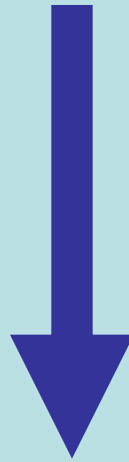


MÉTODOS ELÉCTRICOS

- **Resistividad**
- **Potencial espontáneo (SP)**
- **Polarización Inducida (IP)**

MÉTODOS ELÉCTRICOS



POLARIZACIÓN INDUCIDA

FUNDAMENTOS:

Método activo

Depende de pequeña cantidad de carga que es almacenada en el subsuelo cuando lo atraviesa una corriente eléctrica, y que genera una diferencia de potencial que es medida por un tiempo muy breve una vez que cesa la inyección de corriente

APLICACIONES:

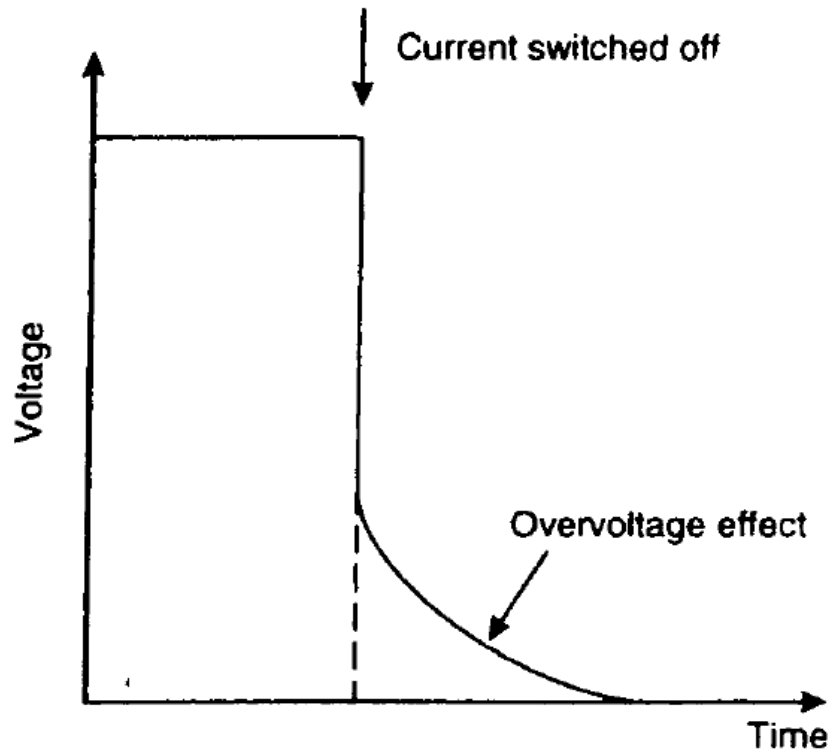
- Prospección de minerales de mena metálicos diseminados (sulfuros, óxidos de hierro)
- Basureros municipales: mapeo de relleno y plumas de contaminación
- Detección y ubicación de objetos metálicos enterrados, como estructuras hechas por el hombre

TÉCNICAS:

Dominio de tiempo

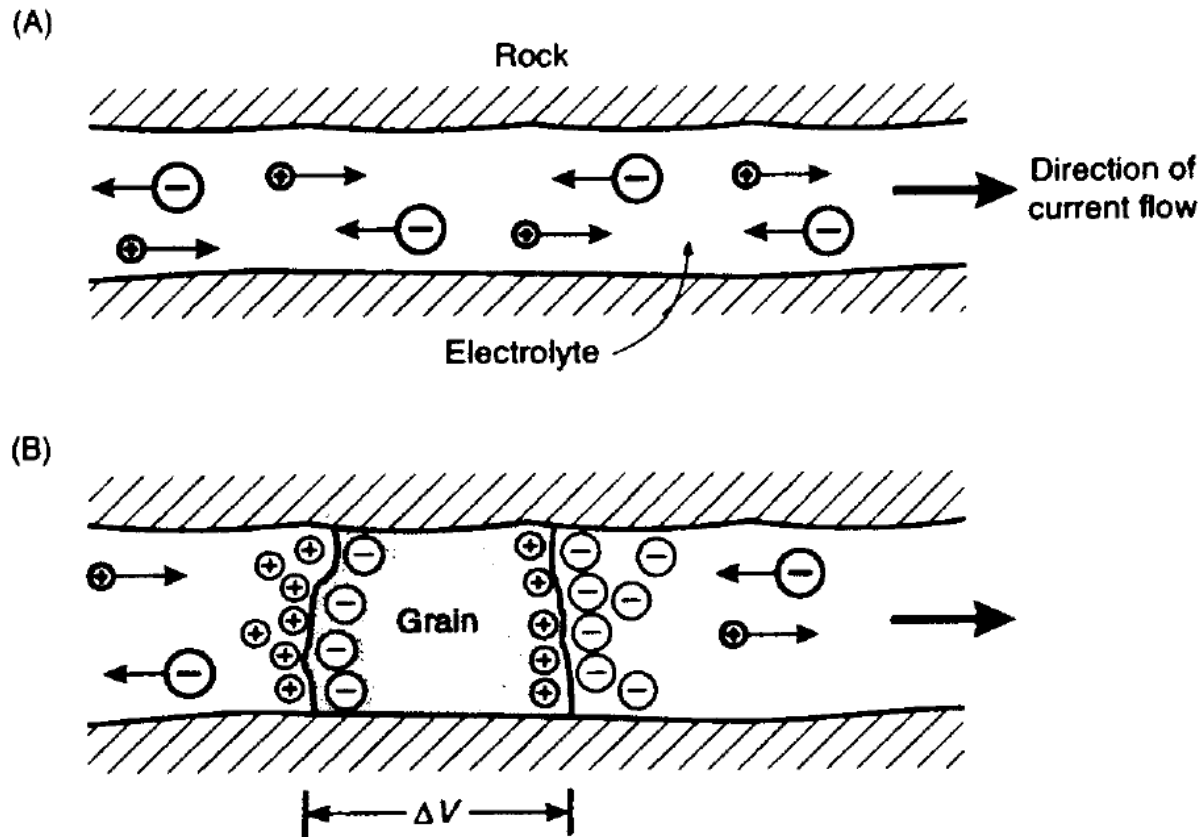
Dominio de frecuencias

FUNDAMENTOS: SOBREVOLTAJE



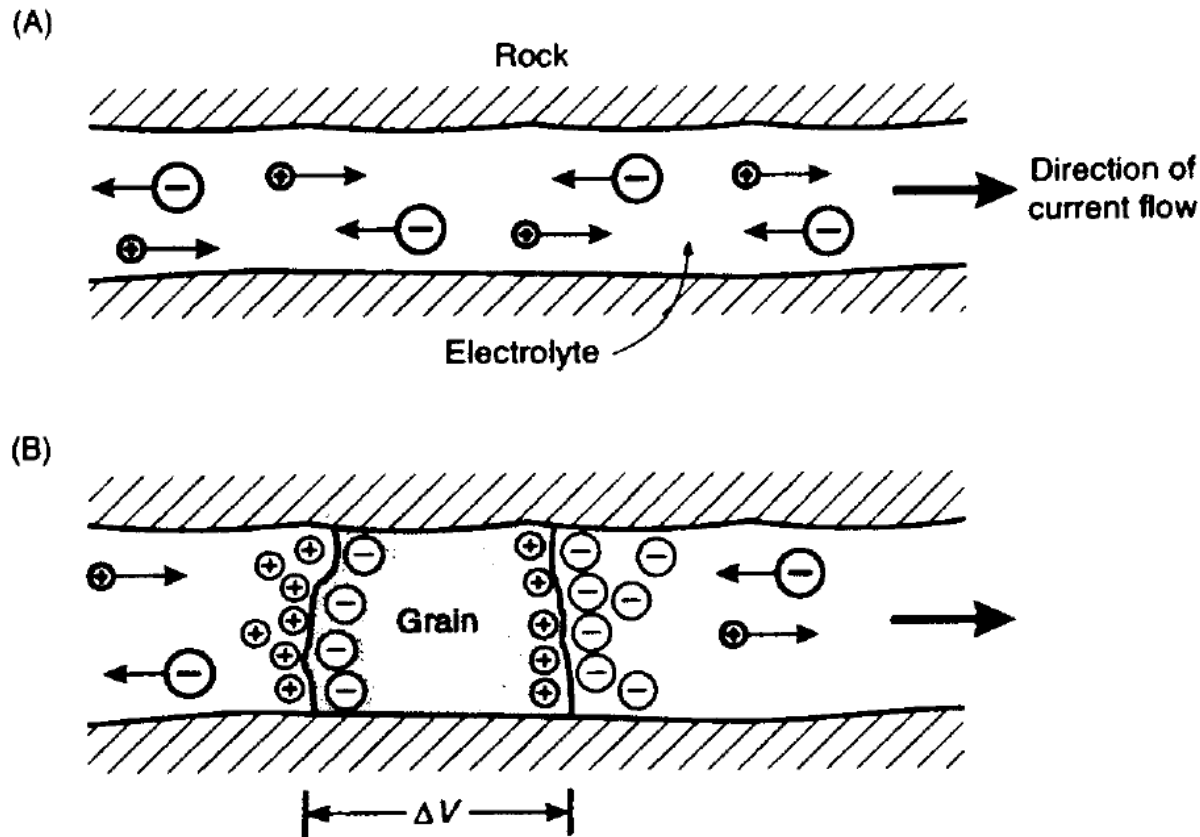
Diferencia de potencial que se registra durante un tiempo muy breve en un tendido de resistividad luego que cesó la inyección de corriente

FUNDAMENTOS: POLARIZACIÓN DE ELECTRODO



Se genera debido a la presencia de pequeñas partículas discretas de minerales conductores dispersas en una matriz de roca no conductora.

FUNDAMENTOS: POLARIZACIÓN DE ELECTRODO



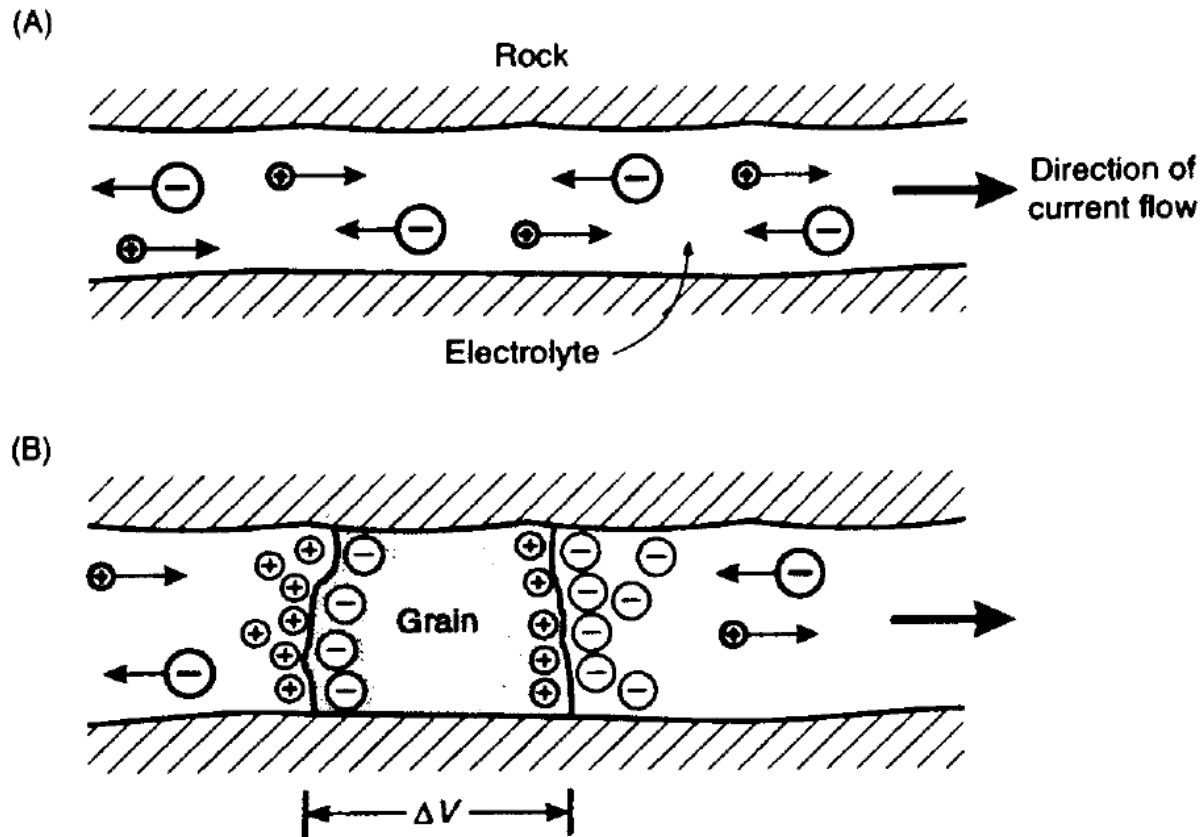
Corriente conducida por iones desplazándose en los espacios porales. Si el desplazamiento es bloqueado por material conductor, pasan electrones.

Iones negativos pierden electrones, positivos los ganan.

El intercambio es lento y se forma una "cola" de iones, que genera acumulación local de carga

Efecto más significativo para menas diseminadas

FUNDAMENTOS: POLARIZACIÓN DE ELECTRODO

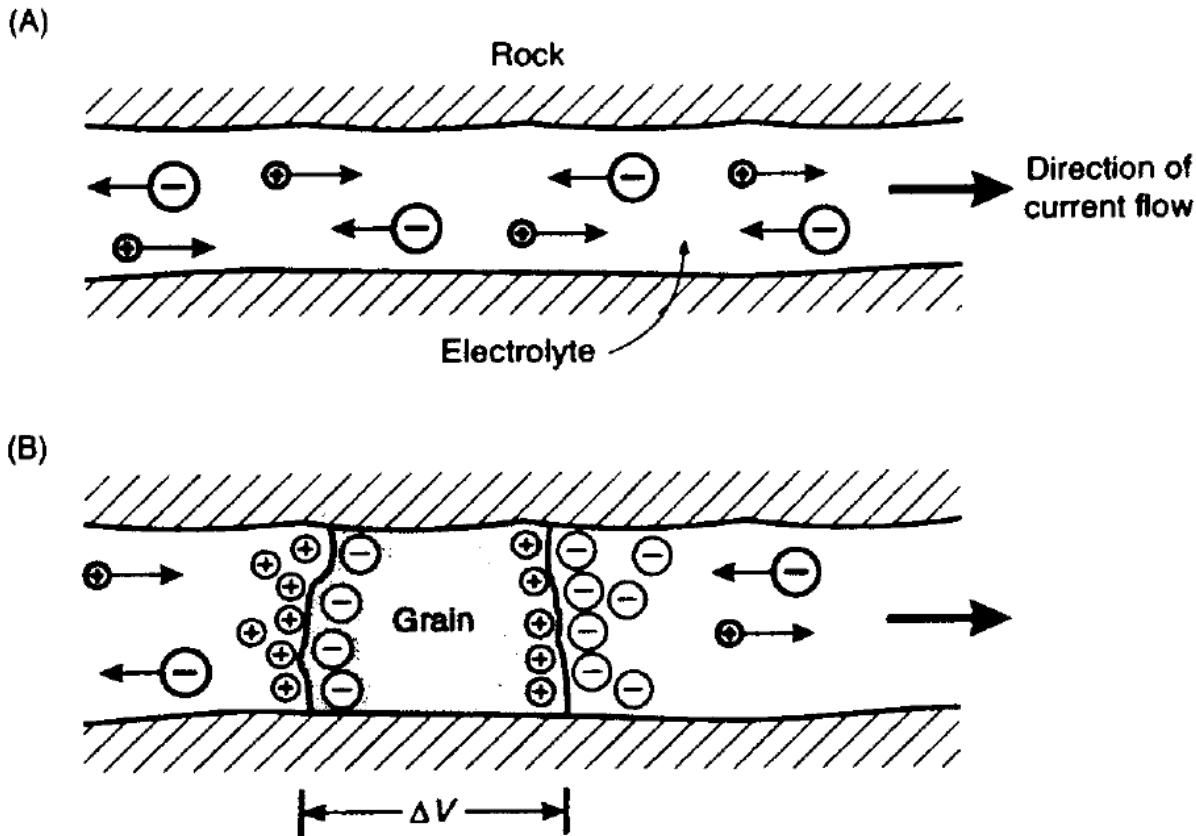


La roca se comporta de manera similar a un capacitor eléctrico.

Cuando cesa de enviarse corriente, las cargas se dispersan a través del agua poral y producen una corriente por un tiempo muy breve.

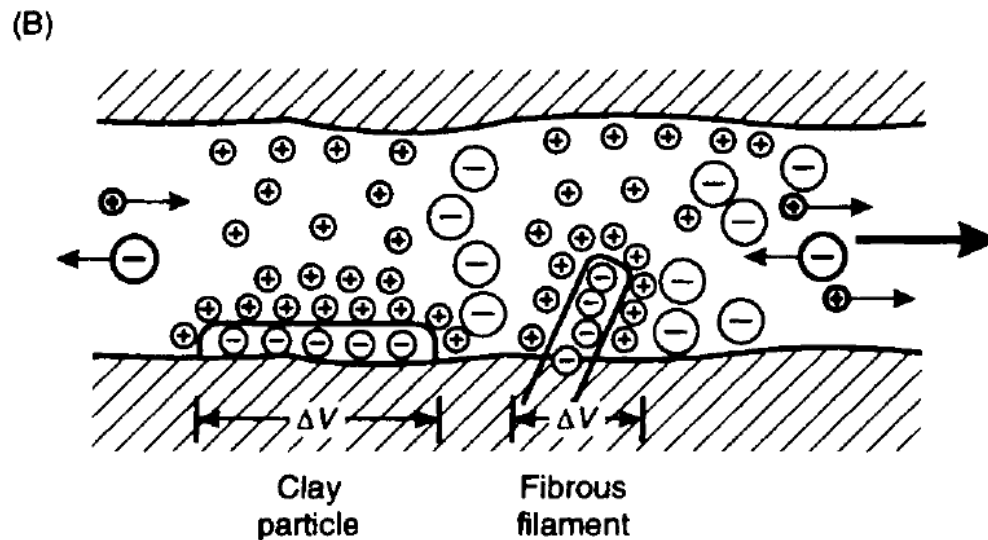
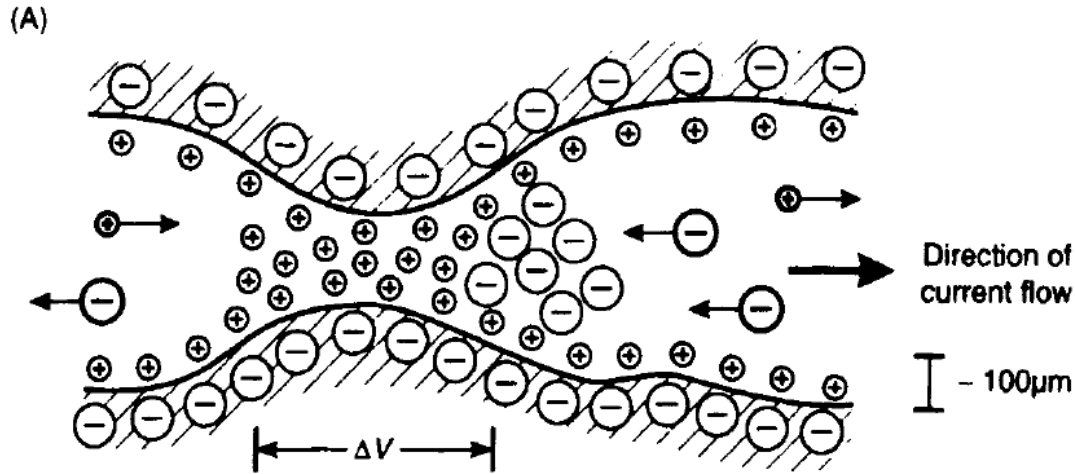
Como resultado, la diferencia de potencial entre electrodos de potencial no decae inmediatamente a cero.

FUNDAMENTOS: POLARIZACIÓN DE ELECTRODO



Desarrollan IP muchas menas de Cu, Fe, Co y otros metales, incluyendo la mayoría de los sulfuros (excepto la Blenda SZn) y algunos óxidos (magnetita, casiterita). Desafortunadamente también desarrolla IP el grafito que no tiene interés económico.

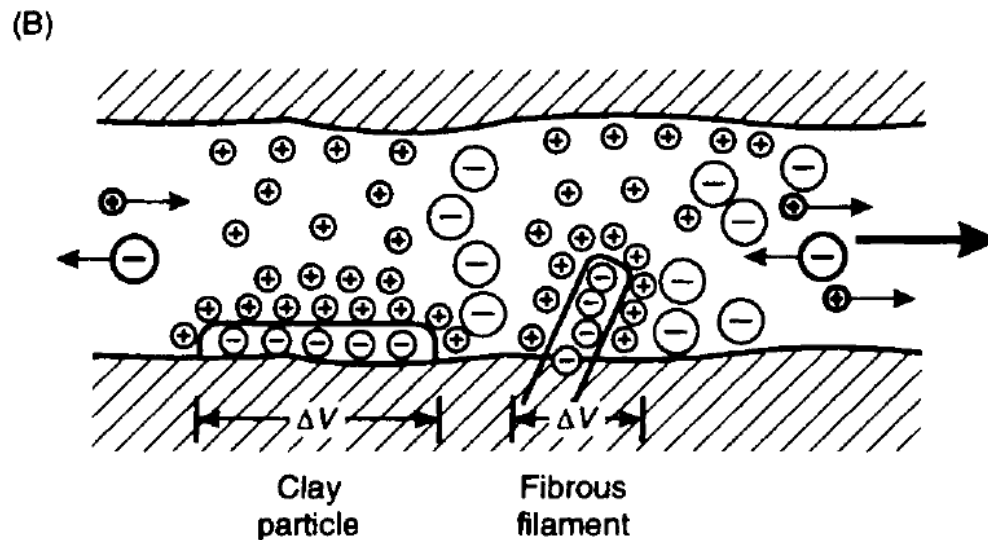
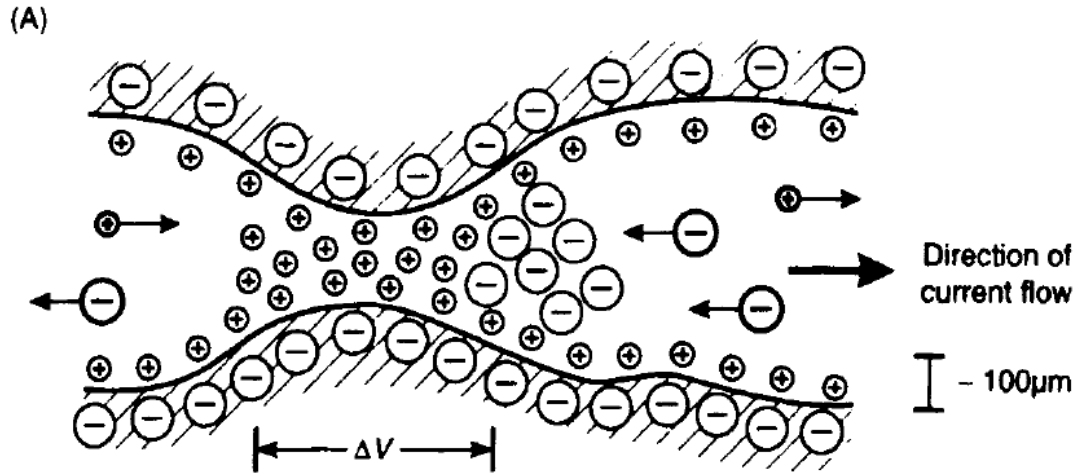
FUNDAMENTOS: POLARIZACIÓN DE MEMBRANA



Las partículas de arcilla en los laterales de poros estrechos causan un efecto similar. Las cargas negativas de las arcillas atraen iones positivos y producen acumulación de carga.

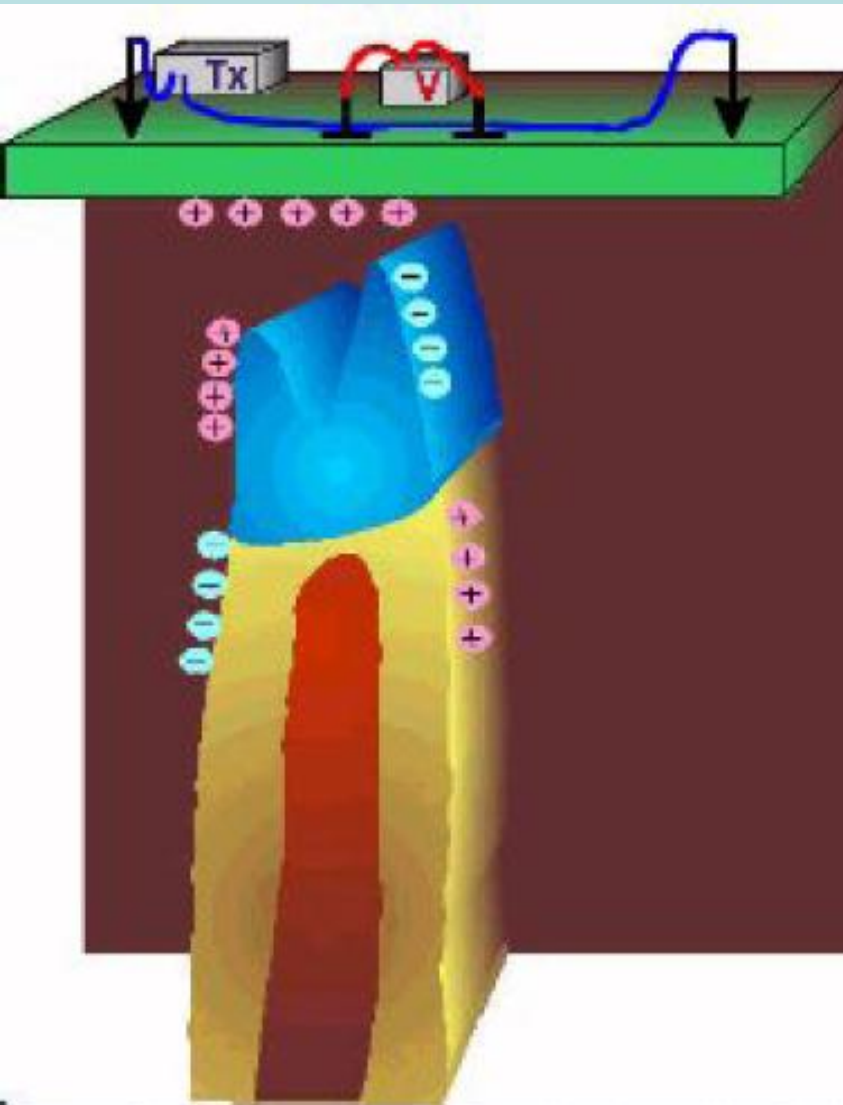
El efecto suele ser sólo una fracción de la polarización de electrodo y puede considerarse "ruido".

FUNDAMENTOS: POLARIZACIÓN DE MEMBRANA



Estas pequeñas acumulaciones de carga también se dispersan cuando cesa la inyección de corriente.

RELEVAMIENTO DE IP



Similar a resistividad, se inyecta corriente en el subsuelo y se mide la diferencia de potencial.

Se utiliza un tendido de cuatro electrodos, los de potencial deben ser no polarizables.

Se invierte la corriente a intervalos regulares para promediar y eliminar efectos p.ej. de corrientes telúricas.

Se utilizan tendidos dipolo-dipolo, polo-dipolo y Schlumberger generalmente.

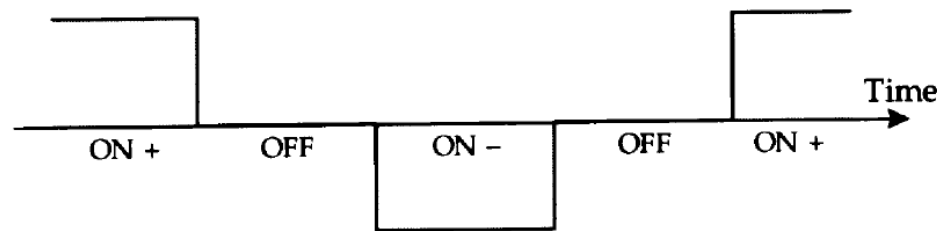
DOMINIO DE TIEMPO

Se realizan mediciones en distintos tiempos.

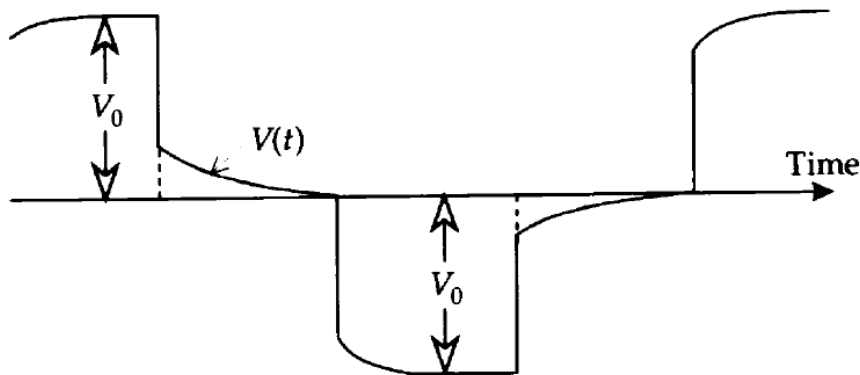
Se envía la corriente por un par de segundos, suficiente para el desarrollo de cargas hasta un valor estable. Luego se detiene el envío de corriente por un intervalo de tiempo igual.

No es posible medir el sobrevoltaje inmediatamente luego del cese del envío de corriente, porque la corriente enviada también necesita un tiempo para decaer a cero.

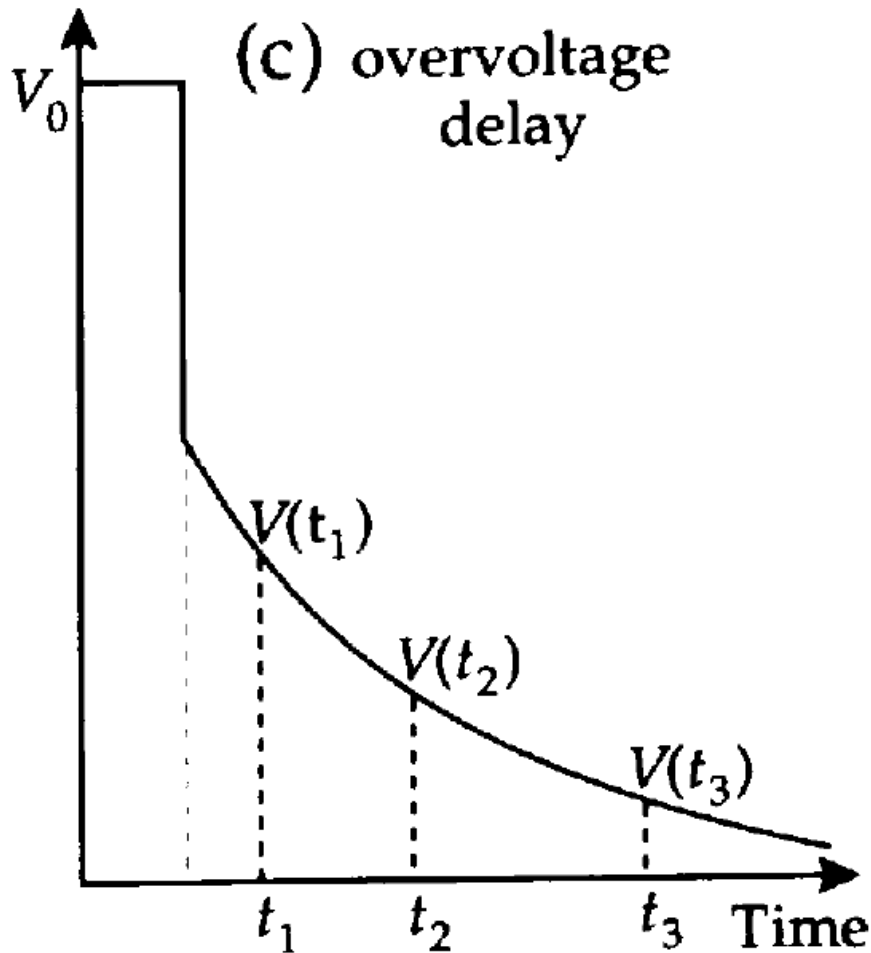
(a) inducing current



(b) measured potential



DOMINIO DE TIEMPO



El decaimiento de potencial luego de retirada la corriente no se mide de manera continua. Se leen valores durante un número de intervalos separados, cada uno de unos milisegundos de duración $V(t_1)$, $V(t_2)$, $V(t_3)$. Estos muestran la forma de la curva de decaimiento.

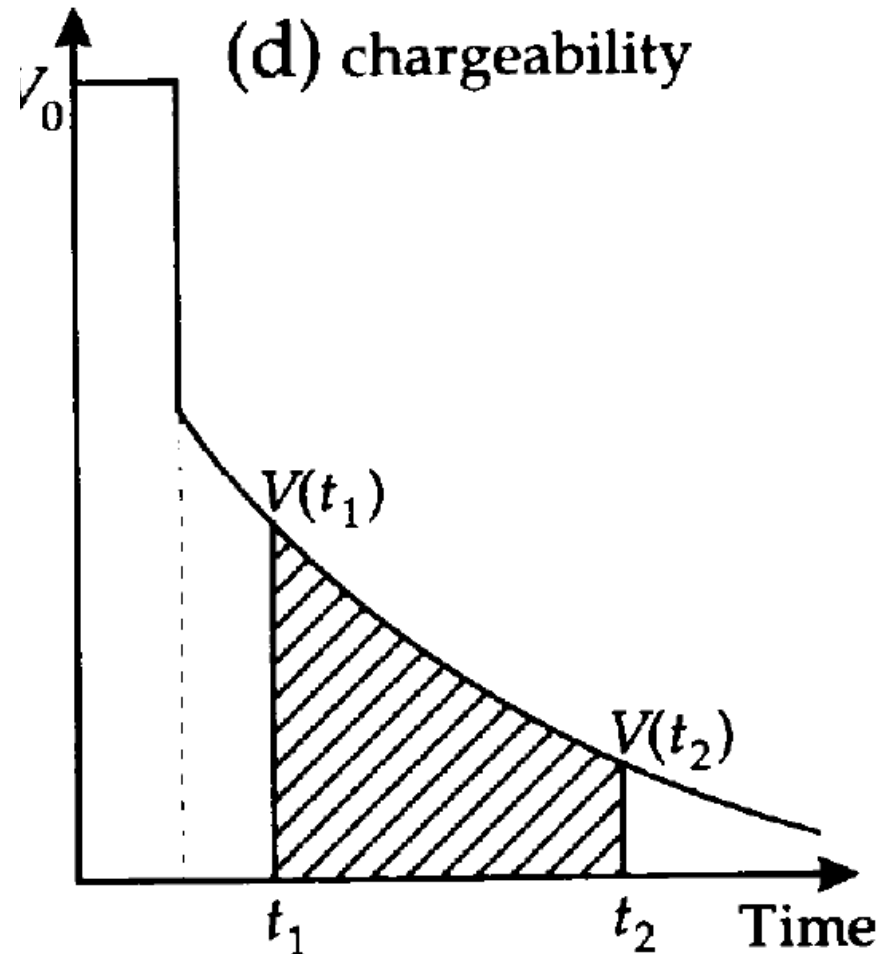
Se promedian lecturas repetidas para obtener valores más consistentes.

DOMINIO DE TIEMPO

El área debajo de la curva de decaimiento de potencial se calcula entre el primer y último valor, mediante integrales. Ese área es dividida por la diferencia de potencial medida antes de cesar el envío de corriente.

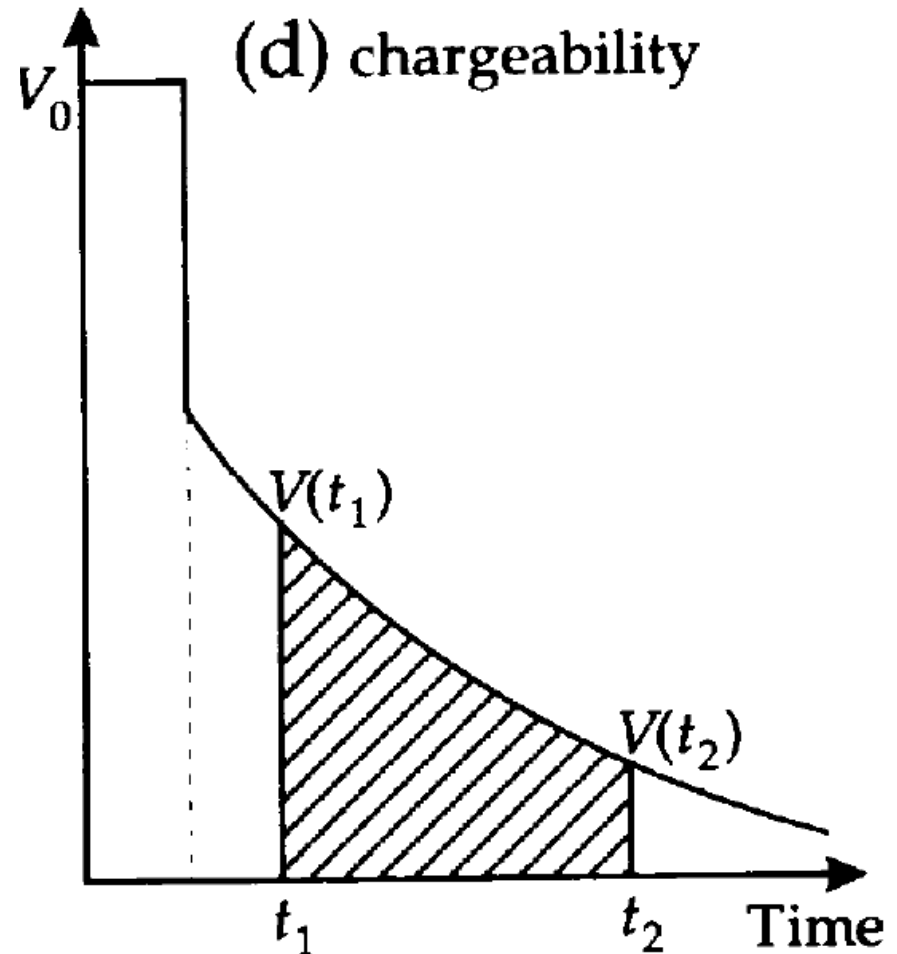
CARGABILIDAD APARENTE:

$$Ma = A / V_0 \text{ (ms)}$$



DOMINIO DE TIEMPO

La cargabilidad se mide en milisegundos y es proporcional a la carga total almacenada en el subsuelo y por lo tanto, es una medida de la concentración del mineral de mena diseminado en las cercanías del tendido de electrodos.



DOMINIO DE FRECUENCIA

Al inyectar corriente al subsuelo, la corriente alcanza un valor máximo casi instantáneamente y luego comienza a decaer a medida que se acumula carga alrededor de la partícula de mena y se opone al flujo de corriente.

Cuando finaliza la acumulación de carga, la corriente tiene un valor estable. Ese valor es el utilizado para calcular la resistividad aparente en los relevamientos de resistividad.

DOMINIO DE FRECUENCIA

Al disminuir la intensidad de la corriente, la resistividad aparente aumenta desde un valor inicial hasta un valor estable. Ese aumento es una medida de la carga acumulada y por lo tanto de la cantidad de mineralización diseminada.

Para medir este cambio de la resistividad aparente se inyecta corriente alterna de distintas frecuencias. Si se inyecta corriente que alterna varias veces por segundo, habrá poco tiempo para que se acumulen cargas.

DOMINIO DE FRECUENCIA

Por lo tanto la resistividad aparente que se mida será muy similar a la inicial. Luego, se inyecta corriente que alterna menos veces por segundo y se mide la resistividad aparente estable.

Es decir que este método involucra la medición de la resistividad aparente con dos o más frecuencias diferentes de corriente alterna.

Dichos valores se utilizan para calcular el EFECTO DE FRECUENCIA.

DOMINIO DE FRECUENCIAS

A mayor frecuencia,
la resistividad aparente es menor
(el sistema tiene menos tiempo de
acumular y/o equilibrar el sobrevoltaje, el
transporte de cargas es inconcluso)

DOMINIO DE FRECUENCIA

EFEECTO DE FRECUENCIA

Utilizando frecuencias de 0,1 Hz y 10 Hz por ej.:

$$EF: (\rho_{0,1} - \rho_{10}) / \rho_{10} \quad (\text{no tiene unidades})$$

Si no existe el efecto de PI no hay diferencias en los valores de resistividad aparente y $EF=0$

A veces EF se multiplica por 100 para dar el porcentaje del efecto de frecuencia PFE.

DOMINIO DE FRECUENCIA

FACTOR METÁLICO:

El valor calculado para EF depende en parte del valor de resistividad aparente de la roca que alberga la mena. Por ej. si la resistividad del agua poral disminuyera a la mitad por influjo de agua salada, la resistividad aparente estable también disminuiría a la mitad y el EF variaría sin cambio en la mineralización.

Por lo tanto, una mejor medida de la mineralización sería el aumento de la conductividad debido a la mineralización, expresada como Factor Metálico.

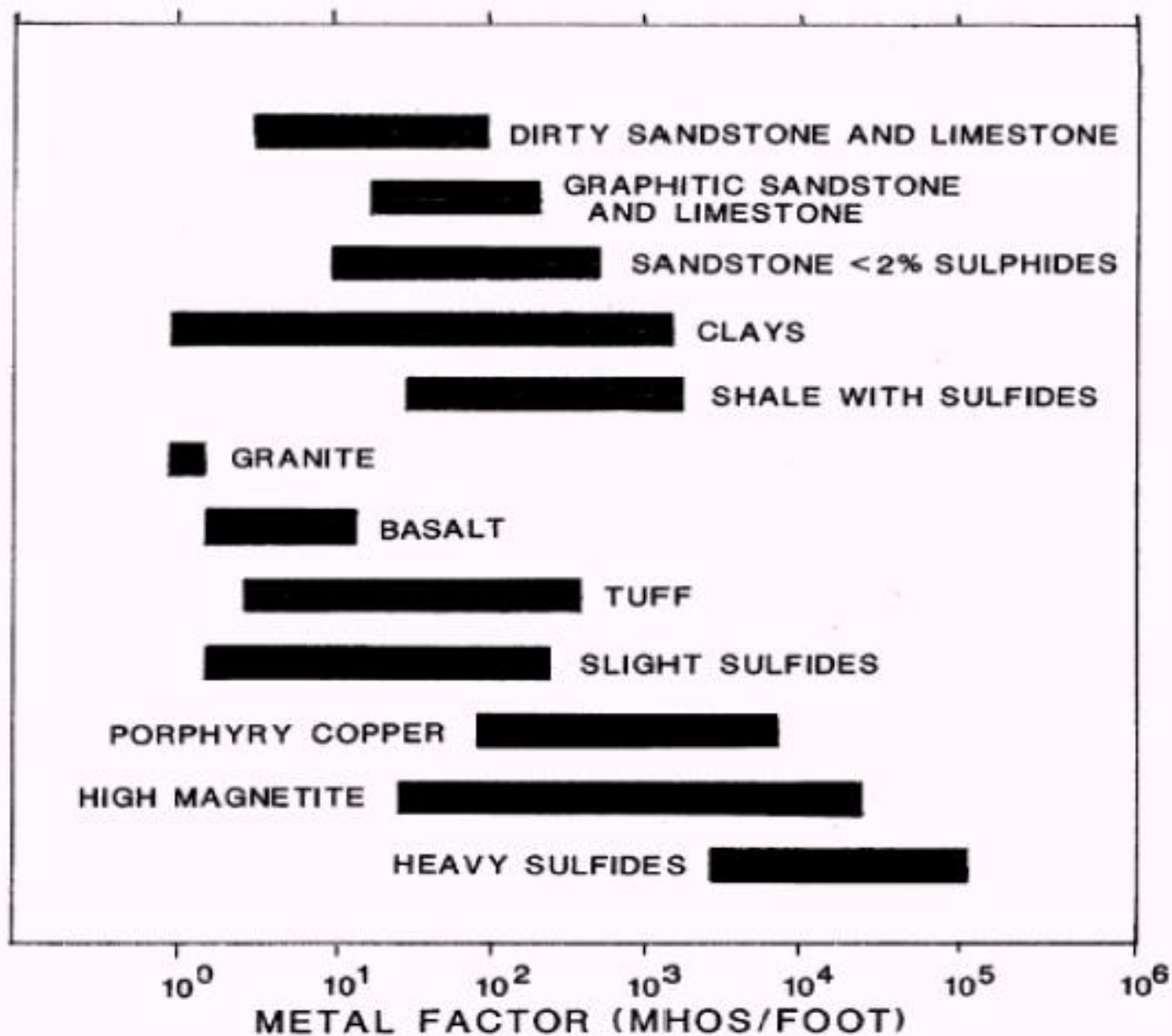
DOMINIO DE FRECUENCIA

FACTOR METÁLICO:

$$FM: 2\pi 10^5 (\rho_{0,1} - \rho_{10}) / \rho_{10} \rho_{0,1}$$

Para resistividad aparente medida a 0,1Hz y 10 Hz

$2\pi 10^5$ se inserta para convertir valores muy pequeños de FM en números más convenientes.



RELEVAMIENTO DE IP

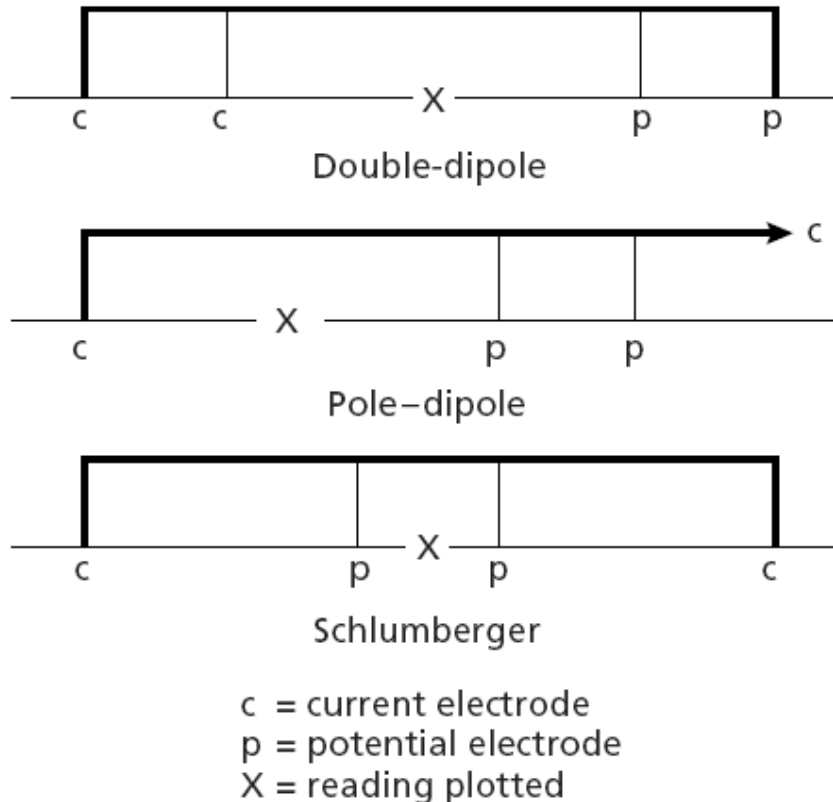


Fig. 8.33 Electrode configurations used in induced polarization measurements.

Normalmente se realizan perfiles. También puede generarse una pseudosección utilizando tendidos de tipo dipolo-dipolo, polo-dipolo o Schlumberger variando la separación entre electrodos. También pueden tomarse lecturas en una grilla y se generan isolíneas.

RELEVAMIENTO DE IP

Como el potencial generado por IP es mucho menor que el voltaje entre los electrodos de potencial mientras fluye la corriente (que es el valor medido en resistividad), se deben utilizar corrientes mucho mayores que las usadas para resistividad, hasta de 10 A, más de 10 veces mayores comparadas con una fracción de A para los relevamientos de resistividad.

Para proveer esta corriente es necesario contar con generadores. Hay que ser muy cuidadoso con shocks y electrocución.

REDUCCIÓN DE DATOS Y DISPLAY

La reducción de datos e interpretación en IP es simple. Sólo se plotean los valores de cargabilidad, PEF, FM, como un perfil o en una grilla y se seleccionan lugares aptos para perforar.

Si se utilizó espaciado de electrodo variable, se plotea un pseudocorte para dar una mejor idea de como varía la concentración de la mena con la profundidad.

REDUCCIÓN DE DATOS Y DISPLAY

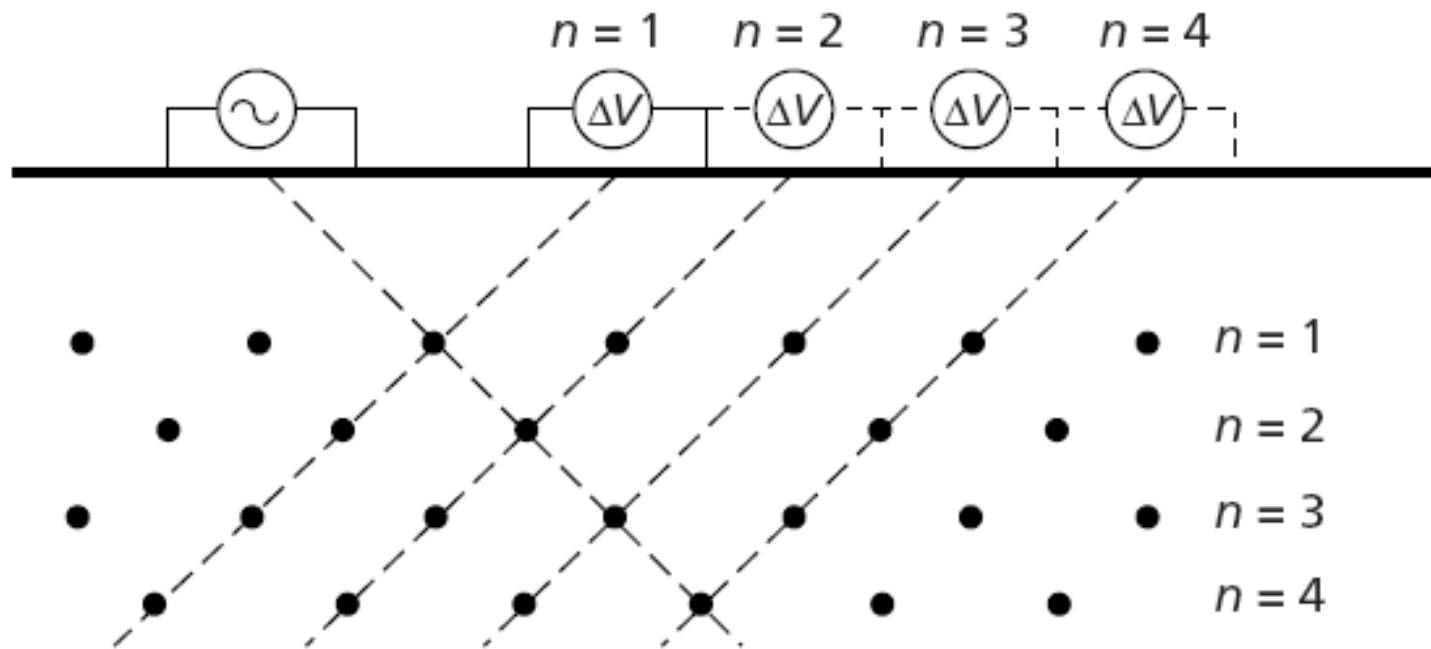


Fig. 8.31 The presentation of double-dipole IP results on a pseudosection. n represents the relative spacing between the current and potential electrode pairs.

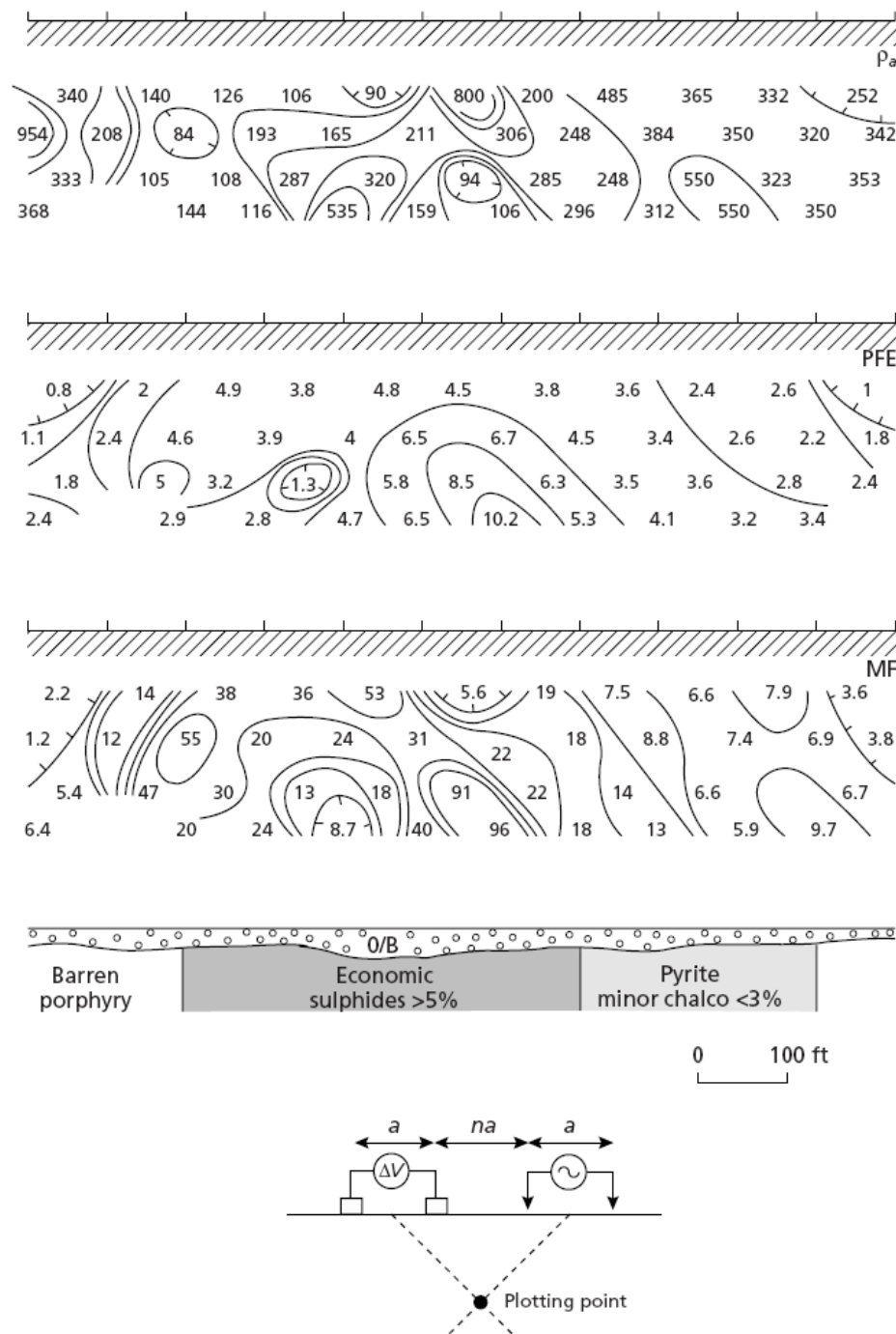


Fig. 8.32 Pseudosections of apparent resistivity (ρ_a), percentage frequency effect (PFE) and metal factor parameter (MF) for a double-dipole IP traverse across a zone of massive sulphides whose shape is known from subsequent test drilling. Current and potential electrode spacing a was 100 feet (30.5 m). Frequencies used for the IP measurements were 0.31 and 5.0 Hz. (After Fountain 1972.)

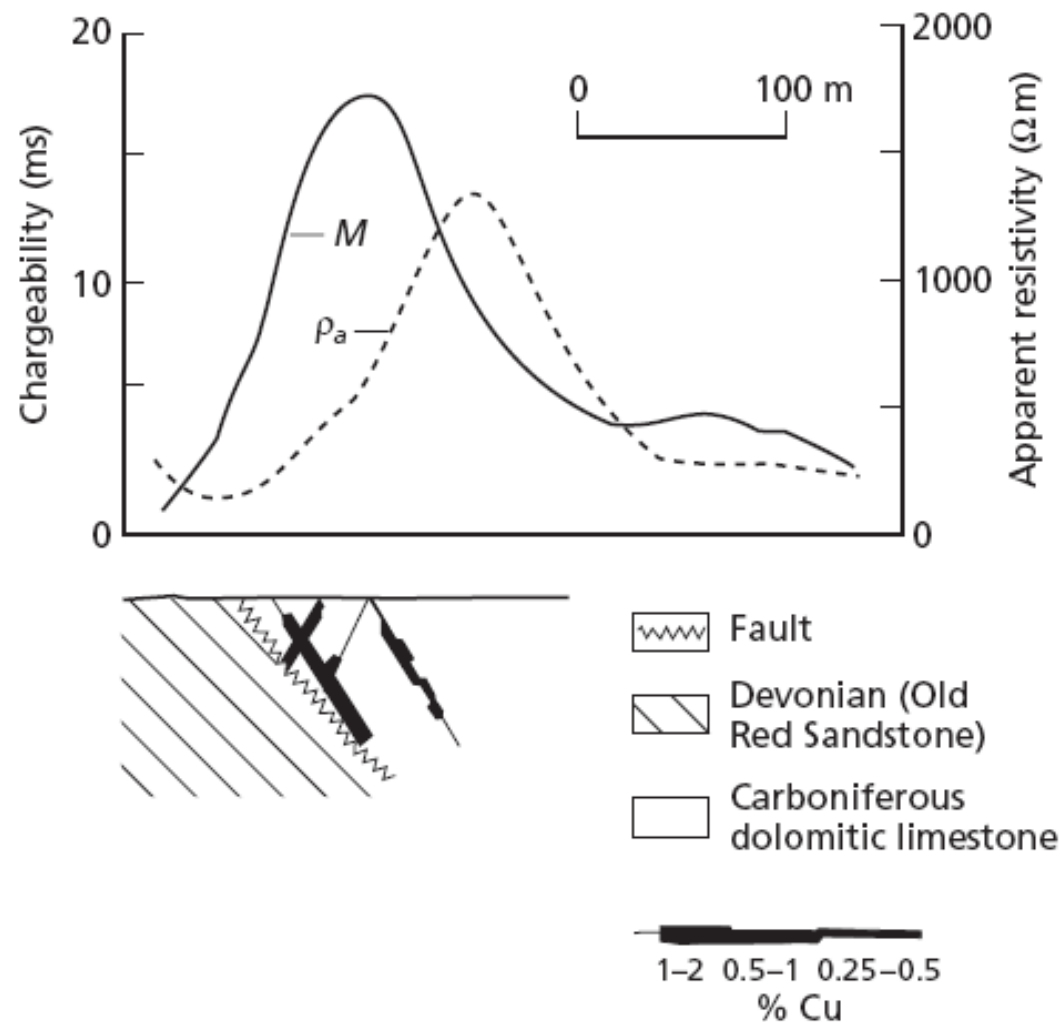


Fig. 8.34 Time-domain IP profile using a pole-dipole array over the Gortdrum copper-silver body, Ireland. (After Seigel 1967.)

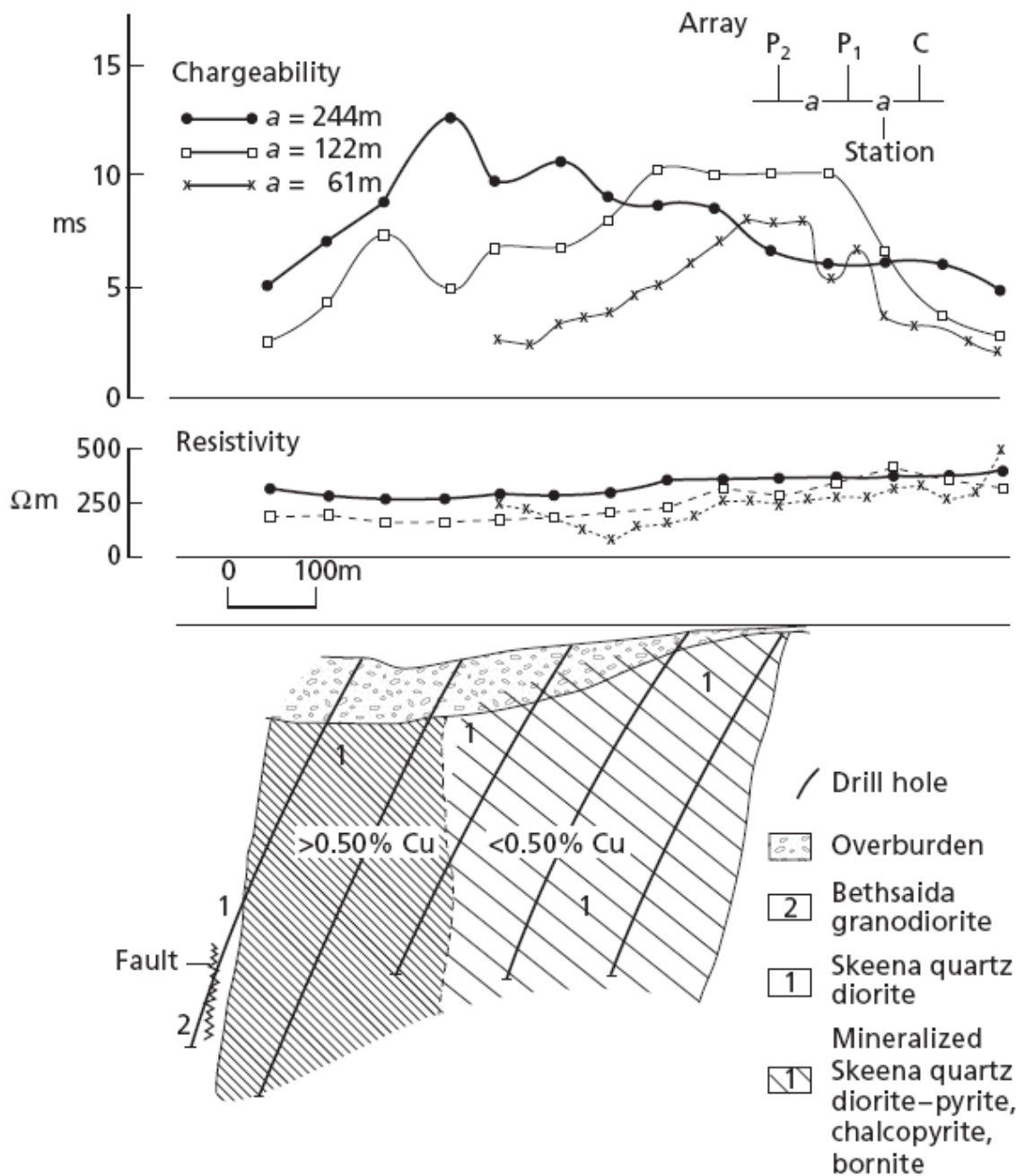
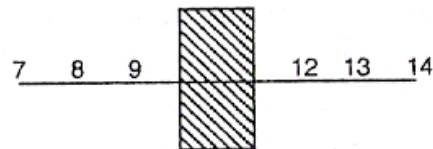


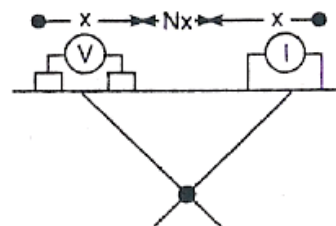
Fig. 8.35 Time domain induced polarisation and resistivity profiles over a copper porphyry body in British Columbia, Canada. (After Seigel 1967.)

PLAN VIEW

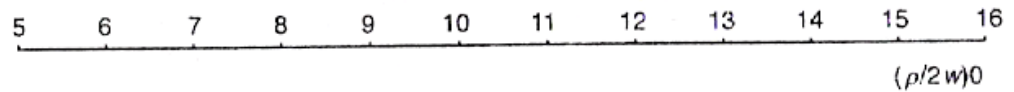


DIMENSIONS OF SOURCE

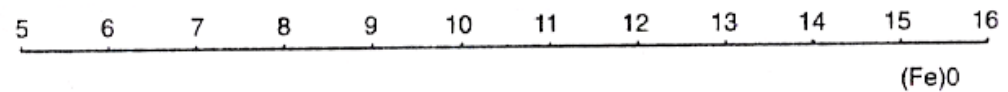
$$1\frac{1}{4} \times 2\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \text{ UNITS}$$



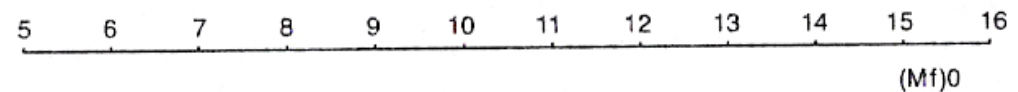
X EQUALS 1 UNIT



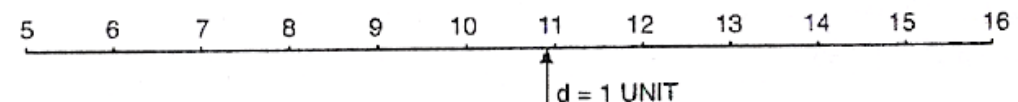
N-1	250	250	250	235	232	235	250	250	250			
N-2	250	252	251	219	214	214	219	252	252	250		
N-3	250	254	250	210	218	242	219	210	250	254	250	
N-4	250	234	250	207	223	258	258	224	207	250	254	250



N-1	0	0	0	02	02	02	0	0	0			
N-2	0	0	0	04	08	08	04	0	0	0		
N-3	0	0	0	03	05	02	05	03	0	0	0	
N-4	0	0	0	06	02	0	0	02	06	0	0	0



N-1	0	0	0	09	09	09	0	0	0			
N-2	0	0	0	18	37	37	18	0	0	0		
N-3	0	0	0	14	23	04	23	14	0	0	0	
N-4	0	0	0	29	09	0	0	09	29	0	0	0



$$\begin{aligned} (\rho/2w)_1 &= 250 \\ (Mf)_1 &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\rho/2w)_2 &= 0 \\ (Mf)_2 &= 1250 \\ (Fe)_2 &= 125\% \end{aligned}$$

PLAN VIEW

6 8 10 12 14

x Nx x

V I

X EQUALS 1 UNIT

5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16

$(\rho/2w)_0$

N-1	10	10	10	99	93	99	10	10	10			
N-2	10	10	10	97	91	91	97	10	10	10		
N-3	10	10	10	97	92	92	92	97	10	10	10	
N-4	10	10	10	96	93	93	93	93	96	10	10	10

5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16

(Fe)0

N-1	0	0	-03	0	35	0	-03	0	0
N-2	0	0	-08	0	36	36	0	-08	0
N-3	0	0	-08	05	45	45	46	05	-08
N-4	0	0	-07	08	42	51	51	42	07

5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

(Mf)0

N-1 — 0 0 -30 0 376 0 -30 0 0

N-2 — 0 0 -79 0 417 417 0 -79 0 0

N-3 — 0 0 -79 52 490 490 501 52 -79 0 0

N-4 — 0 0 -70 83 462 546 555 462 76 -71 0 0

$$\begin{aligned}(\rho 2 w)_1 &= 10 \\ (M f)_1 &= 0\end{aligned}$$
$$(\rho_2 w)_2 = 241$$
$$(Mf)_2 = 22800$$
 $(\text{Fe})_2 = 55\%$

DEPTH EXTENT OF SOURCE
4 UNITS

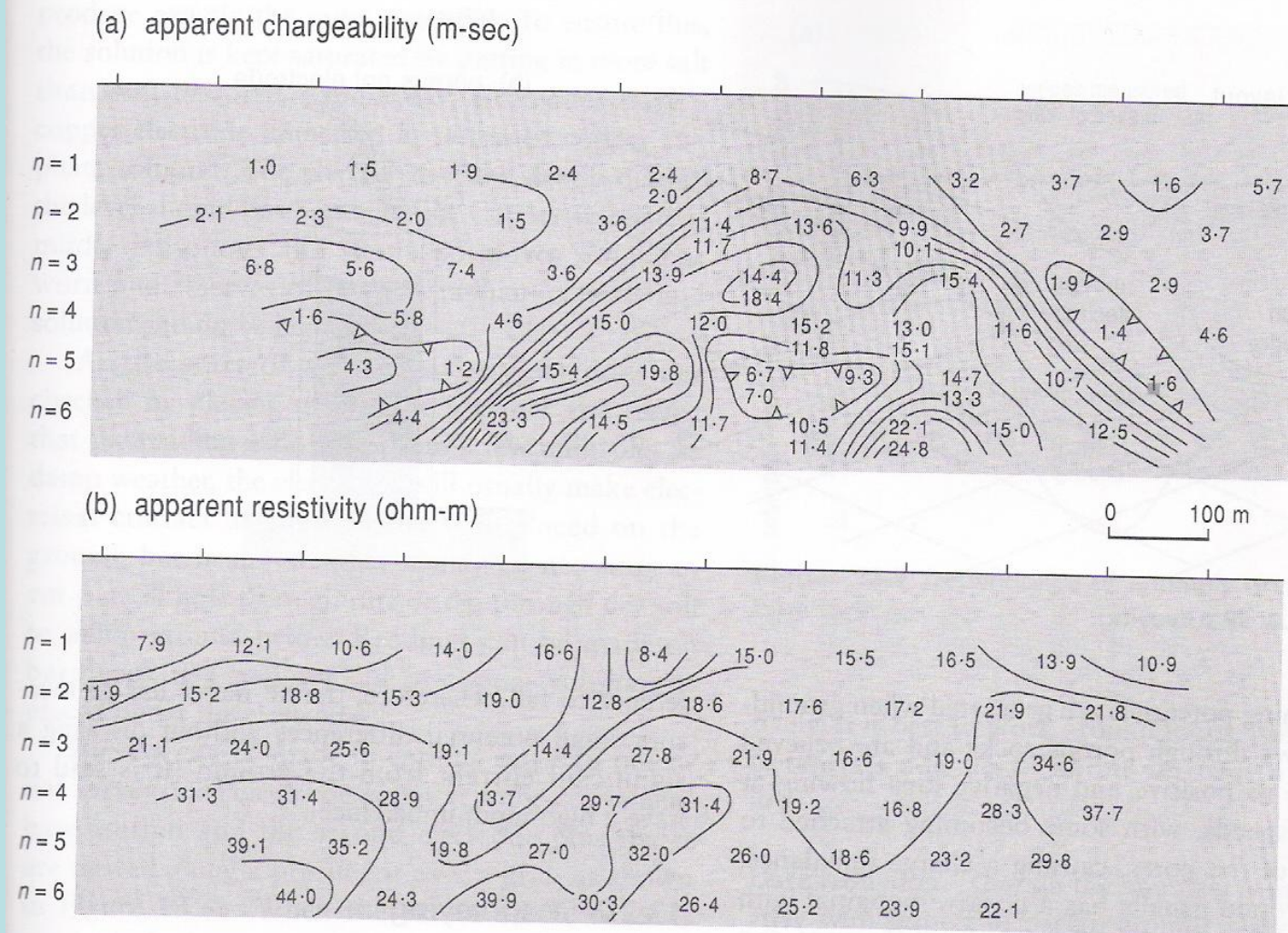
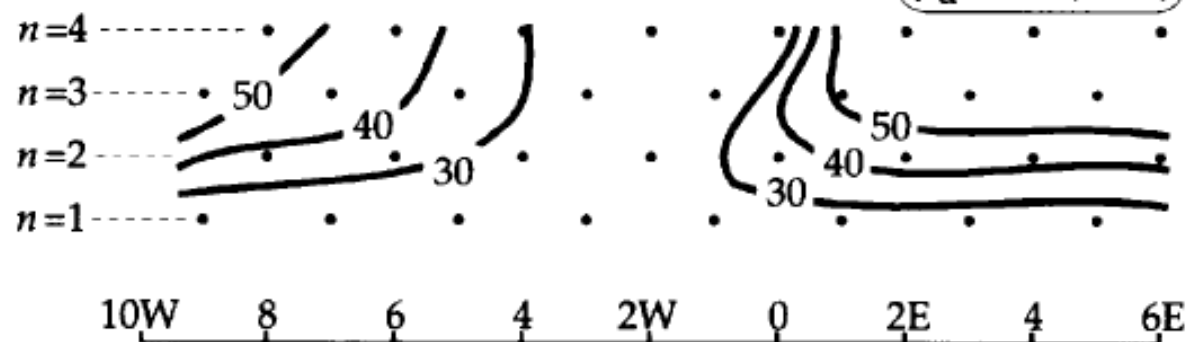


Figure 13.4 IP and resistivity pseudosections, Elura.

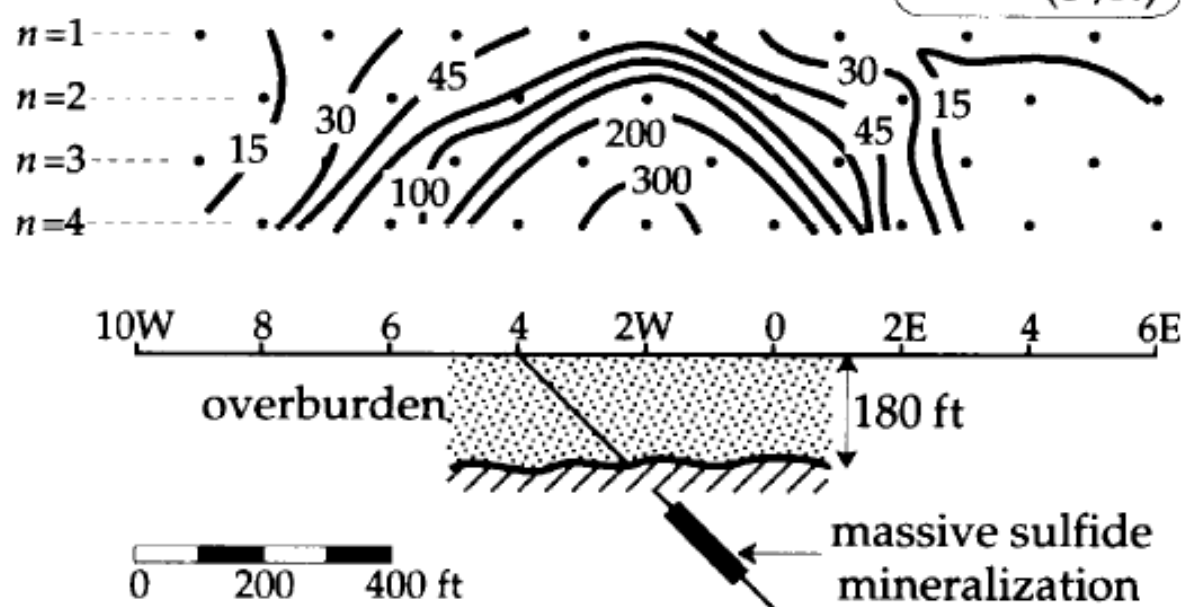
Cargabilidad: V invertida o “pant-leg”: indica presencia de mena concentrada. Esta distorsión también ocurre en zonas pequeñas de muy baja resistividad.

(b)

apparent resistivity



metallic factor



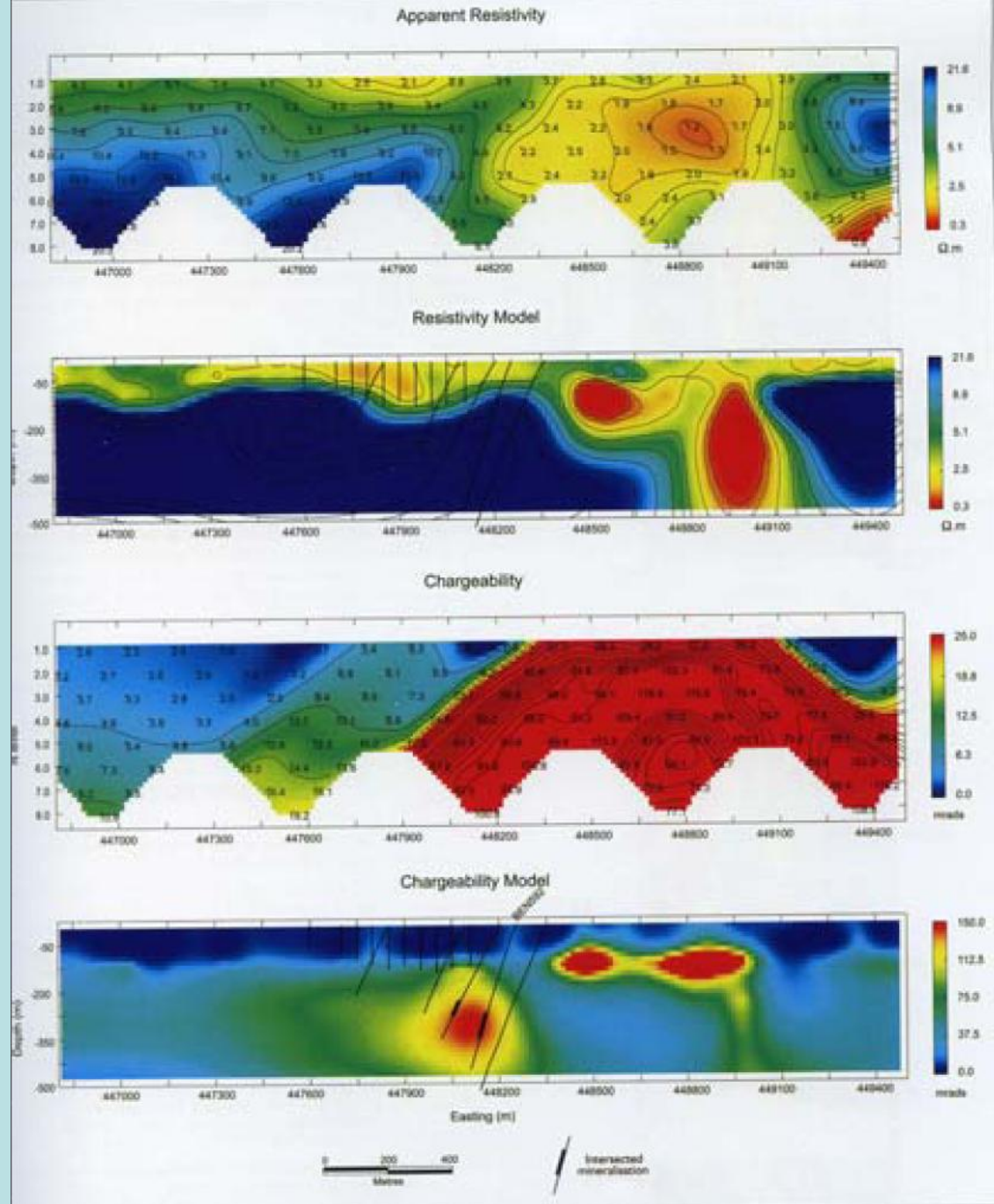
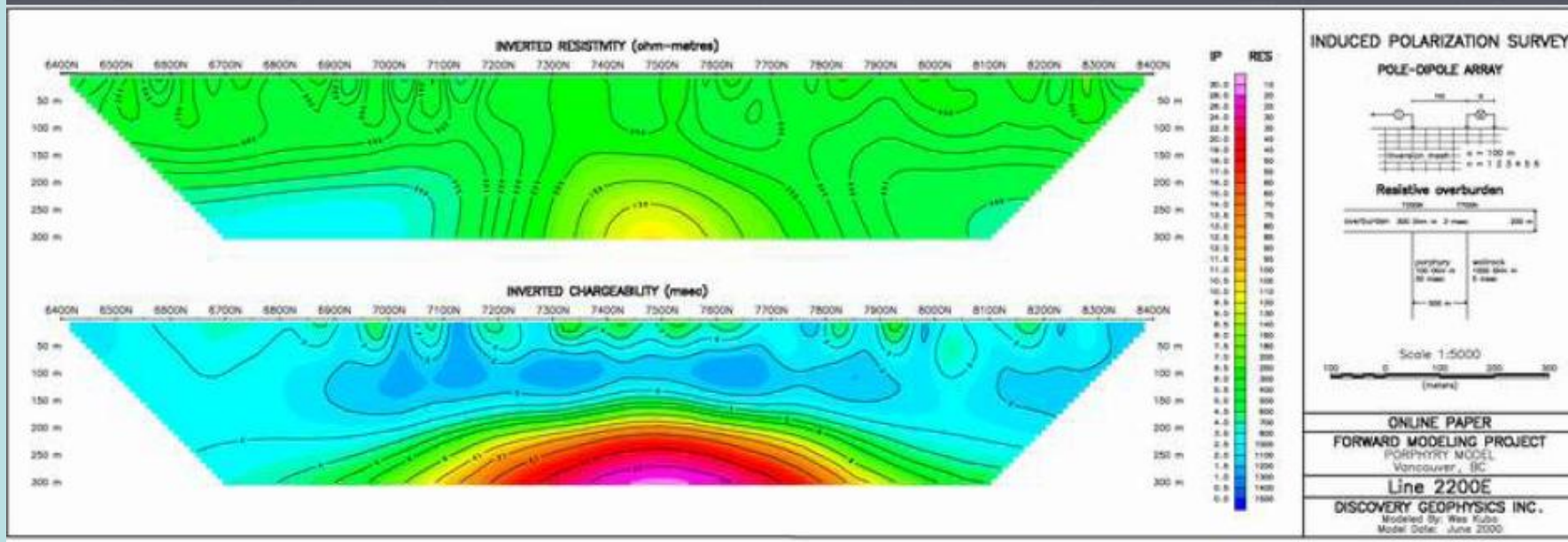
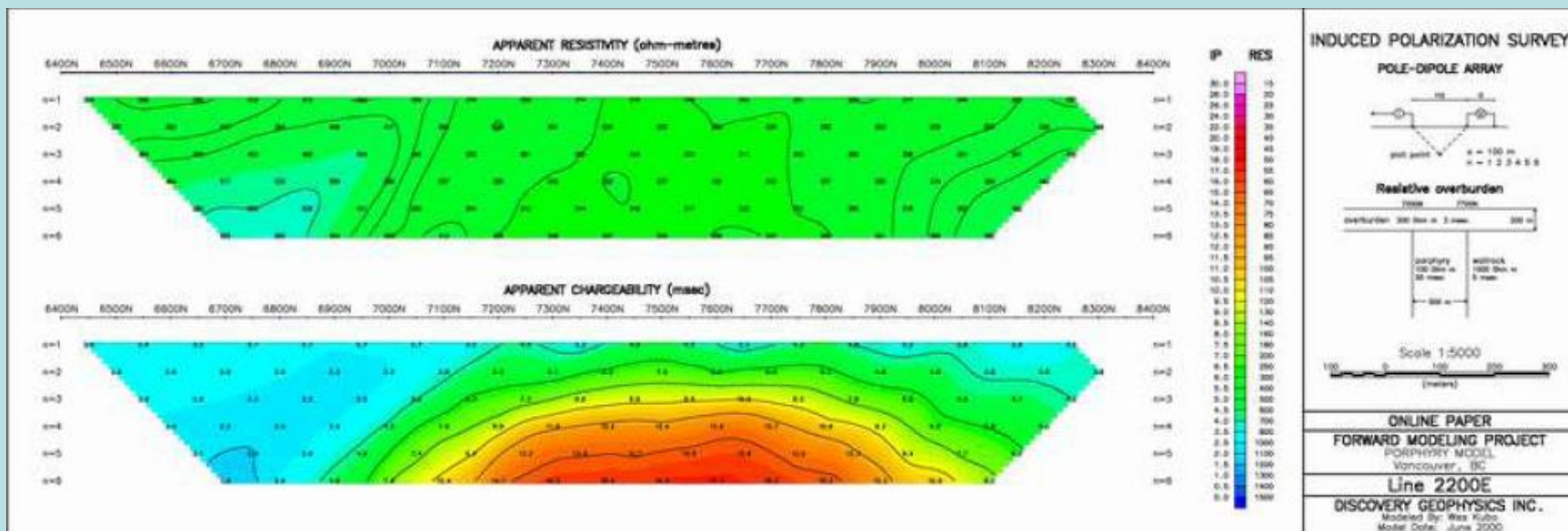


Fig.3. CRIP pseudosections and cross-sections derived from inverse modelling, North Portia, (line 6,522,600N). See Figure 7 for location.



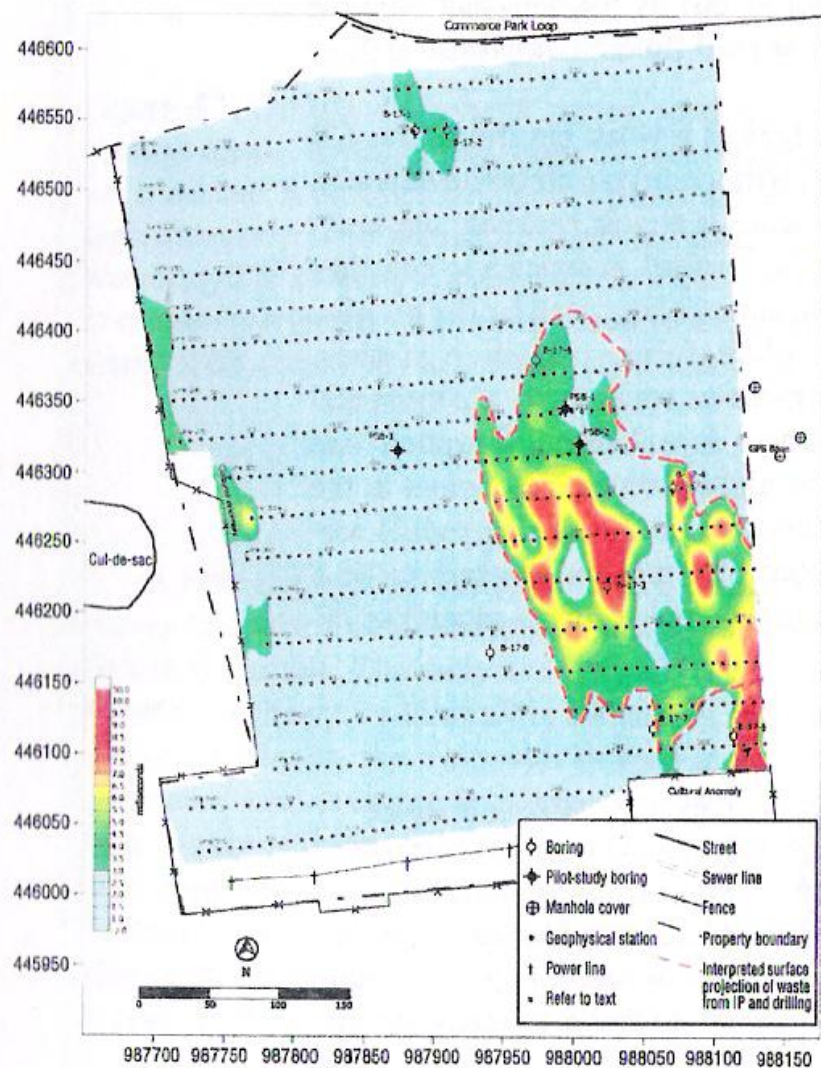


Figure 35. Inverted IP survey results over Lot 17 of the Rio Nuevo Landfill, Tucson, Arizona, showing a plan-view slice at a depth of 6.1 m below the surface.

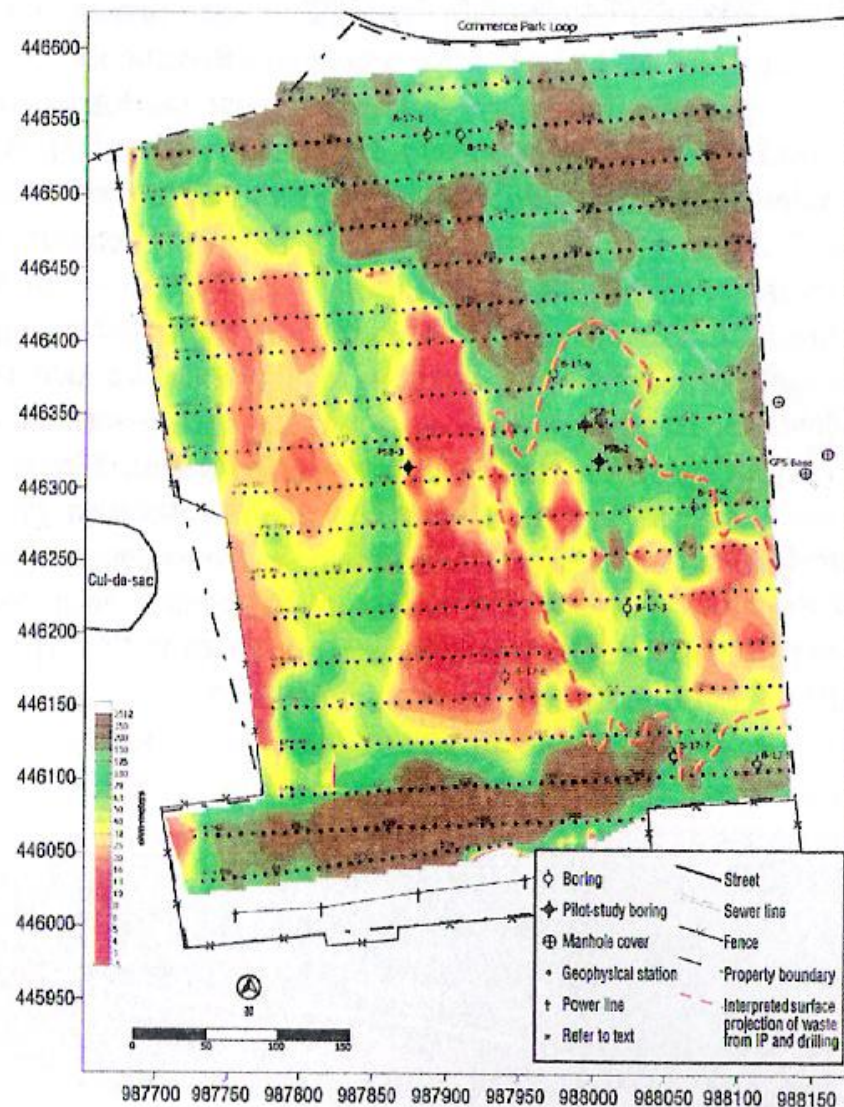
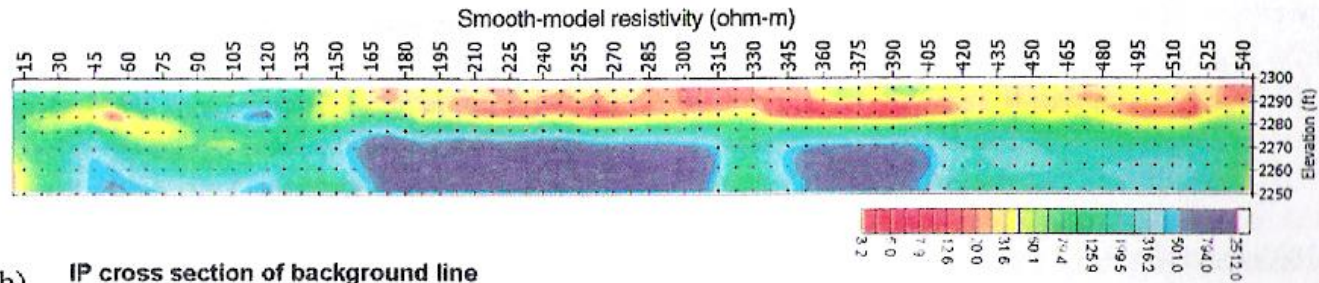
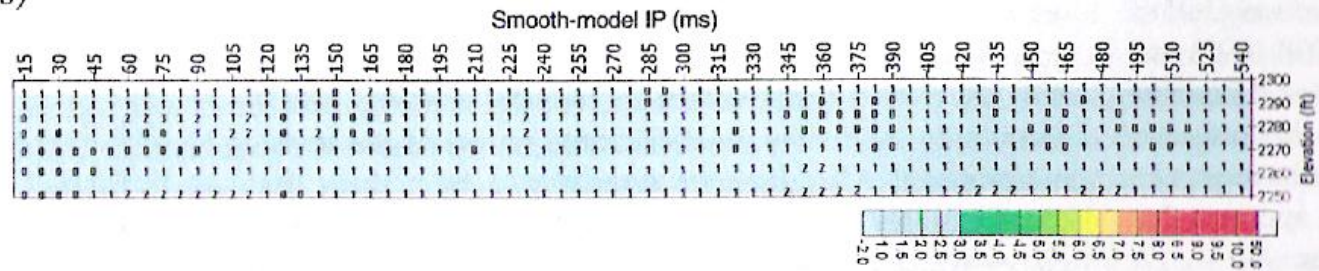


Figure 36. Inverted resistivity survey results over Lot 17 of the Rio Nuevo Landfill, Tucson, Arizona, showing a plan-view slice at a depth of 6.1 m below the surface.

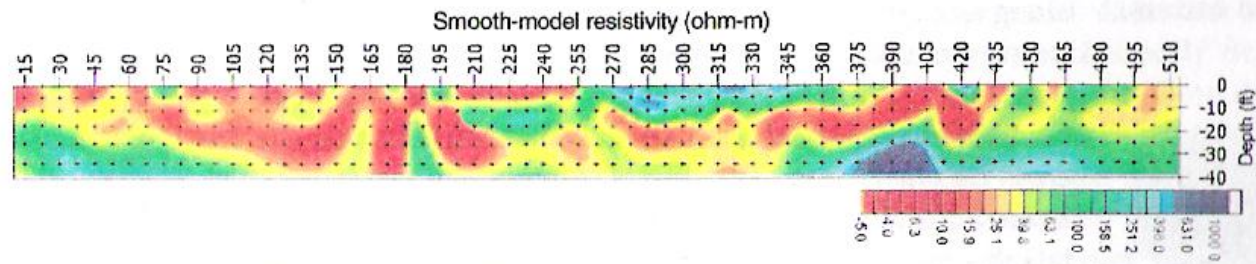
a) Resistivity cross section of background line



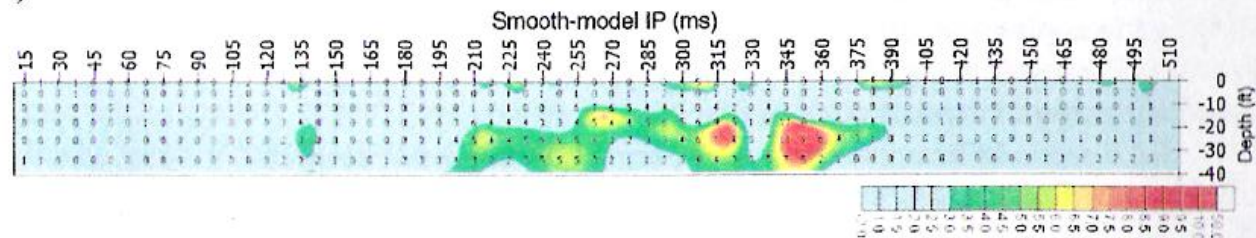
b) IP cross section of background line



c) Resistivity cross section of anomalous, disturbed area



d) IP cross section of anomalous, disturbed area



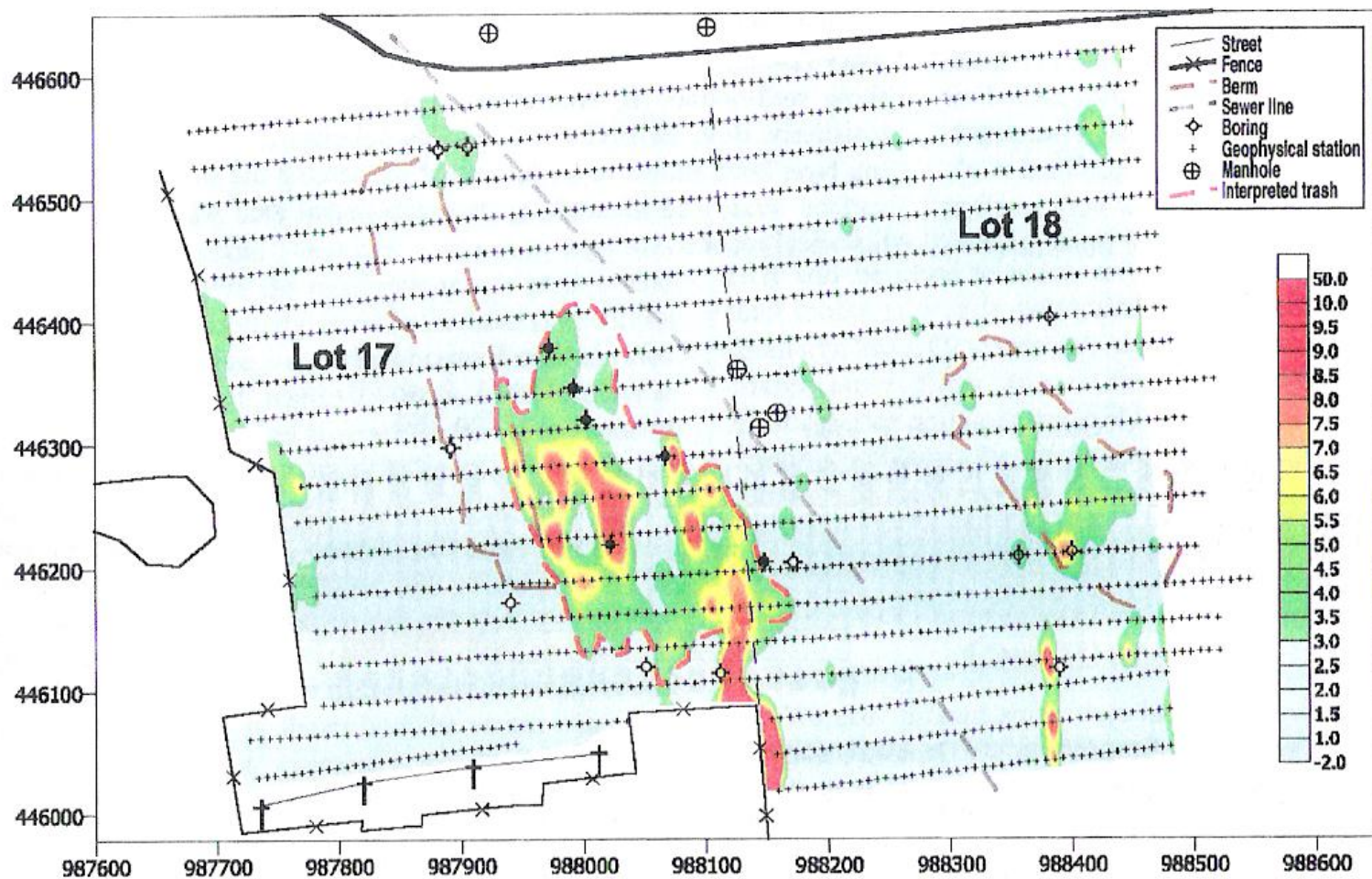
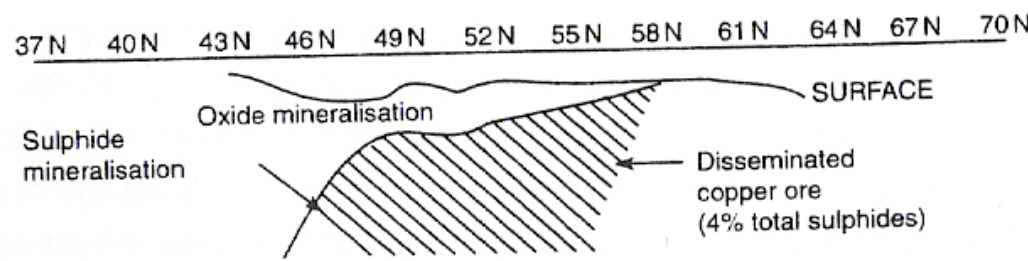
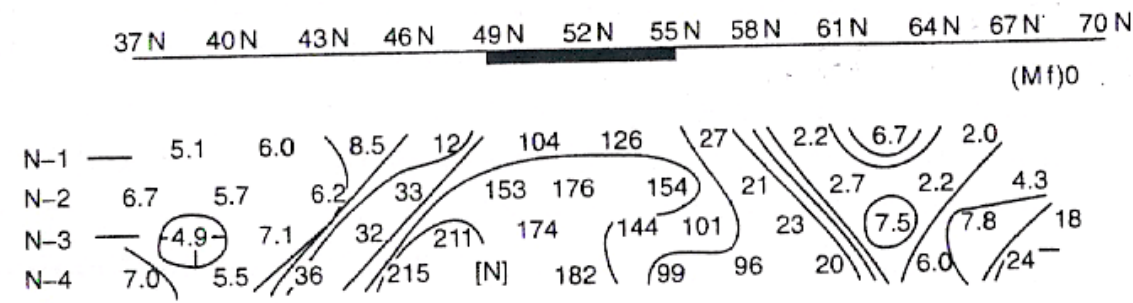
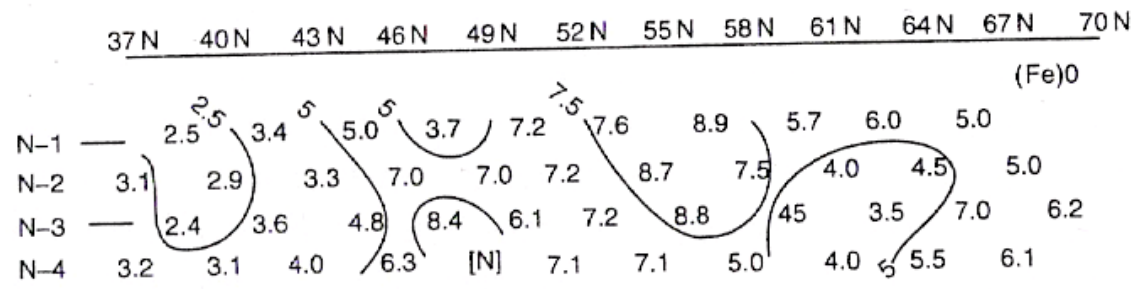
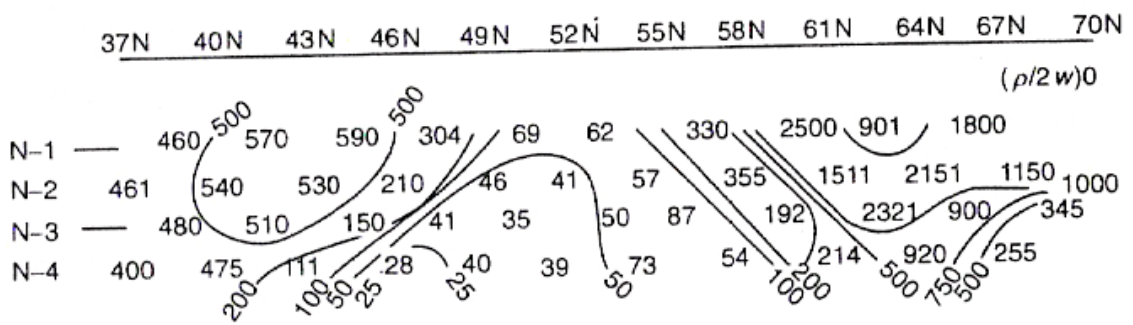


Figure 6. Plan view of the 2D IP inversion for the entire Rio Nuevo site at a depth of 6.1 m. These results required more than 14 000 measurements at 3767 locations along lines spaced 9.1 m apart (black dots). The dashed orange line outlines the interpreted waste location. (taken from Carlson et al., 1999).

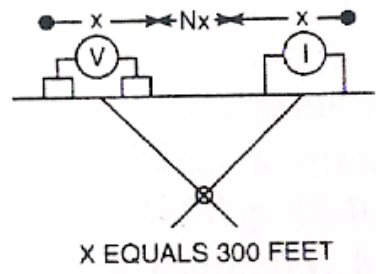
Cobre diseminado

Canadá



LINE - 31 N

FREQUENCIES - 0.31 & 2.5 CPS



MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Activos:

Dominio de Frecuencias (FEM)

Dominio de Tiempo (TEM)

Transmisores Remotos (VLF)

Georadar (GPR)

Pasivos:

Magnetotelúrica (MT)

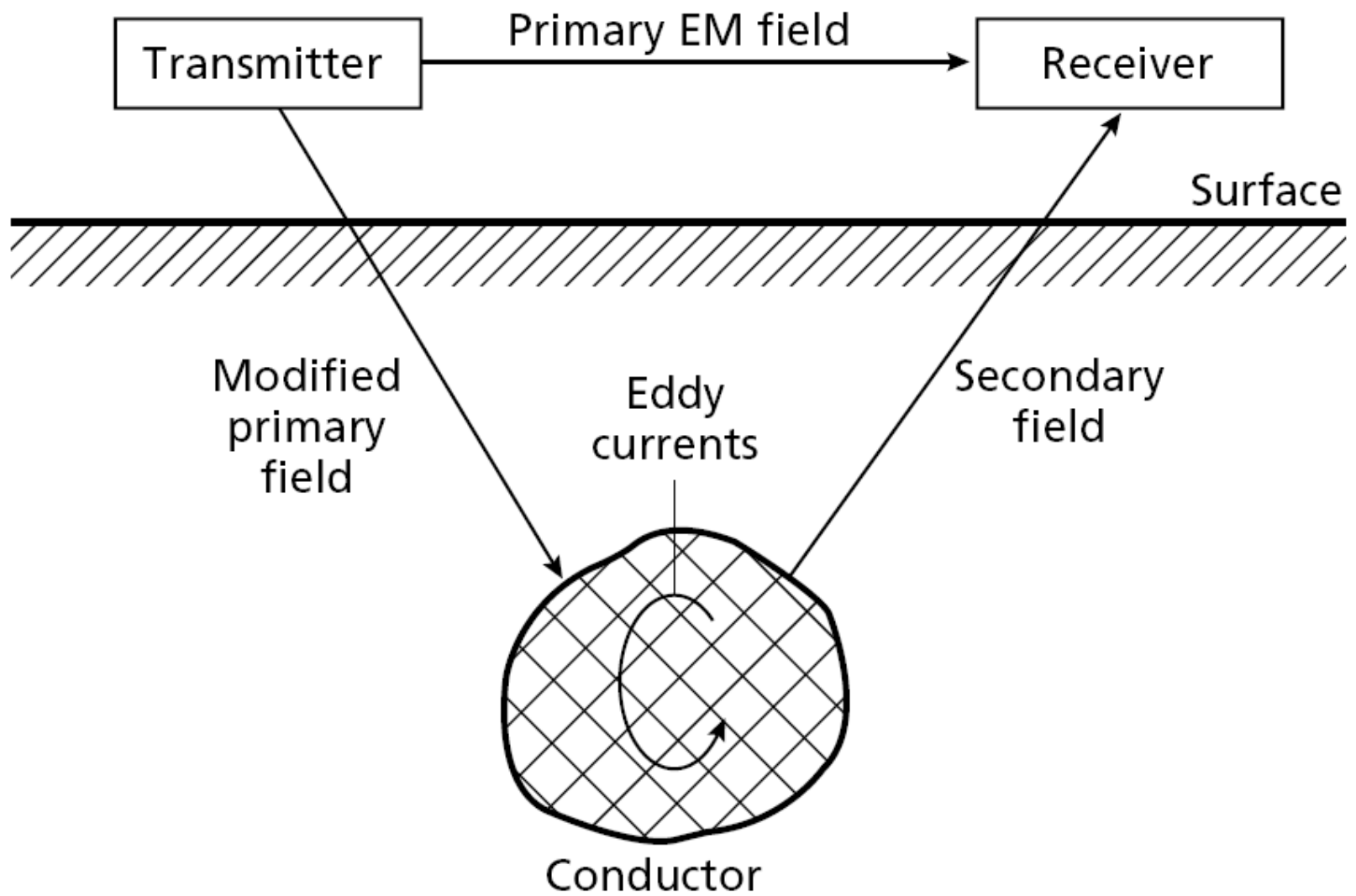
PRINCIPIOS BÁSICOS:

Se basan en la respuesta del subsuelo a la propagación de campos electromagnéticos.

Se genera campo electromagnético primario pasando corriente alterna a través de una bobina.

El subsuelo responde generando un campo electromagnético secundario.

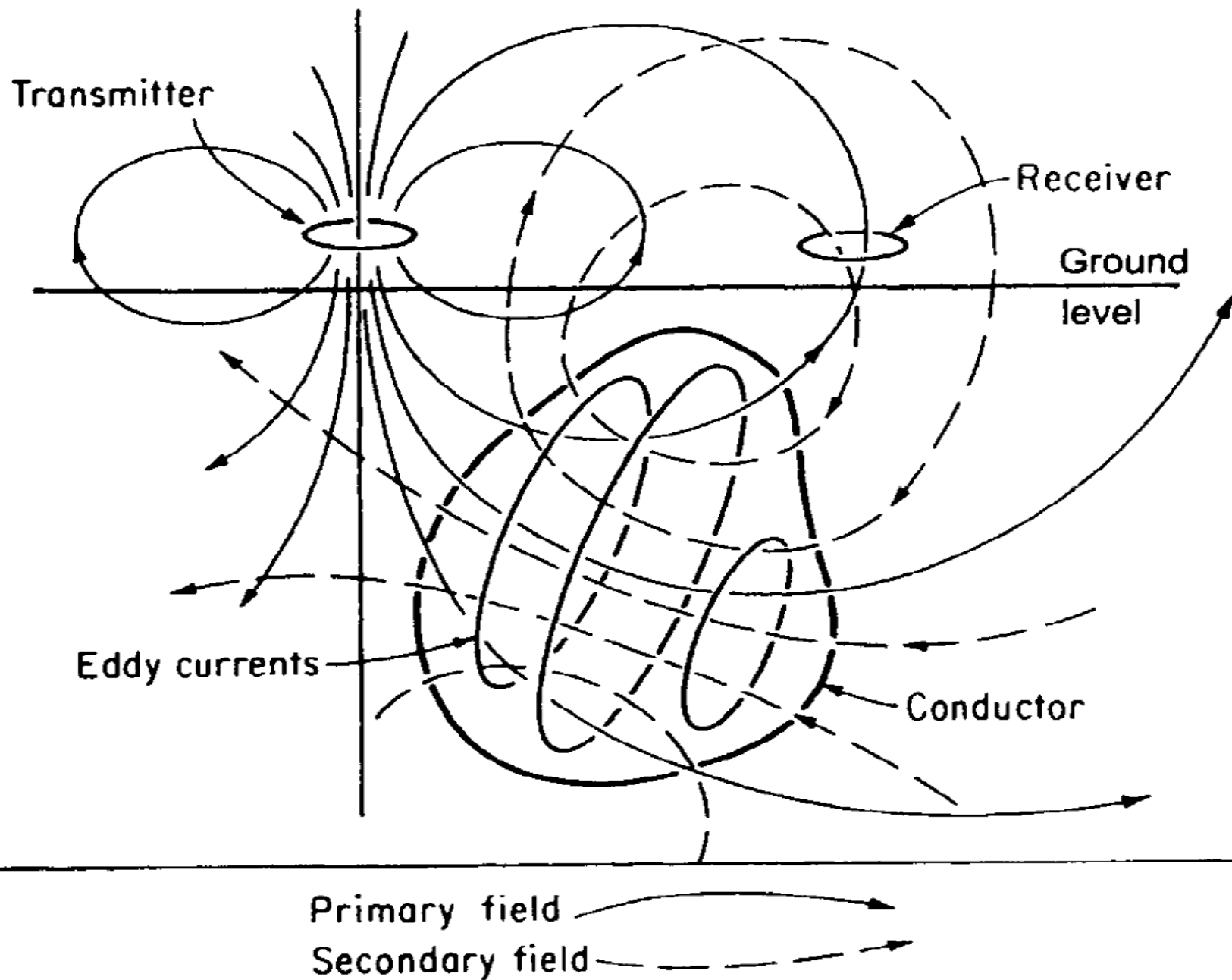
Dicho campo induce corrientes alternas en una bobina receptora.



PRINCIPIOS BÁSICOS:

Si el subsuelo es homogéneo no existe mucha diferencia entre los campos que se propagan sobre y debajo de la superficie, sólo pequeña reducción de amplitud.

En presencia de cuerpo conductor, la componente magnética del CE que penetra en el subsuelo, induce corrientes alternas que fluyen en el conductor. Dichas corrientes generan su propio CE que viaja hasta el receptor.



PRINCIPIOS BÁSICOS:

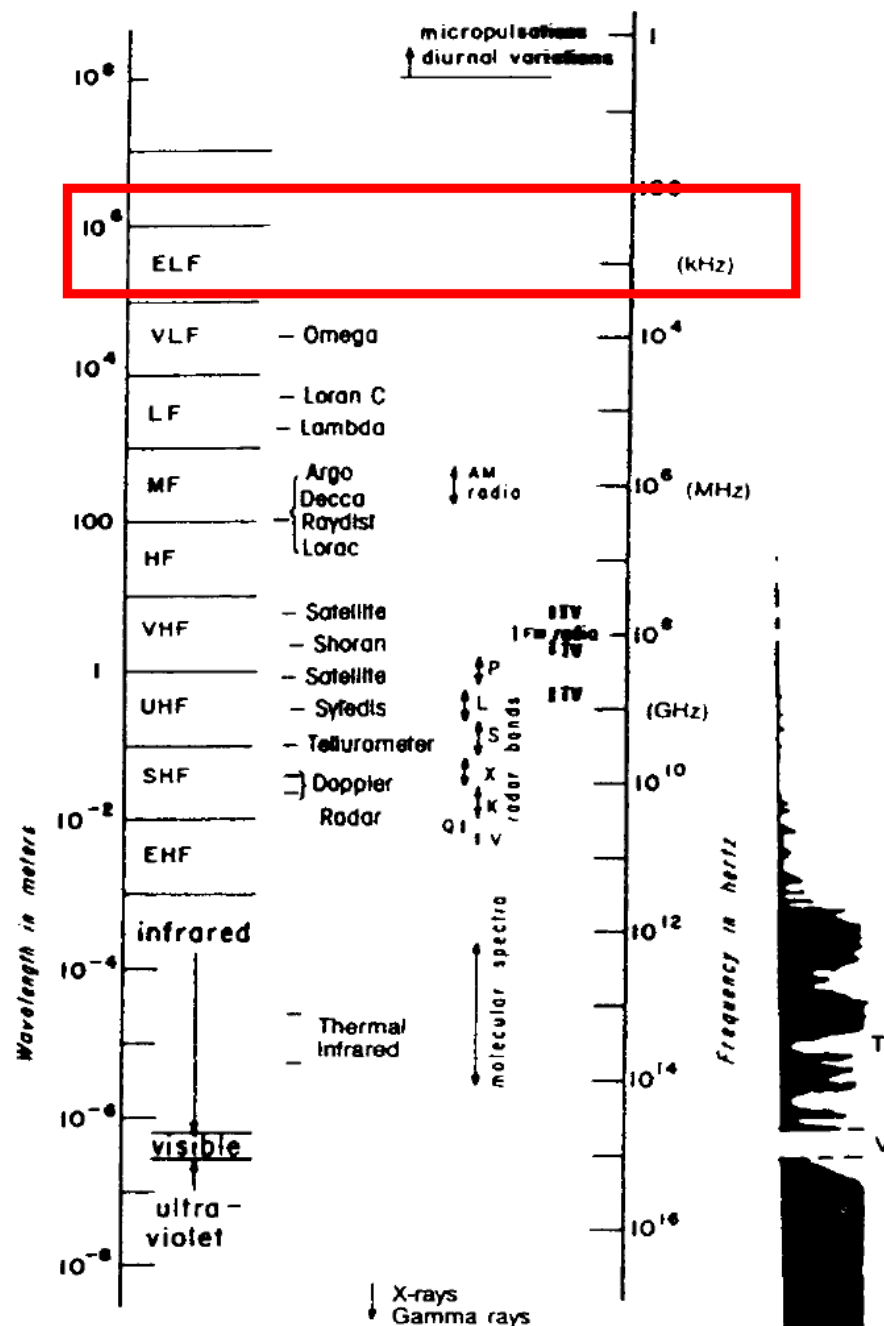
La bobina receptora responde a la resultante de los campos primarios y secundarios que llegan a ella, por lo que la respuesta difiere en amplitud y en fase de la respuesta del campo primario. Estas diferencias entre CE transmitidos y recibidos revelan la presencia de cuerpos conductores, y dan información sobre su geometría y propiedades eléctricas.

PRINCIPIOS BÁSICOS:

La inducción de flujo de corriente resulta de la componente magnética del CE. No hay necesidad de contacto físico entre transmisor o receptor y subsuelo. Relevamientos aéreos.

Se utiliza conductividad (recíproca de resistividad) $\sigma=1/\rho$ (Siemens/m).

Cualquier cuerpo anómalo con alta conductividad genera CE secundario intenso.



Métodos EM

Frecuencias de 100 a 3000 Hz (ciclos/seg).

Longitudes de onda de cientos-miles de km

PRINCIPIOS BÁSICOS:

Para interpretar resultados hay que determinar como depende la señal en el receptor del tipo de material, forma y profundidad del blanco y del diseño y posiciones del transmisor y del receptor.

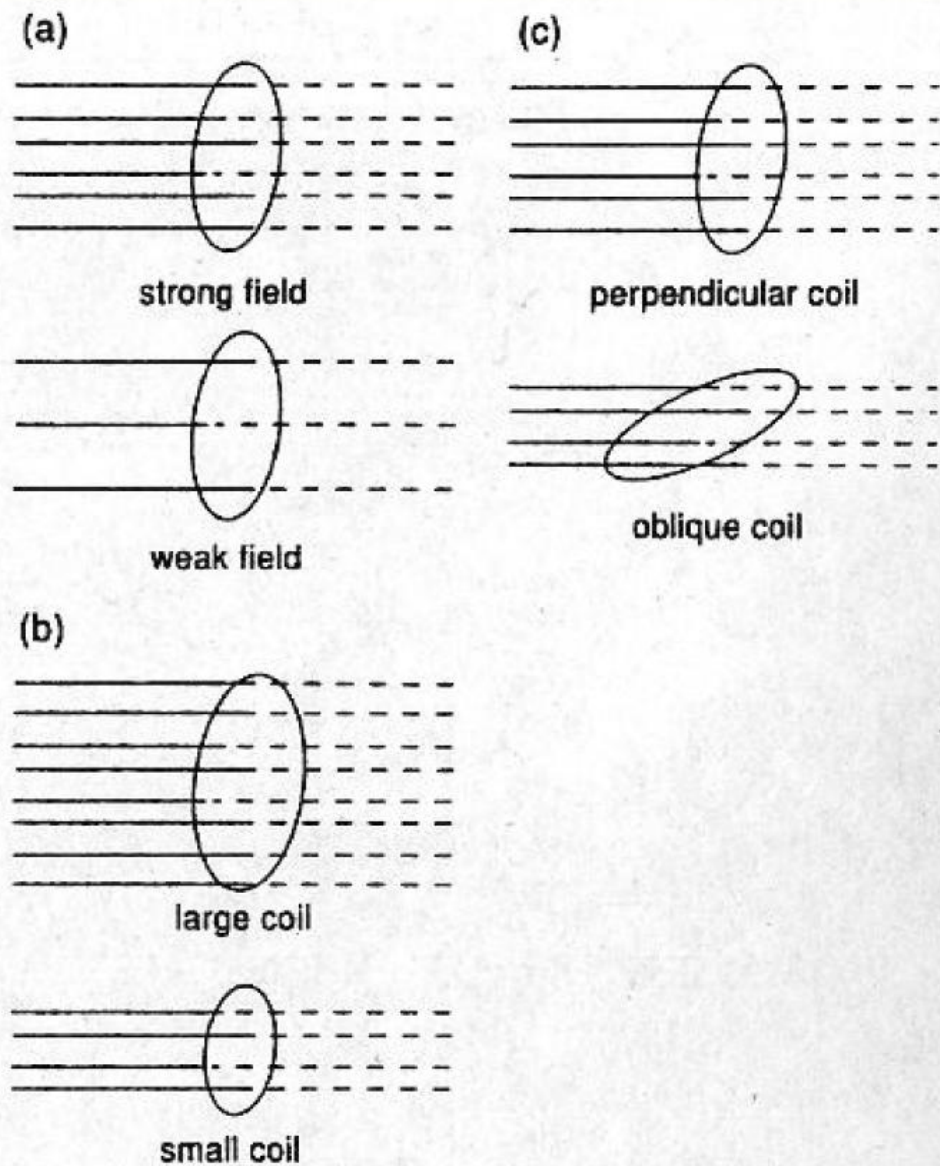
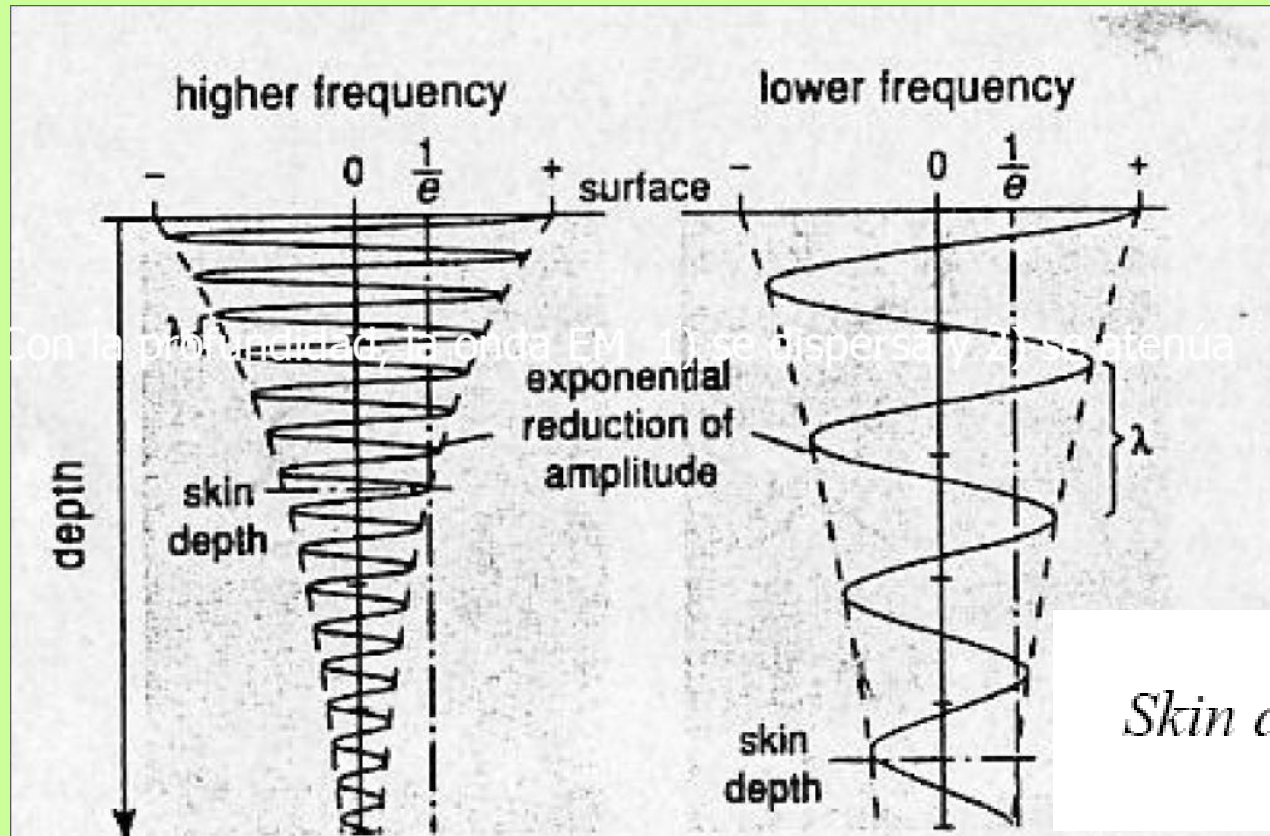


Figure 14.2 Flux through a coil.

Factores que afectan la señal recibida (depende de la intensidad de corriente inducida en el blanco por el transmisor):

- El número de líneas de campo magnético que atraviesan el blanco (flujo magnético) (depende de 1. intensidad del CM, 2. área del blanco, 3. ángulo del blanco con respecto al CM)
- La tasa de cambio de ese número de líneas (frecuencia)
- La conductividad (propiedad intrínseca del material)
- La intensidad del CM a su vez depende de la potencia del Tx, y de la distancia entre Tx y blanco ("factor geométrico")

Absorción y atenuación de ondas electromagnéticas

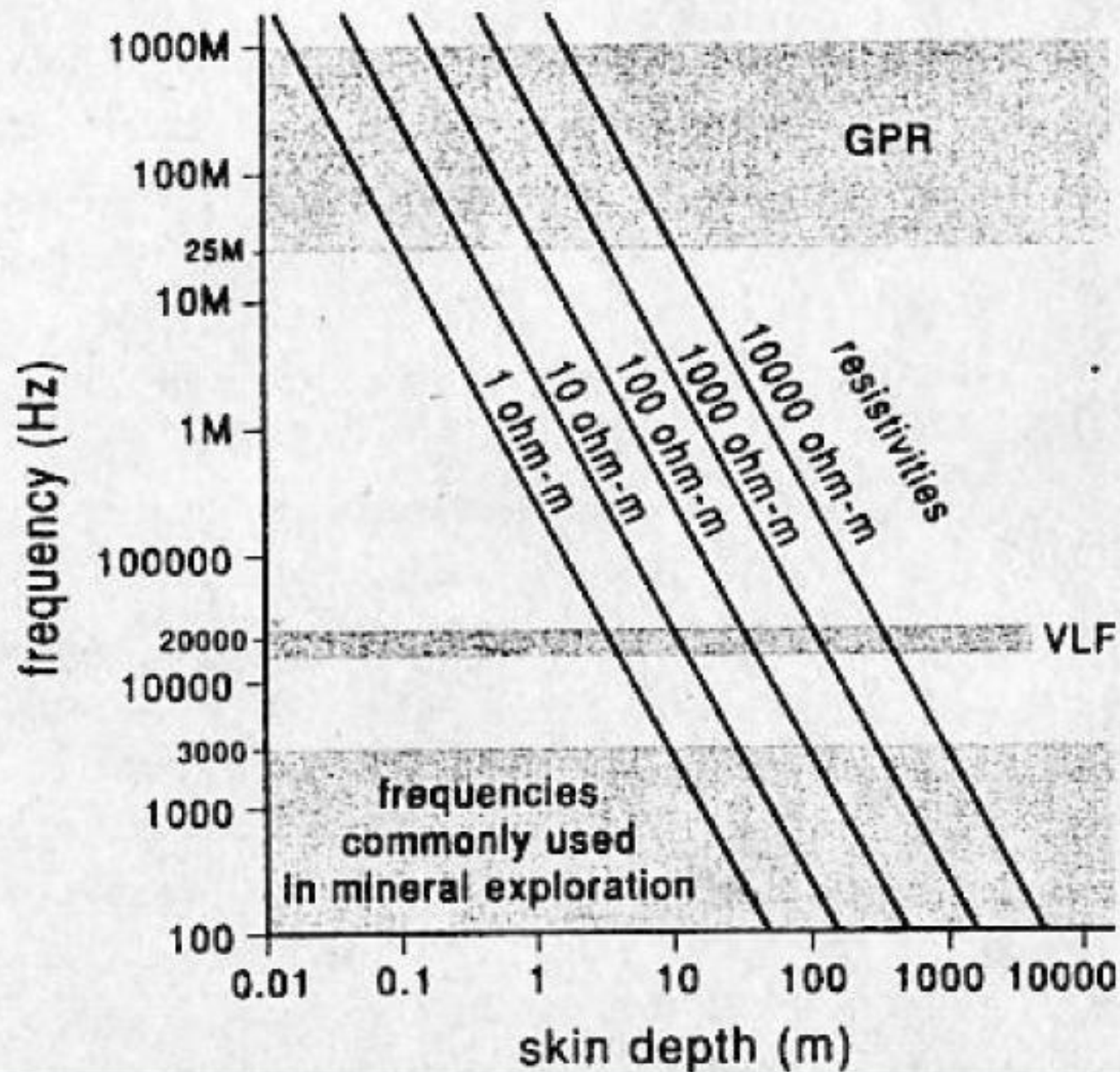


Con la profundidad la onda EM se atenúa debido a dispersión y absorción

$$\text{Skin depth} = 500 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}}$$

Skin Depth:

Profundidad a la cual la amplitud se reduce a $1/e$. Penetración es función de frecuencia y de conductividad



Sistema Slingram: Tx y Rx conectados por un cable, con la separación entre ambos constante, y ambos se desplazan a lo largo de perfiles. Se mide campo secundario, y su relación con el primario es medida de la conductividad.

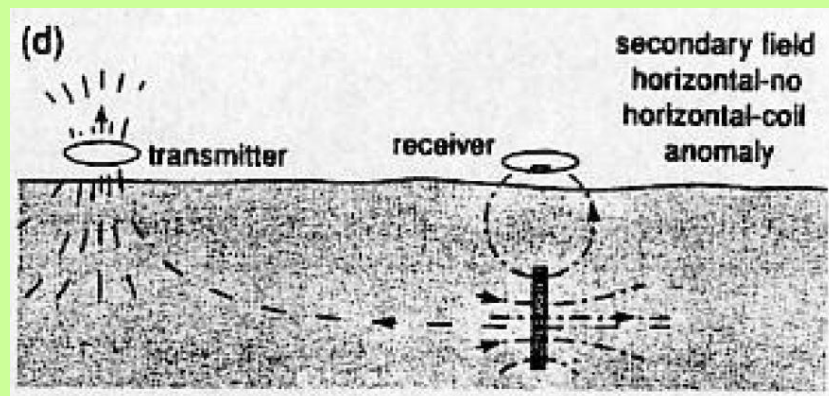
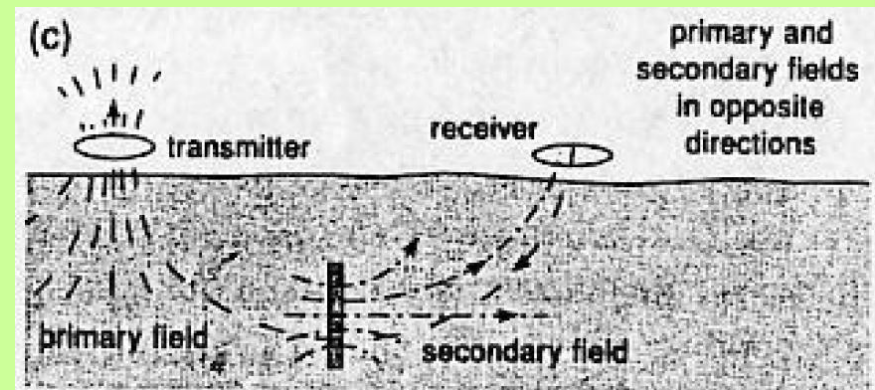
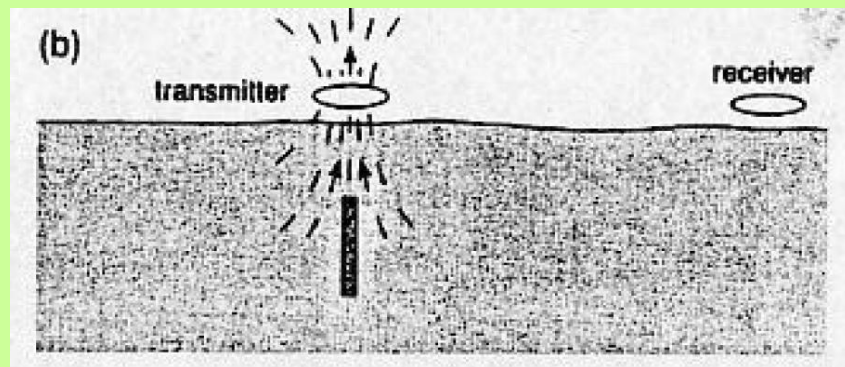
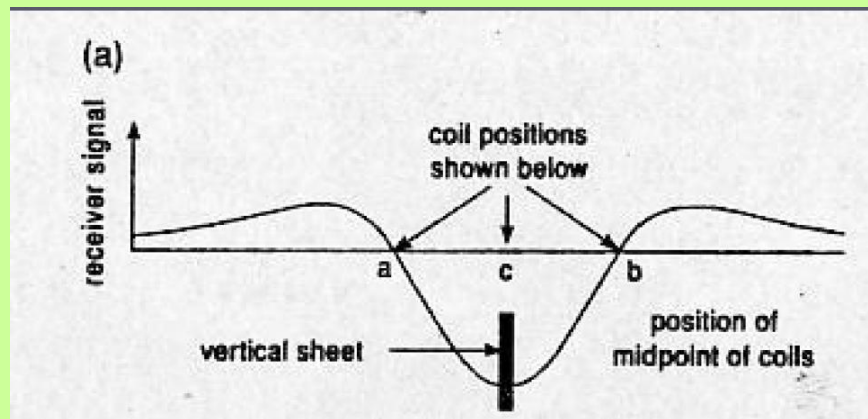


EM31 Geonics
Separación 3,66 – 2 metros
Mide conductividad aparente (mS/m)
Y relación de campo primario a Secundario (en fase; ppt)
Frecuencia ~10 kHz
8 pilas C
Peso 12 kg

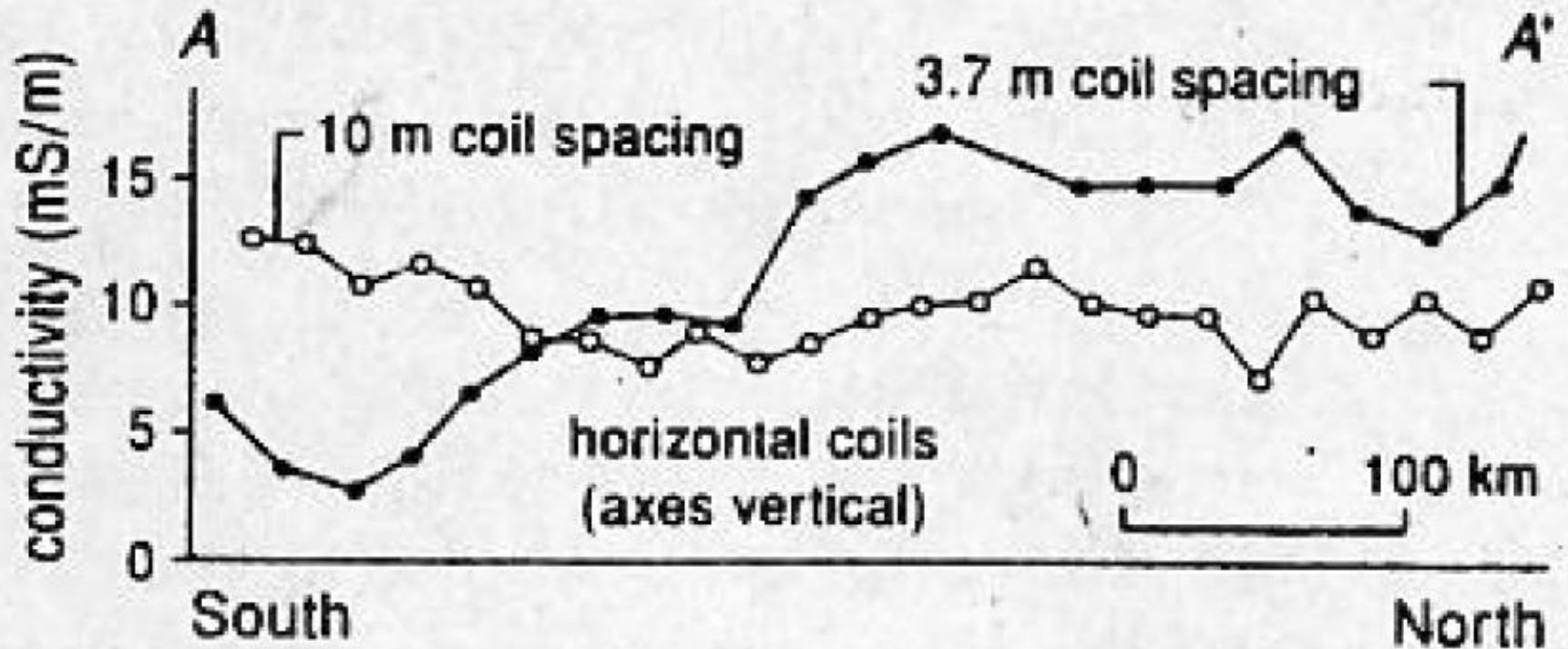


EM34 Geonics
Separación 10 – 20 - 40 metros
Mide conductividad aparente (mS/m)
Frecuencia 6,4 - 1,6 - 0,4 kHz
8 pilas D y C p/tx y rx, resp.
Peso 20 kg





(b) profiles with two coil separations



Con separacion 3.7 m aumenta conductividad hacia el N: banco de arcillas somero.

Con separación 10 m conductividad más baja hacia el N: poco espesor de arcillas. Pero se observan más arcillas en profundidad hacia el S.

Sistema Turam: Bobina Tx fija de gran tamaño (1 a 2 km de lado), y Rx formado por dos bobinas móviles. Se mide la diferencia entre los campos secundarios detectados por las dos bobinas.

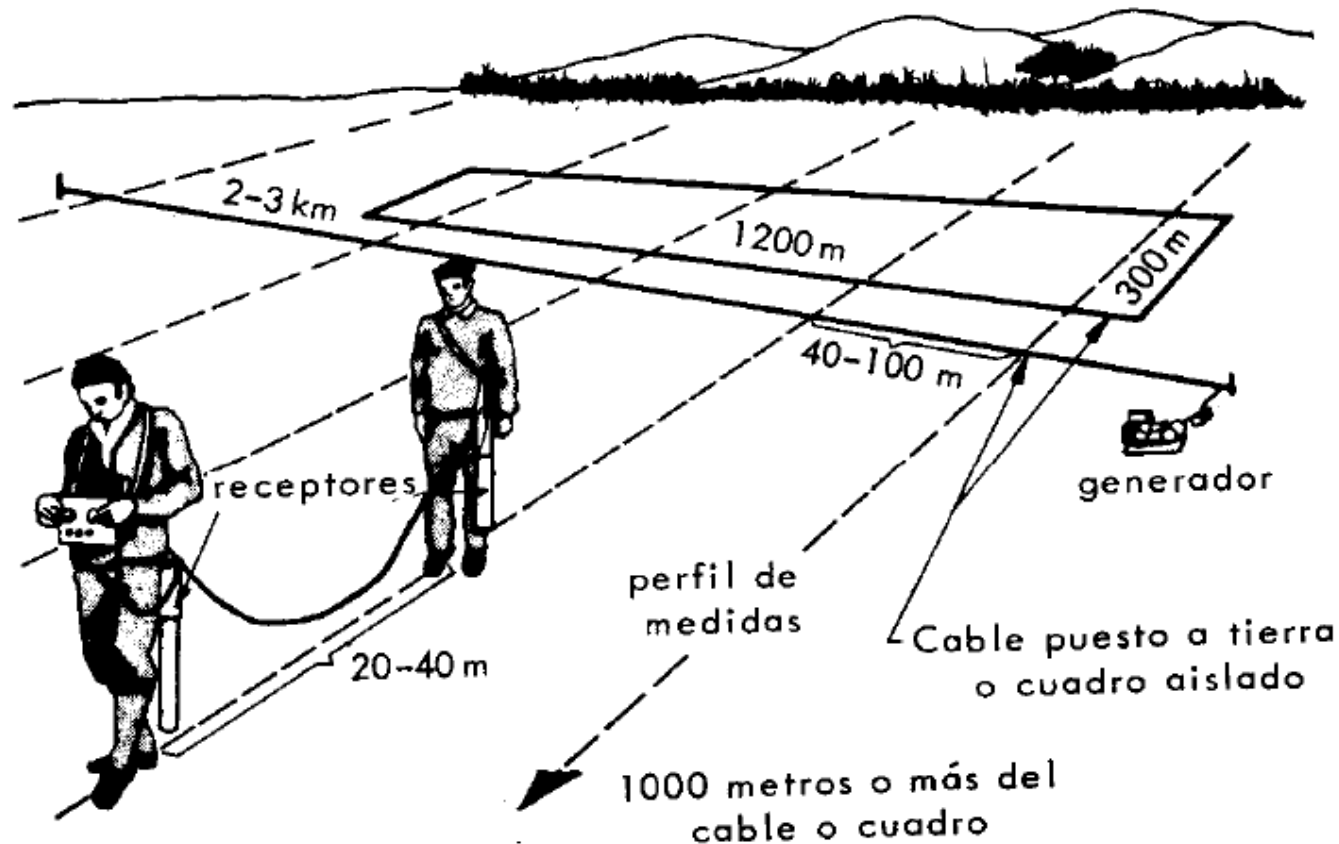
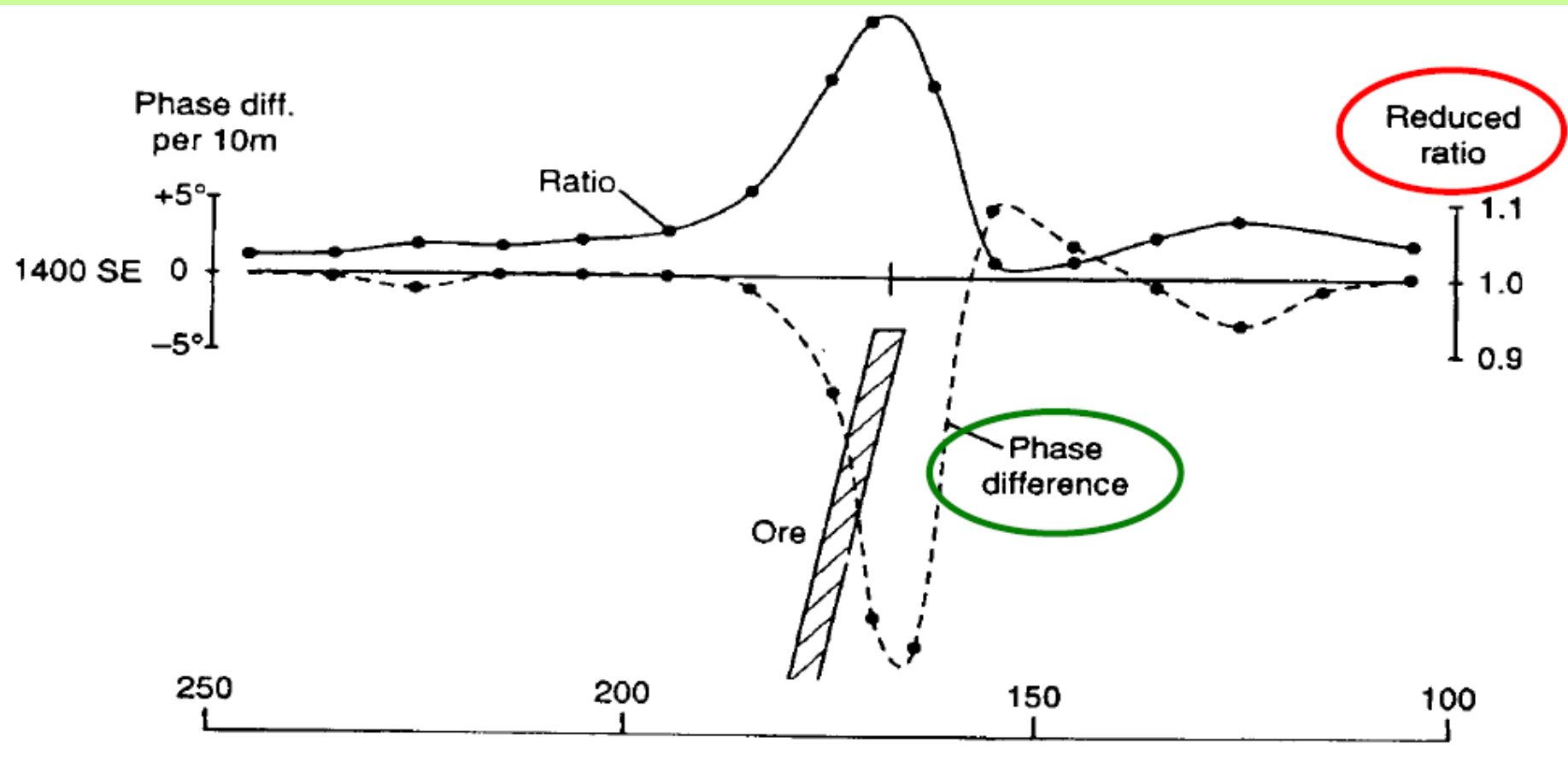


FIG. 77. — Método TURAM. (Documento ABEM.)

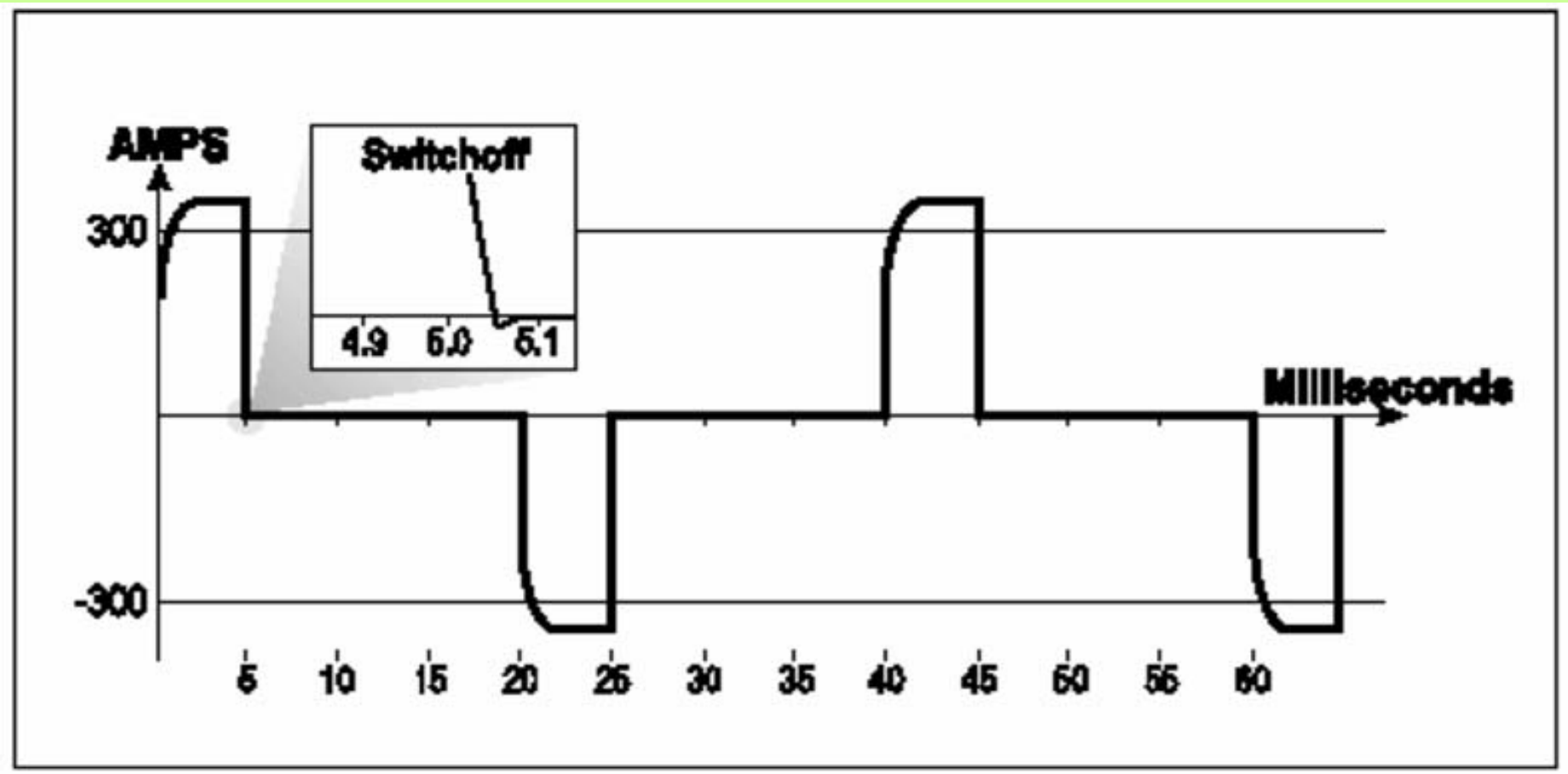


MÉTODOS TEM (Transient electromagnetic)

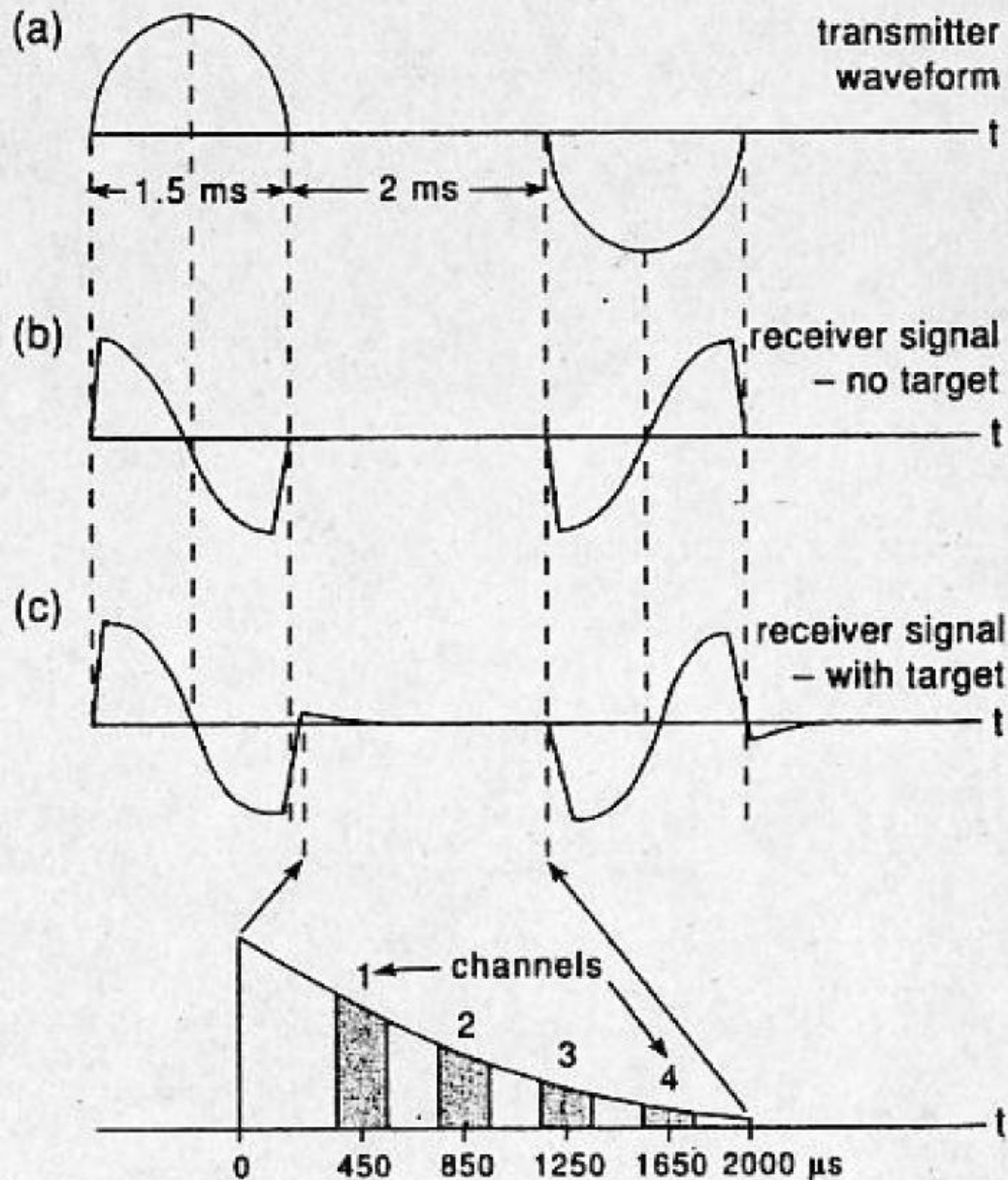
Un problema con métodos EM es cancelar exactamente la corriente inducida en el Rx por el campo primario del Tx. Cuando la señal del blanco es débil cualquier señal por cancelación imperfecta puede enmascarar. Es un problema sobre todo en relevamientos aéreos.

Se utiliza TEM: se mide la señal en Rx sólo cuando el Tx es apagado (similar a IP).

MÉTODOS TEM (Transient electromagnetic)

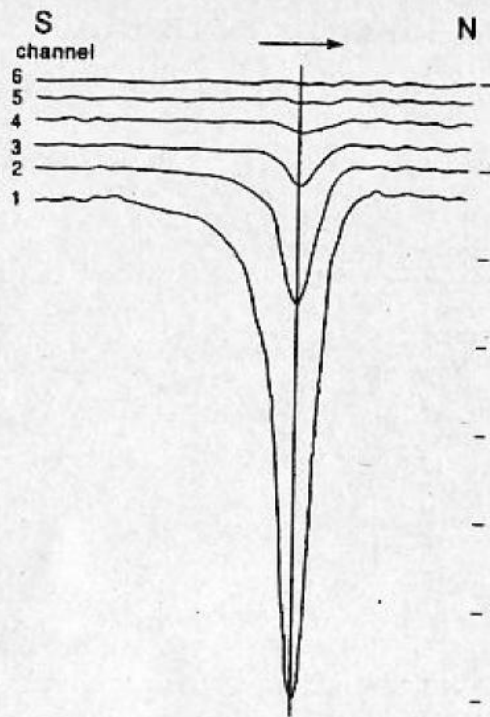
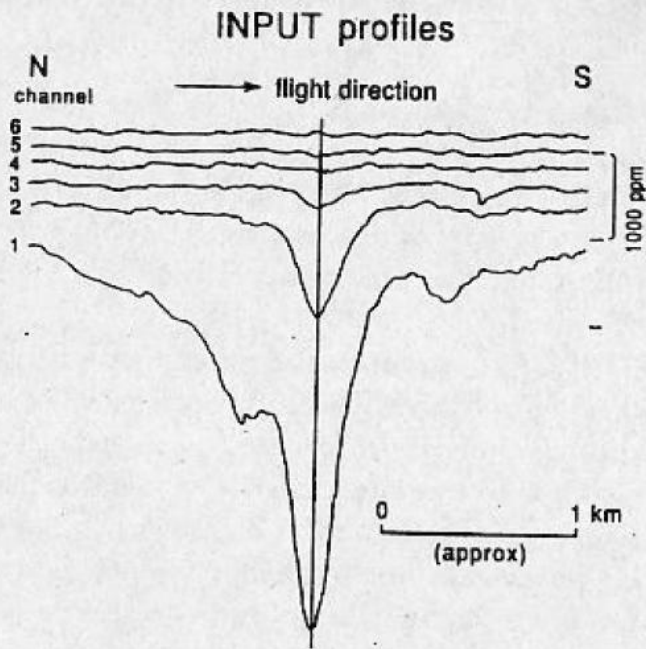


Sistema INPUT (Induced Pulse Transient)

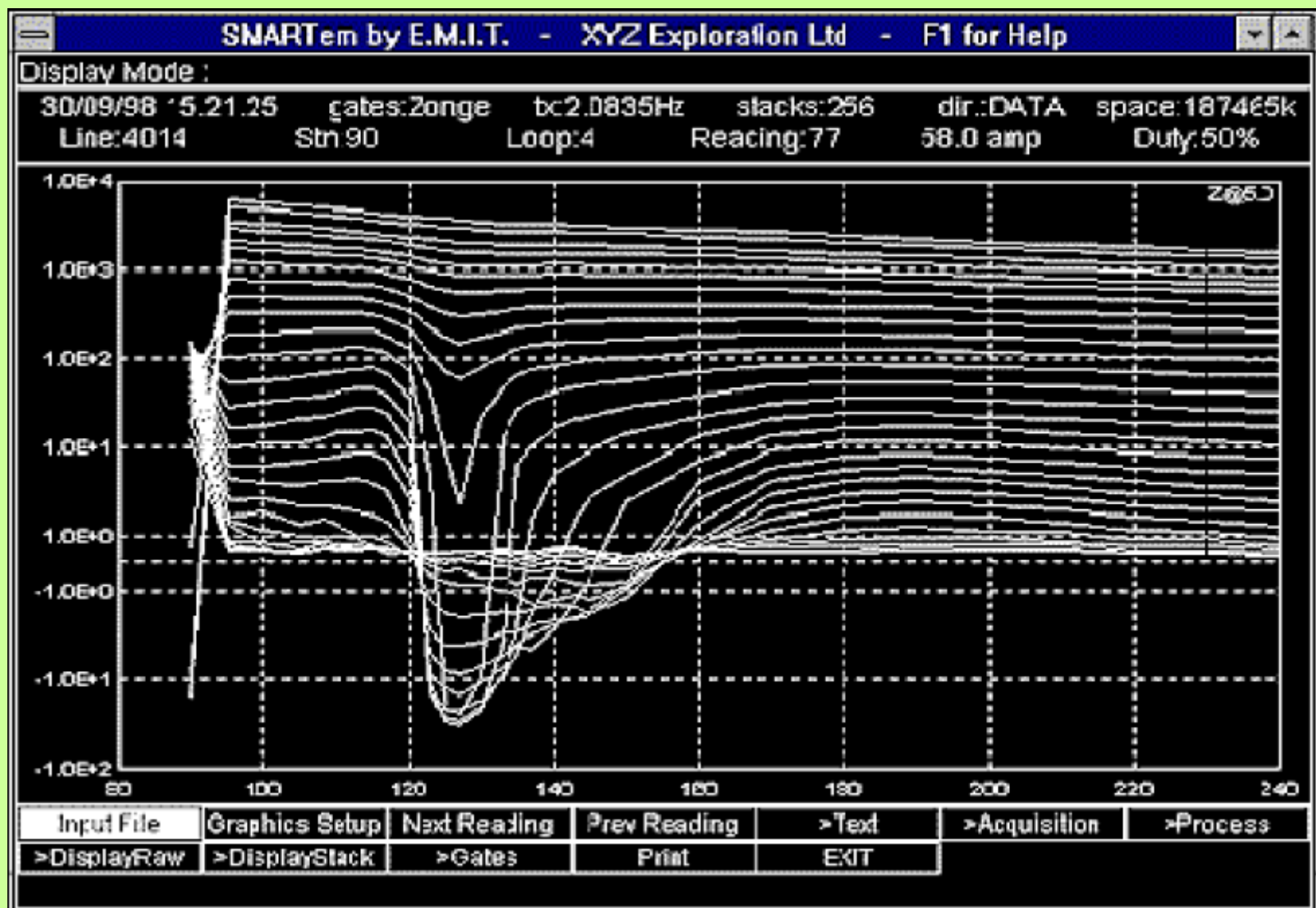


En ausencia de blanco conductor, al final de medio ciclo, la corriente decae rápidamente a cero. Cuando hay un conductor la señal persiste por más tiempo.

La corriente se muestrea en intervalos de tiempo (canales). Si hay cuerpo conductor somero los valores de todos los canales son grandes. Si hay blanco profundo, poca señal en primeros canales y luego la señal crece antes de decrecer (le lleva tiempo a la señal propagarse hasta la superficie). Detección hasta 300 m.



Perfiles que permitieron descubrir depósito de Zn-Cu-Ag (Canadá). Tx en avión 120m altura, Rx 100m atrás de Tx y 67m más abajo. Cada perfil muestra seis canales, y la escala es 1000 ppm del campo del Tx. Se observa una clara anomalía, en primer perfil en los primeros tres canales, en el segundo perfil en los primeros cuatro o cinco canales. Indica una mena más rica en el segundo perfil. La anomalía mayor se observa en el primer canal: mena somera. Perforaciones la encontraron a unas pocas decenas de metros.



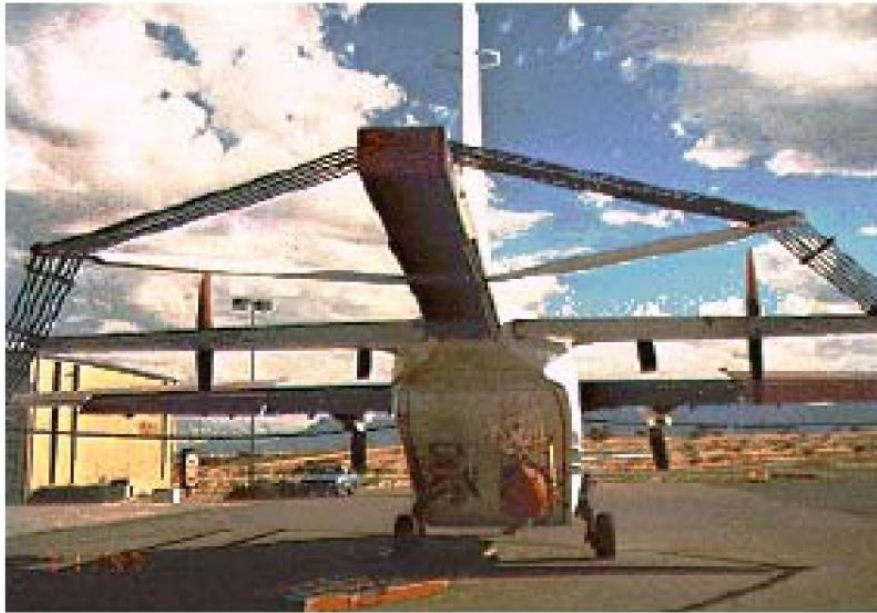


Fig. 3. Receiver "birds" and transmitting coil around perimeter of aircraft. Photograph

Bobina Tx montada en
avión



Fig. 4. GEOTEM system in operation. Photograph courtesy of Jeff Wynn.

“Pájaros” receptores
Transportados por el
avión



Fig. 2. The SkyTEM system configuration.



Fig. 1. The SkyTEM system in operation, Utah, October 2005.

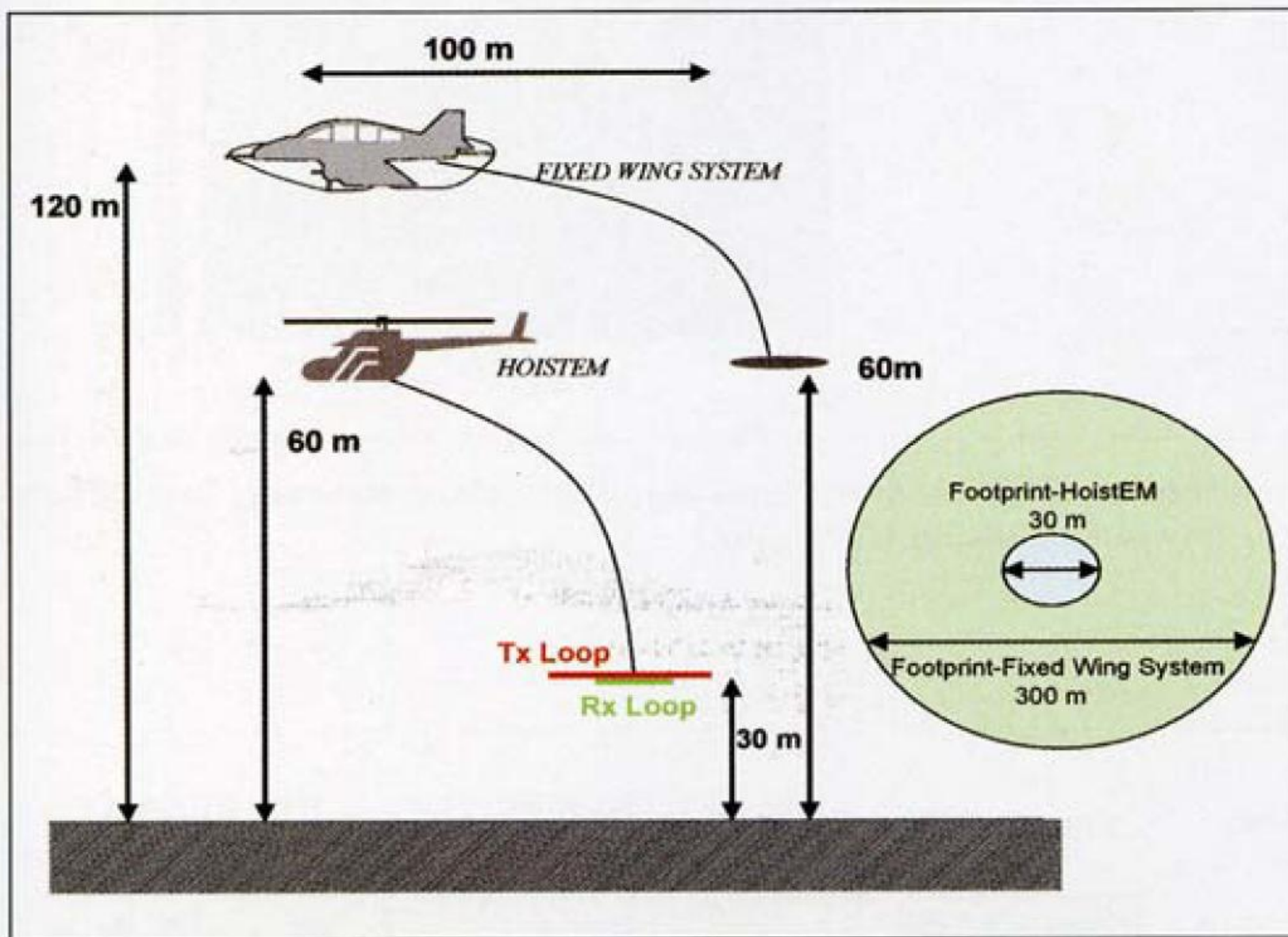


Fig. 3. Comparison of the HoistEM configuration with current fixed wing EM systems (Modified from GPX Airborne Pty Ltd).



Receptor PROTEM, Geonics
 Mide tasa de decaimiento del
 Campo magnetico secundario a lo
 largo de 3 ejes, en nV/m²
 20-30 ventanas de tiempo
 Frecuencias 0,3 a 285 Hz
 Bateria de 12 V
 Peso 15 kg

Transmisor TEM47, Geonics
 Soporta loops de 5x5 a 100x100
 m
 Suministra 0-9 V (2,5-3 A)
 Frecuencias 30-75-285 Hz
 Bateria de 12 V
 Peso 5 kg



Receptor

Transmisor
sincronizado



SMARTem V. Receptor de 8 canales.