

12. MEDIOS CONSOLIDADOS (metamórficos y cristalinos)

12.1. Métodos de resistividad por corriente continua

12.1.1. Dispositivo multielectrodos

12.2. Método EM de superficie

12.2.1. Método V.L.F.

12.2.2. C.S.A.M.T.

12.2.3. EM de dominio de frecuencias

12.2.4. Método EM de dominio de tiempos

12.3. Métodos aeroportados

12. MEDIOS CONSOLIDADOS (Metamórficos y cristalinos).-

En función de los objetivos generales de este trabajo, excluimos las formaciones carbonatadas que a nuestros efectos pueden considerarse como de permeabilidad medida a alta.

De modo general los medios metamórficos y cristalinos pueden considerarse como impermeables porque su porosidad intergranular es prácticamente nula. Sin embargo las zonas de fractura constituyen en ellos un camino preferencial para la circulación de fluidos a su través y pueden llegar a comportar valores extraordinariamente elevados de permeabilidad para el conjunto del medio rocosa.

Consecuentemente los estudios geofísicos en este ámbito y para nuestros objetivos se orientarán de forma preferente a la detección de zonas de fractura, dentro de un programa general cuyas etapas fundamentales pueden ser las siguientes:

- 1.- Selección de zonas de interés a partir de estudios fotogeológicos y de cualquier otra información significativa.
- 2.- Aplicación de técnicas geofísicas aeroportadas, o de superficie, para definir en detalle las zonas fracturas.

El papel de la geofísica en este sentido es tanto mayor cuanto menor sea la entidad de los afloramientos.

3.- Comprobación mediante sondeos, testificación geofísica de los mismos, etc.

Existen diversos ejemplos significativos en la literatura reciente, relativos a las aplicaciones geofísicas en este ámbito geológico, bien sea con el objetivo de explotación de aguas subterráneas (Palacky et al 1.981) o bien para la protección de acuíferos (Ahlbom et al 1.983).

El desarrollo de la metodología geofísica para estudio de fracturas está asociado en gran medida a la exploración minera ya que un gran número de depósitos se asocian a fracturas, contactos y zonas de cizalla. El estudio de tales zonas con fines hidrogeológicos requiere una mayor sensibilidad ya que en general interesa el estudio de accidentes de pequeña magnitud que pueden representar un débil contraste en las propiedades físicas del macizo rocoso.

Existe una considerable variedad de fracturas (Gale and Witherspoon, 1.979) si bien cabe centrar nuestros comentarios en aquellas que presentan un buzamiento considerable y que llegan hasta el contacto con el recubrimiento o se sitúan relativamente próximas a superficie.

Los parámetros que las caracterizan son: Dirección, continuidad en profundidad, espesor, buzamiento, grado de alteración de las rocas en su zona de influencia, etc.

Las posibilidades de empleo de métodos geofísicos para su detección se basan en el hecho de que las propiedades físicas de los materiales que las rellenan así como las de las zona de alteración de su entorno, son diferentes de las del macizo rocoso en que se sitúan. Entre los parámetros físicos más característicos y que presenta las mayores variaciones en zonas de fractura, cabe citar la resistividad eléctrica.

Por ello la mayor parte de las técnicas aplicadas con éxito en este ámbito se agrupan en las categorías de métodos de resistividad por cc y métodos EM.

De modo marginal puede considerarse las magnetometría en aquellos casos en que la alteración en las zonas de fracturas conlleva la destrucción de la magnetita (Mabey, 1.956).

Existen en la literatura algunas referencias a la aplicación de otras técnicas tales como la gravimetría (Eaton et al, 1.964), la sísmica (Lennox and Carlson, 1.967), aunque son poco representativas.

En todo caso, es la prospección por resistividades la que ofrece las mejores opciones, bien mediante técnicas convencionales en que se hace circular una corriente por el subsuelo a través de electrodos situados en el mismo (Van Nostrand and Cook, 1.966) o mediante Técnicas EM en las que se opera por inducción.

Puede decirse que las técnicas de este segundo grupo, en sus diversas modalidades, son las más utilizadas en la actualidad por sus ventajas operacionales y por su mayor resolución.

La diferenciación de las técnicas EM a que nos referimos más adelante con mayor detalle, se puede establecer en base a los siguientes elementos:

- Por el origen del campo EM (natural o controlado).
- Por la componente medida (eléctrica o magnética).
- Por el dominio en que se efectúan las medidas (tiempo o frecuencia).

De acuerdo con estos criterios los métodos a comentar son los siguientes:

- Técnicas que utilizan un campo artificial de origen lejano tal como el método VLF o el CSAMT.
- Técnicas EM operando en la dominio de frecuencias que utilizan un campo local. En esta categoría cabe diferenciar entre métodos de superficie y métodos heliportados.
- Técnicas de dominio de tiempos que utilizan un campo local.

12.1. Métodos de resistividad por corriente continua.-

Esta categoría se refiere a las comúnmente definidas como Calicatas o Perfiles Eléctricos que constituyeron la herramienta más ampliamente utilizada, entre los años 1.950 a 1-970, para la detección de contrastes laterales de resistividad del subsuelo.

Con independencia del dispositivo de medida empleado, el método consiste en determinar la respuesta del medio rocoso frente al paso de una corriente eléctrica que se hace circular a su través mediante dos electrodos situados en la superficie y entre los que se establece una diferencia de potencial. La respuesta del subsuelo se mide en función de la diferencia de potencial que se establece, por el paso de la corriente, entre dos electrodos también situados en superficie y que se desplazan progresivamente a lo largo del perfil de medida.

Existen dos factores significativos de cada dispositivo de medida:

- Su focalización que depende inversamente de la distancia entre electrodos de recepción.
- La profundidad de investigación que es función de la apertura entre electrodos de emisión o de la distancia entre los electrodos de recepción y el más próximo de los de emisión.

Ambos factores son contrapuestos de modo que en todo caso ha de establecerse una situación de equilibrio entre ambos, respecto a los objetivos a resolver. Por ello es también relativamente frecuente el empleo simultáneo de más de un dispositivo con diferente capacidad de penetración; al objeto de poder valorar la evolución en profundidad de cualquier anomalía significativa.

Existe un número muy considerable de dispositivos electródicos conocidos o de uso frecuente. La experiencia de cada técnico con unos u otros les puede hacer aparecer como más o menos ventajosos. La disposición de electrodos de los dispositivos más comunes la reflejamos en la Figura 23.

<u>ARRAY</u>	<u>GEOMETRY</u>	<u>K</u>	<u>DISPLAY</u>
GRADIENT		See Fig. 4.1	Plan contours of ρ_a
DIPOLE-DIPOLE		$\pi n(n+1)(n+2)a$	ρ_a vs n
POLE-DIPOLE		$2\pi n(n+1)a$	ρ_a vs n
SCHLUMBERGER		$\pi n(n+1)a$	ρ_a vs $(n+1/2)a = AB/2$
WENNER		$2\pi a$	ρ_a vs a

FIG.23- DISPOSITIVOS DE MEDIDA MAS COMUNES PARA EL METODO DE CALICATAS ELECTRICAS

Con independencia del dispositivo aplicado en cada caso podemos señalar algunas características comunes a todos ellos que resultan significativas respecto a la valoración final de los resultados.

. Sus medidas están afectadas notablemente por las condiciones superficiales de la zona de trabajo y más cuando es elevada la resistencia de contacto entre los electrodos y el terreno.

En ese caso el ruido inducido en las medidas puede llegar a enmascarar anomalías significativas.

. La presencia de recubrimiento de naturaleza conductora y algunas decenas de metros de espesor provoca una atenuación considerable de las medidas haciendo muy difícil la identificación de las anomalías de interés.

. Pese a que al crecer la profundidad estudiada se pierde resolución lateral, estas técnicas posibilitan un cierto control respecto a la evolución en profundidad y a la geometría de las supuestas anomalías mediante el empleo simultáneo de varios dispositivos complementarios.

Los resultados obtenidos mediante estos métodos se presentan en forma de perfil, en cuyo eje horizontal se indican los puntos de lectura y en el eje vertical los valores de resistividad aparente, según una escala logarítmica.

Así, aunque se asuma que un determinado dispositivo tiene una profundidad de investigación aproximada, únicamente se obtiene en cada punto un valor de resistividad que representa el efecto global de los materiales del subsuelo hasta esa profundidad.

Tal vez este hecho constituye el handicap más significativo respecto a la representatividad de los datos obtenidos con estos métodos.

De modo genérico se puede considerar que estas técnicas son aplicables con cierta efectividad a estudios para un rango máximo de 100-150 metros de profundidad.

Desde el punto de vista operativo son relativamente lentas en su aplicación y exigen el empleo de un número elevado de personas para tendido de cables y posicionado de electrodos. En consecuencia pueden llegar a ser relativamente caras.

12.1.1. Dispositivo multielectrodos.-

En los últimos años se ha producido un resurgimiento importante de los métodos de resistividad por cc, en su modalidad de secciones, merced a dos innovaciones significativas:

- a)
El empleo de equipos controlados por microprocesador y operando por repetición de pulsos.

- b)
El desarrollo de sistemas multielectrodo que permiten el intercambio instantáneo de la función de cada uno de los electrodos de un dispositivo múltiple; así como el procesado inmediato de las medidas para obtener secciones que muestran la distribución 2D de resistividad, a lo largo del perfil de medida.

La principal ventaja de estas técnicas es la capacidad de resolución de accidentes de reducidas dimensiones aunque en todo caso están igualmente afectadas por las condiciones superficiales, en lo que se refiere a la resistencia de contacto entre los electrodos y el terreno.

Por la gran riqueza informativa de sus medidas resultan relativamente costosas ya que exigen el tendido de dispositivos en un número muy elevado de electrodos y reducido espaciado.

Además el procesado en campo requiere en ciertos equipos una instalación sofisticada dentro de un vehículo que no siempre puede acceder a zonas de trabajo de difíciles condiciones topográficas.

Entre los sistemas más conocidos de este grupo se pueden citar los siguientes: RAMSES, OYO y TNO.

12.2. Métodos EM de superficie.-

12.2.1. Método V.L.F..-

Sin duda es el método más ampliamente utilizado en la detección de zonas de fractura tanto en la exploración minera como en Hidrogeología.

La señal medida tiene su origen en el campo EM generado por antenas de comunicaciones entre estaciones de tierra y submarinos.

Tales antenas emiten en el rango de 20 KHz y su señal se transmite horizontalmente por la corteza terrestre distorsionándose en función de diversos factores tales como topografía, características geológicas, etc.

Mediante un receptor adecuado pueden medirse determinadas componentes del campo EM a distancias de varios miles de km. y reconocerse accidentes significativos, especialmente los de tipo tabular, subverticales y que representen un contraste acusado de resistividad con el medio rocoso.

La profundidad de investigación viene determinada por la expresión «skin depth» definida como la profundidad a la que el campo se atenúa a $1/e$ de su valor original.

Tal profundidad depende de la resistividad del medio rocoso y de la frecuencia de la señal y es aplicable a todos los métodos EM. En el gráfico de la Figura 24 puede apreciarse como en el rango VLF y para resistividades inferiores a 1000 ohm.m la profundidad de investigación es muy reducida.

Consecuentemente el método VLF no es aplicable en medios conductores, tales como zonas de recubrimiento arcilloso. Las condiciones óptimas para su empleo se dan en medios de alta resistividad, como ejemplo la mayoría de las formaciones cristalinas o metamórficas.

En la prospección geofísica por métodos EM con el objetivo de detectar elementos de tipo tabular como puede ser una zona de fractura, se suele caracterizar el comportamiento eléctrico de tales elementos en función de su conductancia. Se define la conductancia como el producto del espesor por la conductividad.

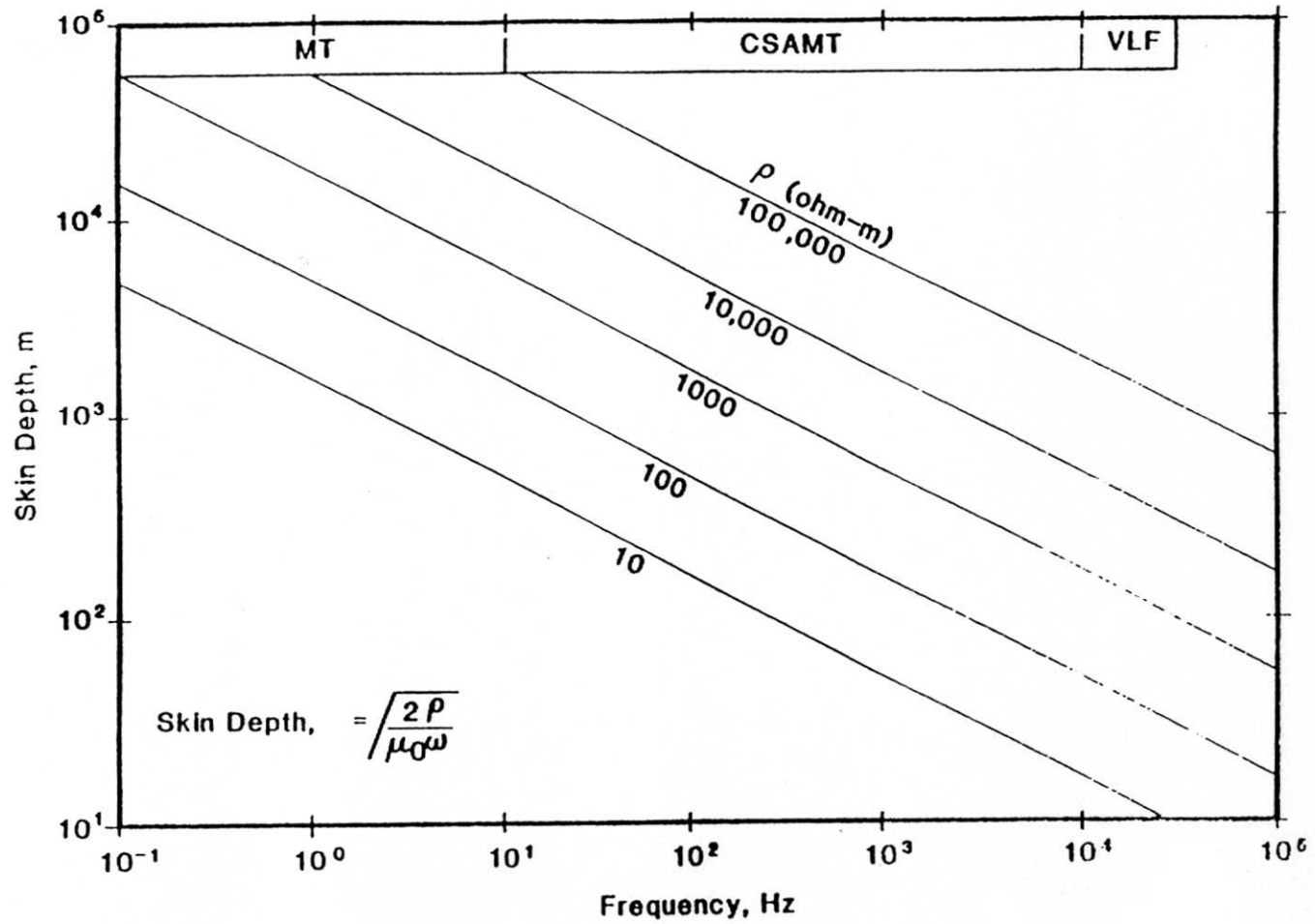


FIG.24- SKIN DEPTH DE LOS METODOS EM

Este parámetro se utiliza a nivel teórico para el cálculo de modelos de respuesta (Olsson, 1.980) del tipo que incluimos en la Figura 25. De trazo continuo se representan las medidas de la componente en fase y de forma discontinua las de la componente en cuadratura, para diferentes valores de conductancia de la fractura y una resistividad de 10.000 ohm.m del medio rocoso encajante.

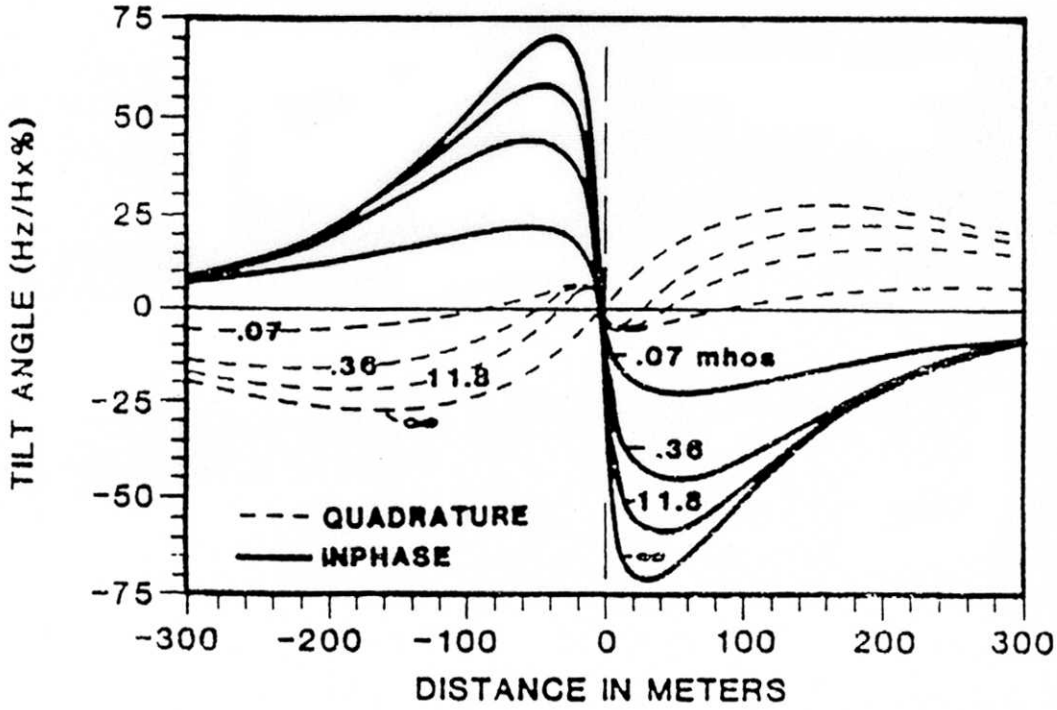
Los gráficos de la figura anterior ponen de manifiesto el estilo general de las anomalías de VLF, de tipo dipolar, con paso por cero en la vertical del elemento anómalo y tanta mayor amplitud cuando mayor sea la conductancia.

Pese a que, de modo general, la presencia de recubrimiento arcilloso representa una limitación importante en la aplicación del método, puede calcularse a priori hasta que punto puede ser aplicable si se conoce la resistividad del recubrimiento. Por ejemplo en la Figura 26 puede apreciarse como para una resistividad de 300 ohm.m puede operarse con espesores de hasta 30-35 metros siempre que la conductancia de la supuesta fractura sea superior a 0'2-0'25 mhos. Sin embargo con resistividad del recubrimiento de 20 ohm.m, y espesores mayores de 5 m, raramente se podrá aplicar el método de forma efectiva.

Cada equipo receptor es capaz de operar con varias estaciones emisoras de diferentes frecuencias, localizadas en diferentes países. La selección de la estación con la que operar se realiza en función de la dirección esperada para las estructuras o fracturas objeto de la prospección.

Los fabricantes de receptores VLF proporcionan habitualmente la relación de estaciones emisoras con sus frecuencias características.

THEORETICAL CURVES



MODEL

SURFACE

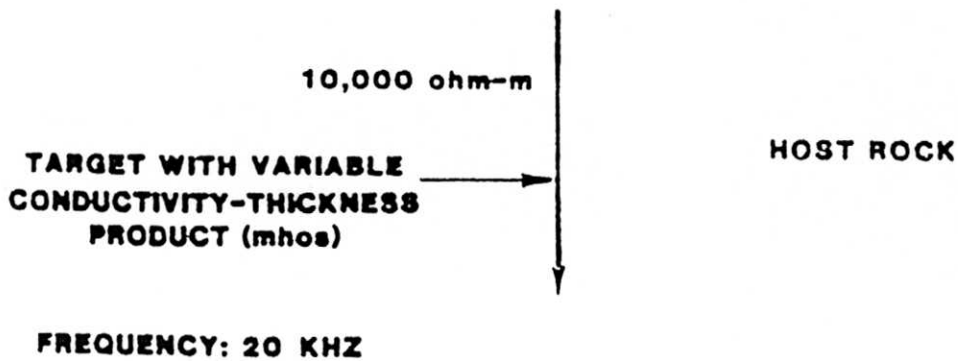
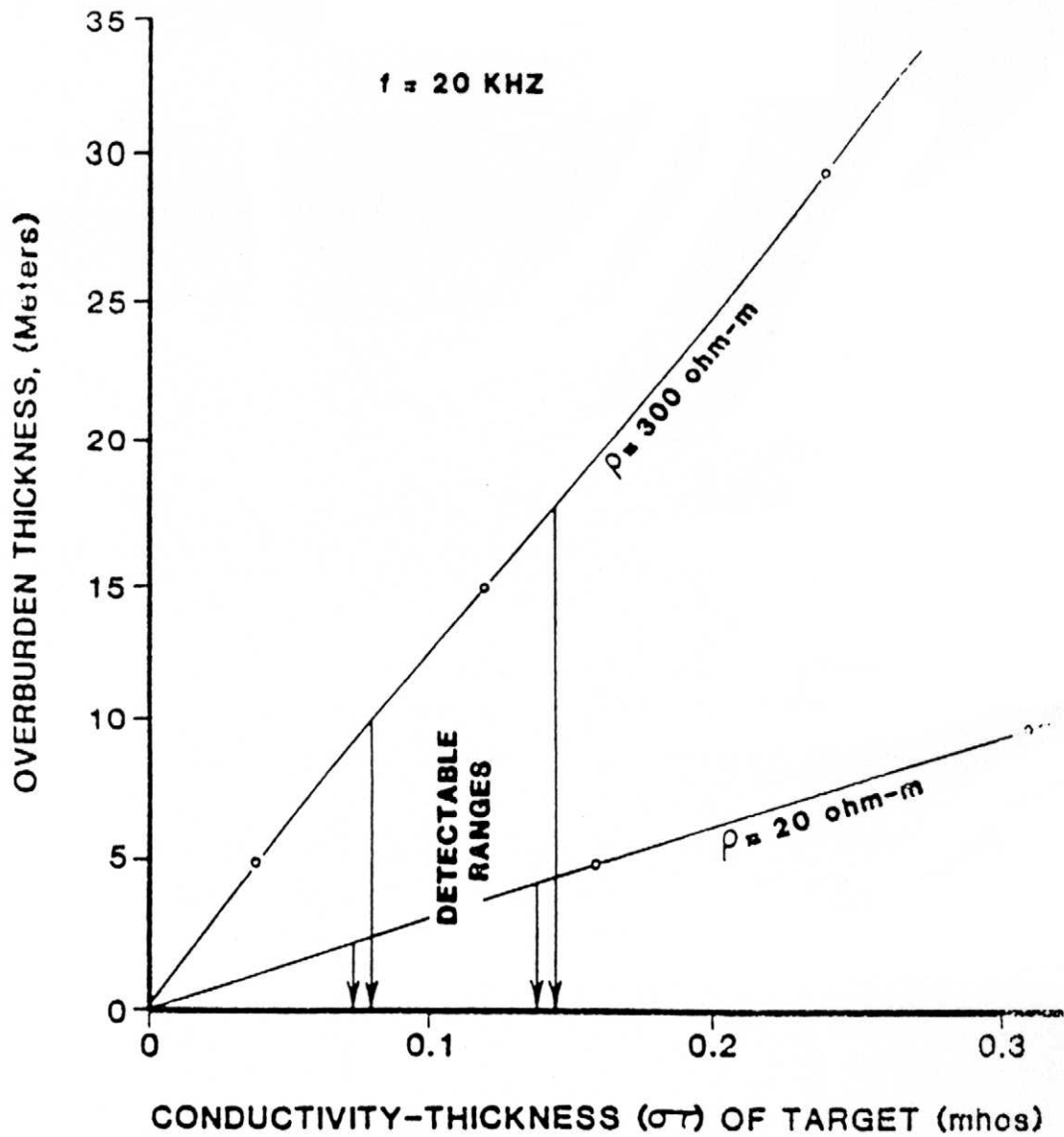


FIG. 25 - MORFOLOGIA DE ANOMALIAS VLF



**INDEX OF CURVES IS
OVERBURDEN RESISTIVITY (ρ)**

FIG. 26- NOMOGRAMA DE DETECTABILIDAD DE ANOMALIAS
POR EL METODO VLF

Para nuestra posición geográfica es habitual operar con la estación NAA (USA) para estudio de fractura E-W y con la GBR (Gran Bretaña) para la dirección N-S.

La regla que se sigue al respecto es seleccionar la estación de modo que la dirección que se define al unirla con la zona de trabajo sea lo más paralela posible a la de las estructuras a estudiar.

Las medidas se efectúan según perfiles perpendicular a la dirección anterior, con toma de datos a intervalos aproximados de 20-25 metros o menores en el caso de estudios de detalle.

En términos generales puede valorarse el método VLF como muy efectivo y muy sencillo de operación. Además la interpretación de sus resultados es relativamente inmediata, tanto si éstos se presentan en forma de perfiles seriados, como si se hace mediante isolíneas a partir de los valores filtrados por el método de Fraser.

Un posible inconveniente del método VLF es el hecho de que periódicamente algunas estaciones emisoras cesan en su actividad por trabajos de mantenimiento. Si esto ocurre sin conocimiento del operador geofísico puede llevar a errores o a medidas no válidas.

Aunque de forma esporádica también puede ocurrir que una determinada estación cambie su frecuencia de emisión. No obstante ambas situaciones suelen anunciarse con antelación en revistas especializadas.

12.2.2. CSAMT.-

Este método ya comentado en su modalidad de sondeo al referirnos a los medios no consolidados, puede considerarse respecto a la detección de fracturas como una variante de VLF aunque con dos aparentes ventajas:

- a) Posibilidad de control del campo primario, en su dirección, frecuencia y tiempo de operación.
- b) Actuación sobre la expresión «skin depth», con lo que teóricamente se puede variar la profundidad investigada.

La segunda ventaja es más aparente que real puesto que (Kaufman and Keller, 1.985) la amplitud de las anomalías producidas por fracturas decrece rápidamente con la frecuencia.

Para la detección de fracturas relativamente pequeñas aunque de gran importancia hidrogeológica, el método VLF aparece en todo caso como más ventajoso sin que se aprecien ventajas significativas al operar en baja frecuencia.

12.2.3. EM de dominio de frecuencias.-

De modo general el método consiste en la inducción de una corriente en el subsuelo utilizando una bobina, situada en superficie, a través de la que se hace circular una corriente variable con el tiempo.

Existen múltiples variantes operativas en función de las posiciones relativas de las bobinas transmisora y receptora. Sin embargo la más habitual es aquella en que ambas se disponen horizontales (HLEM).

La distribución de corrientes inducidas se modifica en función de la resistividad del medio rocoso y de las heterogeneidades del mismo. (Ver la Figura 27). Las fracturas provocan un comportamiento anómalo en la distribución de estas corrientes, siendo detectable tal comportamiento mediante medidas realizadas en superficie con el adecuado equipo receptor.

Tales medidas se efectúan a lo largo de perfiles de dirección perpendicular a la de las fracturas o accidentes a detectar.

Esta modalidad de operación con dos bobinas (T_x y R_x) que se desplazan simultáneamente sobre el perfil es la denominada Slingram. La otra forma de operación es la Turam que utiliza un bucle transmisor de gran dimensión que se mantiene fijo sobre el terreno mientras que la bobina receptora se desplaza por los perfiles de medida situados por fuera del bucle.

Igual que en el caso del método VLF, es importante la influencia del recubrimiento conductor: La operación a altas frecuencias posibilita la detección de fracturas más pequeñas pero a costa de reducir la profundidad de investigación.

Existen nomogramas, específicos para cada instrumento, que permiten conocer los rangos de aplicación del método en función de la resistividad del recubrimiento, su espesor y la conductancia de la fractura. Por ejemplo el de la Figura 28 corresponde a un sistema Max-Min II operando a 888 Hz, con 60 metros de separación entre bobinas.

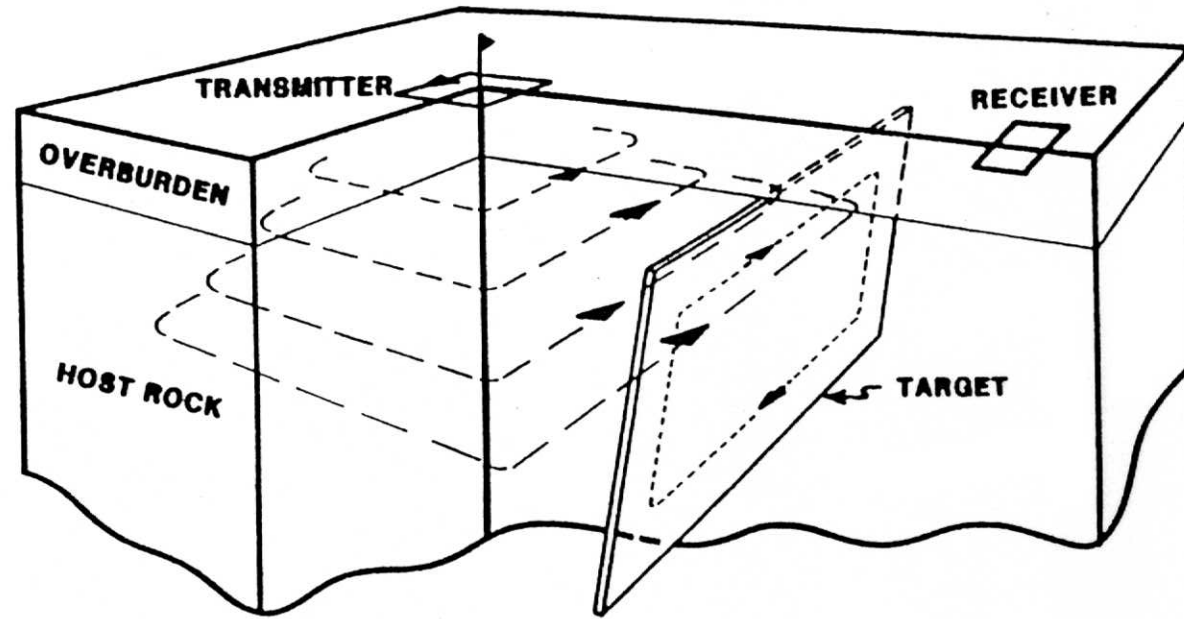


FIG. 27- ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS METODOS EM (DOMINIO DE FRECUENCIAS) EN LA DETECCION DE FRACTURAS

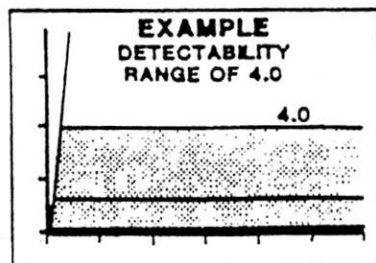
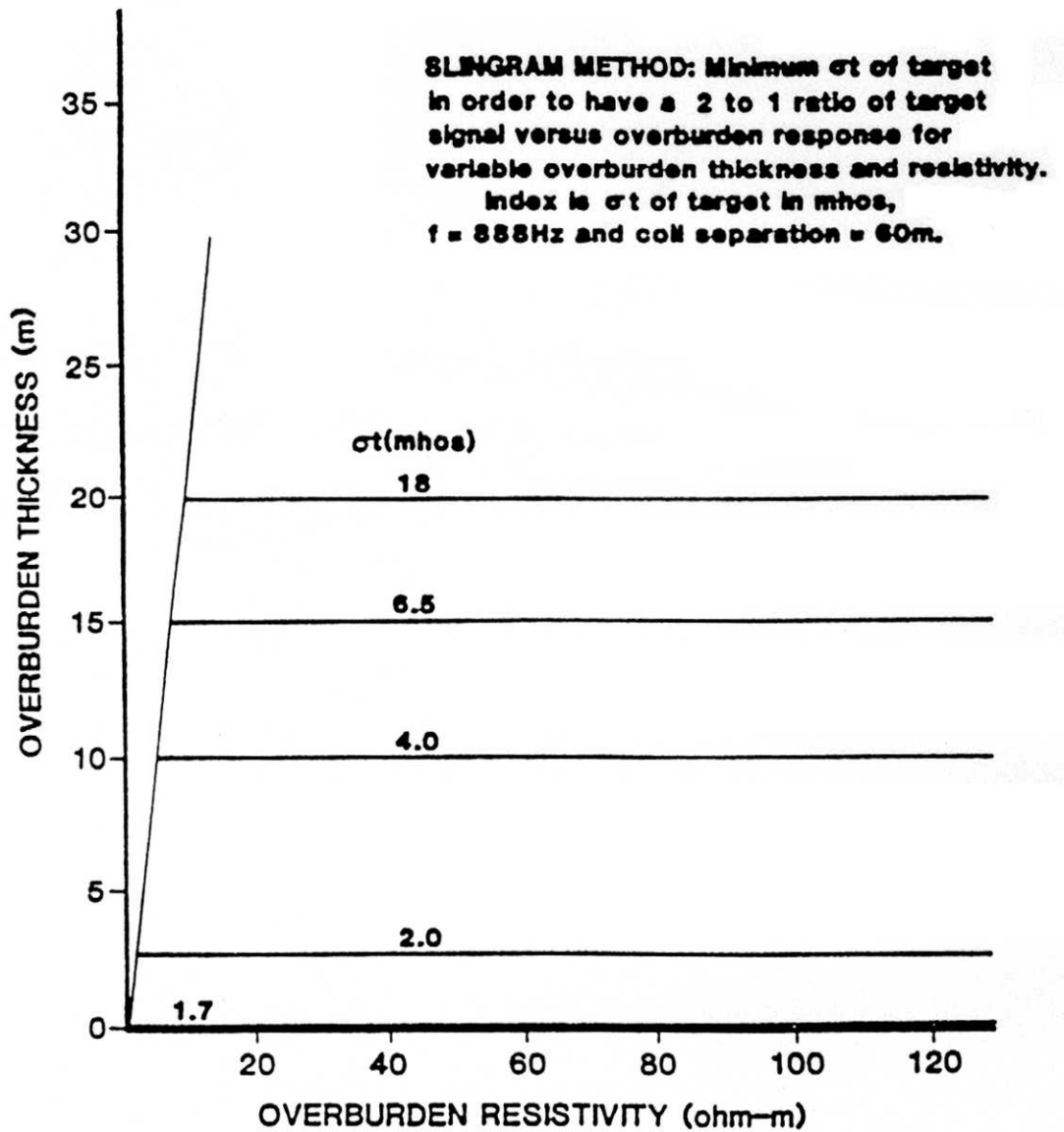


FIG. 28 - NOMOGRAMA DE DETECTABILIDAD DE FRACTURAS CON METODOS H L E M

Los métodos EM de dominio de frecuencias son muy flexibles en sus condiciones de empleo y sus resultados son relativamente fáciles de interpretar.

Su mayor limitación es su reducida profundidad de investigación que además se reduce enormemente en presencia de recubrimientos conductores.

Los sistemas EM han evolucionado de forma espectacular en sus modalidades aeroportadas, operando simultáneamente con sistemas multifrecuencia y multigeometría para las aplicaciones del método en el mapeo geofísicos de grandes áreas.

Existen ejemplos en la literatura reciente que ilustran de forma efectiva la capacidad de estas técnicas respecto a nuestros objetivos. Uno de los artículos más relevantes al respecto es el de Palacky, 1.981.

12.2.4. Método EM de dominio de tiempos.-

Sus fundamentos teóricos se comentaron brevemente en el epígrafe 11.1.3.2., relativo a su aplicación en la modalidad de sondeo eléctrico.

Para su utilización en la detección de fracturas la modalidad operativa es con dispositivo tipo Turam.

Una de sus características más destacables en su capacidad de investigación incluso en presencia de importantes espesores de recubrimiento conductor y también la posibilidad de diferenciar en su respuesta la influencia de elementos tales como

recubrimiento, posibles fracturas, contactos litológicos, etc.

A efectos de ilustrar, desde el punto de vista conceptual, la forma en que el método discrimina los elementos anteriores incluimos en la Figura 29 un esquema del comportamiento de las corrientes de difusión en función del tiempo.

En los instantes que siguen al corte de los pulsos de corriente en el bucle transmisor, las medidas están condicionadas de forma dominante por el recubrimiento.

A medida que las corrientes de difusión se expanden con el paso de tiempo, comienzan a influenciar a la zona de fractura cuyo efecto llega a ser dominante para las lecturas en los últimos canales de tiempo de los equipos de medida.

La respuesta (early time) del recubrimiento puede ser muy importante y manifestarse durante un intervalo considerable en la curva de f.e.m. del campo secundario. A tiempos crecientes este efecto enmascarador de la respuesta debida a una posible zona de fractura será tanto menor cuanto mayor sea la conductancia de la misma. Si la conductancia es alta se producirá un retardo en la extinción del campo secundario, diferenciable del efecto del recubrimiento.

De forma similar a otros métodos EM, pueden construirse diagramas de detectabilidad de fracturas, bajo diversas hipótesis relativas a geometría de la fractura, comportamiento del recubrimiento y medio rocoso afectado por ella, etc.

Incluimos unos de estos nomogramas en la Figura 30, donde puede apreciarse que el método ofrece posibilidades de

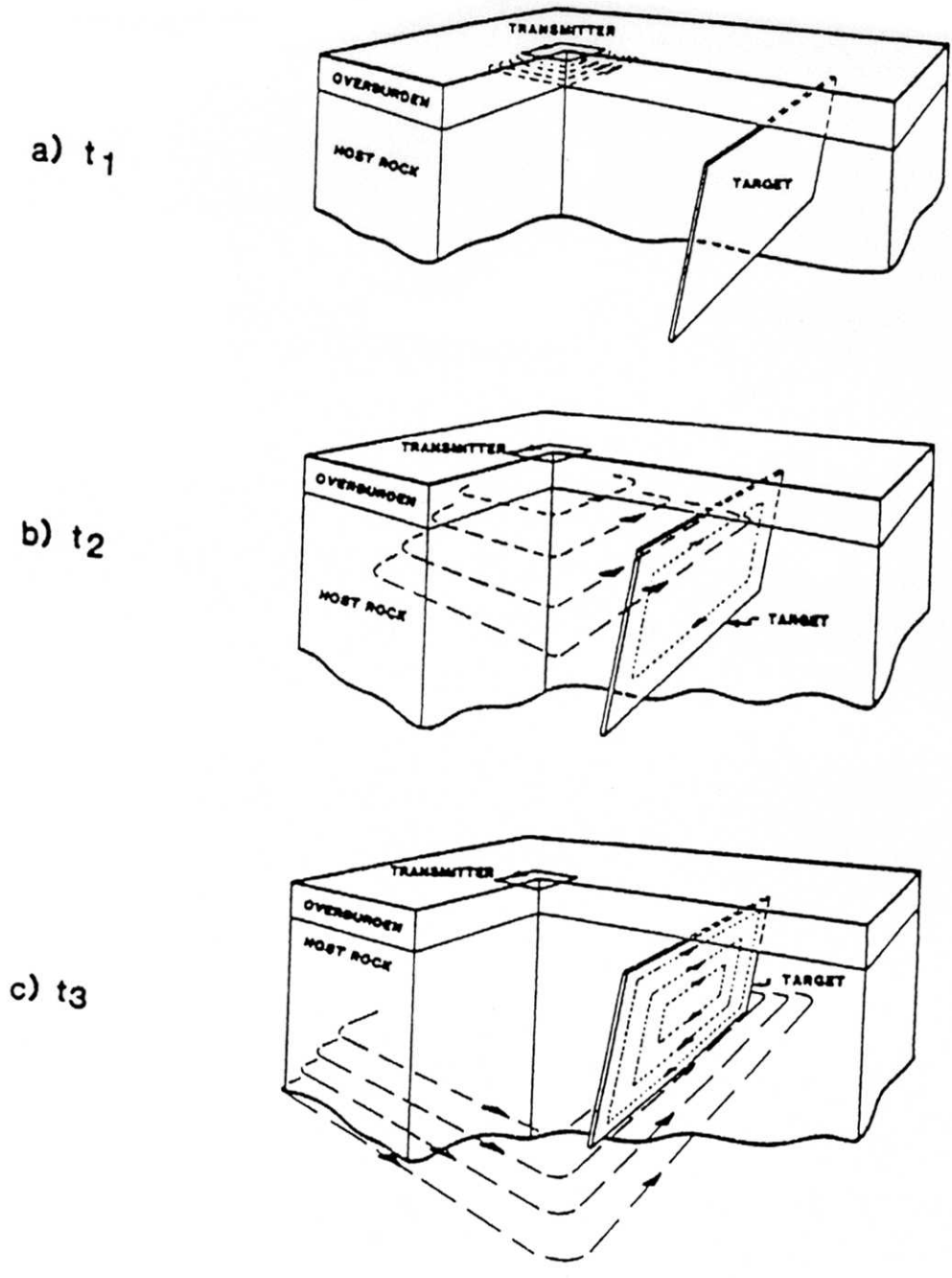


FIG. 29 – ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL METODO EM (DOMINIO DE TIEMPOS) EN LA DETECCION DE FRACTURAS

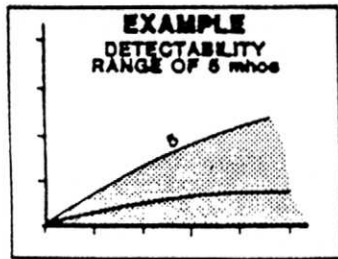
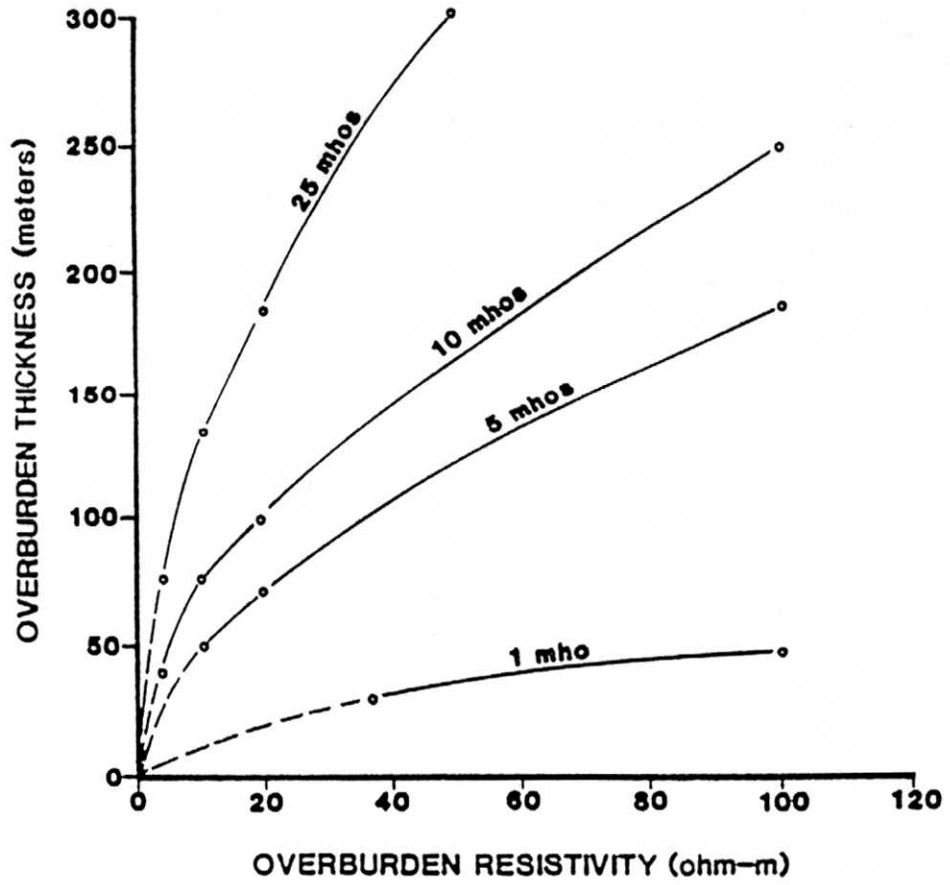


FIG. 30 - NOMOGRAMA DE DETECTABILIDAD DE FRACTURAS, POR EL METODO E M DE DOMINIO DE TIEMPOS.

operación con espesores de recubrimiento considerables, aunque siempre condicionado a que la zona de fractura tenga un carácter acusadamente conductor.

Podemos concluir, en consecuencia, que el método EM de dominio de tiempos aplicado a la detección de fracturas es la técnica geofísica que ofrece mejores posibilidades cuando se trata de investigar bajo recubrimientos de algunas decenas de metros de espesor. En cualquier caso es el que alcanza mayor profundidad de investigación, si bien su capacidad de detección de fracturas de pequeña entidad es limitada.

12.3. Métodos aeroportados. -

El estudio de grandes áreas de forma detallada y a coste competitivo únicamente cabe abordarse mediante el empleo de diversas técnicas integradas y aplicadas simultáneamente desde helicóptero.

De forma indiscutible esta metodología es ventajosa respecto a cualquiera de los métodos de superficie tanto en nivel de información como en coste.

En su configuración standard más avanzada. se opera simultáneamente con las siguientes técnicas.

- Magnetometría de alta sensibilidad (0'01 nanotelsa).
- VLF con dos emisores situados en direcciones ortogonales respecto a la zona de estudio.
- Varios dispositivos EM de dominio de frecuencias, multifrecuencia y multigeometría.
- Espectrografía (U, Th, K y CT).

Son elementos fundamentales de esta tecnología los siguientes:

- Sistema electrónico de navegación que posibilite una extraordinaria precisión en la posición correspondiente a cada medida.
- Alta velocidad de muestreo (10 lecturas por segundo) que junto con la baja velocidad del helicóptero hace que la resolución a lo largo del perfil sea del orden de una lectura cada 2'5 metros.
- Baja altura de vuelo con lo que se optimiza la sensibilidad de los diferentes sensores utilizados.

El empleo de bobinas coaxiales y coplanares y frecuencias variables entre 400 y 30.000 HZ en los sistemas EM permite la elaboración de mapas de isorresistividades correspondientes a diversos rangos de profundidad. Como ejemplo presentamos en la Figura 31 un plano de isorresistividades correspondiente a 9600 Hz isorresistividades correspondiente a 9600 Hz con bobinas coplanares obtenido en la zona de Pino de Oro (Zamora), las alineaciones N-S corresponden a zonas de fractura.

Otro documento standard resultante de estos trabajos es el plano de espesores de recubrimiento.

Desde el punto de vista de la interpretación de anomalías puntuales, es factible identificar la posición y buzamiento de supuestas zonas de fractura en base a la comparación de las respuestas obtenidas para diferentes configuraciones (coaxiales y coplanares) de las bobinas transmisora y receptora.

Al respecto y a modo de ejemplo incluimos la **Figura 32** que recoge algunos casos relativos a la respuesta producida por una fractura, en función de su buzamiento.

La gran ventaja que aportan estos métodos integrados es la capacidad de resolver de forma conjunta diversos aspectos tales como: diferenciación de unidades litológicas, determinar espesor de recubrimientos, identificar fracturas y elementos estructurales, etc

Complementariamente, el enorme volumen de datos que generan permite su tratamiento y manejo a nivel de usuario mediante herramientas informáticas que facilitan la interpretación y la comparación de resultados con otros de la naturaleza que sean. Nos referimos de forma específica a los sistemas de procesado de Imágenes en Tiempo Real que constituyen la última generación de aplicaciones para la utilización de grandes volúmenes de datos geofísicos.

El rango de profundidad que cabe asignar a estas técnicas, principalmente a los métodos EM, en la prospección de zonas de fractura es de algunas decenas de metros, si bien las medidas magnetométricas por su carácter potencial ofrecen otras opciones.

En términos unitarios sus costes son muy inferiores a las de cualquier método equivalente de superficie y por ello esta tecnología no tiene alternativas cuando se trata del estudio de áreas de varios km² de extensión.

Un programa lógico de trabajo contemplaría la aplicación de métodos heliportados en la primera fase y el subsiguiente estudio detallado de las posibles zonas de interés mediante

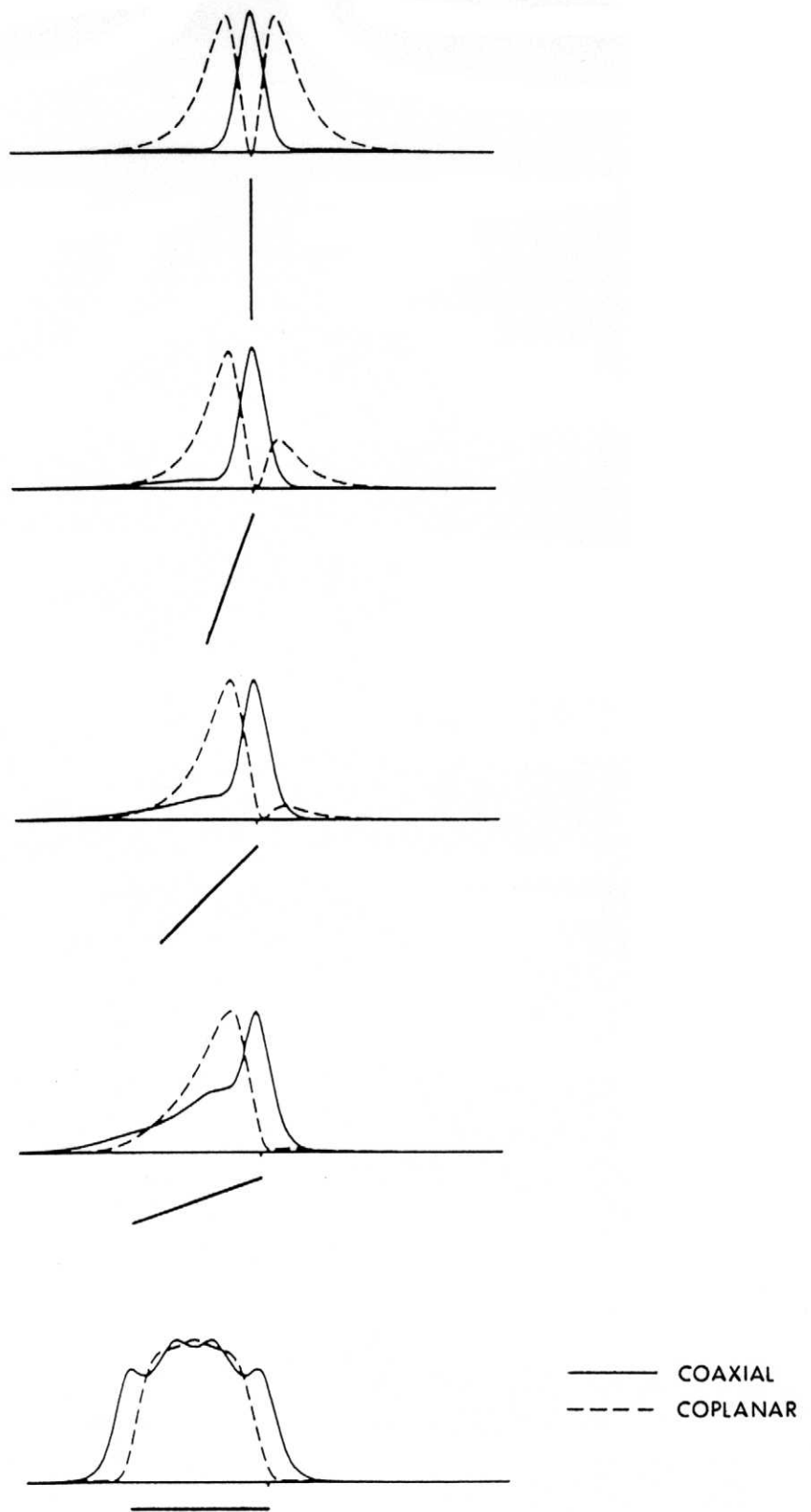


FIG. 32 - MODELOS DE RESPUESTA DE FRACTURAS, PARA METODOS EM AEROPORTADOS.

las técnicas de superficie que mejores características presenten respecto a los objetivos a resolver.