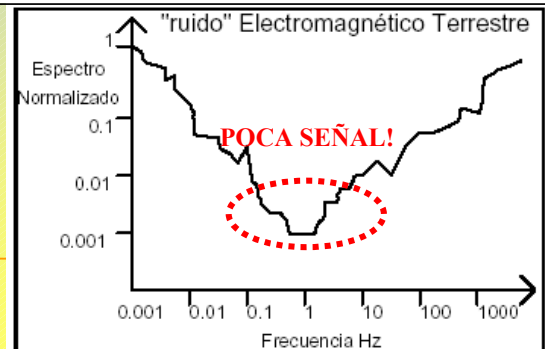


Gonzalo Yañez 2005

## METODO MT: ADQUISICION DE DATOS

## ESPECTRO DE MEDICION

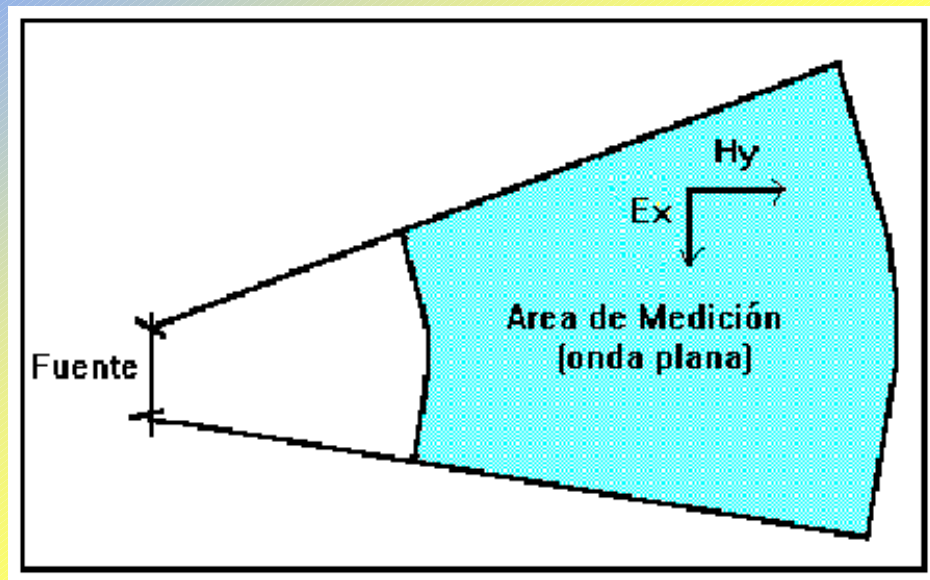
Banda	Ancho de banda (Hz)	Muestreo [1/seg]
1	0.0049-0.1724	0.5 (diezmación de banda 2)
2	0.6895-0.0195	2
3	0.3027-10.6895	30
4	4.88-172.3	500
6	85-5800	Detección sincrónica



Gonzalo Yañez 2005

# METODO MT: PRINCIPIOS

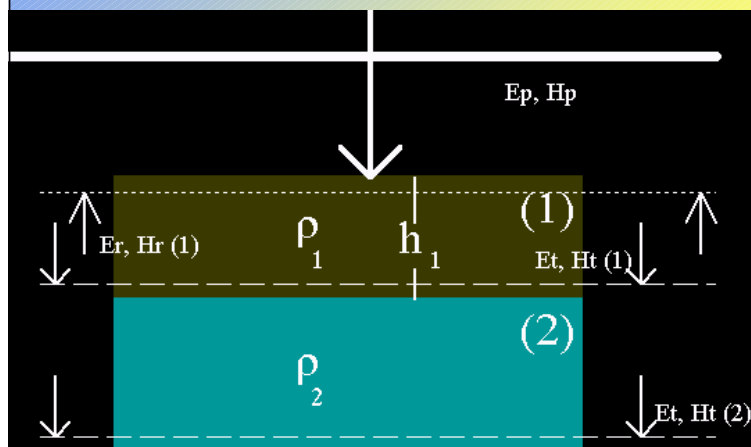
## METODO MT CON FUENTE CONTROLADA (CSAMT)



Gonzalo Yañez 2005

## PROPAGACION DE ONDA EN MEDIO ESTRATIFICADO

### Sistema de una capa y un semi-espacio



$$Z(\omega, z=0) = \frac{E_x(\omega, z=0)}{H_y(\omega, z=0)} \equiv \text{IMPEDANCIA}$$

$$Z(\omega, z=0) = -Z_1 \frac{[R_{12}e^{-2k_1h_1} + 1]}{[R_{12}e^{-2k_1h_1} - 1]}$$

$$Z_1 = -\sqrt{i\omega\mu / \sigma_1} = -(1+i)\sqrt{\omega\mu / 2\sigma_1}$$

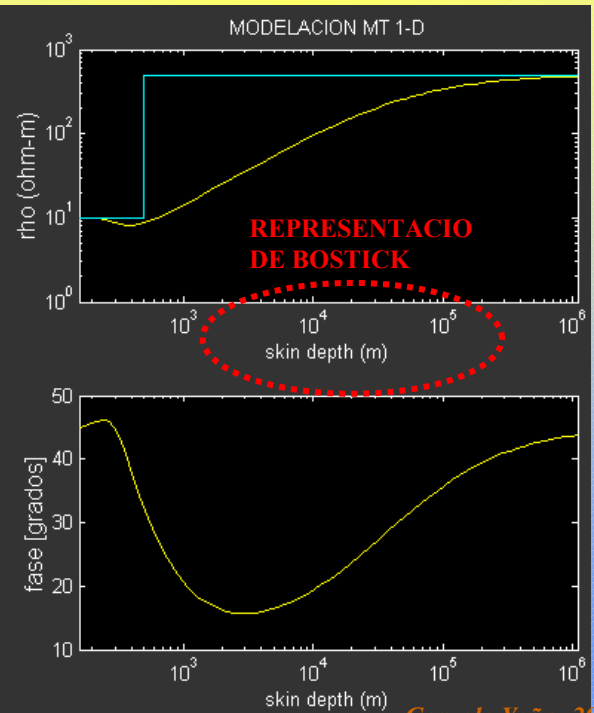
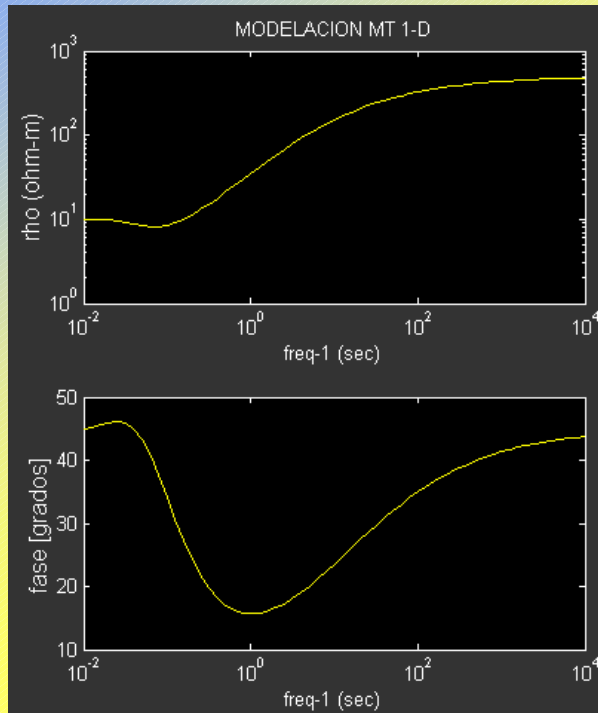
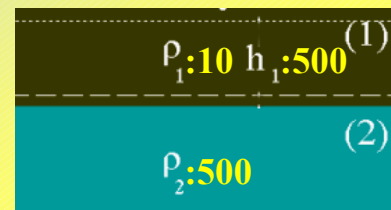
$$R_{12} = \left[ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right] = \left[ \frac{\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1}} \right]$$

$$k = \sqrt{(i\omega\mu\sigma)} = (1+i) \sqrt{(i\omega\mu\sigma)/2}$$

Gonzalo Yañez 2005

## METODO MT: TEORIA BASICA

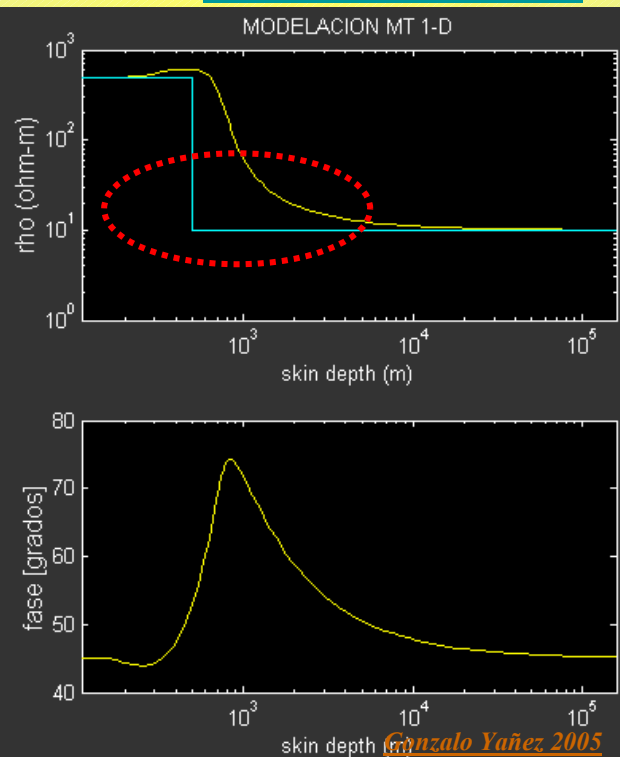
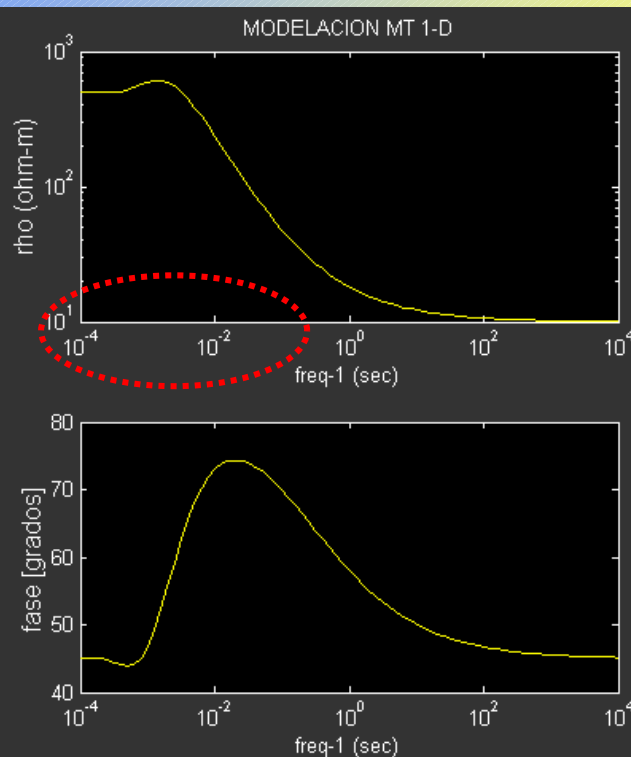
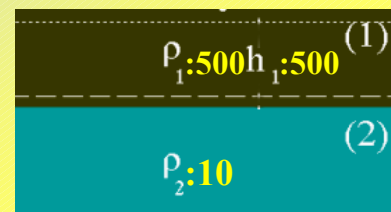
### Sistema de una capa y un semi-espacio



Gonzalo Yañez 2005

## METODO MT: TEORIA BASICA

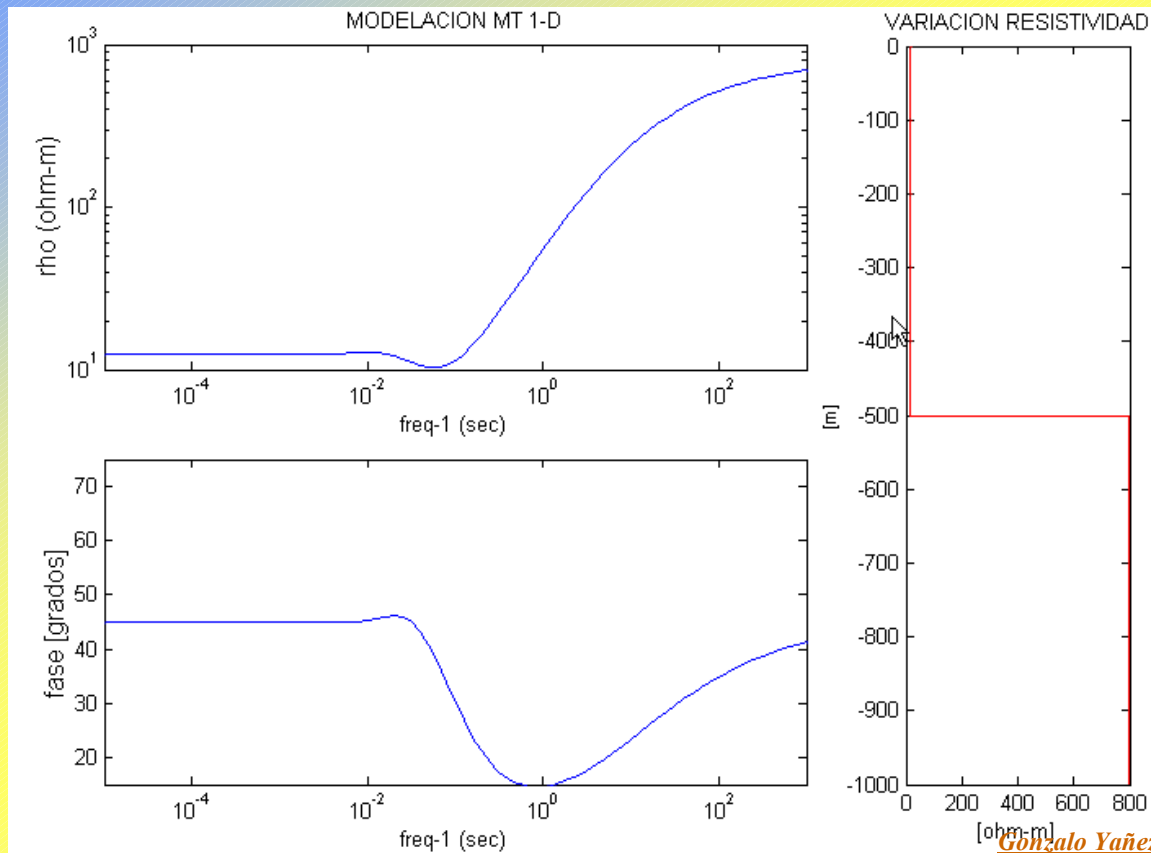
### Sistema de una capa y un semi-espacio



Gonzalo Yañez 2005

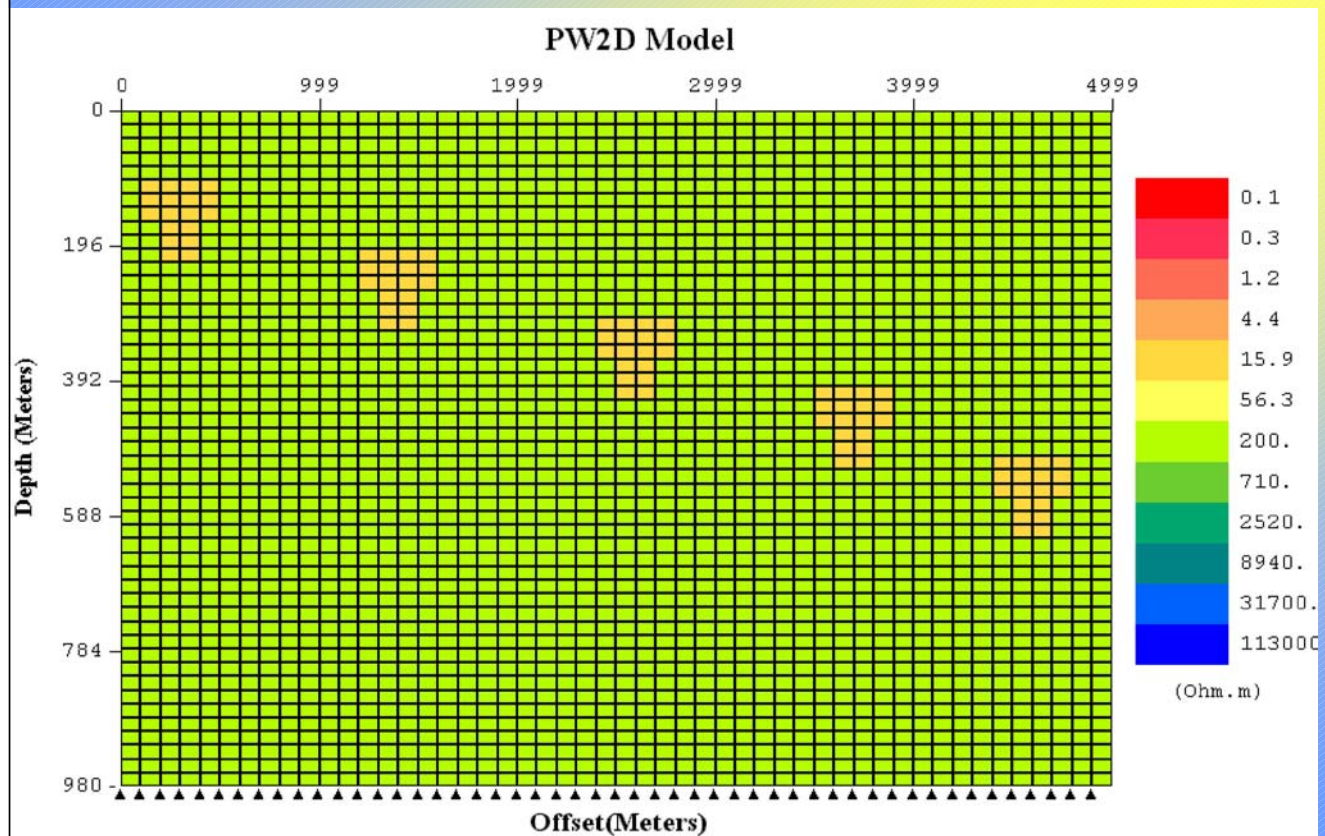
# METODO MT: PRINCIPIOS

## Animación: Sistema de una capa y un semi-espacio



# METODO MT: PRINCIPIOS

## CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD

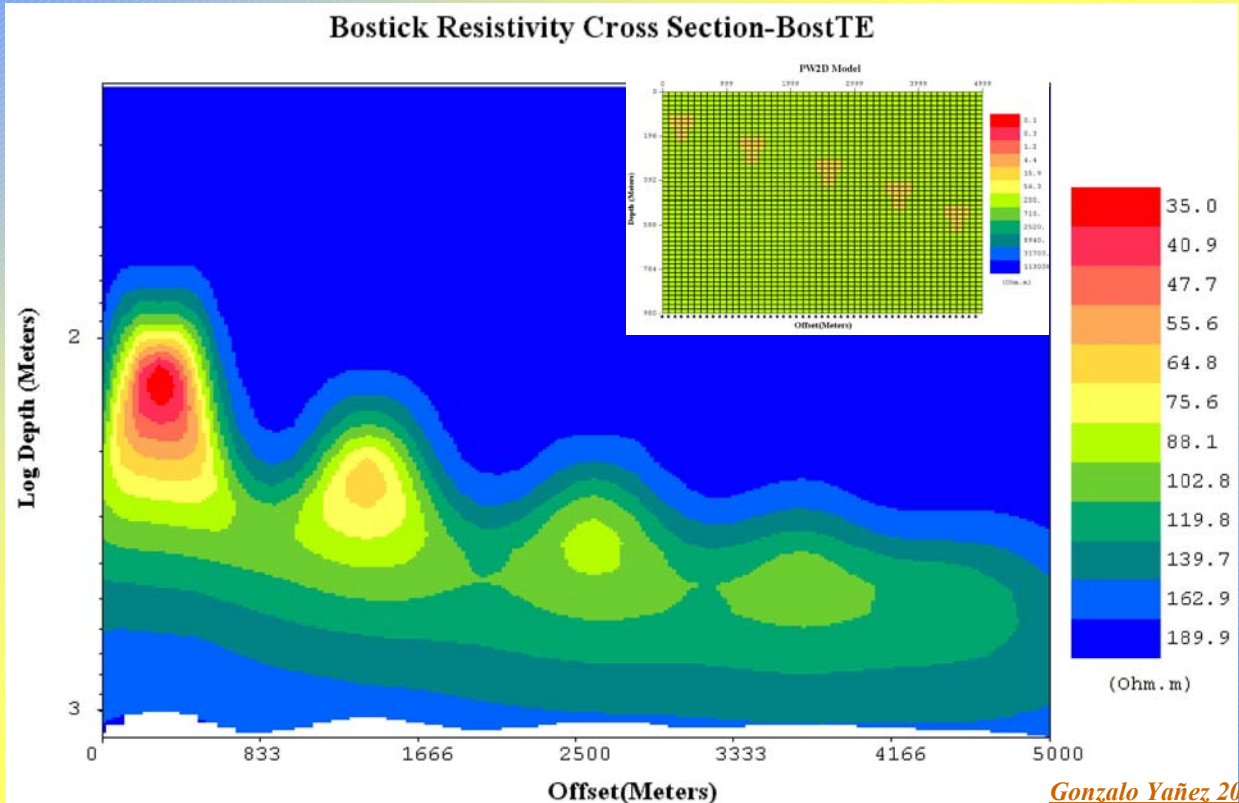




# METODO MT: PRINCIPIOS

## CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD

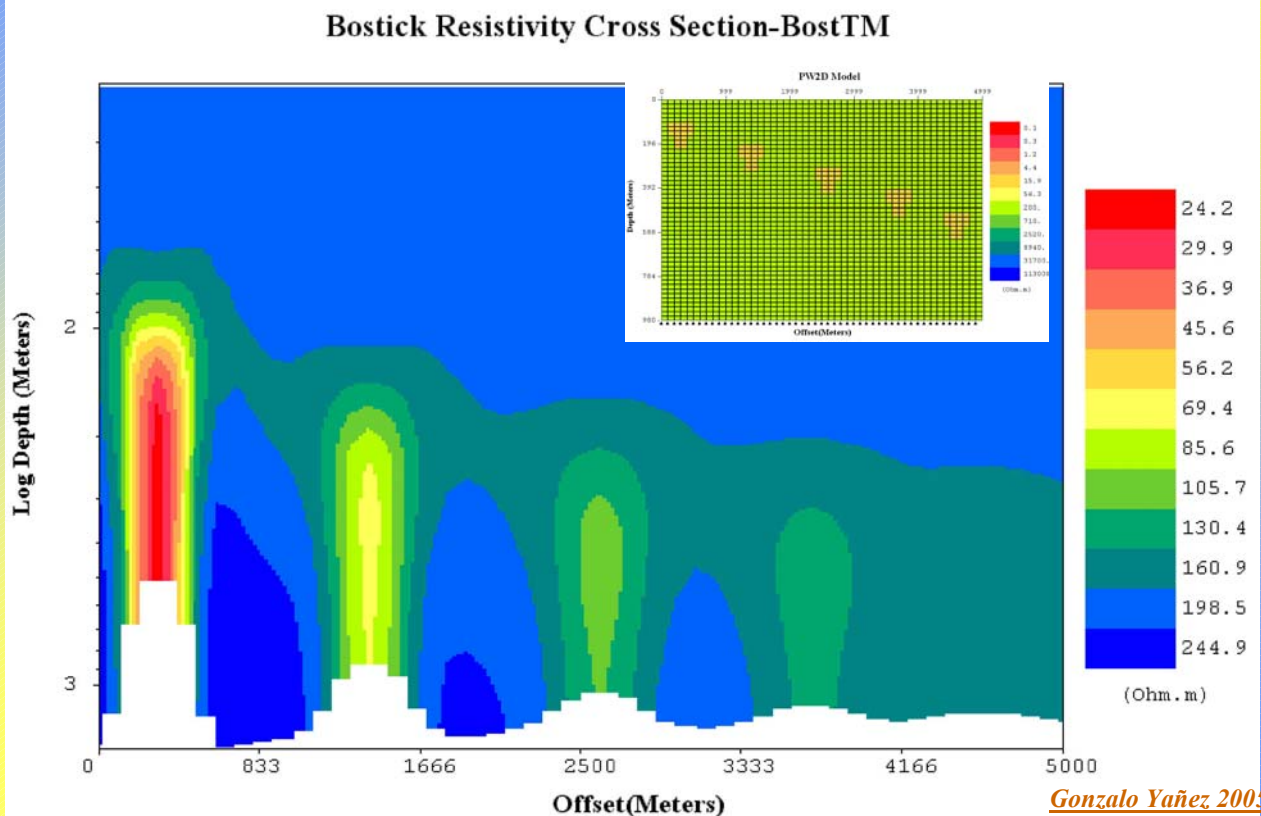
### REPRESENTACION DE BOSTICK TE ( $E_x/H_y$ )



# METODO MT: PRINCIPIOS

## CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD

### REPRESENTACION DE BOSTICK TM ( $E_y/H_x$ )



# **METODO MT: PRINCIPIOS**

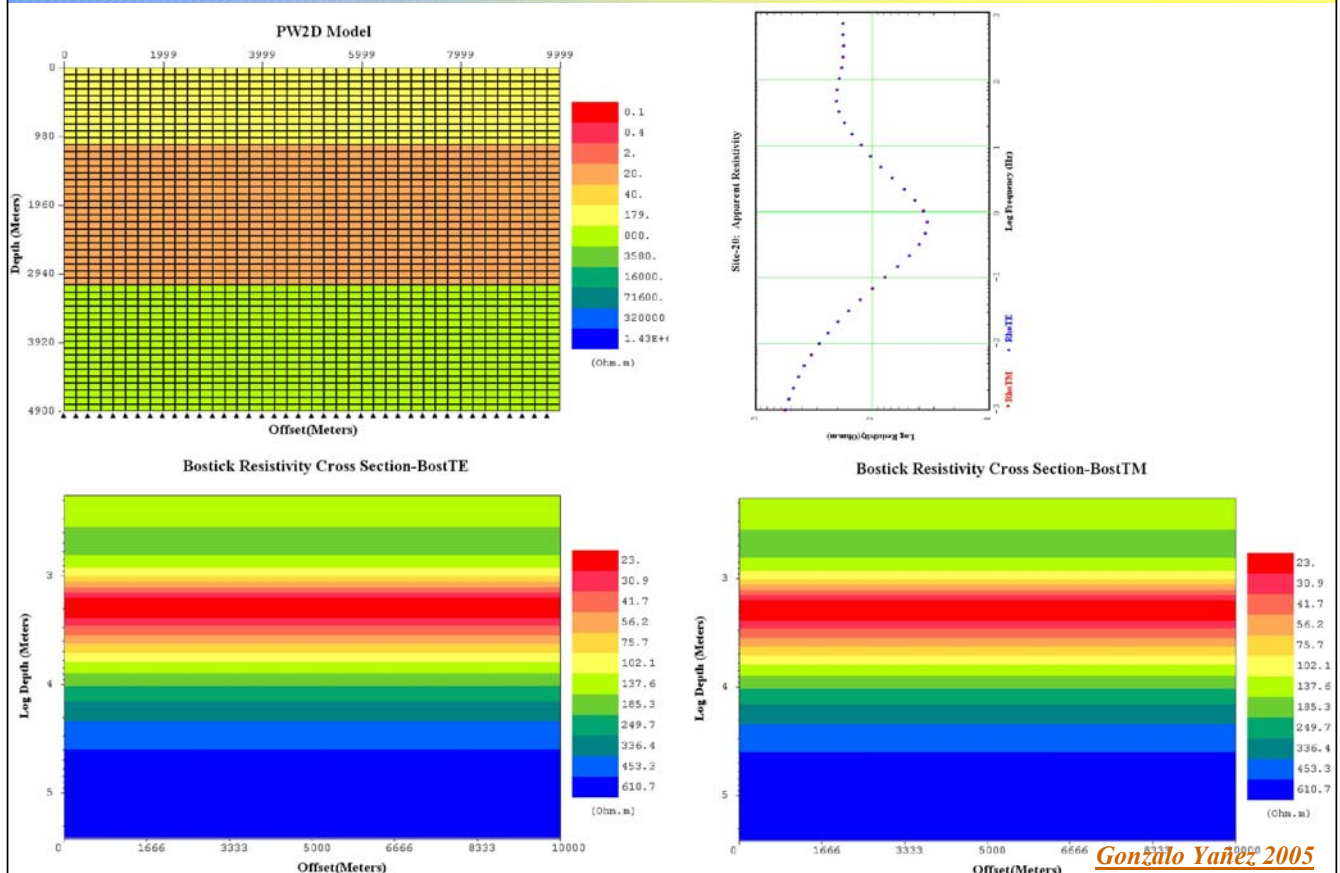
## **CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD**

- **A MEDIDA QUE AUMENTA LA PROFUNDIDAD DEL CUERPO SU DETECCIÓN ES MAS DIFUSA.**
- **EL MODO TE PERMITE UNA MEJOR DEFINICIÓN DE CONTACTOS HORIZONTALES**
- **EL MODO TM RESUELVE MEJOR CONTACTOS VERTICALES**

*Gonzalo Yañez 2005*

# **METODO MT: PRINCIPIOS**

## **MEDIO ESTRATIFICADO: TE Y TM IDENTICOS**

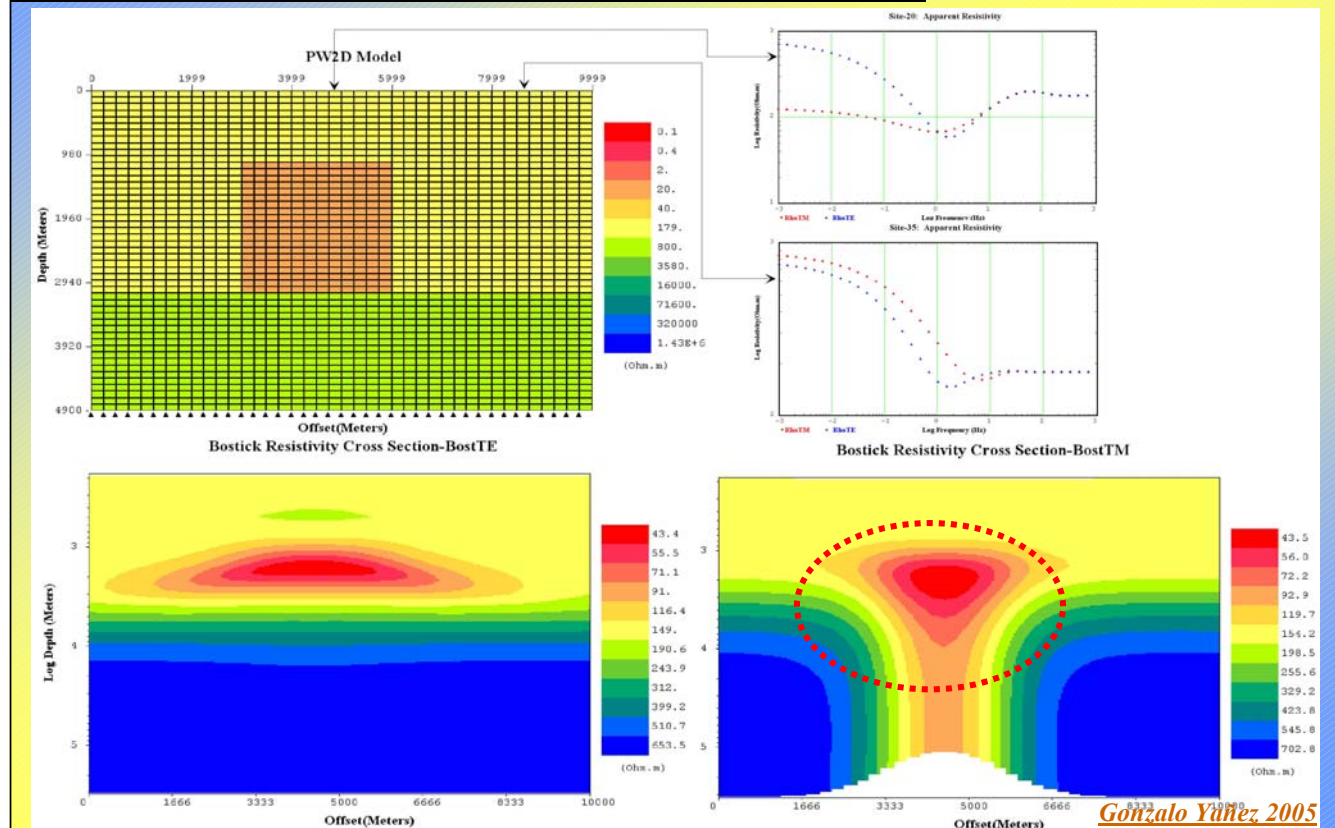




# METODO MT: PRINCIPIOS

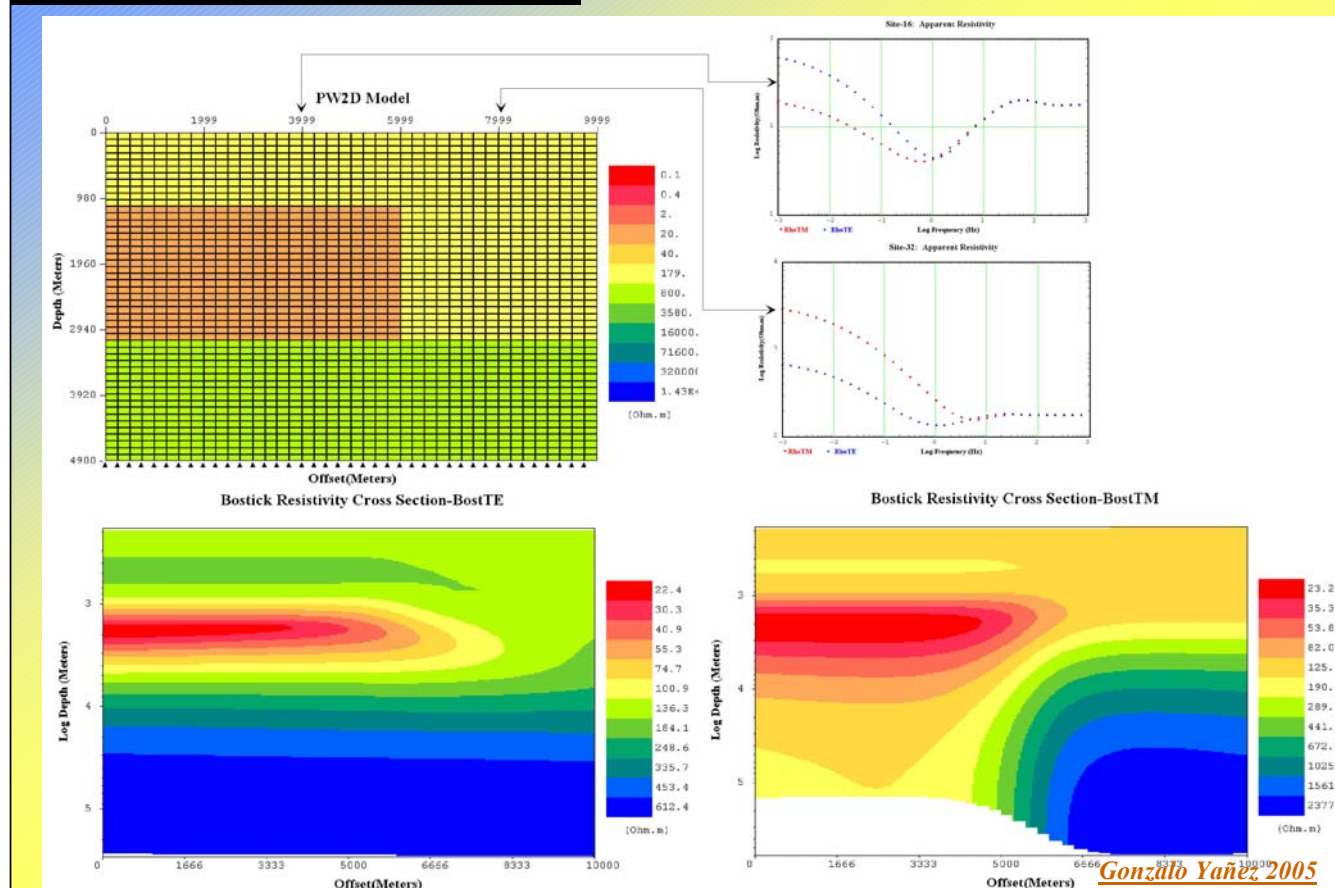
## CONDUCTOR EN MEDIO ESTRATIFICADO:

### TM MARCA CONTACTOS VERTICALES



# METODO MT: PRINCIPIOS

## CONTACTOS VERTICAL



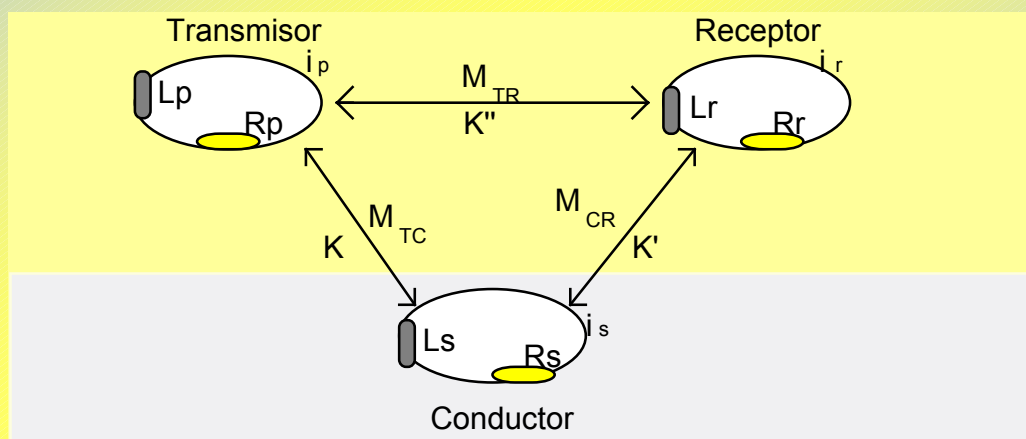
# METODO MAGNETOTELURICO: CONCLUSIONES

- Detección de propiedades eléctricas
- Pérdida de resolución con la profundidad (frecuencia)
- Uso de fuente natural que permite gran penetración de detección (varios km)
- Mapeo de tipo regional y detalle (dependiendo de la separación dipolar)
- Modelamiento en imágenes de profundidad con programas de inversión de 2 y 3-D (interpretación cualitativa no es confiable)
- Costos de US\$ 500-1000/km en sistemas convencionales, en sistemas de última generación valores alcanzan mas de US\$ 2,000/km

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

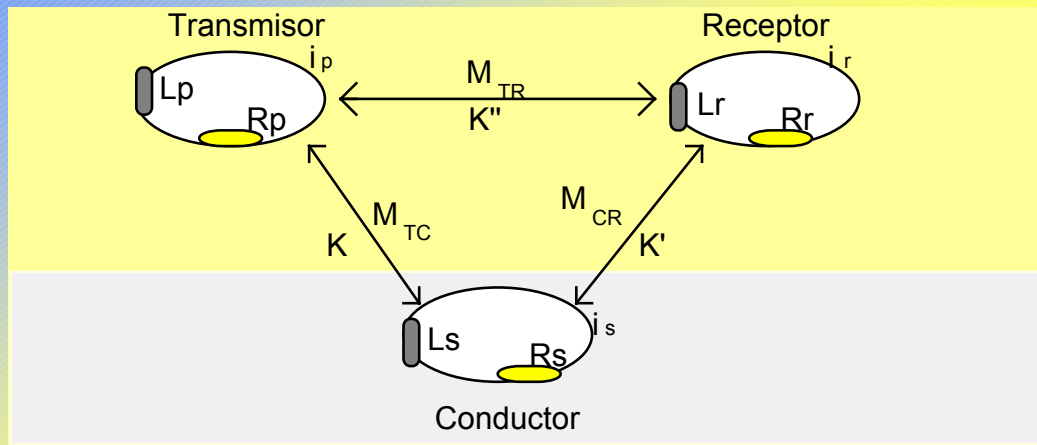
En los métodos electromagnéticos con fuente artificial se produce la interacción entre un campo electromagnético generado en la fuente (campo primario), la inducción electromagnética en un cuerpo conductor de subsuperficie (campo secundario), y la recepción de ambos campos en el receptor. Esta configuración se describe esquemáticamente en términos de un arreglo de bobinas que representan la configuración transmisor-conductor-receptor.



*Gonzalo Yañez 2005*



## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS



- Rp, Rr, y Rs son las resistencias del transmisor, receptor, y conductor respectivamente.
- Lp, Lr, y Ls son las respectivas inductancias.
- MTR, MCR, y MTC son las inductancias mutuas entre transmisor-receptor, receptor-conductor, y transmisor-conductor, respectivamente.
- Para cada uno de estas inductancias mutuas se define además un factor geométrico K'', K', K, que da cuenta de la geometría relativa entre cada bobina.

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### Definición inductancia mutua

#### Inductancia Mútua

La inductancia mútua  $M_{12}$  entre 2 circuitos, 1 y 2, es definido como el flujo total:  $\phi_{12}$ , a través del circuito 1 producido por una corriente unitaria en circuito 2:

$$M_{12} = \frac{\phi_{12}}{i_2} = \frac{\int_{s_1} B_2 \cdot ds_1}{i_2} = \frac{\int_{s_1} \nabla \times A_2 \cdot ds_1}{i_2} = \oint_{c_1} \frac{A_2 \cdot d\ell_1}{i_2}$$

De acuerdo a ecuación (93), el potencial vectorial  $A_2$  puede ser expresado como:

$$A_2 = \frac{\mu i_2}{4\pi} \oint \frac{d\ell_2}{r},$$

y en consecuencia la inductancia mútua  $M_{12}$  se define finalmente como:

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{d\ell_1 \cdot d\ell_2}{r} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{\cos\theta \, d\ell_1 d\ell_2}{r}$$

geometría	representación	$M_{12}$
círculos coaxiales		$\frac{0.2 \pi^2 a^2 b^2}{s^3} \approx \frac{2 a^2 b^2}{s^3}$
círculos coplanares		$-\frac{0.1 \pi^2 a^2 b^2}{s^3} \approx -\frac{a^2 b^2}{s^3}$

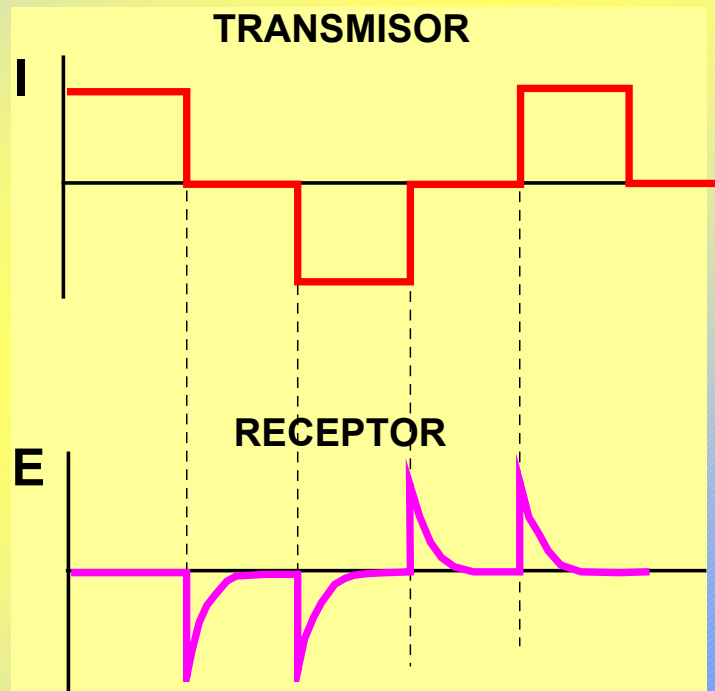
*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### INTERACCION PRIMARIO-SECUNDARIO

En el método TEM se observa la respuesta del medio en estudio una vez que el campo primario se interrumpe abruptamente.

De tal forma que la señal en el receptor corresponde exclusivamente a la respuesta transiente del medio ante la excitación de una señal electromagnética previa.



*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### INTERACCION PRIMARIO-CONDUCTOR TERRESTRE

La fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en la bobina conductora en función de la corriente alterna que circula en la bobina primaria es:

$$e_s = -i\omega M_{TC}i_p$$

Esta f.e.m. inducida en la bobina conductora puede expresarse también en términos de la impedancia y la corriente  $i_s$  que se induce en el cuerpo

$$e_s = -i\omega M_{TC}i_p = -i_s(r_s + i\omega L_s)$$
$$\Rightarrow i_s(\omega) = \frac{i\omega M_{TC}i_p}{(r_s + i\omega L_s)}$$

*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### INTERACCION CONDUCTOR TERRESTRE-SECUNDARIO

Esta corriente  $i_s(s=i\omega)$  puede ser transformada al dominio temporal  $i_s(t)$  utilizando la antitransformada de Laplace:

$$i_s(t) = T.LP.^{-1} \left[ \frac{i\omega M_{TC} i_P}{(r_s + i\omega L_s)} \right] = \frac{-M_{TC} i_o e^{-t/\tau}}{L_s}$$

con  $\tau = L / R \equiv \text{constante de decaimiento}$

En consecuencia, en la bobina receptora (secundario) la f.e.m. inducida es:

$$E^{\text{sec}}(t) = M_{CR} \frac{d i_s}{d t} = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$

Gonzalo Yañez 2005

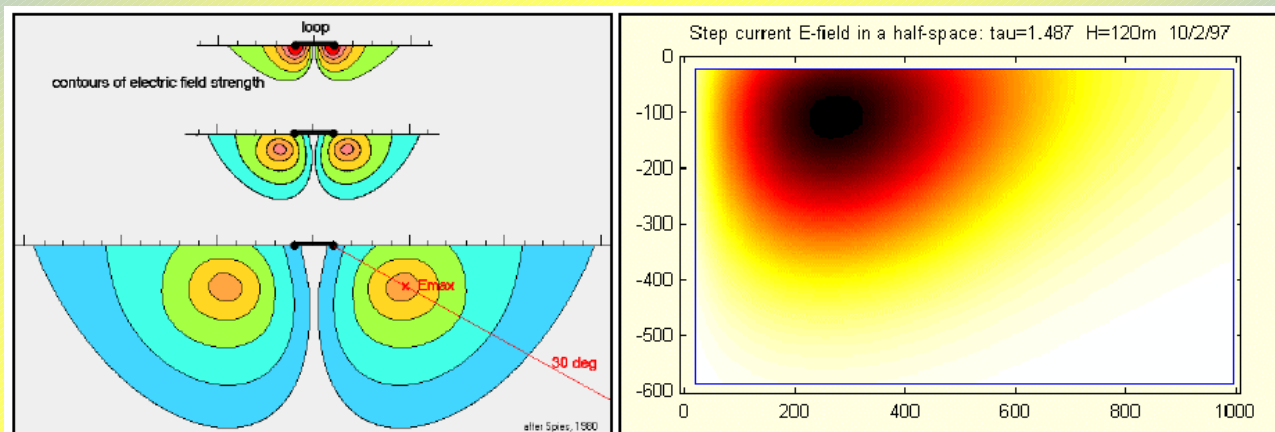
## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### EVOLUCION TEMPORAL DE TRANSIENTE ELECTRICO

A medida que avanza el tiempo el campo electrico se difunde en el medio conductor y decayendo en intensidad

$$E^{\text{sec}}(t) = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = L / R$$



Gonzalo Yañez 2005

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### INTERACCION CONDUCTOR TERRESTRE-SECUNDARIO: SISTEMA DE CAPAS

La impedancia mutua  $Z(t)=V(t)/I$  (voltaje transiente ( $V(t)$ ) dividido por la corriente aplicada ( $I$ )) en un sistema de  $N$  capas horizontales excitado por una bobina circular de radio  $a$  (que a su vez se utiliza de receptor), esta dado por:

$$Z(t) = \pi \mu a \int_0^{\infty} L^{-1} [A_o(h_i, \rho_i, \lambda)] J_1(\lambda a)^2 d\lambda$$

$J_1$  : Funcion de Bessel orden 1

$L^{-1}$  : Transformada inversa de Laplace

En este caso la complejidad numérica requiere de algoritmos complejos y gran capacidad computacional para su evaluación.

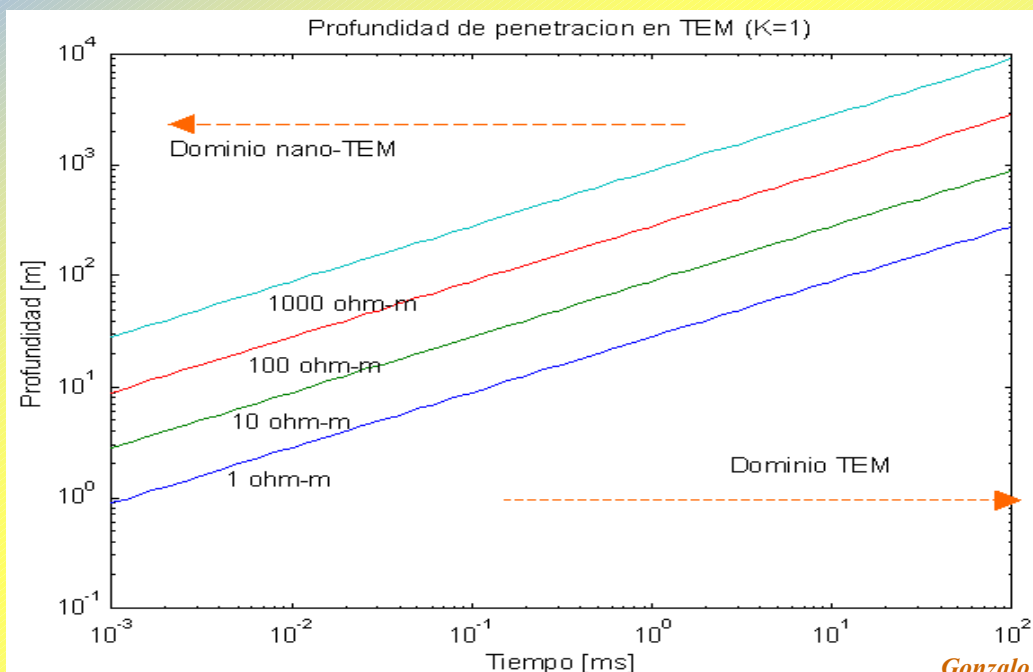
*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

### RESPUESTA TEM GENERAL:

- La profundidad de penetración en el método TEM es:  $H_{\text{penetracion}} = \sqrt{k \frac{t}{\mu \sigma}}$

$k$  depende de la configuración de la fuente (entre 0.35 y 5)



*Gonzalo Yañez 2005*



## METODO TEM: SISTEMAS DE MEDICION

El sistema TEM en sus diferentes modalidades utiliza los siguientes tipos de transmisores y receptores:

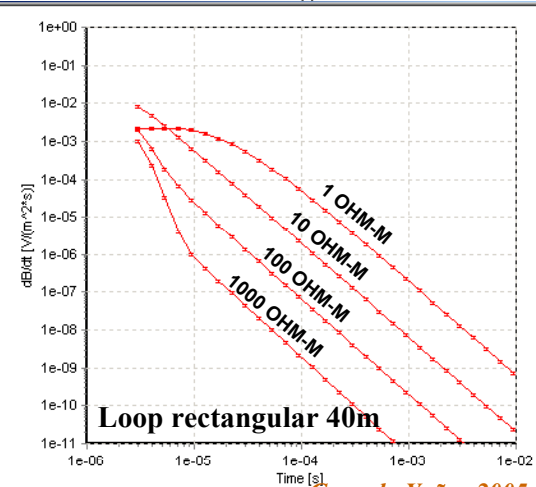
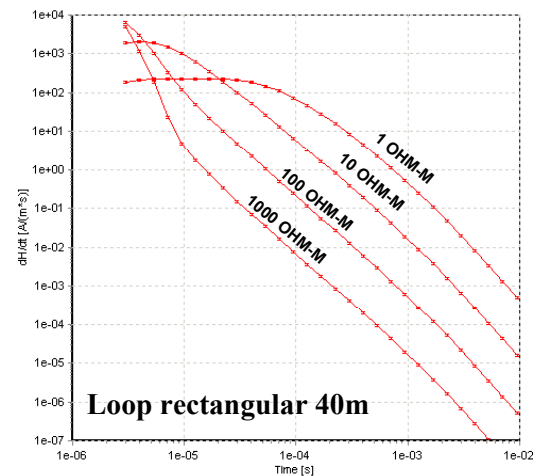
**Transmisor:**

- loops electricos (circulares o rectangulares)
- campos magnéticos (bobinas)

**Receptor:**

- bobinas [ $dH/dt$  : A/(m's)]
- campos electrico [ $dB/dt$ : V/(m<sup>2</sup>s)]

Si bien las unidades cambian el fenómeno físico de disipación del campo electrico es el mismo.



Gonzalo Yañez 2005

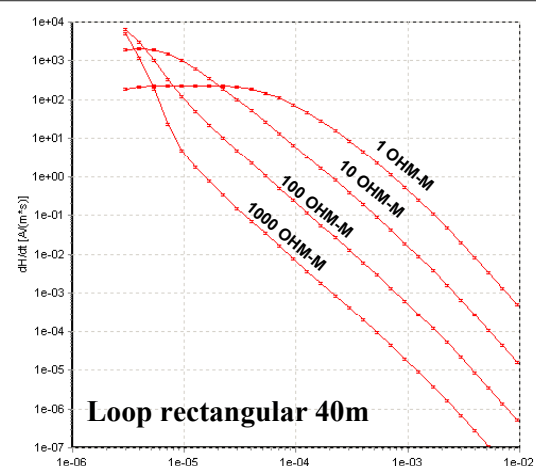
## METODO TEM: SISTEMAS DE MEDICION

La amplitud del potencial eléctrico medido es directamente proporcional a la resistividad del conductor, pero la constante de tiempo  $\tau$  es a su vez inversamente proporcional a la resistencia del conductor.

En consecuencia un cuerpo resistivo presenta una amplitud inicial mayor que un cuerpo conductor, pero el decaimiento temporal de un cuerpo resistivo es mas fuerte que en el caso de un cuerpo conductor

$$E^{\text{sec}}(t) = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = L / R$$

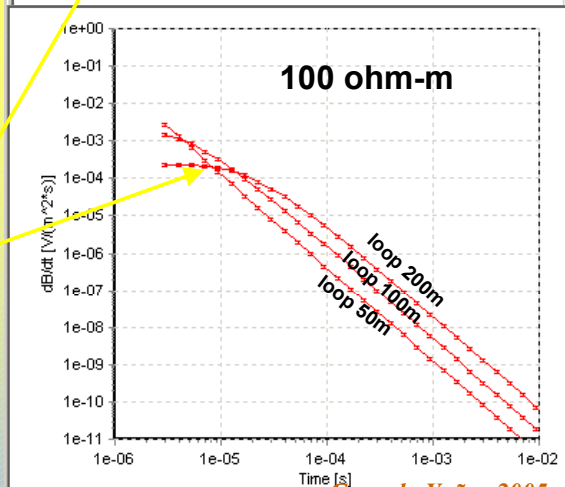
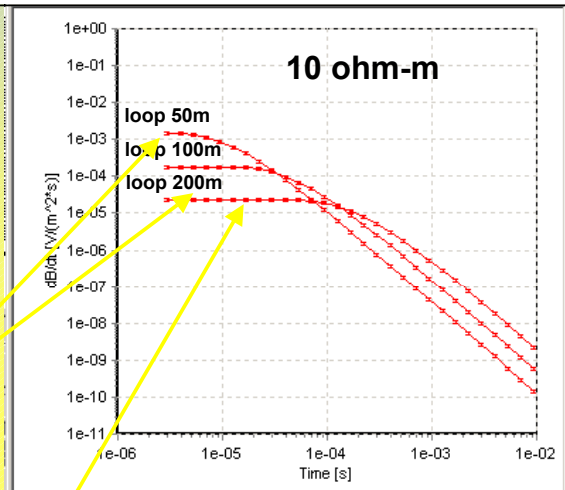


Gonzalo Yañez 2005

## METODO TEM: SISTEMAS DE MEDICION

Tamaño del loop condiciona la detección de la señal deseada en función de la resistividad del medio:

- a medida que el tamaño del loop transmisor aumenta se debe medir una mayor ventana de tiempos tardíos (para detectar curva de decaimiento característico)
- Si la resistividad del medio es mayor la señal de decaimiento se alcanza en tiempo mas cercanos.



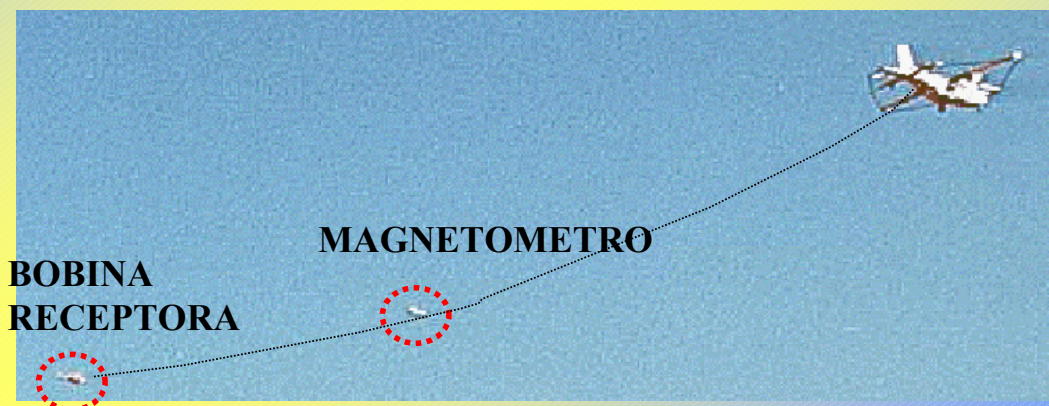
Gonzalo Yañez, 2005

## METODO TEM: INSTRUMENTAL

BOBINA  
TRANSMISORA



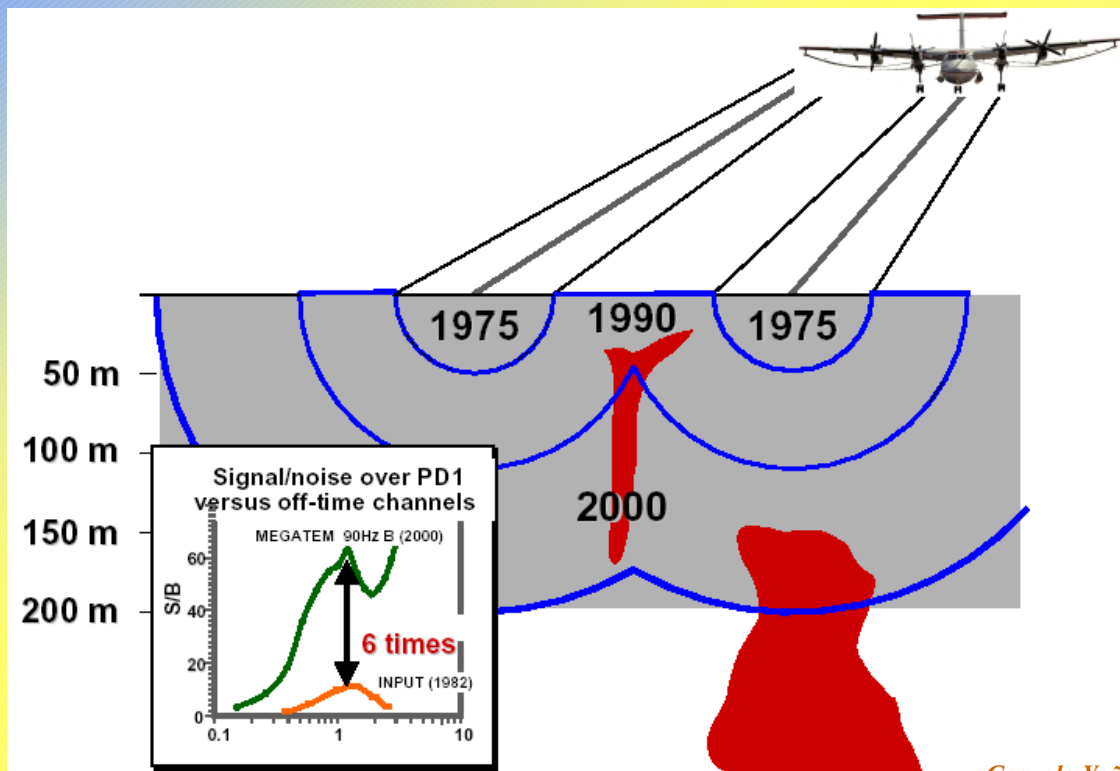
SISTEMA AEREO GEOTEM



Gonzalo Yañez, 2005

## METODO TEM: INSTRUMENTAL

### EVOLUCION EN EL TIEMPO DE PENETRACION EN SISTEMAS AEREOS



*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: INSTRUMENTAL

### SISTEMA ZONGE (GDP32): TERRESTRE



**BOBINA TRANSMISORA**

**BOBINA RECEPTORA  
(IN-LOOP, FIXED LOOP,...)**



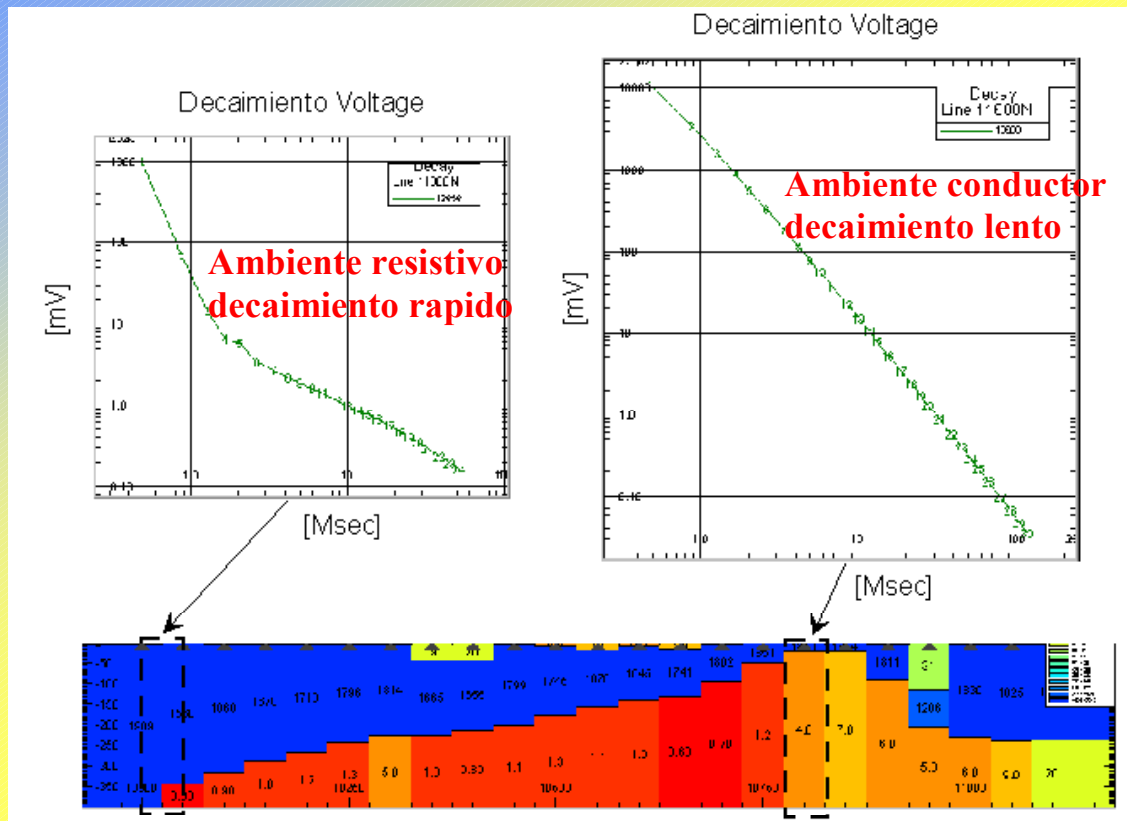
**BOBINA RECEPTORA  
(LOOP COINCIDENTE)**

*Gonzalo Yañez 2005*



# METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

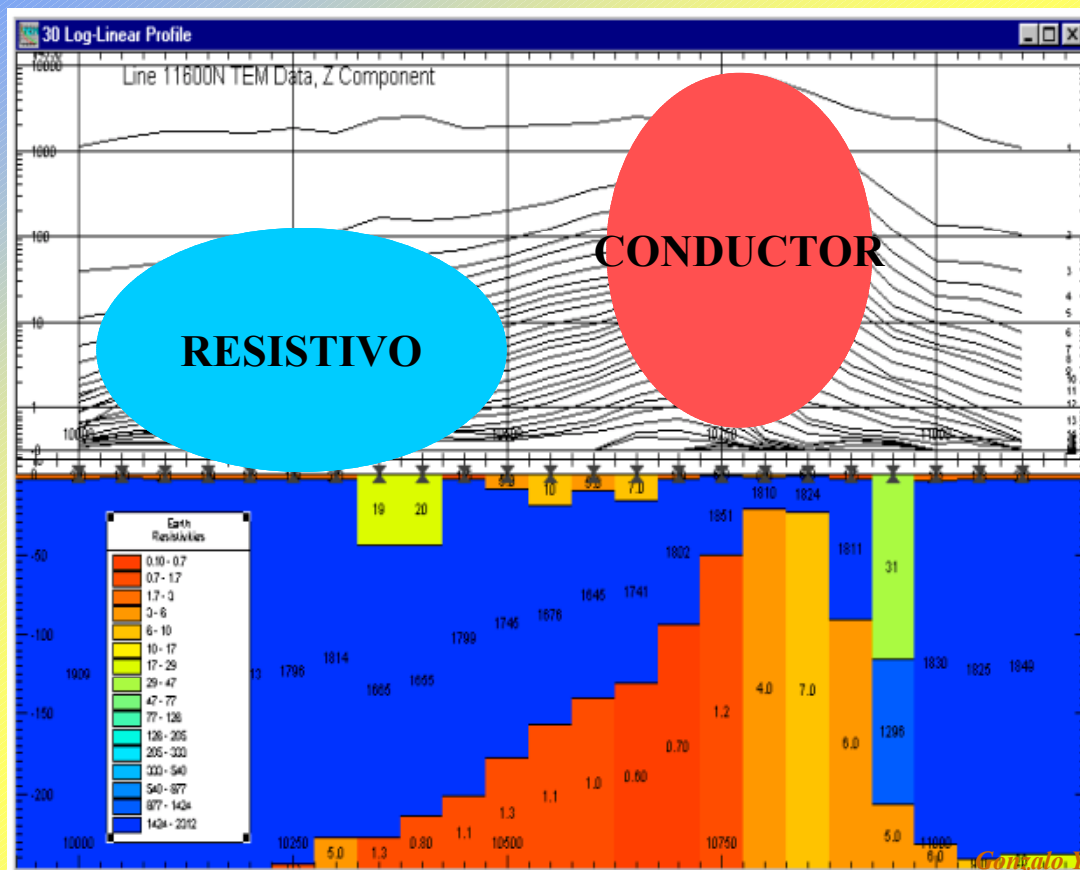
## CURVAS DE DECAIMIENTO



Gonzalo Yañez 2005

# METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

## CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCIONES

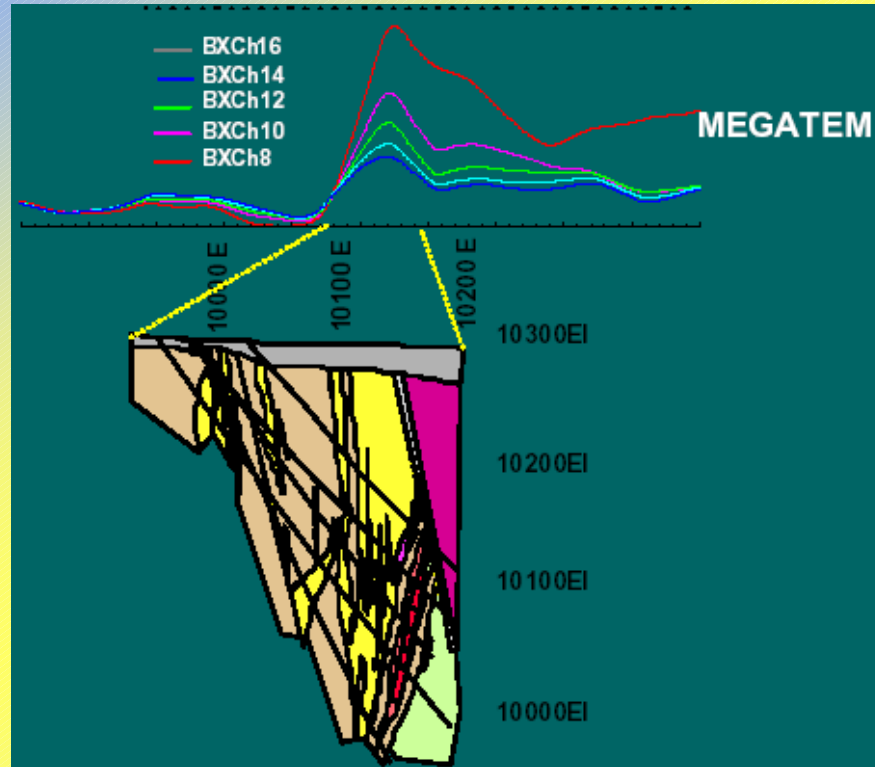


Gonzalo Yañez 2005



## METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

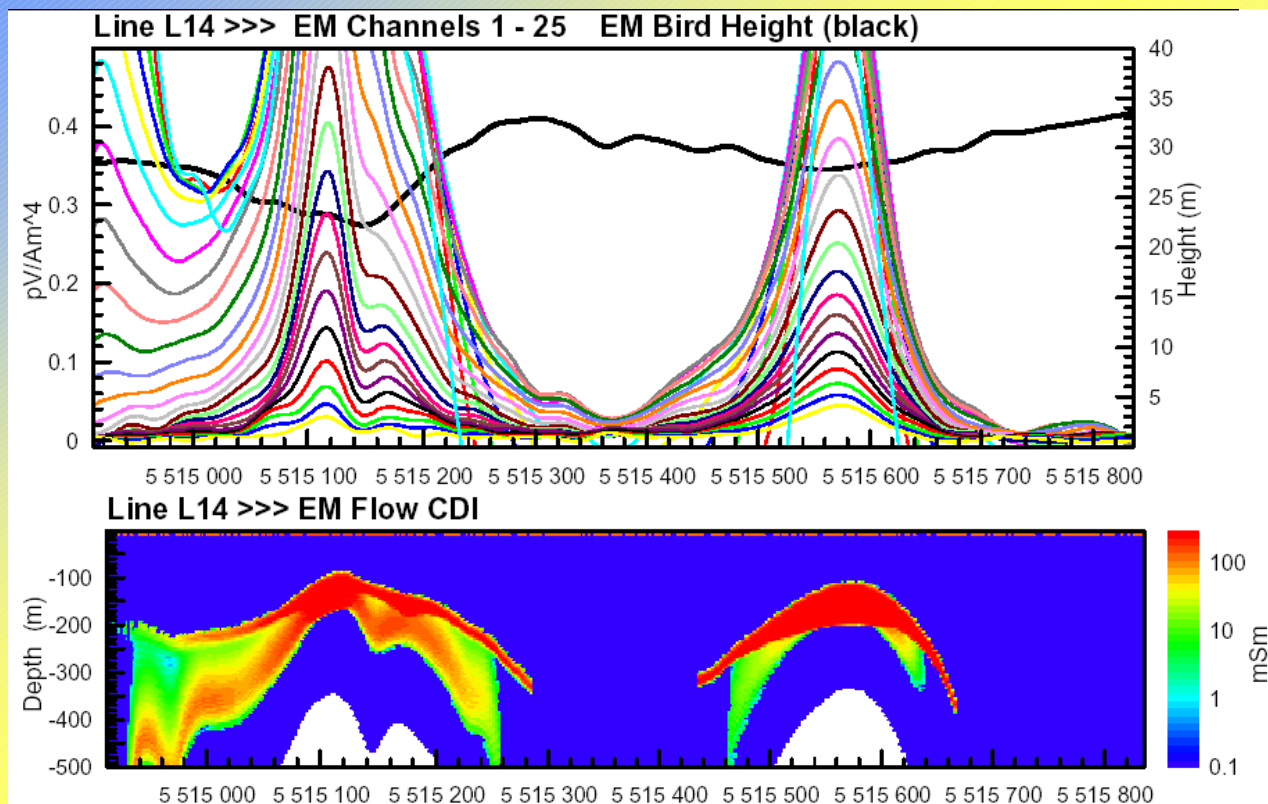
### CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCIONES SULFURO MASIVO EN AUSTRALIA (CARVER MINE)



*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCION E INVERSION



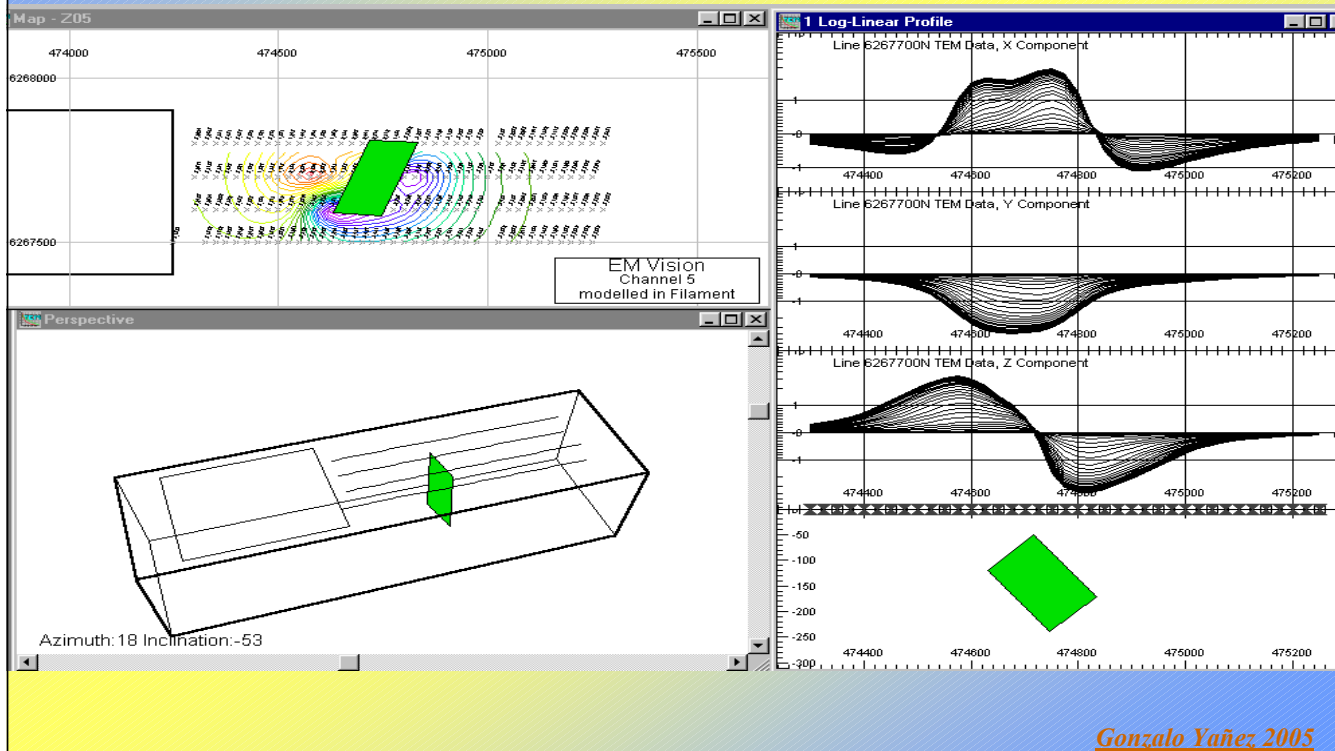
*Gonzalo Yañez 2005*

# METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

## CUERPOS 3-D

CONTORNOS A DISTINTOS  
TIEMPOS (PROFUNDIDAD)

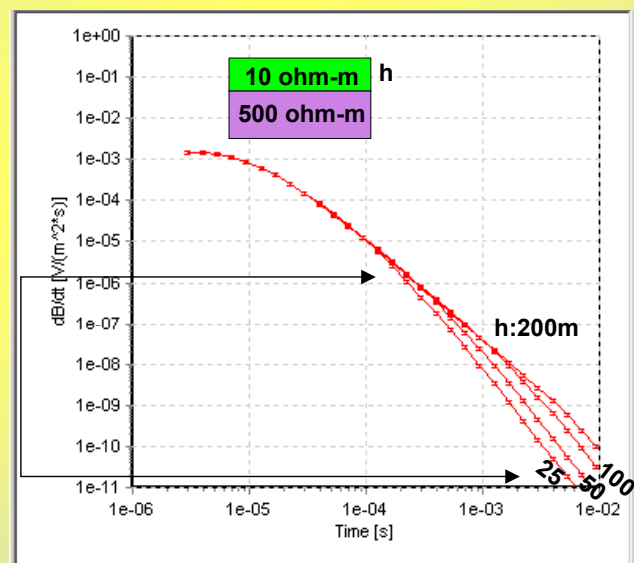
SECCIONES DE DECAIMIENTO  
POR PERFIL (MEDICION DE  
3 COMPONENTES)



# METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Conductor en basamento resistivo (cuenca)

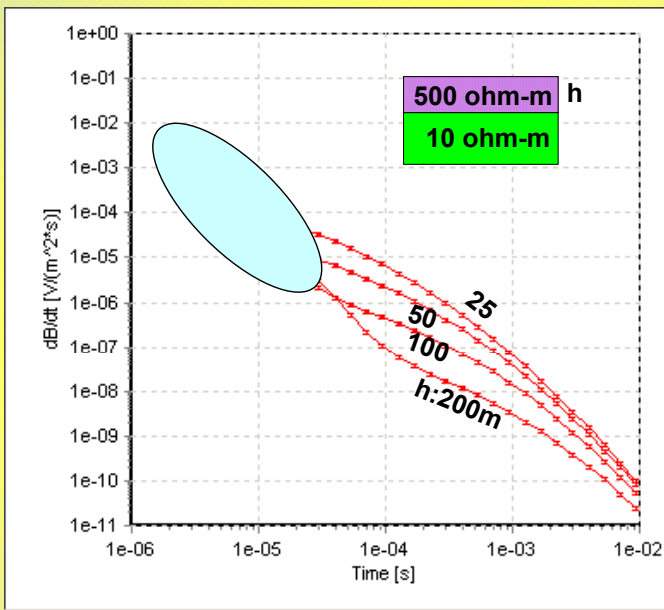
Disminución del decaimiento  
a medida que aumenta la  
potencia del conductor



## METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Resistivo sobre conductor (costra de caliche, sedimentos secos sobre acuífero, cap silíceo sobre cuerpo mineralizado)

Decaimiento asociado a resistivo en tiempo tempranos, para menores espesores es necesario muestrear mas altas frecuencias



*Gonzalo Yañez 2005*

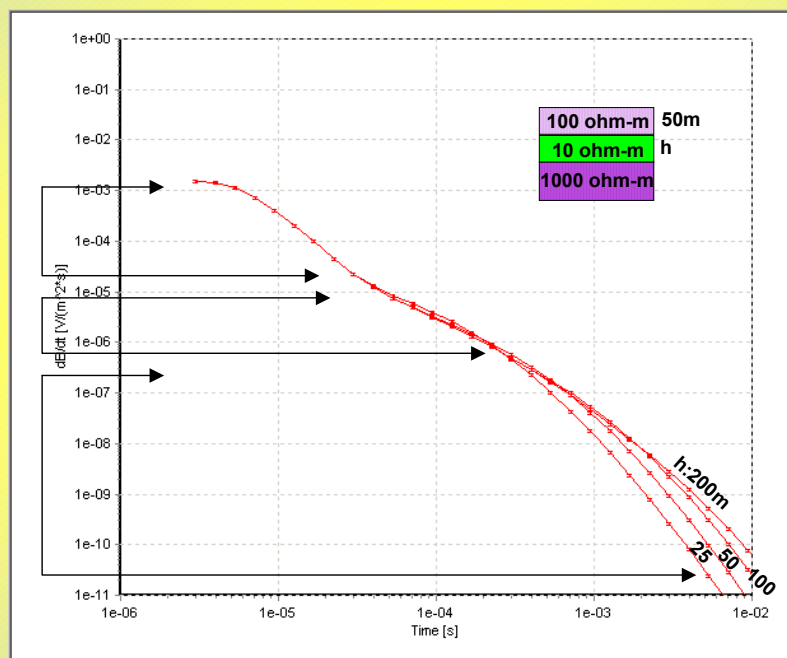
## METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Conductor entre resistivo somero y basamento resistivo (por ejemplo acuífero o cuerpo mineralizado entre gravas secas y basamento cristalino)

Decaimiento asociado a resistivo somero

Decaimiento asociado a conductor, se extiende a tiempos lejanos para  $h \gg$

Decaimiento asociado a basamento, curvas paralelas expuestas en mayores tiempos tardios para  $h \gg$

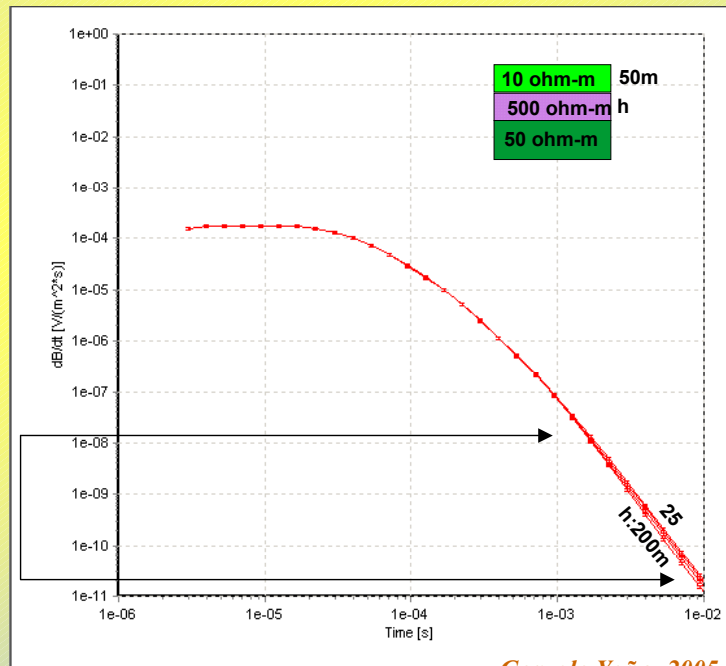


*Gonzalo Yañez 2005*

## METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Resistivo entre conductor somero y conductor moderado (por ejemplo secuencia de basaltos entre gravas no compactadas y compactadas)

**Difícil discriminación de distintos espesores de cuerpo resistivo dada la rápida disipación de la señal electromagnética**



## METODO TEM: CONCLUSIONES

- Detección de propiedades eléctricas
- Pérdida de resolución con la profundidad, penetraciones de 200-400m en sistemas tradicionales
- Método inductivo, no hay problemas de inyección de corriente en ambientes muy resistivos
- Modelamiento en imágenes de profundidad con programas de inversión de 1-D (interpretación cualitativa no es confiable)
- Carencia de modelamientos 2-D apropiados para interpretación minera
- Costos de US\$ 300-800/km