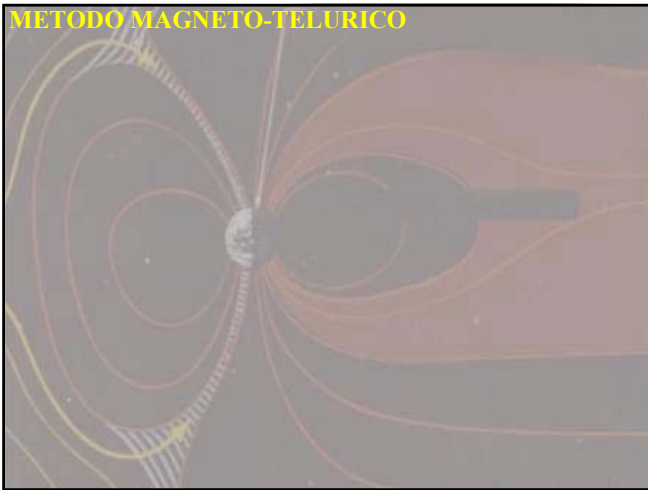
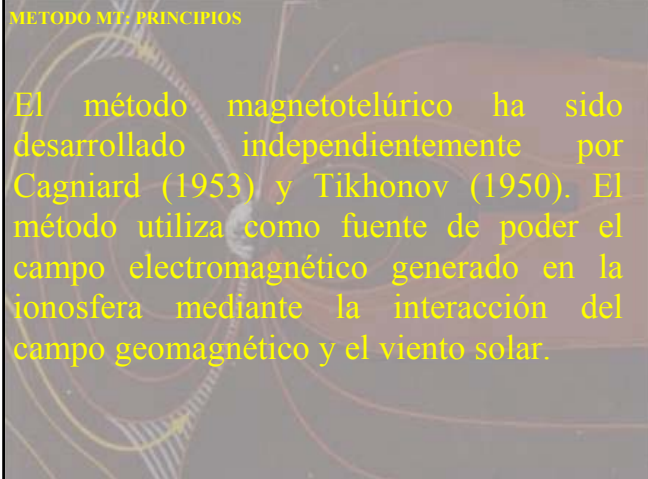


METODO MAGNETO-TELURICO



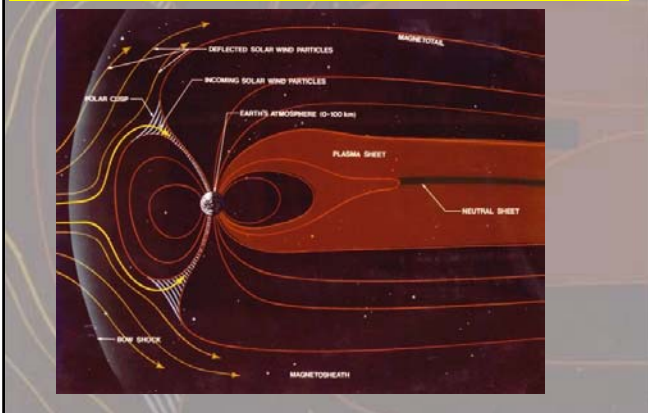
METODO MT. PRINCIPIOS



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.

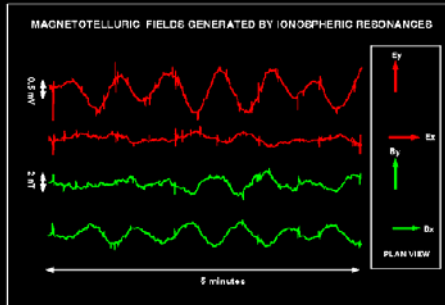
METODO MT. PRINCIPIOS

INTERACCION DE IONOSFERA CON VIENTO SOLAR



METODO MT: PRINCIPIOS

SEÑALES REGISTRADAS: CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO



METODO MT: TEORÍA BÁSICA

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:

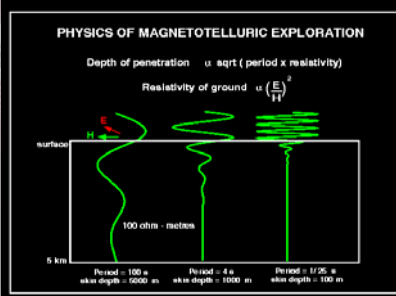
$$\nabla^2 \vec{E} - i\sigma\mu\omega\vec{E} = 0$$

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

METODO MT: TEORÍA BÁSICA

ATENUACIÓN 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

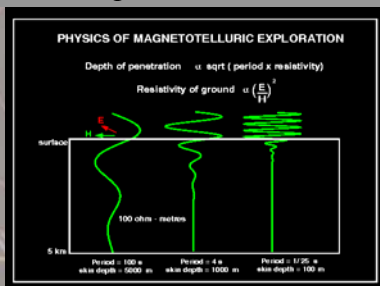


METODO MT: TEORIA BASICA

ATENUACIÓN DE SEÑAL: DEPENDE DE RESISTIVIDAD Y FRECUENCIA

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

≡ "skin depth"



METODO MT: TEORIA BASICA

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

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y \\ E_y &= Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y \end{aligned};$$

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix};$$

$$\vec{E}(\omega) = Z(\omega) \vec{H}(\omega)$$

METODO MT: TEORIA BASICA

ESTIMACIÓN DEL TENSOR DE IMPEDANCIAS

$$\begin{bmatrix} E_x - (Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y) \\ E_y - (Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y) \end{bmatrix}_{\min(Z_{xx}, Z_{xy})} \Rightarrow \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{13} S_{43} - S_{14} S_{43}) & (S_{14} S_{33} - S_{13} S_{34}) \\ (S_{23} S_{44} - S_{24} S_{43}) & (S_{24} S_{33} - S_{23} S_{34}) \end{bmatrix} / D$$

con $D = (S_{33} S_{44} - S_{34} S_{43})$

$S_{ij} = \overline{F_i F_j^*} \equiv \text{correlación - cruzada}$

$E_x = F_1; E_y = F_2; H_x = F_3; H_y = F_4$

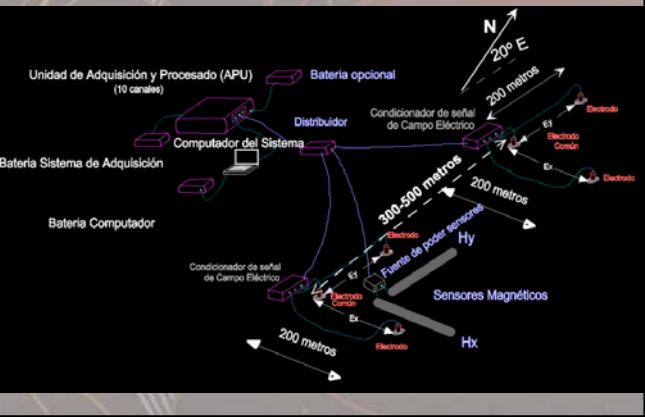
El tensor de impedancia puede reducirse en función de las características del medio:

- si el medio es homogéneo $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$; $Z_{xy} = -Z_{yx}$; independiente de la dirección de medición.
- si el medio es anisótropo en dos direcciones perpendiculares, siempre es posible definir una rotación del sistema coordenado en un ángulo θ para el cual: $Z_{xx}(\theta) = Z_{yy}(\theta) = 0$, y $Z_{xy}(\theta) \neq Z_{yx}(\theta) \neq 0$. Donde (θ) está definido por:

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left[\frac{(Z_{xx} - Z_{yy}) (Z_{xy} + Z_{yx}) + (Z_{xx} - Z_{yy})' (Z_{xy} + Z_{yx})'}{|Z_{xx} - Z_{yy}|^2 + |Z_{xy} + Z_{yx}|^2} \right] \quad (64)$$

METODO MY: ADQUISICION DE DATOS

DISPOSITIVO DE TERRENO



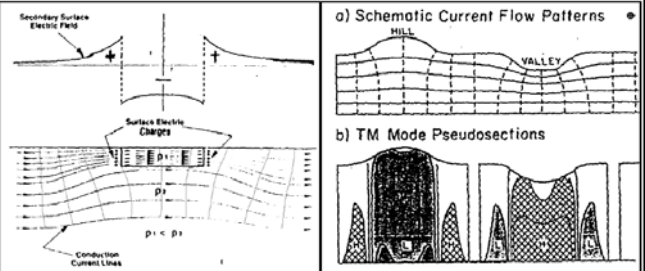
METODO MY: ADQUISICION DE DATOS

EQUIPOS



METODO MY: ADQUISICION DE DATOS

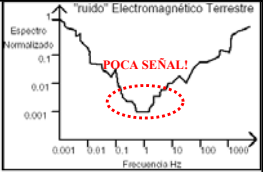
PROBLEMAS DE ESTATICA



METODO MT: ADQUISICION DE DATOS

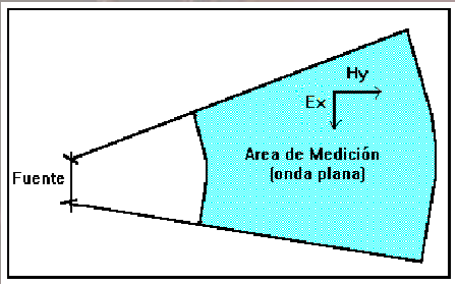
ESPECTRO DE MEDICION

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 sinérgica



METODO MT: ADQUISICION DE DATOS

METODO MT CON FUENTE CONTROLADA (CSAMT)



METODO MT: ADQUISICION DE DATOS

METODO MT CON FUENTE CONTROLADA (CSAMT)

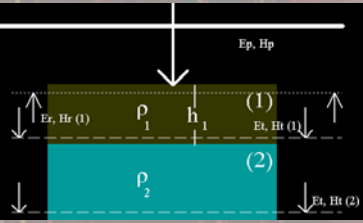
La fuente de poder es generalmente un dipolo eléctrico. En el caso de un dipolo eléctrico de corriente I y longitud Δl orientado en dirección x (vertical en la figura anterior) sobre un medio de conductividad σ , la solución del campo eléctrico y magnético en el campo cercano ($r \ll \delta = \text{"skin depth"}$) y lejano ($r \gg \delta$) está dada por (ver en próxima sección un desarrollo formal de esta expresión):

campo	E_r	E_ϕ	H_r	H_ϕ
cercano	$\frac{1}{\pi \sigma r^3} \Delta l \cos \phi$	$\frac{1}{2 \pi \sigma r^3} \Delta l \sin \phi$	$\frac{1}{4 \pi r^3} \Delta l \sin \phi$	$-\frac{1}{4 \pi r^3} \Delta l \cos \phi$
lejano	$\frac{1}{2 \pi \sigma r^3} \Delta l \cos \phi$	$\frac{1}{\pi \sigma r^3} \Delta l \sin \phi$	$\frac{1}{\pi \sqrt{\mu \sigma \omega}} \frac{\Delta l \sin \phi}{r^2} e^{-i\pi/4}$	$-\frac{1}{2 \pi \sqrt{\mu \sigma \omega}} \frac{\Delta l \cos \phi}{r^2} e^{-i\pi/4}$

$$Z = \left| \frac{E_\phi}{H_r} \right| = \sqrt{i \mu \omega / 2 \sigma}$$

PROPAGACION DE ONDA EN MEDIO ESTRATIFICADO

Sistema de una capa y un semi-espacio



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

$$\equiv \text{IMPEDANCIA}$$

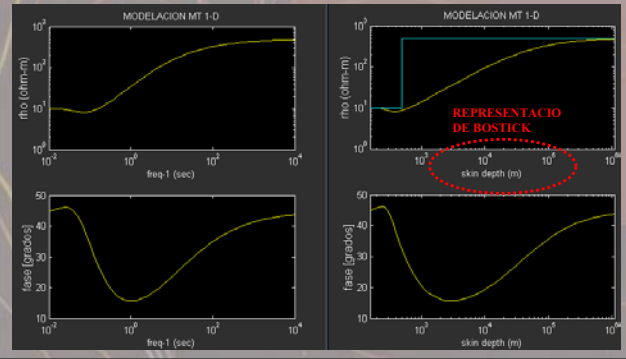
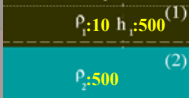
$$Z(\omega, z=0) = -Z_1 \left[\frac{R_{12} e^{-2k_1 h_1} + 1}{R_{12} e^{-2k_1 h_1} - 1} \right]$$

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

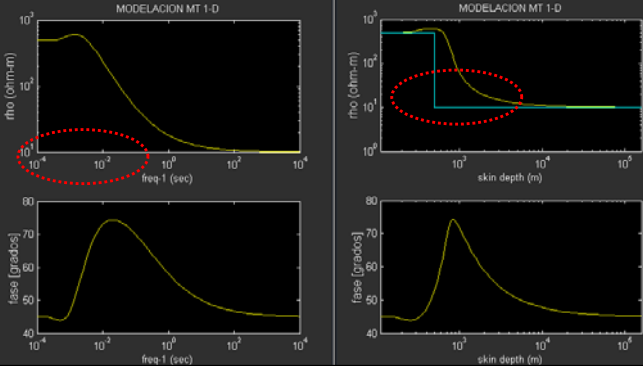
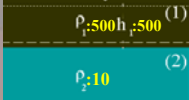
$$R_{12} = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right] = \left[\frac{\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1}} \right]$$

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

Sistema de una capa y un semi-espacio

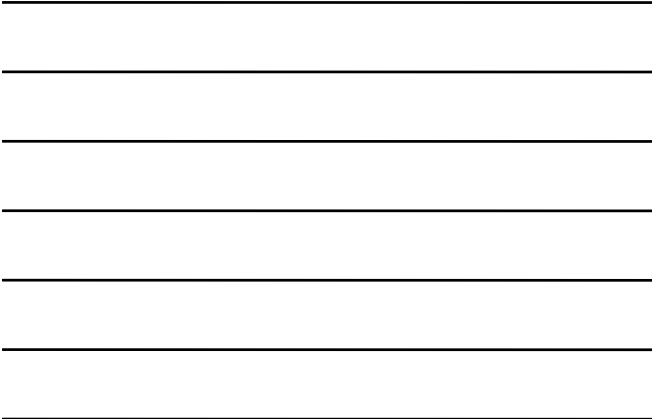
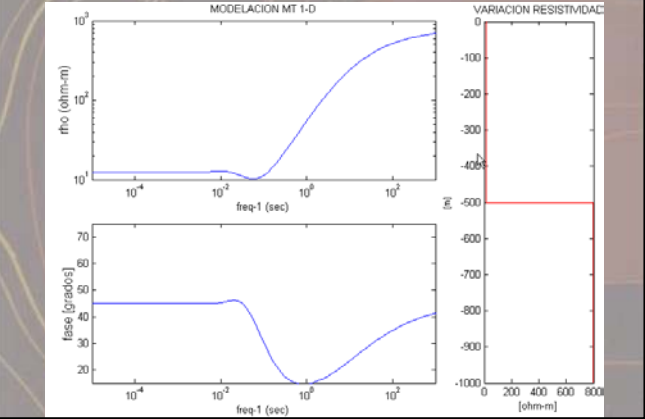


Sistema de una capa y un semi-espacio



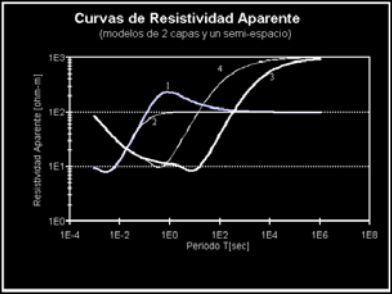
METODO MT: TEORIA BASICA

Animación: Sistema de una capa y un semi-espacio



METODO MT: TEORIA BASICA

Sistema de dos capas y un semi-espacio

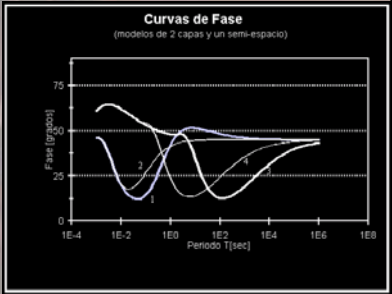


Nº modelo	h_1 [m]	h_2 [m]	ρ_1 [ohm-m]	ρ_2 [ohm-m]	ρ_3 [ohm-m]
1	1000	5000	10	1000	100
2	1000	1000	10	1000	100
3	1000	5000	100	10	1000
4	1000	1000	100	10	1000

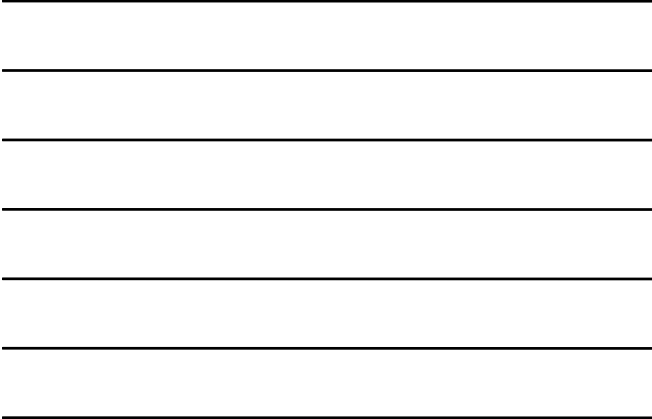


METODO MT: TEORIA BASICA

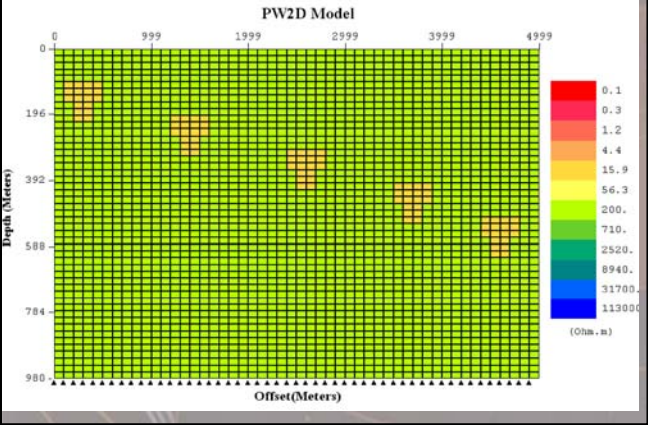
Sistema de dos capas y un semi-espacio



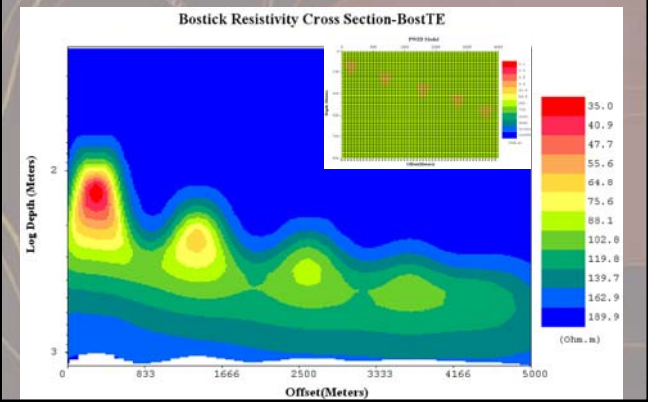
Nº modelo	h_1 [m]	h_2 [m]	ρ_1 [ohm-m]	ρ_2 [ohm-m]	ρ_3 [ohm-m]
1	1000	5000	10	1000	100
2	1000	1000	10	1000	100
3	1000	5000	100	10	1000
4	1000	1000	100	10	1000



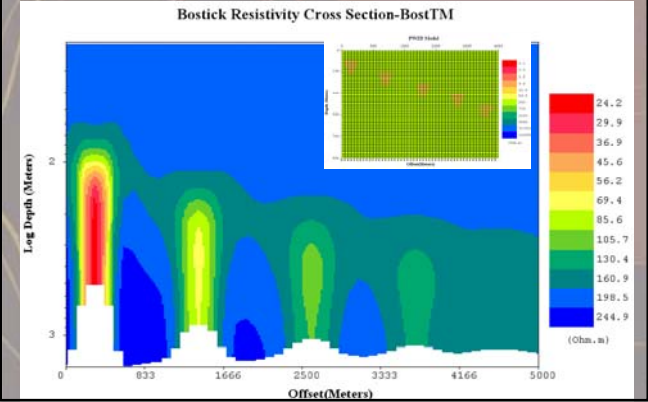
METODO MY: TEORIA BASICA
CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD



METODO MY: TEORIA BASICA
CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD
REPRESENTACION DE BOSTICK TE (E_x/H_y)



METODO MY: TEORIA BASICA
CUERPO 2-D CONDUCTOR A PROFUNDIDAD
REPRESENTACION DE BOSTICK TM (E_y/H_x)



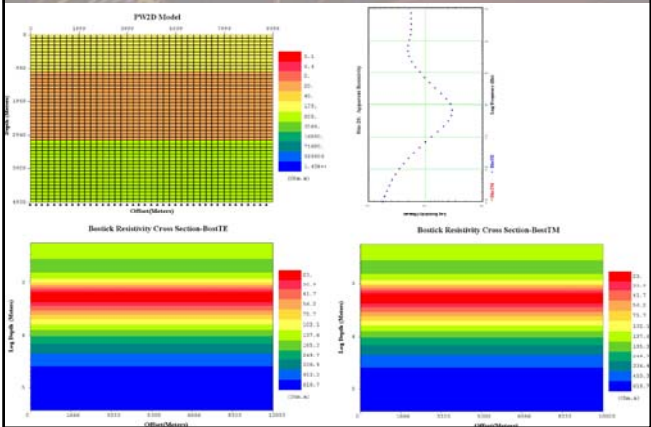
METODO MY: TEORIA BASICA

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

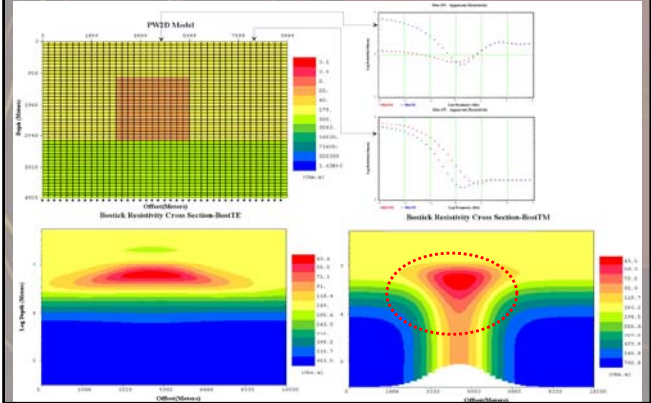
METODO MY: TEORIA BASICA

MEDIO ESTRATIFICADO: TE Y TM IDENTICOS

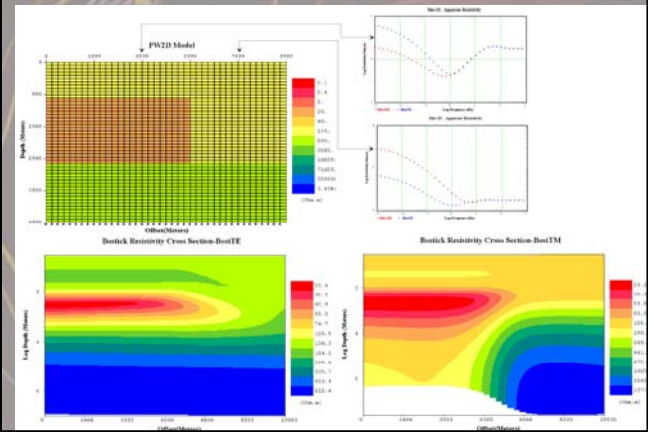


METODO MY: TEORIA BASICA

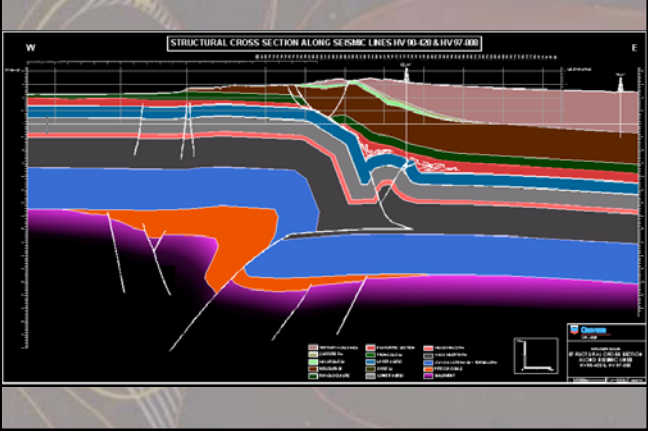
CONDUCTOR EN MEDIO ESTRATIFICADO: TM MARCA CONTACTOS VERTICALES



METODO MT: TEORIA BASICA
CONTACTOS VERTICAL



METODO MT: EJEMPLO
SECCION GEOLOGICA CUENCA DE NEUQUEN

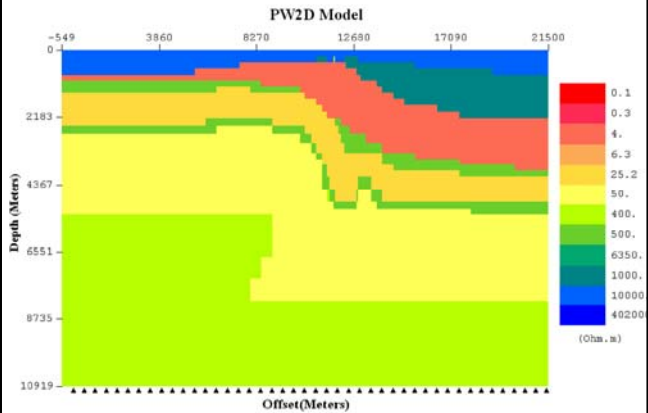


METODO MT: EJEMPLO NEUQUEN
VALORES DE RESISTIVIDAD:

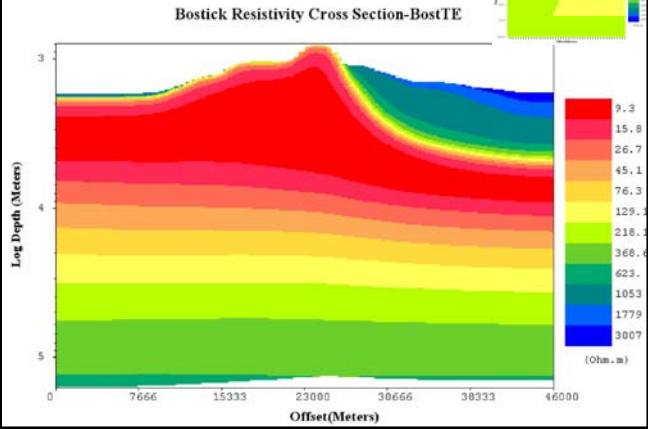
Tabla 1: Resistividad en techo de unidad

Formación	Resistividad (ohm.m)	Profundidad (m)
Huincul	4	1968
Candeleros	2	2189
Rayoso clástico	3	2337
Rayoso Evaporitas	200-2000	2707
Upper Troncos	10	2908
Avile	25	3363
Lower Agrio	50	3391

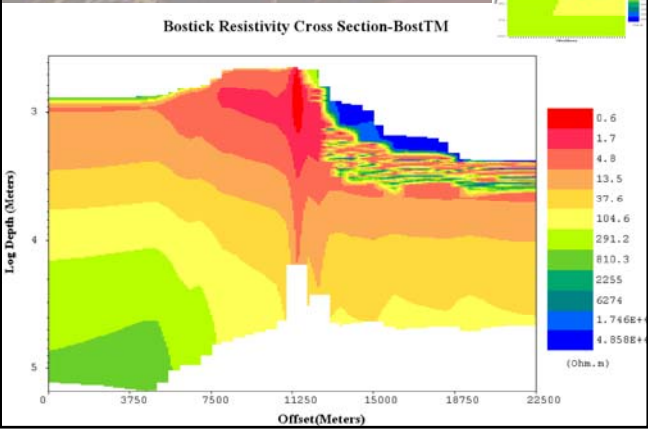
METODO MY: EJEMPLO NEUQUEN
MODELO ELECTRICO



METODO MY: EJEMPLO NEUQUEN
RESPUESTA MODELO MODO TE



METODO MY: EJEMPLO NEUQUEN
RESPUESTA MODELO MODO TM



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
