



[“...él hincó la piedra, él asperjó gotas...”]
Inscripción Maya (circa 800)

Pirámide en
Chichén Itzá.

PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Una tormenta (eléctrica o no) solía ser una bendición para los ciudadanos de la avanzada Civilización maya. Significaba que prosperarían el maíz y otros cultivos. Y que se recargarían las aguas subterráneas de los cenotes (esos pozos subcirculares creados por el colapso de parte del techo de una gruta calcárea). Acuciados por la creciente escasez de agua potable, los mayas hacían invocaciones, celebraban ritos –como el referido en la inscripción– y ofrendaban sacrificios (incluso humanos) para obtener el favor de Chaak, el dios de la lluvia. Y dado que Chaak les fue brindando cada vez menos respuestas –como nuestro Dios a la inmensa mayoría de los marginados del mundo en toda época–, los mayas sin duda hubiesen loado el conocimiento de la geoeléctrica que tan útil resulta en la búsqueda de acuíferos y otros recursos subterráneos. Nada, al final parece que convulsiones sociales generadas a partir de la escasez alimentaria –por falta de lluvias– llevaron al colapso civilizatorio y para 1519, cuando Cortés y sus secuaces llegaron a esas tierras, muchas de las grandes ciudades mayas llevaban siglos cubiertas de selva y los españoles se ahorraron otro estrago a gran escala como el perpetrado contra la pujante Cultura azteca. Diego de Landa y otros perpetradores se conformaron con destruir la casi totalidad del patrimonio cultural maya, escrito en códices empleando como soporte cortezas de higueras tratadas (mejores que el papiro egipcio), por creerlos contrarios a la “verdad” bíblica...

La Civilización maya ya prosperaba cuando en la ciudad o polis de Mileto, en la costa jonia –hoy costa turca sobre el mar Egeo, donde los migrantes pugnan por huir de actuales estragos–, un tal Tales afirmaba que el agua es el origen de todo, tiene dioses y vida propia. Pero no sólo eso. Porque dicen que alrededor del 600 a.C. este filósofo griego –que además experimentó con el magnetismo, como ya hemos referido– descubrió el resultado de frotar un trozo de ámbar (resina fósil, como la del mosquito de Jurassic Park con el imposible ADN de los dinosaurios picados). El ámbar frotado adquiría la propiedad de atraer pequeños objetos. **Tales de Mileto** había descubierto la electricidad estática. Ámbar en griego se dice ἤλεκτρον (élektron).

Tres siglos después, hacia el 310 a.C., **Teofrasto de Ereso** documentó en Atenas sus estudios de diferentes materiales capaces de producir fenómenos eléctricos.

La palabra **electricidad** fue instalada en la modernidad por el inglés **William Gilbert** hacia 1600.

William Watson, también inglés, en 1746 descubrió que el suelo es conductor de corrientes eléctricas. Más tarde, en 1784, como citamos en el Tema 4, el francés **Charles Coulomb** definió la ley fundamental de los campos electromagnéticos, que para el campo eléctrico se escribe:

$$F = K q_1 q_2 / l^2 \quad \text{–la forma matemática típica de los campos potenciales–}$$

(en el S.I. las cargas q se dan en coulomb y la longitud conductora l en metros, con $K=9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ en el vacío)

En Italia hacia 1800 **Alessandro Volta** inventó la primera pila –a partir de los estudios previos del médico, también italiano, **Luigi Galvani**–. Recordemos que la palabra voltio es utilizada para definir la **diferencia de**

energía potencial en los campos eléctricos, también llamada **tensión o voltaje**.

Análogamente al magnetismo, el **potencial eléctrico** es: $V = K q_1 / l$

y el **campo eléctrico** deviene: $E = F / q_2 = K q_1 / l^2 = V / l$ (potencial eléctrico sobre longitud)

La **densidad de corriente** es: $J = I / s$ (intensidad eléctrica sobre sección o área del conductor)

El francés **André Ampère** observó que dos cables con corriente se repelen o atraen según sea la dirección relativa de circulación y en 1826 expuso su teorema: $\oint H ds = J + dD/dt$

(donde el primer término es la integral de contorno cerrado o bucle del campo magnético así generado, J la densidad de corriente, D la inducción electrostática y t el tiempo)

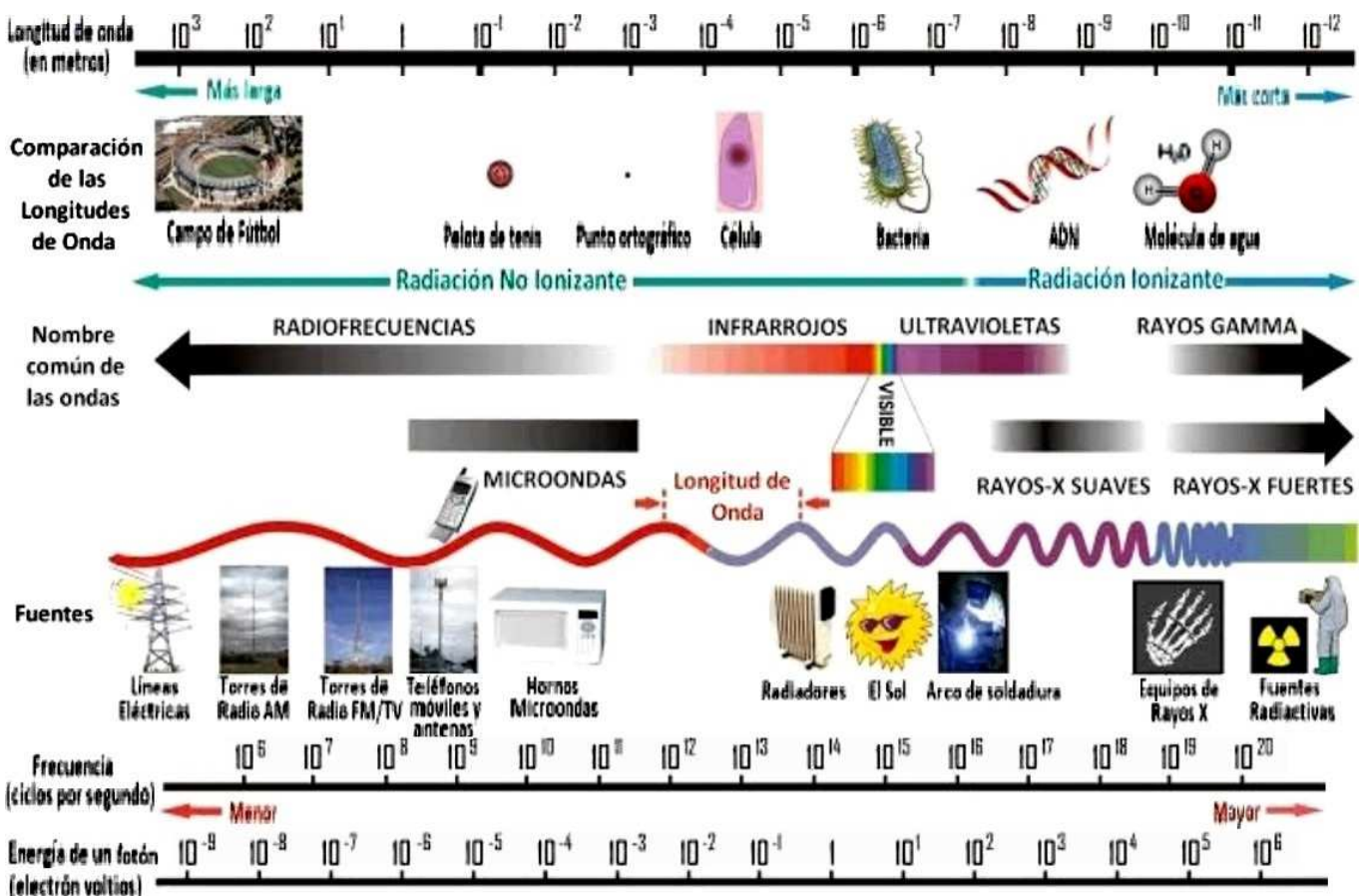
A la inversa, la Ley del inglés **Michael Faraday** y el alemán **Heinrich Lenz** (1831-33) dice que:

$\oint E ds = -dB/dt$ (siendo B el flujo magnético cuya variación temporal genera un campo eléctrico E)

Además el alemán **Karl Gauss** en 1835 descubrió que las líneas de campo eléctrico pueden ir de una a otra carga q, de modo que: $\oint D ds = q$

Y el mismo Gauss halló que las líneas de inducción magnética son continuas, o sea que no puede haber polos aislados y por tanto: $\oint B ds = 0$ Conceptos que fueron unificados por el escocés **James Maxwell** en 1861.

Como complemento de este corto repaso de fórmulas físicas, presentamos una representación abarcativa del espectro electromagnético (del latín *spectrum*, imagen). Nuestros ojos ven una mínima porción de él, pero con diferentes dispositivos podemos “ver” todo su rango. Animales nocturnos o marinos (insectos, roedores, peces, etc.) en sus ojos tienen receptores que les ofrecen la capacidad de ver en ultravioleta cercano.



Espectro electromagnético (modificado de electromagneticos.es)

METODOLOGÍAS DE PROSPECCIÓN

Los métodos geoeléctricos se fundamentan en el registro o adquisición de magnitudes eléctricas del campo electromagnético en el suelo y subsuelo terrestre, las que, una vez procesadas (correcciones o reducciones) podrán ser interpretadas para conducir a la identificación de valores anómalos vinculados a objetivos de interés científico o perentoriamente aplicados.

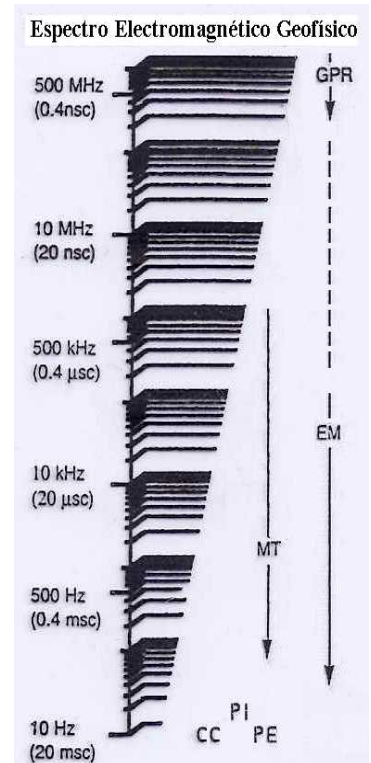
El investigador ruso **E. I. Ragozin** publicó en San Petersburgo en 1903 un trabajo pionero acerca del uso de la electricidad en investigaciones de cuerpos rocosos mineralizados.

En las variantes prospectivas de la geoelectricidad pueden aprovecharse las respuestas dadas a partir de los campos eléctricos naturales de la Tierra, o bien recurrirse a la generación de campos artificiales cuya mayor intensidad o mejor control podrá permitir generar registros más claros del terreno estudiado.

Existe una gran variedad de metodologías, que podemos clasificar según diversos criterios alternativos o la combinación de ellos. Por ejemplo, la naturaleza del campo (natural o artificial), el tipo de información obtenida (vertical o sondeo, lateral o calicata, en sección o tomografía, areal o mapa, volumétrico o 3D) y el tipo de campo (constante o continuo, variable o alterno).

Clasificación general de los métodos prospectivos

- Campo Natural:** Potencial Espontáneo (PE)
Corrientes Telúricas
Corrientes Magnetotelúricas (MT)
- Campo Artificial:**
 - Campo Constante (CC):** Líneas Equipotenciales
(Inyección de Corriente) Sondeos Eléctricos
Calicatas Eléctricas
Tomografías Eléctricas y 3D
 - Campo Variable (EM):** Calicatas Electromagnéticas
(ElectroMagnéticos) Sondeos de Frecuencia
Tomografías EM y 3D
Registros Hertzianos
Georradar (GPR)
 - Polarización Inducida (PI):** Dominio del Tiempo
Dominio de la Frecuencia
PI espectral y otros



PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

Magnitudes medibles

Son tres: permeabilidad magnética, constante dieléctrica y resistividad (o resistencia específica).

* La **Permeabilidad magnética μ** es una magnitud fundamental en la prospección magnetométrica, como ya se ha visto en los Temas 04 y 05.

* La **Constante dieléctrica o Permitividad ϵ** es un ordenador lineal que vincula la magnitud de un campo eléctrico E con la inducción electrostática D. Su valor relativo depende de la composición química, la densidad y la estructura cristalográfica, porque influye mucho la dipolaridad (efecto pila) del material.

Matemáticamente: $D_i = \epsilon_j \cdot E_j$

(en el vacío ϵ vale 8,854 pF/m, en granitos y petróleo unos 20, y en agua y arcillas cerca de 80 pF/m)

Existen pocos métodos geoelectricos basados en la valoración de la permitividad, de los cuales los dos más empleados son:

- El **Radar de Substrato o Georradar**, que ha sido aplicado habitualmente a objetivos de muy poca profundidad (pocos metros bajo la superficie), con objetivos estratigráficos, hidrogeológicos o ambientales, y muy utilizado en áreas de suelos congelados. Se lo refiere con algún detalle en el Tema 08.

- El **Perfil Dieléctrico de Pozos**, que en algunas cuencas ha sido muy empleado como indicador de porosidades y tipos de fluidos. Es abordado en el Tema 06-07-08(b).

* La **Resistividad ρ** es la magnitud eléctrica más contrastante, con un rango de variación de más de veinte órdenes de magnitud, y es la más utilizada en los métodos de la geoelectricidad. Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo, sea que tengamos una fuente de campo natural o que creemos un campo artificial.

Resistividad eléctrica de los suelos

La **resistividad eléctrica** ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. Etimológicamente procede del latín *resistere* (*sistere* es mantenerse fijo, como insistir). Así como su inversa, la **conductividad** σ , deriva de *conducere* (*ducere* es guiar, como en oleoducto, o como *il Duce* Mussolini...) y se la puede definir como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica para atravesar el material.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo resulta determinada por la resistividad ρ del material que lo constituye y por la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la **resistencia eléctrica** R viene dada por: $R = \rho \cdot l / s$

O bien, según la ley hallada por el alemán **Georg Ohm** en 1830: $I = V / R$

y por lo tanto $R = V / I$

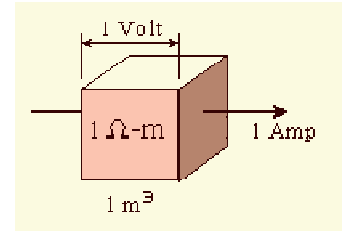
por lo que $\rho \cdot l / s = V / I$ y $\rho = (V / I) \cdot (s / l)$

(s / l es la configuración geométrica del conductor, en este caso un cable)

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio por metro ($\Omega \cdot m$), ya que R se da en ohmios, y además I en amperios y V en voltios.

La conductividad σ es, como se dijo, el concepto inverso a la resistividad: $\sigma = 1 / \rho$

La unidad de conductividad en el S.I. es el Siemens (S) –en honor a **Werner von Siemens**, alemán inventor de la dínamo hacia 1850–, aunque suele referirse también como mho/m.



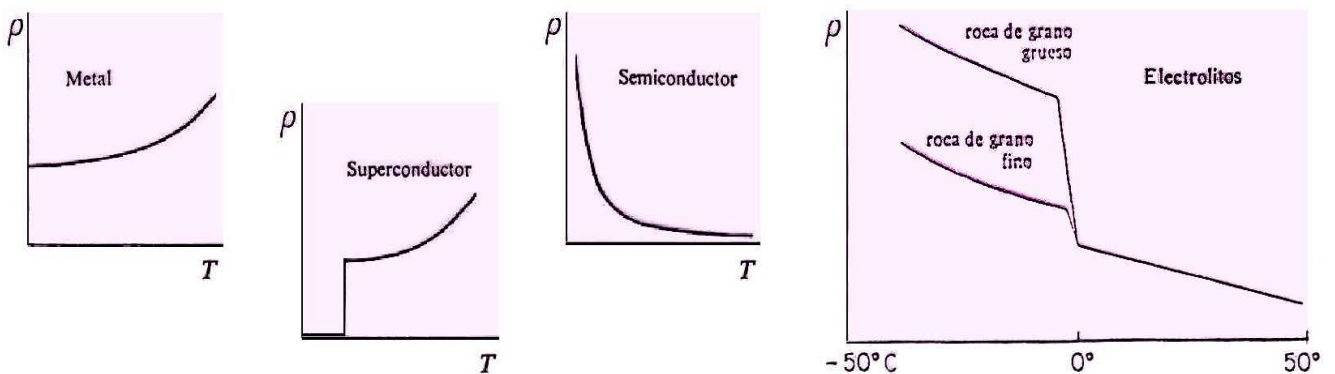
Tipos de conductividad

Estrictamente hablando, todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los que tienen conductividad iónica pueden ser dieléctricos o electrolitos líquidos (obviamente mientras no devengan gaseosos).

▪ Conductividad Electrónica

Metales: el mecanismo de la conductividad de éstos puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que éstos forman, sin vinculación a ninguno determinado. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número redundan en una conductividad muy elevada. Su resistencia aumenta con el contenido de impurezas y con la temperatura (mayor energía que desordena el movimiento electrónico y hace menos eficiente la conductividad). La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre 10^{-8} y $10^{-7} \Omega \cdot m$. Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que poseen conductividad metálica. Entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño) y quizá algún mineral poco abundante como la ullmanita (NiSbS).

Como curiosidad, los materiales **superconductores** se comportan análogamente a los metales hasta que a muy bajas temperaturas caen a resistividad cero, como se esquematiza en la figura siguiente. Se los sintetiza artificialmente. No los hay en la corteza terrestre, salvo la miasita, un raro y escasísimo sulfuro de rubidio ($Rh_{17}S_{15}$) hallado en el valle del río Miass en la región rusa del sur de los montes Urales, mineral que además presenta una fortísima respuesta magnética. También se ha visto superconductividad muy raramente en aleaciones presentes en cantidades ínfimas en sideritos (meteoritos metálicos).



Relación resistividad de ρ vs temperatura T de distintos materiales (modificado de Orellana, 1972)

Semiconductores: son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo. Por añadidura su conductividad es función de la absorción de fotones, que producen saltos energéticos hacia la banda de conducción electrónica, y aumenta con la temperatura. Por ende, no cabe esperar que la resistividad de un cierto mineral pueda representarse por un dato único, sino que puede variar dentro de límites bastante amplios.

En general los teluros y los arseniuros son conductores muy buenos. Los sulfuros suelen clasificar también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio. Los compuestos de antimonio y casi todos los óxidos en general son malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no se presentan en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones y junto con una ganga frecuentemente aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo cual la resistividad conjunta de un filón puede variar mucho de unos casos a otros.

▪ Conductividad Iónica

Dieléctricos (o aisladores): los electrones están fuertemente ligados a los átomos. Esto puede deberse a que existen enlaces sea covalentes que iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrolito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a $10^7 \Omega\text{m}$. Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y muchos otros. Entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aisladoras si no fuera por la presencia de electrolitos líquidos. También el hielo es aislador o resistor. Asimismo el petróleo.

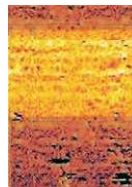
Electrolitos líquidos: sus condiciones de conductividad son función de la concentración de las soluciones, tamaño de los iones y temperatura (como se ve en la gráfica previa). En las rocas el agua contenida no se congela instantáneamente en virtud de que, a medida que baja la temperatura, la parte que va quedando no congelada es cada vez más salada –porque el agua que se congela es casi pura– y obvio que esto depende de la salinidad inicial del agua poral, pero también del tamaño de grano, porque cuanto más grueso, mayor es la proporción de espacio de poros conteniendo electrolitos. El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos $10^5 \Omega\text{m}$, por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, porque siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl, variando entre 0,2 (agua de mar) y $10^3 \Omega\text{m}$ (agua dulce).

Comportamiento Eléctrico de las Rocas

La resistividad (inversa de la conductividad) es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales (figura en la siguiente página). Pero además depende de la intensidad y frecuencia del campo eléctrico aplicado: cuanto mayores sean, más baja será la resistividad medida.

En las rocas se presenta un medio heterogéneo con por lo menos dos conductividades distintas, una propia de la matriz (dieléctrica, muy raramente semiconductor, según sea la mineralogía) y otra del espacio poral (electrolitos líquidos) donde los distintos parámetros de porosidad y permeabilidad importan. Pero también influyen dos parámetros físicos: presión y temperatura.

De modo que *la conductividad eléctrica depende de:*



Matriz mineral (composición y estado de agregación)
Espacio Poral (volumen, configuración y fluidos)
Presión y Temperatura

Como se mencionó, el agua pura es muy poco conductora ($10^5 \Omega\text{m}$), pero las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan conductividad debido a las sales disueltas. Así, las aguas de lagos y arroyos de alta montaña registran resistividades que van de 10^3 a $3 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$, las aguas subterráneas de 1 a $20 \Omega\text{m}$ y las aguas marinas de unos $0,2 \Omega\text{m}$, naturalmente menor en los mares más salados.

En geoelectrica el concepto de matriz incluye clastos, matriz (fina) y cemento. Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como resistores en la inmensa mayoría de los casos, puesto que lo son prácticamente el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores o metales en cantidad apreciable podría ser considerada como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas, cuya interpretación es igualmente

compleja porque normalmente están rodeados de una ganga aislante. Pero causalmente todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos líquidos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. **La resistividad de las rocas puede oscilar en un margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros.** Recordando que de su grado de interconexión depende de la **permeabilidad**, que se mide en milidarcy

Tipo de roca	Rango usual de porosidad %	
	desde	hasta
Lutita	20	50
Arenisca	5	30
Caliza	1.5	15.0
Dolomía	3	20
Cuarcita		0.8
Granito		1.2
Diabasa		1.0
Diorita	1.3	5.1
Gabro	0.3	3.5

(modificado de Parkhomenko, 2012)

($mD = 9,87 \cdot 10^{-16} m^2$) en homenaje al francés **Henry Darcy** que en 1856, a los cincuenta y seis años, dos antes de fallecer, publicó un trabajo para el abastecimiento de agua de la ciudad de Dijon, conteniendo la conocida fórmula relativa a la permeabilidad: $Q = k \cdot A \cdot \Delta P / \mu \cdot \Delta x$

(siendo Q el caudal, A el área medida en sección, ΔP la diferencia de presión que depende del gradiente hidráulico, μ la viscosidad dinámica del fluido, Δx el espesor del medio considerado y k la permeabilidad)

La resistividad de las rocas **también depende de la temperatura** a la que se encuentren, ya que ésta influye sobre la resistividad de los minerales (inversamente en metales que en semiconductores), pero además en los fluidos que ocupan los poros. En las sedimentarias un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico o mal conductor, tal como se grafica en la pág.126.

Asimismo hay influencia de la presión. En las rocas sedimentarias, o en general con conductividad iónica dominante, su incremento produce un correlativo aumento de resistividad por el efecto de la deshidratación consecuente. Pero si, en cambio, las rocas tienen abundancia de minerales con conductividad electrónica, el incremento de presión suele aumentar la conductividad total de la misma.

Por último, cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y por consiguiente de las rocas que éstos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir que presentan **anisotropía eléctrica**. En las rocas sedimentarias la estratificación también puede producir anisotropía, aunque en general este efecto es débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en las rocas.

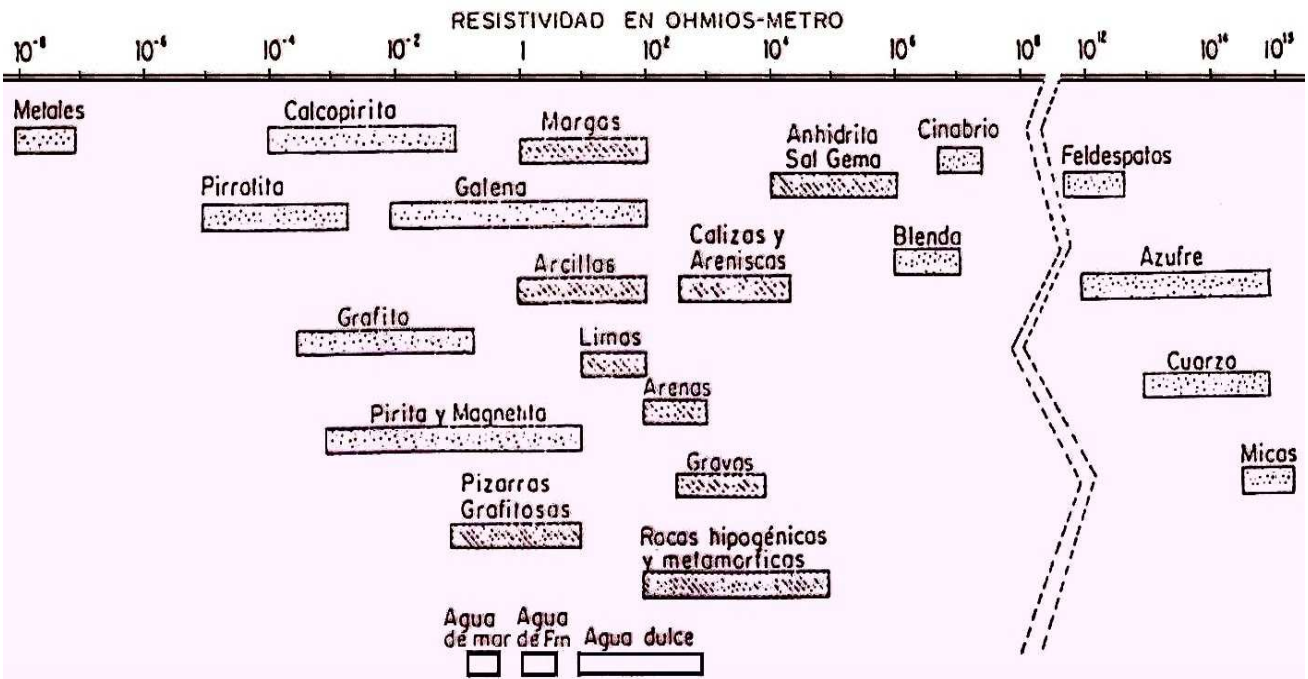


Gráfico de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. La fisuración, impregnación de agua salada, etc. pueden extender estos límites.

(modificado de Orellana, 1972)

En definitiva, se parte desde la premisa de que el sector del subsuelo que se está investigando nunca es homogéneo, porque si lo fuera daría todos valores idénticos y no existiría anomalía, ni en éste ni en los otros

métodos geofísicos. Entonces los valores de resistividad resultantes de las mediciones en el campo se denominan **resistividades aparentes** y se simbolizan **pa**. Y para obtener las resistividades de los medios rocosos individuales interesados, así como sus geometrías aproximadas, es necesario hacer un modelado o



inversión de las ρ_a (véase por ejemplo Cai *et al.*, 2017), de manera comparable a como se procede en gravimetría, magnetometría y con los otros campos geofísicos que son abordados en los capítulos sucesivos. Los procesamientos para llegar a los modelos geológicos causantes de las anomalías registradas los iremos viendo en cada método en particular, con un amplio abanico de entretenidas posibilidades.

Prospección geoeléctrica en la búsqueda de agua potable para la ganadería en el área del arroyo La Madera, alto río Chubut (foto Geosoil Argentina)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué magnitudes eléctricas pueden ser medidas en las rocas?
- Describir brevemente los distintos tipos de conductividad eléctrica y citar unos pocos ejemplos de minerales en los que pueden manifestarse.
- ¿Qué características de las rocas determinan sus propiedades eléctricas?
- ¿Cómo se clasifican los distintos métodos geoeléctricos?
- Expresar la ley de Ohm y definir resistividad y conductividad.
- ¿Qué es la resistividad aparente?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Burger, H., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface (p 241-242). Prentice-Hall.
- Cai, J., Wei, W., Hu, X. & Wood, D., 2017. Electrical conductivity models in saturated porous media: a review. Earth-Science Reviews, V.171 (p 419-433).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 379-387). Librería de Ciencia e Industria.
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 568-574). McGraw-Hill.
- Francis, P., 1992. Exploration of the Solar System. En Understanding the Earth (p 3-24); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Griffiths D. & King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p 19-84). Editorial Paraninfo.
- Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 382-383). Ediciones Omega.
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics (p 203-207). Cambridge University Press.
- Orellana, E., 1972. Prospección geoeléctrica en corriente continua (p 33-79). Editorial Paraninfo.
- Parasnis, D., 1971. Geofísica minera (p 165-175). Editorial Paraninfo.
- Parkhomenko, E., 2012. Electrical properties of rocks (314 p). Springer Science & Business Media.
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 445-448). John Wiley & Sons.

- Sharma, P., 1976. Geophysical methods in geology (p 261-264). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 442-454). Cambridge University Press.
- Udías, A. & Mezcua, J., 1997. Fundamentos de geofísica (p 365-367). Alianza Editorial.

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.

“In tali ricerche, dobbiamo aver cura di tenere a mente la forza elettromotrice della Terra, e le correnti telluriche...”

[“En tales investigaciones, debemos cuidar de tener en mente la potencia electromotriz de la Tierra, y las corrientes telúricas...”]

(foto Phoenix Geophysics)

Carlo Matteucci (1844)



MÉTODOS GEOELÉCTRICOS DE CAMPO NATURAL

Carlo nació en 1811 en Forlì (Romagna, unos 200 km al noreste de Pisa), hijo de Chiara y Vincenzo (cirujano del hospital local). Tras el secundario superó los exámenes de ingreso en la cercana Università di Bologna, años en que por propia iniciativa estudió aspectos geológicos de los cercanos Apeninos. Ya graduado como físico, se fue a perfeccionar a la École Polytechnique de París, donde entabló amistad con grandes científicos, entre ellos **François Arago** (físico y astrónomo) y **Antoine Becquerel** (investigador de electroquímica aplicada y abuelo del descubridor de la radiactividad). Por ese tiempo Italia estaba dividida y le causó gran impacto la ejecución del patriota **Ciro Menotti** a manos de autoridades serviles al Imperio austríaco. (Hoy existen jueces corruptos que procuran encarcelar políticos no serviles al Poder económico).

Carlo Matteucci llegó a tener a su cargo la cátedra de física de la Università di Pisa, realizó viajes académicos por Francia e Inglaterra y se casó con la escocesa Robinia Young. Hizo innumerables aportes a la física, especialmente a los fenómenos eléctricos, meteorología, inducción magnética, polarización de electrodos, instrumental médico y hasta relativa a la electrofisiología animal (fue un torturador de pobres ranitas... como antes **Luigi Galvani**). De espíritu humanista y con visión federal, Carlo se involucró en política, fue senador por el Reino de Cerdeña y luego ministro de educación durante la presidencia de Urbano Rattazzi en el naciente Reino de Italia.

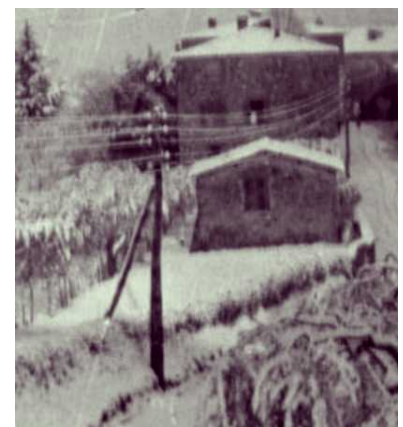
Entre sus muchas publicaciones, están aquellas referidas a las corrientes que él bautizó como telúricas y que estudió a partir de medir (con electrodos impolarizables) su interferencia con las líneas telegráficas de Saint Maurice (Francia) y con las tendidas entre Pisa y la portuaria Livorno (primer telégrafo en la península, inicio de las comunicaciones a distancia) así como entre Milán y Monza, que solían tener correlato con la aparición de auroras boreales (auténticas señales del más allá).

Matteucci se estaba tomando un descansito en Livorno cuando, sólo cuatro días después de cumplir cincuenta y siete, lo sorprendió la parca.

Las ranitas seguramente festejaron.

CORRIENTES TELÚRICAS Y ATMOSFÉRICAS

Las corrientes eléctricas naturales que circulan por la corteza terrestre son llamadas telúricas y se originan por la inducción primaria (P) del campo geomagnético de la Tierra, más la interacción de las tormentas eléctricas troposféricas, que a su vez pueden interactuar con otras corrientes corticales menores. Dada la variabilidad del campo magnético externo, las corrientes telúricas inducidas o secundarias (S) se manifiestan con amplitud y

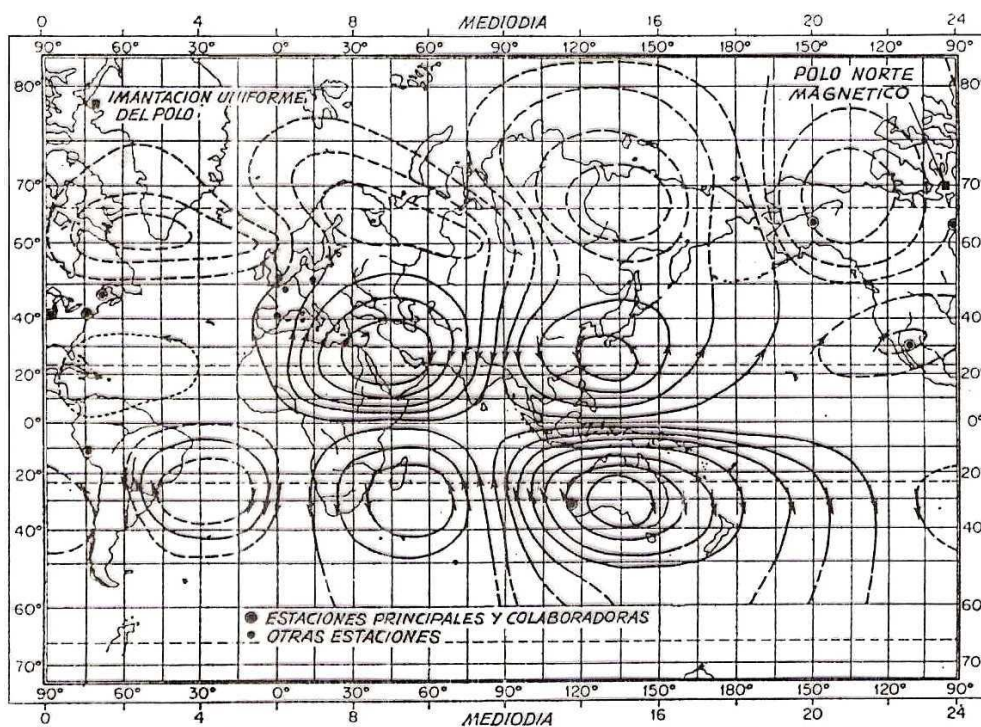


Antiguas líneas telegráficas en Italia
(foto www.clamfer.it)

frecuencia cambiantes a lo largo de las horas y también de un día a otro, registrando desde casi 0 hasta 10.000 Hz, habitualmente con amplitudes bajas.

A escala global, las corrientes telúricas configuran ocho circuitos eléctricos principales, cuatro en cada hemisferio, más otros circuitos menores distribuidos geográficamente, en especial en las regiones polares.

Respecto a la conexión entre la tierra y el aire, la superficie terrestre tiene carga negativa y atrae iones positivos de la atmósfera cuando hay buen tiempo. En cambio, durante las tormentas las cargas positivas viajan en sentido contrario. Las nubes en su base se cargan negativamente y estas cargas fluyen hacia tierra generando las descargas eléctricas (rayos). Y en forma análoga se dirigen hacia la parte superior de las nubes por hallarse positivamente cargada (se visualizan en forma de relámpagos).



Sistema de corrientes terrestres a las 6 horas de tiempo medio de Greenwich.

(modificado de Chapman & Bartels, 1940)

REFUCILOS EXTRATERRESTRES

Todos los planetas y lunas con campo magnético propio naturalmente tienen corrientes eléctricas internas que son sus causales y que generan una magnetosfera que interactúa electromagnéticamente con el viento solar (o con la gran magnetosfera de Júpiter). Estamos refiriéndonos principalmente a Mercurio, la Tierra, los cuatro gigantes y la luna Ganimedes. Es muy presumible que por inducción éstos también desarrollen equivalentes de las corrientes telúricas, con rangos de intensidades diferentes en cada caso.

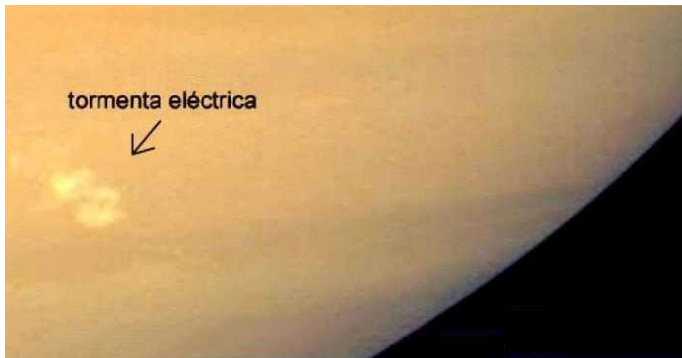
A nivel atmosférico, además de la inducción que puede dar el viento solar, suelen existir disparadores propios. Se estima que ocurren unos 50 relámpagos por segundo en la atmósfera terrestre. Y es probable que cada planeta o luna con atmósfera manifieste corrientes eléctricas asociadas a su dinámica.

En el caso de Venus, carente de un escudo magnético propio, la acción del viento solar induce corrientes eléctricas atmosféricas que producen el ya citado escape del hidrógeno y el oxígeno hacia el espacio. Además, el fenómeno de luces cenicientas (*ashen lights*) es un ligero brillo observado ocasionalmente en su lado nocturno que, sumado a la detección de emisiones de radio de baja frecuencia, sugiere que se producen descargas eléctricas en las nubes sulfurosas de las capas bajas de esa densa atmósfera.

En Marte también hay algunos signos de descargas eléctricas, que en este caso parecen ocurrir durante las intensas tormentas de polvo que suelen azotar el planeta rojo (y esculpir formas extrañas, como también sucede en la Patagonia, tal el caso de la "enigmática efigie" que con el tiempo se está modificando).

Los rayos también descargan en Júpiter, Saturno y probablemente Urano y Neptuno. En la tierra un huracán puede perdurar semanas, mientras que la Gran Mancha Roja de Júpiter ha existido durante más de 150 años y es una de tantas formaciones tormentosas alrededor de ese enorme planeta. También permanentemente una gran masa de átomos cargados es expulsada de la magnetosfera joviana con gran intensidad generando corrientes eléctricas que fluyen hacia algunos satélites, sobre todo Io y en menor medida Europa.

En Saturno es notable que la intensidad de ionización es unas 100 veces mayor en el lado iluminado que en el lado oscuro de su ionosfera. En ese planeta también va apareciendo enormes tormentas ciclónicas (cuya frecuencia media es de una cada año terrestre) y pueden captarse las ondas de radio producidas por el aparato eléctrico asociado a cada una de ellas, con descargas hasta 10.000 veces más potentes que las de la Tierra.



Saturno (imagen de RPWS Team, NASA)

Ocurren predominantemente a ciertas latitudes en las que se estima hay convección vertical a gran escala. de nubes con agua en las capas altas de la atmósfera También es posible que la luz solar directa favorezca estos procesos. La mayor tormenta apareció el año 2010, desarrollando un vórtice central oscuro de unos 5.000 kilómetros de ancho que persistió durante alrededor de 200 de nuestros días y se expandió hasta alcanzar un área donde hubiesen cabido varias Tierras.

Los dos gigantes de hielo, Urano y Neptuno,

igualmente poseen formaciones tormentosas (y vientos feroces), pero sus descargas eléctricas atmosféricas todavía no han sido registradas, si bien los exometeorólogos las consideran muy probables.

Las lunas que poseen atmósfera son también potencialmente capaces de manifestar actividad eléctrica. Se ha confirmado la existencia de este tipo de actividad en Titán, el mayor satélite de Saturno, que además tiene ríos y grandes lagos de hidrocarburos y una atmósfera con 95% de nitrógeno y 5% de metano, como ya fuera mencionado en el Tema 01. Se forman nubes de metano, etano y otros compuestos orgánicos, y suceden movimientos convectivos, lo cual puede generar campos eléctricos estáticos y tormentas. Hay un ciclo de evaporación y lluvias de metano. A lo que puede agregarse que la posibilidad de formación de moléculas orgánicas precursoras de la vida se estima mayor en atmósferas con tormentas eléctricas.

MÉTODO DE LAS CORRIENTES TELÚRICAS

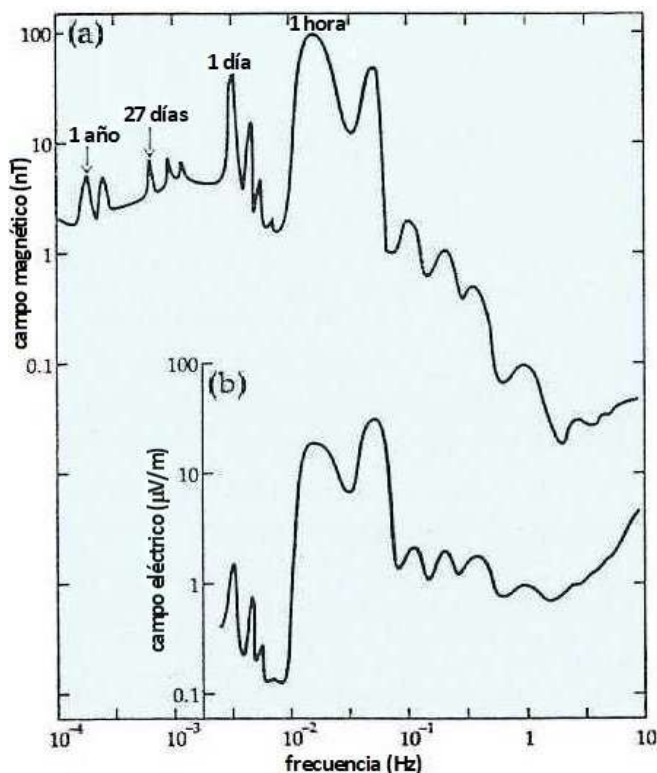
Parece ser que el inglés **Robert Fox** hacia 1832 fue el primero en inferir la existencia de las corrientes telúricas, pero éstas fueron cabalmente interpretadas por **Carlo Matteucci** entre 1847 y 1867, y recién en 1934 los alsacianos **Conrad y Marcel Schlumberger** propusieron en Francia el empleo de tales corrientes para la prospección geofísica. Inicialmente observaron que éstas aparecían como ruidos en los registros que ellos

obtenían con fuentes de corriente artificial (con las que habían comenzado a trabajar algunos años antes). Idearon entonces probar el trabajo de adquisición de información geoelectrica a partir de esta fuente natural; lo que era ruido pasó a ser tomado como señal.

Como adelantamos, las corrientes telúricas son de baja amplitud y sus frecuencias son muy fluctuantes. La prospección con ellas puede complicarse si existe una fuerte actividad magnética solar que afecta el campo terrestre. Porque durante las **tormentas magnéticas** las micropulsaciones del campo exterior de la Tierra (de muy baja frecuencia, inferiores a 0,1 Hz) pueden tener picos de amplitud de hasta 500 nT. Si es así, directamente **debe suspenderse la adquisición** de datos telúricos, tal cual ocurre en magnetometría. (Izquierda, correlación de espectros geomagnético y geoelectrico).

En el trabajo de campo la metodología consiste en **registrar con un par de electrodos móviles a cierta distancia mutua, midiendo la diferencia de potencial entre ellos**, y disponer de **otros dos pares de electrodos fijos** en la base de arranque, uno N-S y otro E-O, **a fin de tener un control permanente de las fluctuaciones naturales de estas corrientes telúricas –más el aporte de corrientes originadas en la actividad humana–** y no confundir las variaciones temporales con el cambio en los valores de un lugar del subsuelo respecto a otro.

Hace muchas décadas que este método prácticamente no



(a) espectro de frecuencia de las variaciones naturales en la intensidad del campo geomagnético, y (b) respectivo espectro de fluctuaciones del campo eléctrico inducido, calculado para un modelo terrestre de $20\Omega\text{m}$.

(modificado de Serson, 1973)

se usa porque fue superado por variantes magneto-telúricas. Derecha, esquema del método telúrico.

MÉTODOS DE LAS CORRIENTES MAGNETOTELÚRICAS

Estos métodos electromagnéticos (EM) de campo natural tienen algunas variantes que son muy similares a ciertas modalidades de los métodos EM de campo artificial.

El ruso **Andrei Tikhonov** en 1950 y el francés **Louis Cagniard** en 1953 elaboraron las bases del método magnetotelúrico (MT), que consiste en medir no sólo las componentes eléctricas del campo magnético, sino además sus contrapartes magnéticas –con sensores que pueden ser bobinas simples o magnetómetros– a fin de combinar las mediciones en conjuntos de datos más robustos, con el plus de dar resultados menos afectados por las variaciones del campo externo.

De manera que *se miden las mismas corrientes telúricas* ($E_{x,y}$), *pero además sus correlativos vectores magnéticos* ($H_{x,y}$), que son ortogonales, como está dibujado a la derecha.

La impedancia es: $Z(\omega) = E_x(\omega) / H_y(\omega)$

O alternativamente: $Z(\omega) = E_y(\omega) / H_x(\omega)$

(E_x y E_y es el campo eléctrico medido en las direcciones perpendiculares x e y en función de la frecuencia angular ω , y análogamente H_x y H_y)

Para semiespacios homogéneos de resistividad ρ_0 se demuestra que: $Z_0(\omega) = \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \rho_0}$ (donde $i = \sqrt{-1}$, Z_0 y ρ_0 caracterizan el semiespacio y μ es su permeabilidad magnética)

Desde allí se definen los parámetros a graficar: Resistividad $\rho_{ij} = (1 / \omega \cdot \mu) \cdot |Z_{ij}|^2$
Fase $\Phi_{ij} = \arctan [\text{imag}(Z_{ij}) / \text{real}(Z_{ij})]$

La componente imaginaria es la desfasada $\pi/2$ ó 90° respecto a la real. Las **amplitudes o resistividades aparentes R** (ρ_{ij}) y las **fases P** (Φ_{ij}) *se miden en dos direcciones:*

- *paralelamente al rumbo general de las formaciones* a mapear, obteniéndose los Telúricos Eléctricos (TE), es decir **resistividades RTE** y **fases PTE**

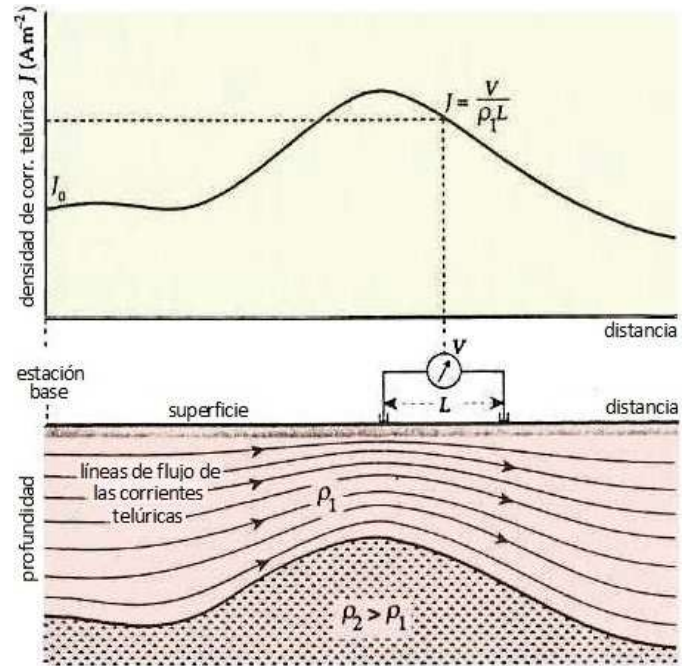
- *ortogonalmente al rumbo*, los telúricos magnéticos (TM), esto es, las **RTM** y **PTM**.

Las curvas RTE y RTM se grafican juntas y lo mismo las PTE y PTM. *Donde entre curvas que forman un mismo par la separación es mayor, estamos ante conductividades de orientación preferencial (por diques, fallas, etc.) para el rango de frecuencias de tal separación* (primeras figuras de la página siguiente). *Frecuencias más bajas corresponden a lugares más profundos; y cuanto más altas son, de más arriba provienen.*

La profundidad de penetración Z depende inversamente de μ , ω y la conductividad σ : $Z = \sqrt{2 / \sigma \cdot \mu \cdot \omega}$
con $\omega = 2\pi \cdot f$ (siendo f la frecuencia), de donde empíricamente: $Z(m) = 503 \sqrt{\rho(\Omega m) / f(Hz)}$

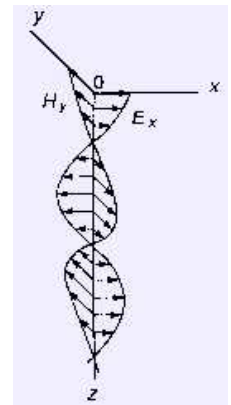
En el procesamiento se deben filtrar eventuales interferencias y corregir por variación temporal y relieve.

El caso de las figuras siguientes es de la cuenca de Paraná o Chacoparanaense en Brasil e ilustra el método, *generando modelos iterativos del subsuelo hasta lograr el mejor ajuste con los datos*. La cuenca geológica tiene cierta coincidencia con el área de distribución de las culturas tupí-guaraníes y naturalmente con la actual cuenca fluvial, último episodio de una larga historia que se inició con el evento de ruptura (*rift*, grieta) que precedió la apertura del Atlántico Sur. El abombamiento térmico bajo el supercontinente de Gondwana sabemos provocó gran cantidad de *rifts* y algunos coalescieron para formar una larga depresión que resultó progresivamente inundada por el mar (como hoy lo es el mar Rojo y todavía no lo es la gran zona de ruptura de Africa oriental, ocupada por lagos). Y fue surgiendo la dorsal centroatlántica que siguió extrayendo calor del

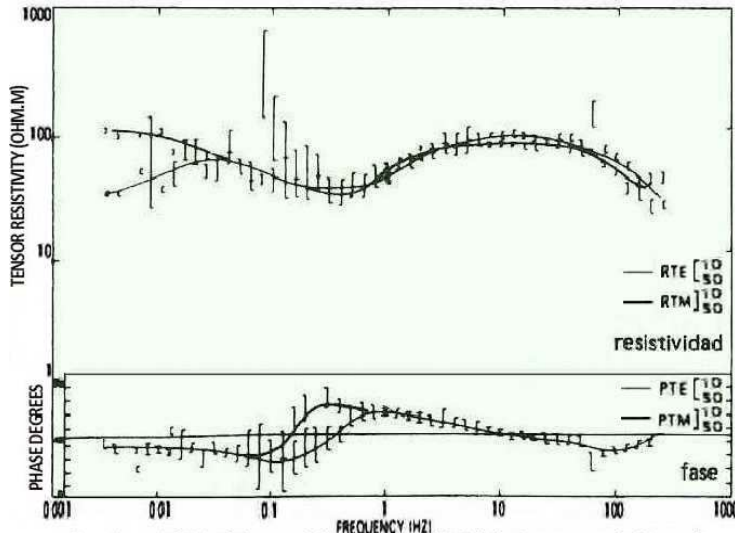


Las líneas de corrientes telúricas deflectan por cambios en el espesor de una capa conductiva sobre otra más resistiva, lo cual afecta el voltaje en superficie, resultando distintos valores de J.

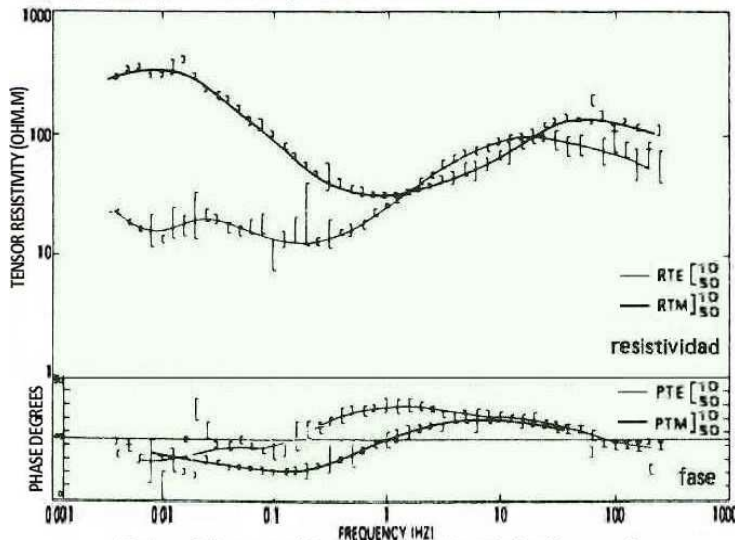
(modificado de Robinson & Corugh, 1988)



manto. La biota sudamericana empezó a evolucionar con cierta independencia (aunque la gran extinción K-Tc no distinguió continentes) y los rifts abortados a ambos lados del Atlántico dieron origen a las cuencas por subsidencia térmica (desplome o *sag*) africanas y sudamericanas. Varias con sistemas petroleros, sobre todo en áreas de actual plataforma continental submarina, antes emergidas (caso del productivísimo *pré-sal* en Brasil).

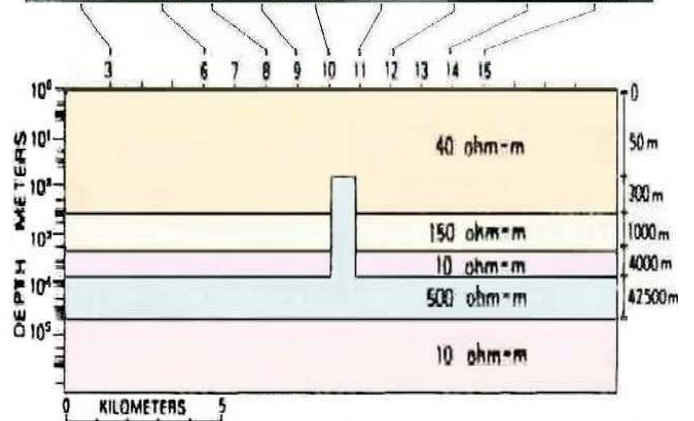


Sondeo de MT típico unidimensional (1-D) de la cuenca de Paraná. Las características 1-D exigen que los valores de resistividad (RTE y RTM) y fases (PTE y PTM) sean esencialmente idénticos.



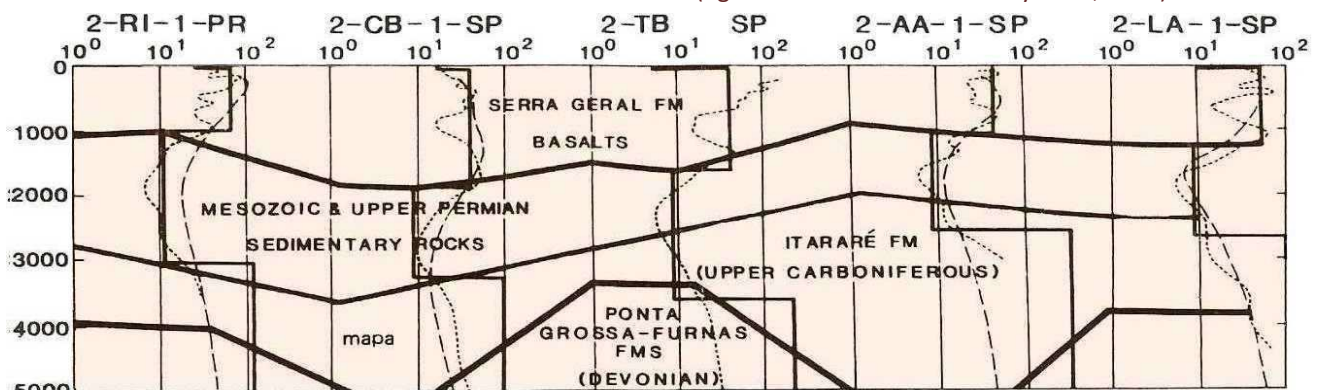
Datos típicos no 1-D, como lo evidencia la divergencia entre los valores de resistividad y las fases correspondientes.

El objetivo en esta exploración fue la detección de diques ígneos, así como la determinación de los espesores sedimentarios y las estructuras geológicas –potenciales reservorios y trampas– por debajo de los más de 1.000 metros de coladas basálticas superpuestas de la formación Serra Geral (el campo de lavas más extenso del mundo, abarcando áreas de Argentina, Paraguay, Brasil y Uruguay), majestuosamente esculpidas por el cincel fluido del río Iguazú (agua grande, en guaraní), que actúa como un espejo que impide una buena iluminación sísmica de las formaciones que yacen por debajo, potencialmente petrolíferas.

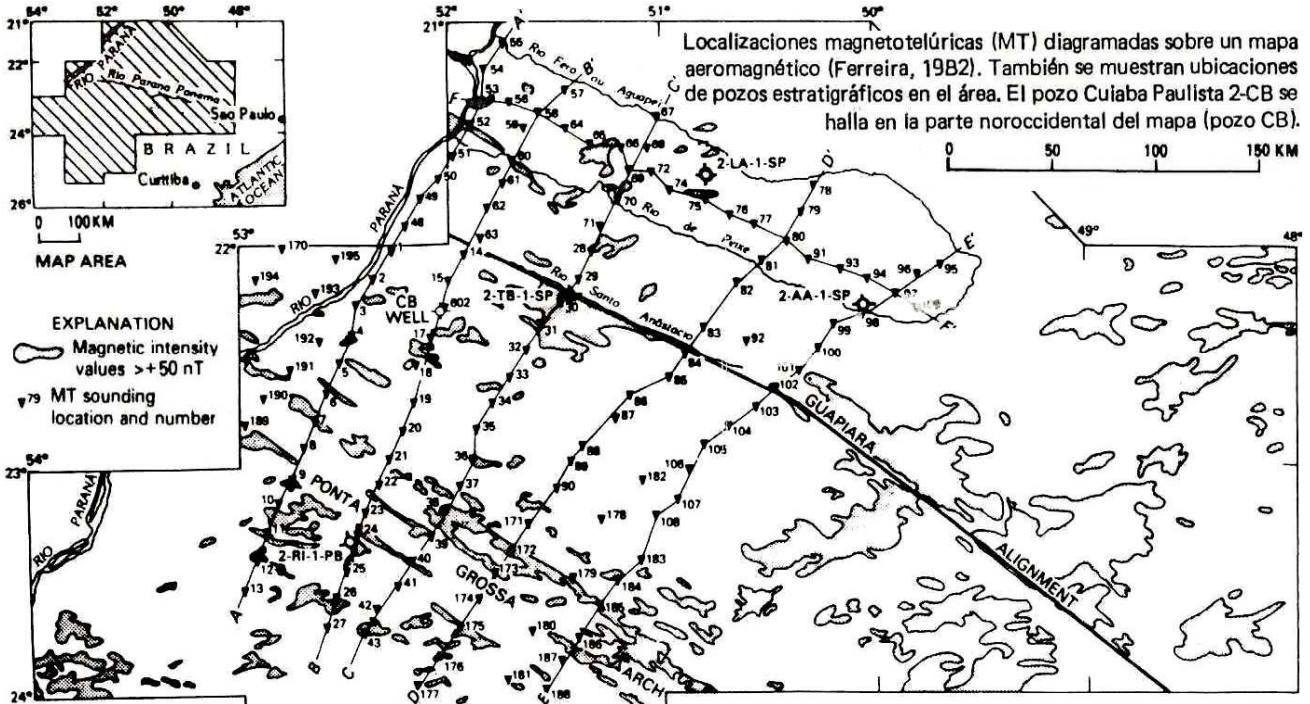


Modelo computarizado que simula un dique cortando sedimentos del Paleozoico y Mesozoico por debajo de una unidad basáltica.

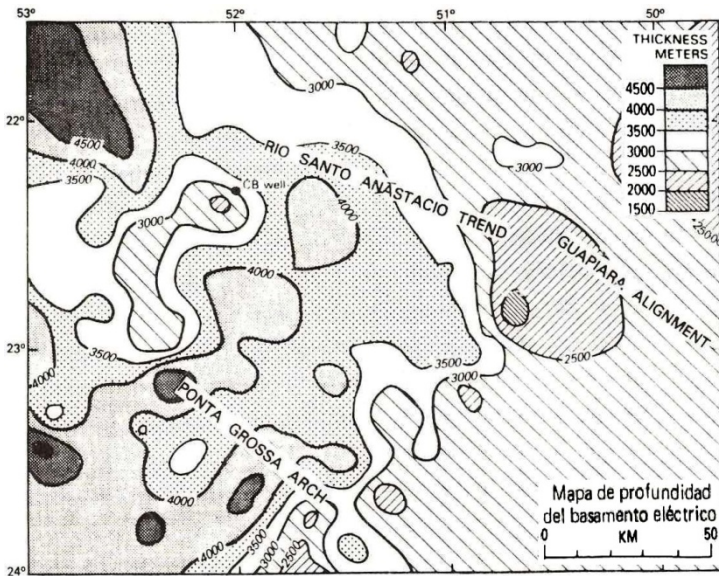
(figuras modificadas de Stanley et al., 1985)



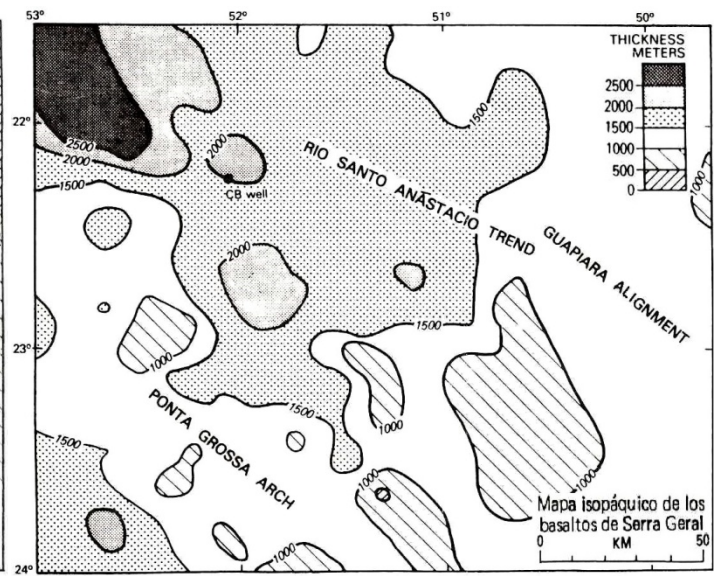
Cortes correspondientes a las cinco perforaciones indicadas en el mapa. Se exponen los perfiles litológicos simplificados de los pozos, así como el perfilaje de inducción eléctrico suavizado, la inversión continua profundidad-resistividad de las curvas de amplitud TE para los sondeos MT más cercanos y los cuatro modelos de estratos utilizados para construir las secciones.



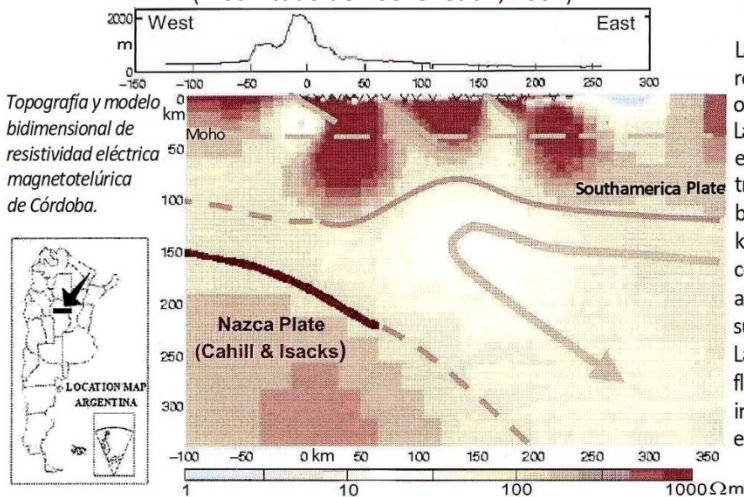
Localizaciones magnetotelúricas (MT) diagramadas sobre un mapa aeromagnético (Ferreira, 1982). También se muestran ubicaciones de pozos estratigráficos en el área. El pozo Cuiaba Paulista 2-CB se halla en la parte noroccidental del mapa (pozo CB).



(modificado de Booker et al., 2002)



(figuras modificadas de Stanley et al., 1985)



Topografía y modelo bidimensional de resistividad eléctrica magnetotelúrica de Córdoba.

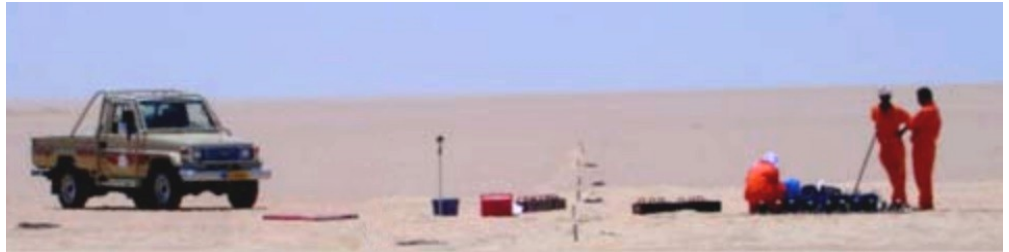
Las v indican los lugares de registros MT. La línea gruesa oscura señala la zona de Benioff. Las resistividades permitieron extrapolarla hacia abajo en trazos, así como establecer la base de la litósfera a unos 100 km de profundidad (línea clara continua) y extrapolar hacia abajo fallas reconocidas en la superficie (segmentos inclinados). La curva que termina en una flecha es el flujo astenosférico interpretado en la esquina entre las placas tectónicas.

A la izquierda se ve otro ejemplo del método, en este caso para estudios corticales profundos en un área de las sierras Pampeanas de Córdoba. Se interpretan zonas conductivas a causa de los fluidos de alta temperatura bajo cada uno de los tres bloques de falla. En el sector oriental el máximo de conductividad se vincula

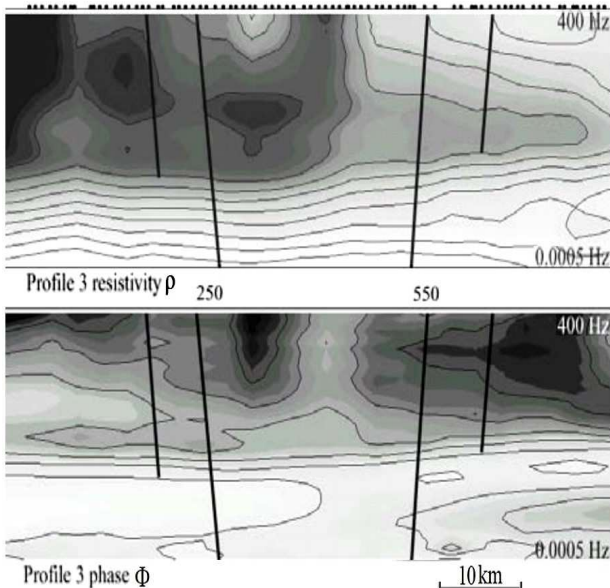
con el relleno sedimentario de esta parte de la cuenca Chacoparanaense.

A pequeña escala, la detección de variaciones de resistividad habilita interpretar posibles cambios verticales en el grado de alteración de la roca, de la litología, porosidad de las rocas reservorio y saturación, así como inferir las profundidades a las que hay cambios de fase en los fluidos geotérmicos, ya que en contraste con los bajos valores de ρ provocados por el líquido caliente y mineralizado, las rocas saturadas con vapor exhiben valores muy resistivos.

A la derecha foto de la prospección para el Paleorift Project, al norte del río Amu Darya, y acá debajo las pseudosecciones de fase y resistividad de un perfil registrado.

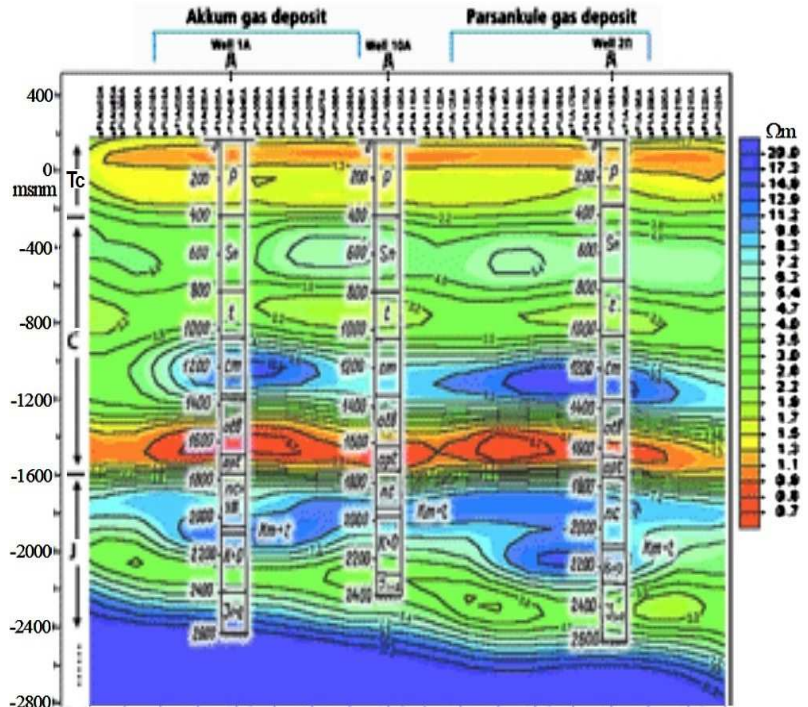


Adquisición MT en Uzbekistán (foto Phoenix Geophysics)

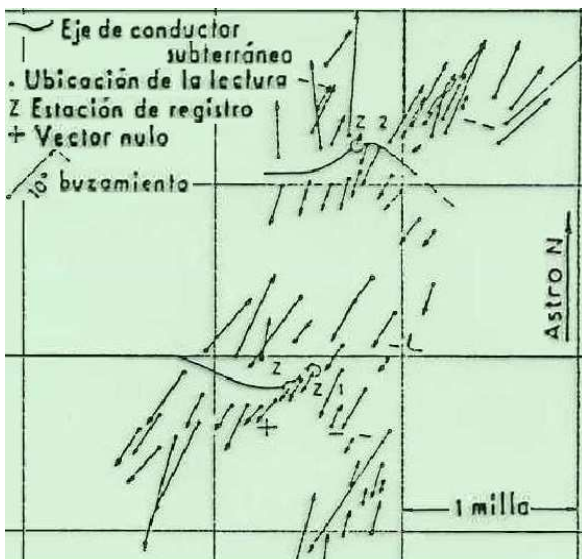


Pseudosecciones de fase y resistividad de uno de los perfiles a través del paleo-rift Bukharo-Khivinsky en Uzbekistán. Los sombreados más oscuros indican mayor Φ y menor ρ . Los segmentos subverticales son fallas interpretadas.

(modificado de Fox et al., 2003)



modelado de resistividades en una zona de yacimientos gasíferos 1 km



Vectores Aomag. (modific. de Jewell & Ward, 1963)

En el modelo de resistividades, obtenido por inversión de los datos procesados, las capas con menor ρ correlacionan con reservorios de hidrocarburos comprobados en pozos, que por tanto pueden extrapolarse a zonas todavía no perforadas como metodología predictiva adicional a otras.

Métodos audiomagnetoteléuricos

Son opciones del método MT que funcionan en el rango de las audiofrecuencias (generadas por tormentas eléctricas). Entre éstos, a su vez, existe la variante más convencional (AMT), que sigue un procedimiento de registro y cálculo análogo a lo ya descrito, y tres variantes especiales, a saber:

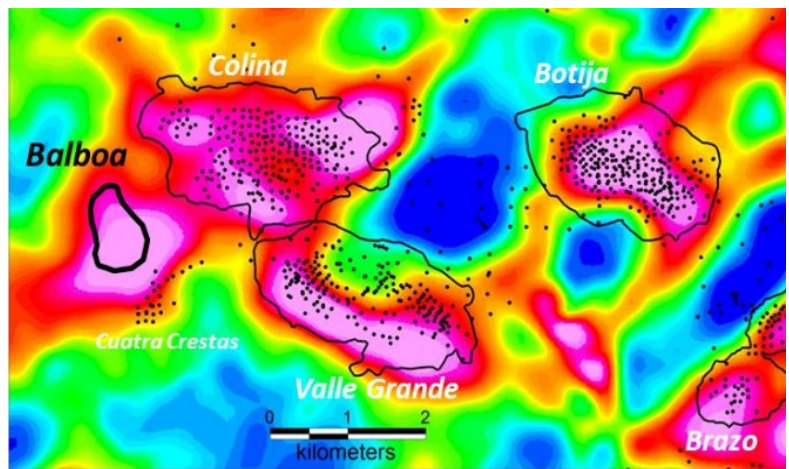
- Una, antigua, es la AFMAG (Audiofrecuencias magnéticas, figura adyacente), útil para la localización de los cambios de buzamientos en estructuras someras del subsuelo. *Se registra de manera análoga a los métodos electromagnéticos de inclinación de campo* (Tema 08, pág.174), pero en este caso la fuente no es un campo artificial, sino uno natural (tormentas).

- Otra variante resulta de la evolución de la antes descrita y se la denomina **ZTEM** (*Z-axis Tipper Electro-Magnetics*: volquete EM en el eje Z), tipo de prospección particular, magnetovariante, que registra el campo magnético vertical con un bucle de unos 7 u 8 metros de diámetro llevado en forma aérea (helicóptero es lo más común, colgando unos 80 a 100 metros por debajo del aparato) mientras que las dos componentes horizontales del campo natural se miden en tierra desde una estación de referencia fija, asumiendo que son relativamente homogéneas dentro del área prospectada. La toma de datos, sincronizada mediante *GPS*, se digitaliza a unos 2.000 Hz. Luego se filtran ruidos (inestabilidad de vuelo e interferencias varias). La relación entre la componente vertical y las dos horizontales es lo que fue bautizado *tipper*, es un tipo de anomalía atravesada sobre un cuerpo conductor de fuerte buzamiento y se busca conjugar las dos componentes en una única centrada en la anomalía. Los datos son presentados en términos de DT (Divergencia de *Tippers*) siendo:

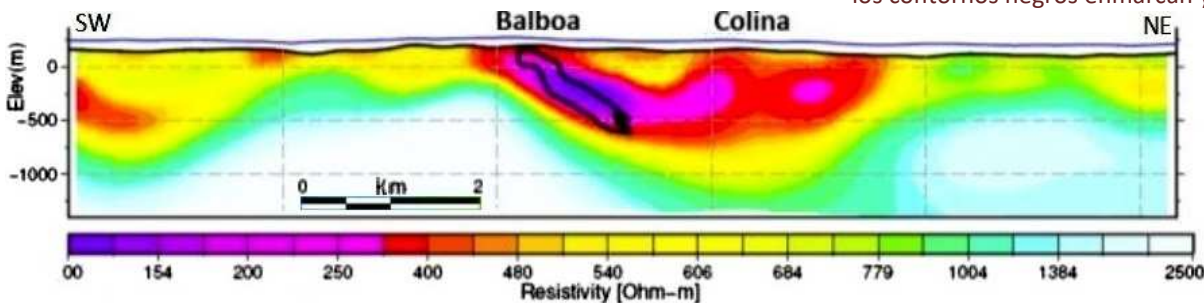
$$DT = \text{div} (Hz/Hx, Hz/Hy) = d(Hz/Hx)/dx + d(Hz/Hy)/dy$$

La divergencia, al ser una derivada, no preserva algunas de las longitudes de onda largas, por lo cual podría no proveer información respecto a la profundidad ni la extensión del conductor. Las grillas de fase rotada 90° muestran el máximo justo sobre los conductores y a veces se las emplea porque preservan las longitudes de onda más largas aunque con la desventaja de favorecer sólo una dirección (*x* o *y*).

Vemos un caso aplicado en Panamá en mapa y perfil en un área andesítica donde existen mineralizaciones de sulfuros, principalmente piritita y calcopiritita, con Cu, Mo y Au porfíricos. Obsérvese la respuesta de baja resistividad sobre los yacimientos mineros ya en explotación, así como sobre el sector denominado Balboa que por analogía significó la inferencia del nuevo hallazgo, luego confirmado con muestreos *in situ*.

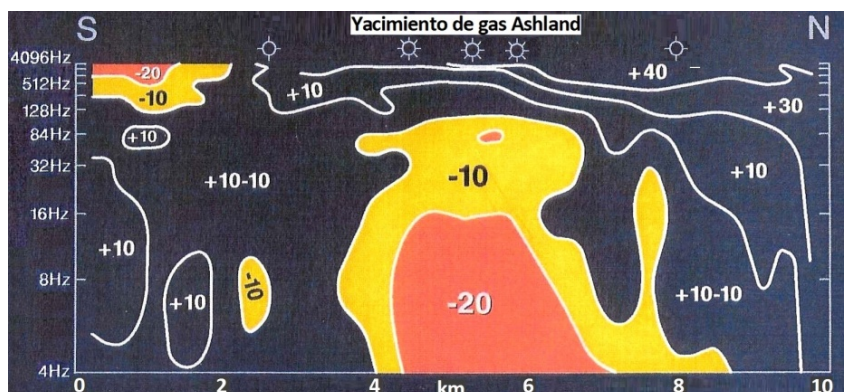


Arriba mapa y abajo perfil de datos de prospección ZTEM en Panamá; los contornos negros enmarcan yacimientos, los puntos indican perforaciones y Balboa es el nuevo hallazgo (modificado de Jansen & Cristall, 2017)



- Otra modalidad prospectiva es la de **CSAMT** (*Controlled Source AMT*), que opera como la mayoría de los métodos MT, pero se diferencia en que su fuente es artificial y por ende controlada, a partir de dos pares de antenas ortogonales a varios km.

Se ilustra en la figura contigua el resultado, ya procesado, de un perfil que muestra una anomalía central de alta ρ al atravesar un yacimiento de gas debido a la presencia somera de areniscas cementadas con calcita (de origen autigénico por el escape de hidrocarburos desde una profunda trampa), y debajo se registran bajas ρ (chimenea conductiva con arcillas alteradas por intercambio catiónico). Vemos hasta 400 m de profundidad.

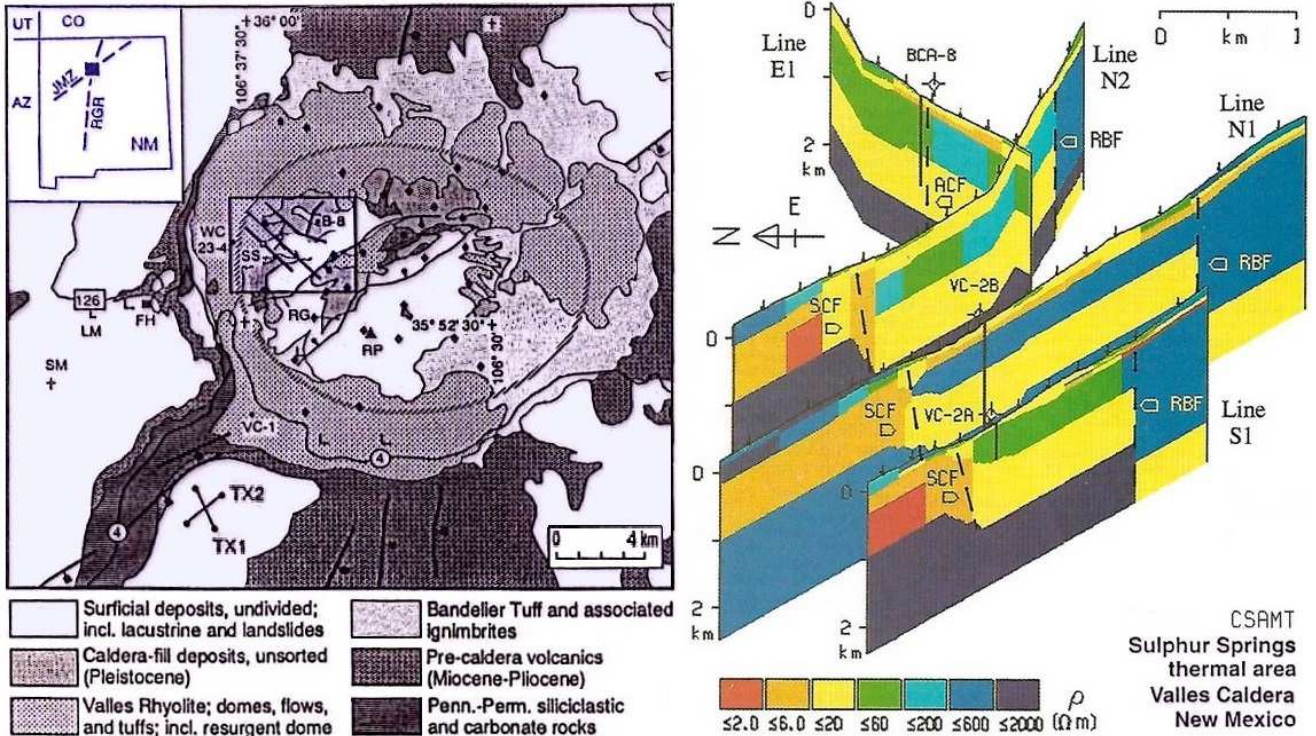


PERFIL DE RESISTIVIDAD RESIDUAL ($\pm\Omega m$) CSAMT Cuenca de Arkoma (Oklahoma, USA) (modificado de Phoenix Geophysics)

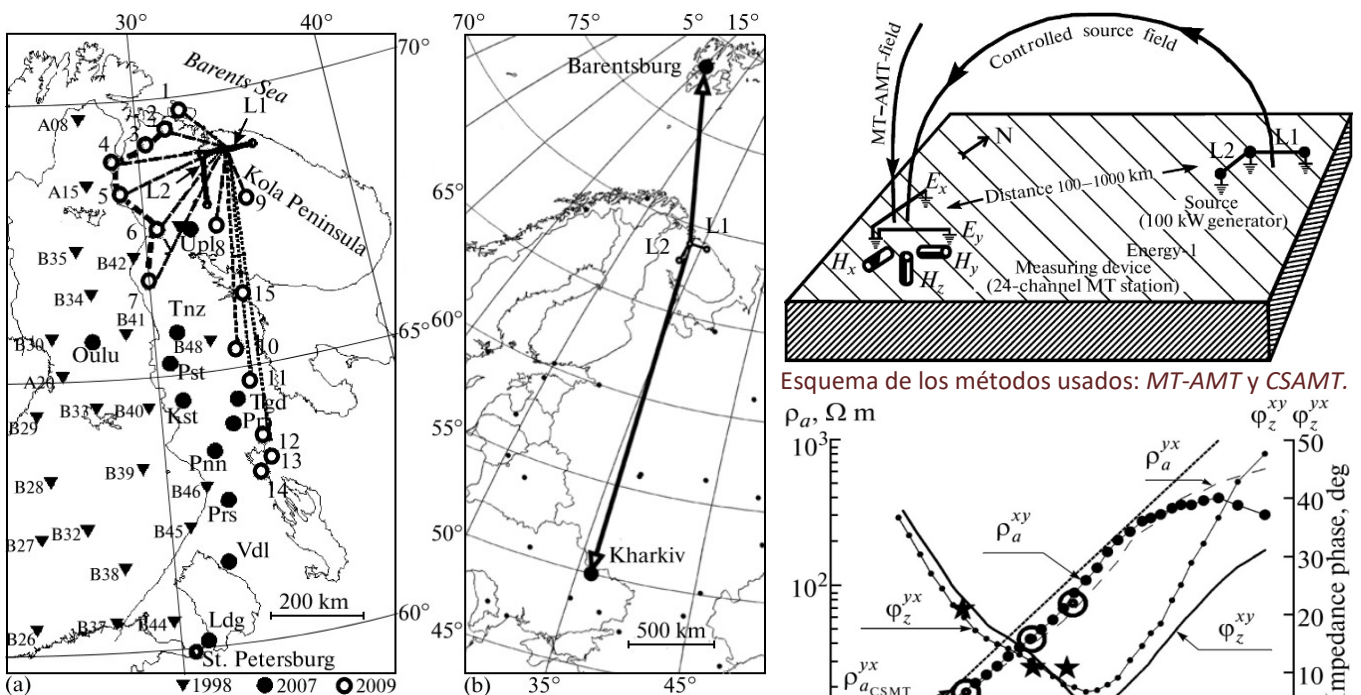
Es frecuente emplear imágenes someras si hay alteración geoquímica por manaderos de hidrocarburos.

Y el ejemplo siguiente procede de un área geotermal volcánica en Estados Unidos. Se registró dentro del recuadro pequeño del mapa geológico (izquierda), TX1 y TX2 son las antenas emisoras. Las secciones modeladas a partir de los datos muestran las zonas más resistivas, en las que mediante pozos fue verificada la presencia de **reservorios de vapor producible para generación eléctrica**.

(modificado de Wannamaker, 1997)

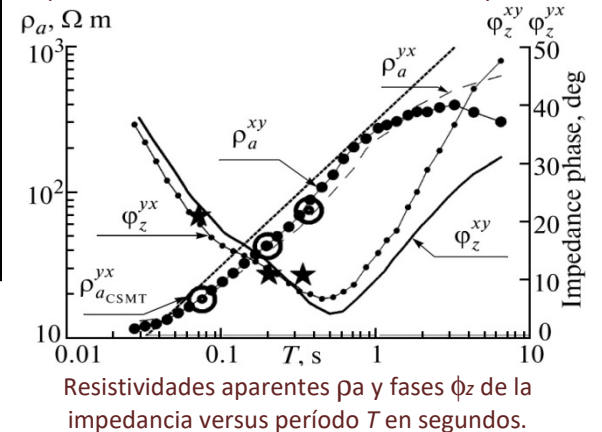


Un caso notable muestran las siguientes figuras de Rusia noroccidental y países vecinos, con emisión desde dos líneas de alta tensión perpendiculares de más de 100 km cada una conectadas a 200 kW de dos generadores.

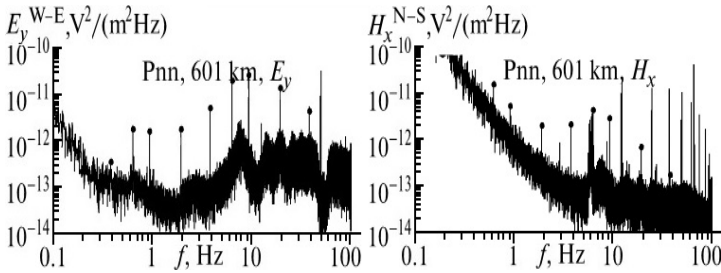


Mapas de ubicación de la adquisición MT-AMT y CSAMT desde la península de Kola, Rusia: (a) estaciones emisoras L1 y L2, y receptoras cercanas en registros de 1998, 2007 y 2009; (b) emisoras y receptoras más alejadas (figuras modificadas de Zhamaletdinov et al., 2011)

Esquema de los métodos usados: MT-AMT y CSAMT.

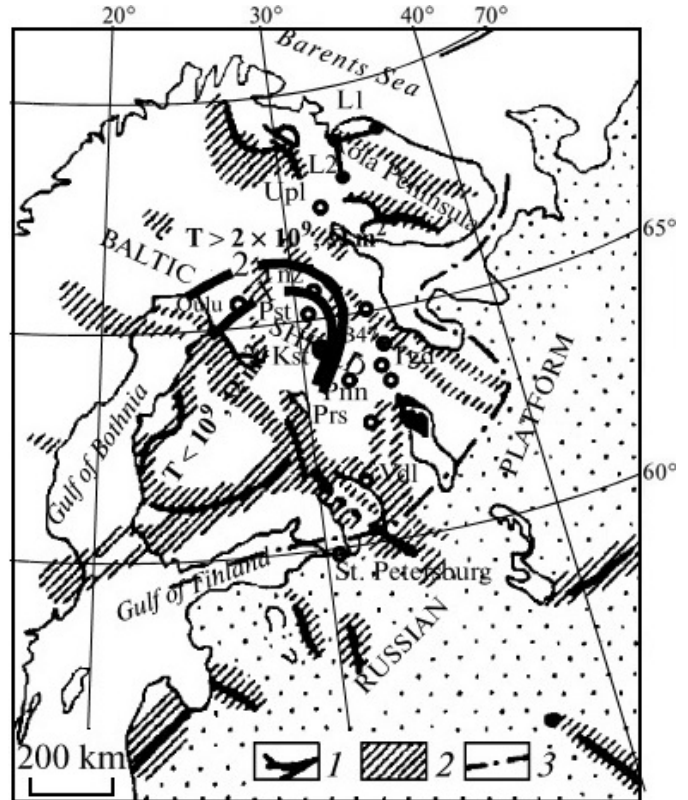


Resistividades aparentes ρ_a y fases ϕ_z de la impedancia versus período T en segundos.



Gráficos de potencia espectral cosechada –frecuencia en abscisas, potencia en ordenadas– en una adquisición a 601 km al sur de las líneas emisoras L1 y L2 según las componentes ortogonales E_y y H_x .

Mapa geoelectrico del área estudiada: 1, ejes de las anomalías de conductividad; 2, regiones de resistividad cortical reducida; 3, confín entre el escudo báltico –donde afloran rocas del Arqueano y Proterozoico– y la plataforma rusa –sedimentitas que cubren el cratón desde el Vendiano– (figuras modificadas de Zhamaletdinov *et al.*, 2011)



Las líneas-fuente fueron emplazadas en la península de Kola (sector noreste del escudo geológico Báltico o Fenscandio). Se operó con dos modalidades: CSAMT y MT-AMT, es decir con campos artificial y natural respectivamente, en el segundo caso empleando un rango de frecuencias más amplio pero menor potencia.

Se trató de un **sondeo EM ultraprofundo** (hasta 60 km bajo la superficie) que se combinó con datos areales. Los sondeos electromagnéticos permiten tener respuestas de lugares más profundos gracias al registro de frecuencias más bajas, que son las que más se preservan en el viaje de ida y vuelta (Tema 08, pág.185).

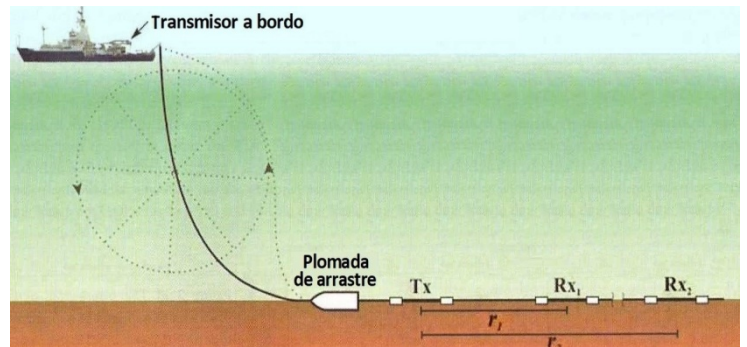
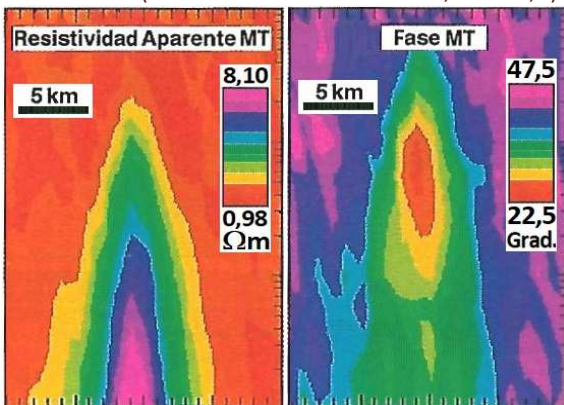
- También puede hacerse **prospección MT para registrar datos del subsuelo de lagos o mares**. La intensidad de los campos eléctricos de los fondos subacúeos es mucho menor que la existente en tierra firme, pero como contrapartida hay muchas menos causas de ruido (no hay líneas de alta tensión, ni estructuras metálicas, ni potenciales eléctricos naturales del terreno, entre otras).

Una posibilidad es sumergiendo hasta el fondo dispositivos como el de la foto colindante, un doble dipolo de 5 metros que, complementado con un magnetómetro en superficie, logra obtener lecturas de las **corrientes telúricas naturales como fuente** con períodos del orden de 0,001 a 10 Hz

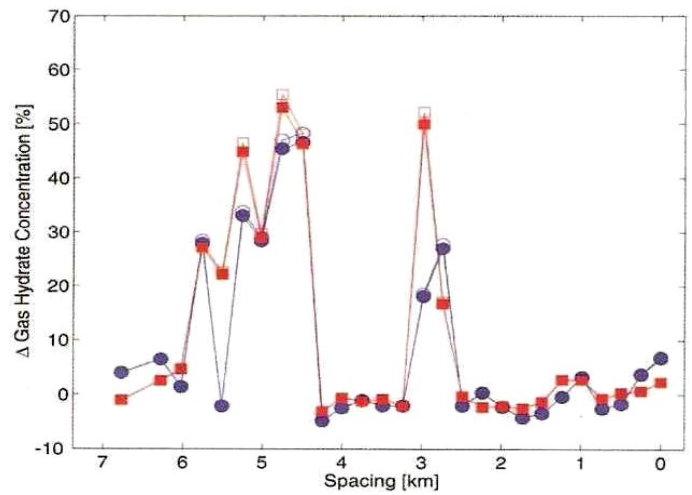
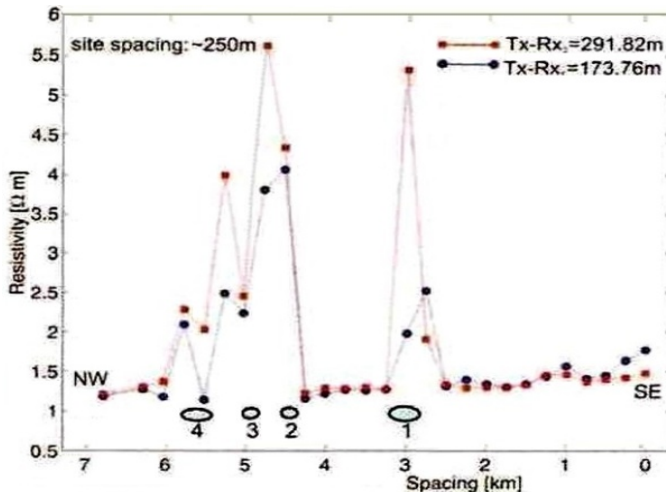
Otra opción es la graficada acá abajo, con **fuentes controladas (artificial)**, parecido a los métodos EM (Tema 08).



Instrumento magnetotelúrico listo para ser bajado al fondo marino y abajo perfiles resultantes sobre un domo salino (modific. de Constable *et al.*, 1998 a,b)



Dispositivo MT de arrastre subacúeo; Tx, dipolo transmisor; Rx1 y Rx2, dipolos receptores (modificado de Schwalenberg *et al.*, 2005)

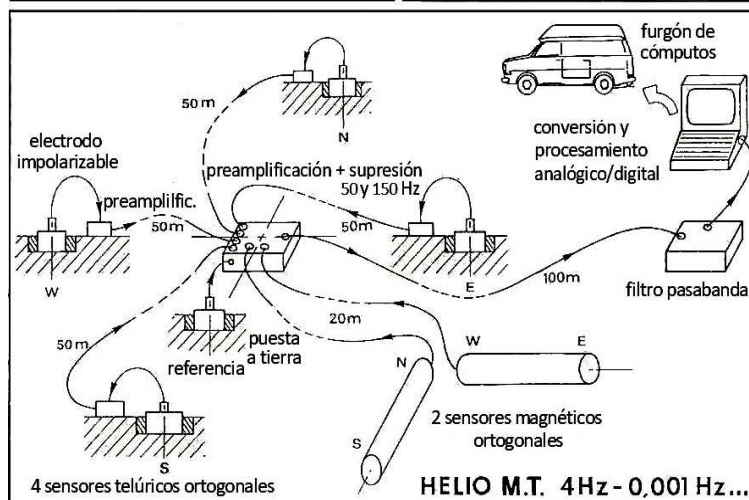
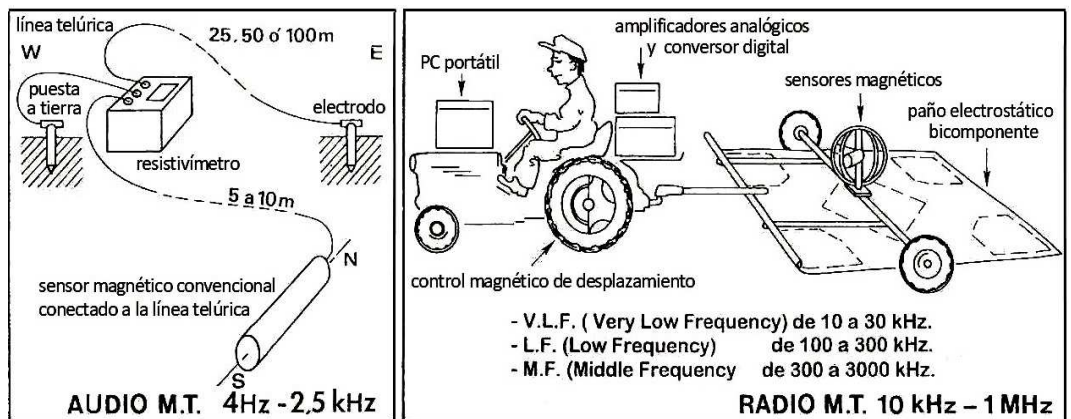


Registros marinos en Cascadia, NO de Estados Unidos (modificado de Schwalenberg *et al.*, 2005)

Se ilustra arriba una adquisición de datos EM marinos para la evaluación de yacimientos de gas en forma de hidratos registrada con el dispositivo referido en la página anterior, en el cual las distancias r_1 y r_2 se miden entre los puntos medios de cada dipolo para luego inferir la profundidad de investigación. Obsérvese la muy buena correspondencia entre las resistividades obtenidas en el perfil de 7 km y la detección de gas hecha por geoquímica. Los **clatratos o hidratos de metano** consisten en formaciones sólidas de agua y metano (CH_4) yacentes sobre todo en lechos marinos continentales y, pese a hallarse entre 0 y 5 °C (donde cada componente puro sería fluido), la presión los estabiliza en una red cristalina de agua con inclusión de moléculas de gas. Al llevarlos hasta la superficie y despresurizarlos tienden a descomponerse. Conforman una fuente energética alternativa con reservas estimadas que casi duplican las reservas convencionales. Pero la extracción de este hielo que arde con una llama es todavía difícil de hacer sin el riesgo de liberar a la atmósfera grandes cantidades de CH_4 (1,8 veces peor que el CO_2), lo cual contribuiría a empeorar mucho el ya nefasto efecto invernadero.

Otras variantes del método MT

Además del rango de audiofrecuencias también se puede trabajar dentro del espectro que dan las **radiofrecuencias (RMT)**, en verdad aprovechando las emisiones radiales de origen artificial —que entre sus opciones incluye el popular **detector de metales** que es descrito en el Tema 08, pág.179—, y asimismo con las **heliofrecuencias (HMT)** dadas por la energía solar, tal como se resume en la figura aquí a la derecha y en el cuadro de la página siguiente.



$$\rho = 0,2 T \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2$$

$$P = \frac{1000}{2\pi} \sqrt{10 \rho T}$$

ρ = resistividad en Ωm
 T = período en s
 E = campo eléctrico en mv/km
 H = campo magnético en nT
 P = profundidad de penetración en m

(modificado de Dupuis, 1997)

versiones	fuentes principales	rango de frecuencias	profundidad de penetración	sensor magnético	sensor telúrico	tiempo de registro
RADIO M-T	sistemas de radiodifusión	1MHz - 10KHz	1 - 50 m.	bucle de 45 cm Ø	capacitivo en un paño electrostático (1-5 m.)	instantáneo
AUDIO M-T	tormentas atmosféricas	2,5KHz - 8Hz	50 - 1000 m.	de flujo retroalimentado 1,15 m. de largo	metálico o impolarizable (15 - 100 m.)	30 minutos
HELIO M-T	actividad solar	8Hz - diurna	> 500 m.	de flujo retroalimentado 1,5 a 2 m. de largo o SQUID	impolarizable (100 - 1000 m.)	½ día a semipermanente

(modificado de Dupuis, 1997)

Como hemos ido viendo, las varias modalidades de los métodos MT tienen aplicaciones muy diversas. Además de las ya referidas, **también se los emplea para la búsqueda de otros tipos de mineralizaciones (por ejemplo diamantes), para recursos hídricos, evaluaciones medioambientales, etc.**

MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO

Se miden pequeñas tensiones eléctricas naturales (menores a 1 voltio) producidas por diferencias en la actividad química de distintos sectores del terreno; no dependen de ninguna propiedad física definida. El fenómeno del potencial espontáneo (PE o *SP*, *self potential*) fue descubierto por el inglés **Robert Fox** en 1815 en minas de cobre –también indagó sobre temas de magnetismo y geotermia–. Su investigación fue retomada en 1882 por **Carl Barus** en Nevada (Estados Unidos), aunque comenzó a ser aplicado regularmente para fines prospectivos recién en 1913 por **Conrad Schlumberger** cuando concretó el primer hallazgo geofísico de un mineral no magnético: un yacimiento de sulfuros en Serbia.

Las investigaciones de **M. Sato** y **H. Mooney** publicadas en Estados Unidos en 1960 determinaron que el origen de los potenciales espontáneos puede remitir a diversas causas. **Nunca ocurren si los suelos están totalmente secos o helados.**

Tipos de potenciales espontáneos

▪ de Fondo:

Están vinculados sólo a conducción de tipo iónico y pueden a su vez ser de dos tipos:

- **potencial electroquímico o de difusión** por variaciones de concentración en los electrolitos del subsuelo (ácido húmico o salinidad).

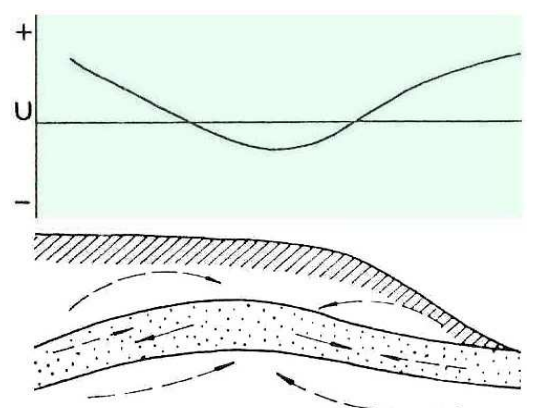
- **potencial electrocinético o de filtración o capilaridad** de los electrolitos que fluyen a través de los poros o membranas, sobre todo a niveles superficiales, como por ejemplo el ascenso y descenso de la napa freática (véase la ilustración de la derecha), lo cual desplaza cargas eléctricas porque se adsorben aniones en la superficie de los clastos y entonces el fluido en movimiento se enriquece proporcionalmente en cationes.

▪ de mineralización:

Responden a las diferencias en la capacidad de oxidación de las aguas próximas al techo de los yacimientos, que internamente poseen conductividad electrónica: esto produce el intercambio de cargas iónicas y electrónicas. La mineralización transporta electrones desde la parte inferior hacia la superior buscando el equilibrio electroquímico, por cuya razón esa parte alta se carga



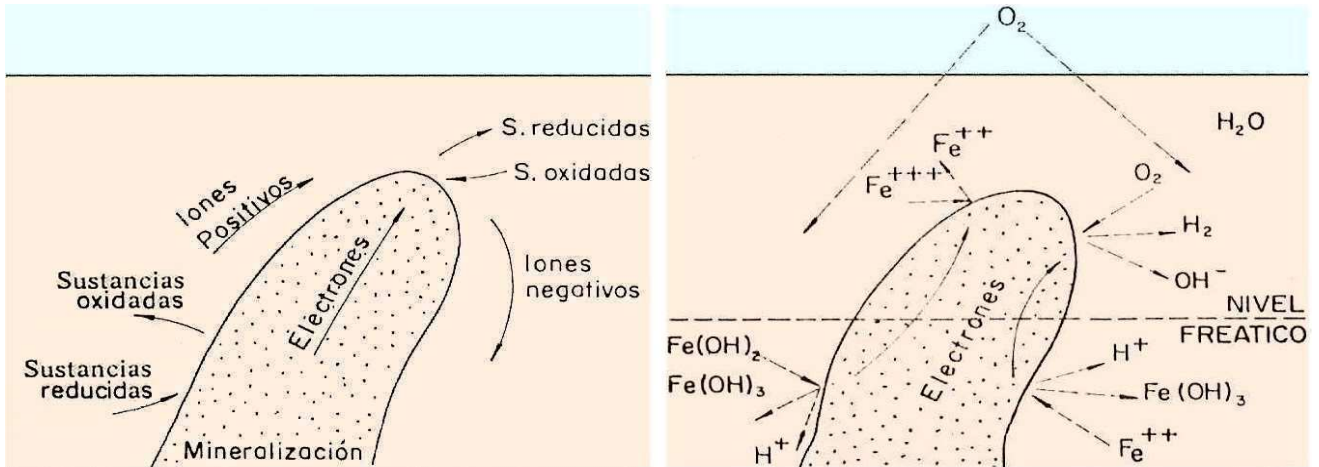
Adquisición de PE (foto Subsurface Geotech)



Producción de potenciales de electrofiltración *per descensum*

flechas llenas: marcha del agua
flechas de trazos: líneas de corriente eléctrica
(modificado de Yakubovskiy & Liakhov, 1964)

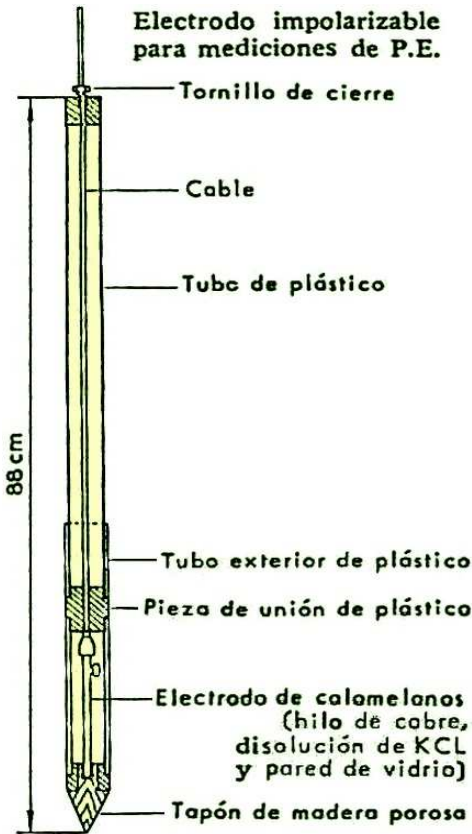
negativamente, generándose en consecuencia una pila, como se esquematiza en las figuras siguientes. Tiene lugar típicamente en yacimientos de sulfuros, magnetita, grafito y otros.



Sentido de marcha de electrones e iones en la Polarización Espontánea

Ubicación y naturaleza de algunas de las reacciones en la PE

(modificado de Sato y Mooney, 1960)



(modificado de Parasnis, 1971)

Medición del potencial espontáneo en superficie

▪ Equipo necesario:

- Dos electrodos: imprescindible que sean impolarizables para evitar la acción electrolítica (acumulación de cargas en el contacto del metal, con conductividad electrónica, con el medio iónico del suelo) la cual enmascararía la diferencia de potencial natural (ΔV). Se recurre al electrodo de Calomelanos (figura adyacente), o bien cobre o cinc sumergido en sulfato de cobre o cinc dentro de una cerámica porosa, u otras alternativas similares.

- Rollo de cable: con un buen recubrimiento aislante.

- Voltímetro: **de lectura directa**, con una impedancia de entrada alta, tipo electrónico de válvula (medidor de ph).

de compensación (oposición), basado en equilibrar la tensión entre los electrodos de SP con una tensión conocida.

▪ Trabajo de campo:

Existen dos modalidades alternativas.

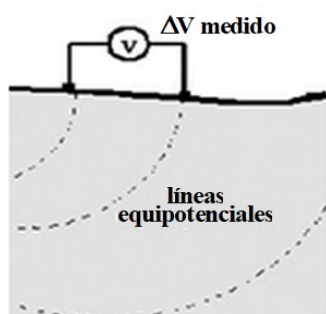
a) Un electrodo permanece fijo en una estación base, mientras que el otro es transportado a diferentes puntos. Se miden los potenciales eléctricos naturales. La presencia de valores negativos intensos sobre zonas amplias puede ser una indicación de interés prospectivo.

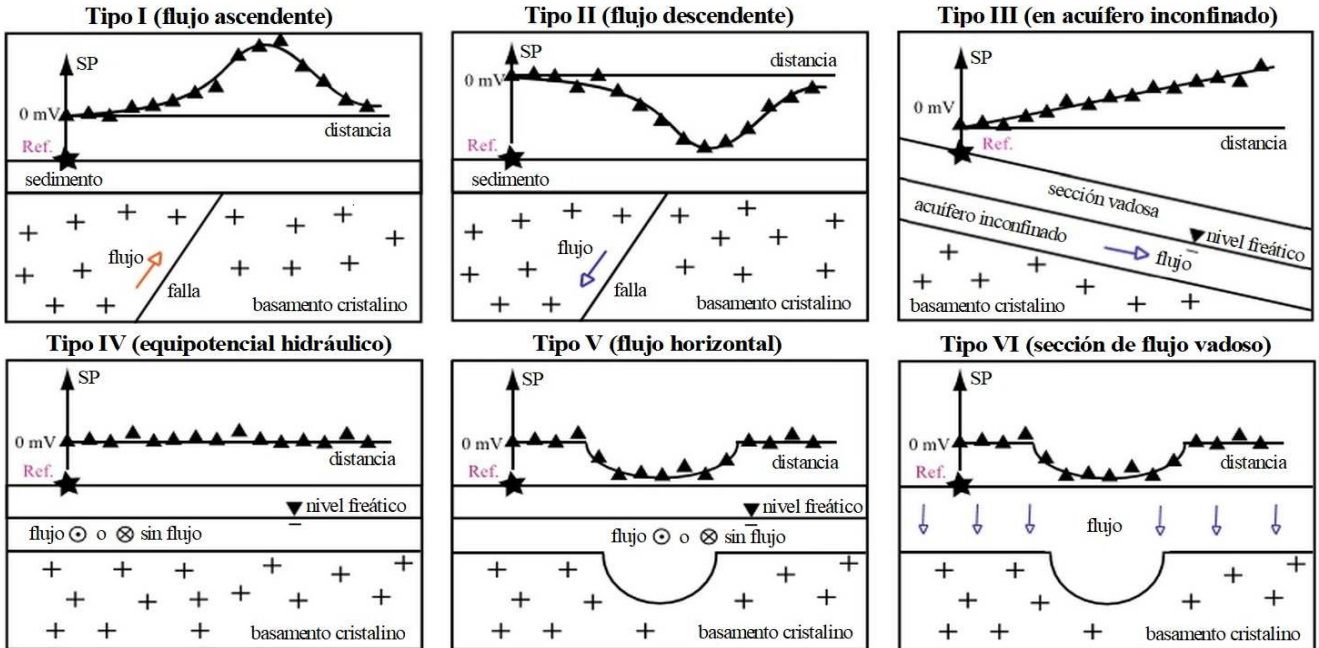
b) Los dos electrodos guardan una separación fija y son desplazados conjuntamente a lo largo del perfil de medición en pasos iguales a la separación mutua. En este caso lo que se mide son gradientes, que tienen la ventaja de un alcance operacional ilimitado. Cuando se miden gradientes, una lectura grande y positiva y otra grande y negativa separadas por un valor nulo resultan en una buena indicación prospectiva.

gradientes, una lectura grande y positiva y otra grande y negativa separadas por un valor nulo resultan en una buena indicación prospectiva.

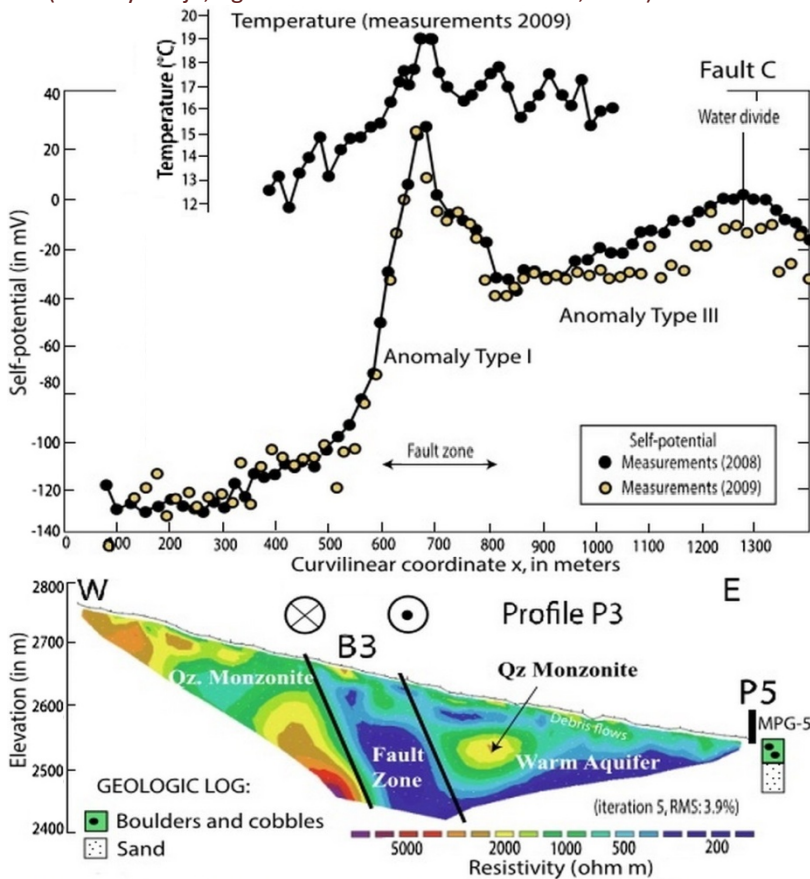
Aplicaciones

En la modalidad de prospección superficial el potencial espontáneo ha sido utilizado fundamentalmente para el cateo de mineralizaciones metalíferas, pero también, aunque con menor frecuencia, para estudios hidrogeológicos del subsuelo, evaluaciones medioambientales, arqueología y, en tiempos más recientes, con el objetivo de explorar yacimientos geotérmicos, algunos de cuyos ejemplos presentamos en las páginas sucesivas.





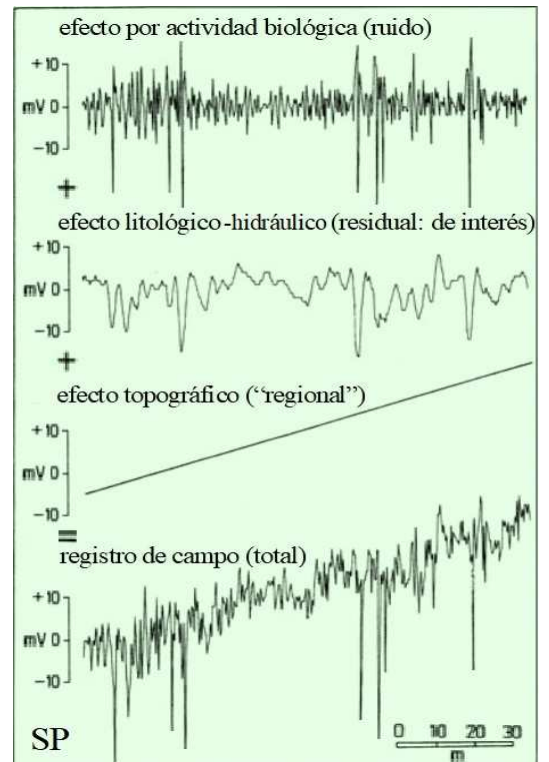
Distribución idealizada de potenciales espontáneos asociados a modelos simplificados de acuíferos. Ref. es la posición del electrodo de referencia. (arriba y abajo, figuras modificadas de Revil *et al.*, 2023)



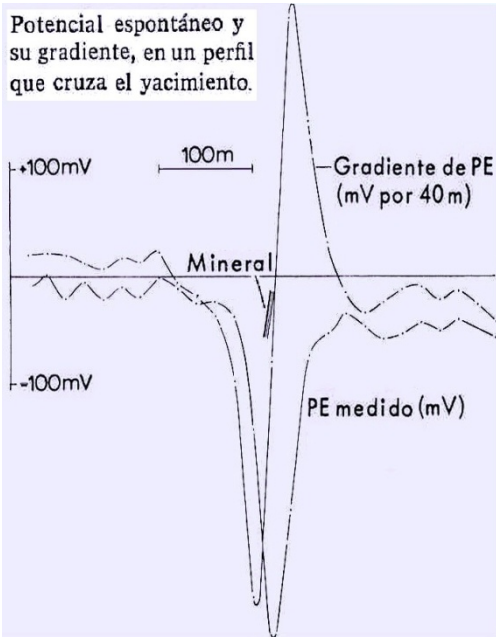
Perfil de SP vinculado al flujo ascendente de agua subterránea por una falla de desgarre que atraviesa el batolito de un antiguo volcán. La tomografía resistiva (abajo, tras 5 iteraciones con un error máximo del 3,9% calculado con raíz media cuadrática: RMS) muestra la posición de la falla y el delgado acuífero. La anomalía positiva de SP de 150 mV se asocia con el ascenso de agua caliente por el plano de falla (anomalía Tipo I). Pendiente abajo se observa una anomalía de SP de Tipo III. La punta y cola de la flechas (⊙ y ⊗) indican el desplazamiento relativo de los bloques de falla. Arriba se ve el perfil de temperatura superficial del terreno. Valle Superior del Arkansas, Colorado, U.S.A.

La profundidad investigada depende de la la geología y aumenta separando más los electrodos. En contextos muy favorables alcanza pocos cientos de metros. La mejor información se consigue de las primeras decenas de metros bajo la superficie.

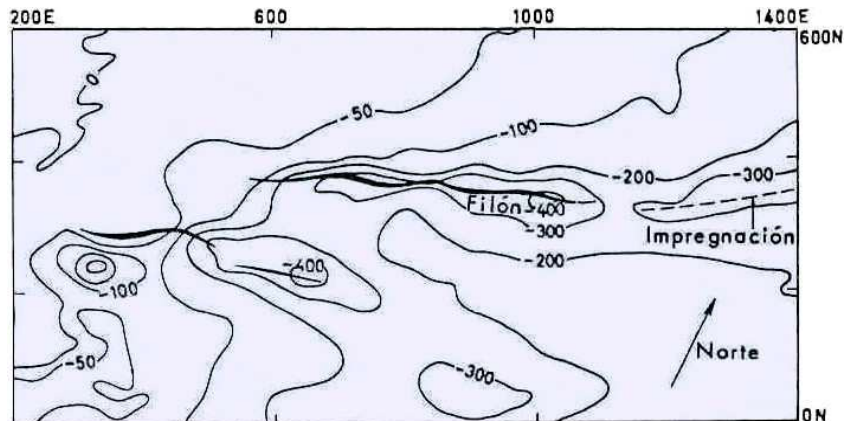
Arriba, respuestas del PE sobre acuíferos. Izquierda, perfil a través de una falla en un área hidrotermal de alta entalpía (Tema 10).



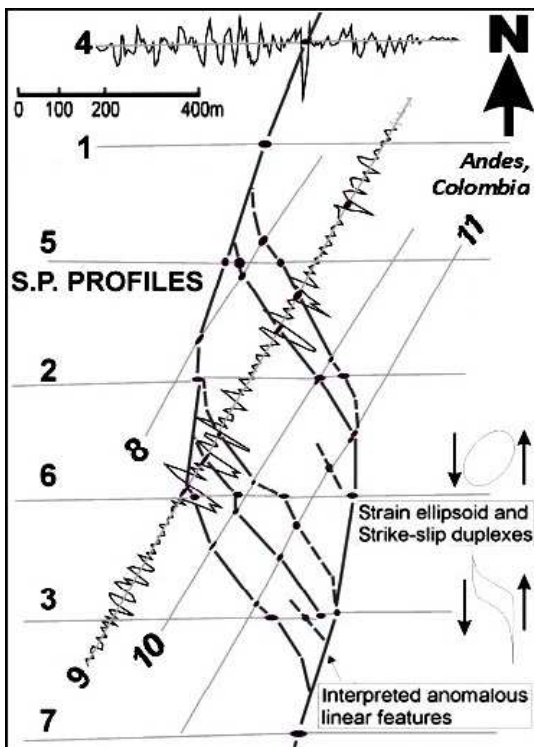
(modificado de Ernston & Scherer, 1986)



La figura de la derecha en la página anterior muestra las componentes típicas de una curva registrada en un perfil de campo, donde en general la respuesta biológica no es de interés prospectivo. *Se requiere filtrar y corregir.*



Mapa del potencial espontáneo en el yacimiento de pirita de Kimheden. Norte de Suecia. Coordenadas de m: isolíneas en mV. (Cortesía de la BGAB) (figuras modificadas de Parasnis, 1971)



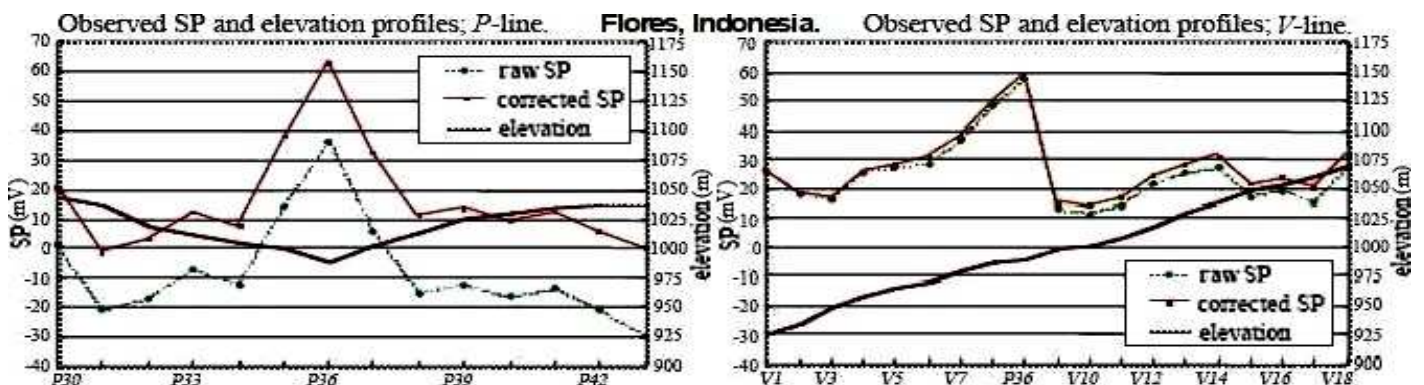
(mapa modificado de Lobo Guerrero, 2004)

Arriba a la izquierda, perfil de PE de un yacimiento sueco de pirita, y a la derecha mapa del área. Las curvas de iso ΔV son más apretadas y alargadas donde hay mineralizaciones.

A la izquierda vemos un caso en los Andes de Colombia –país que transcurrió medio siglo flagelado por narcotraficantes y paramilitares, con bases militares estadounidenses que nada solucionaron–. Fueron registrados once perfiles de PE, de los cuales sólo dos están aquí graficados (4 y 9). En un cuadro tectónico conformado por estructuras dúplex debidas a esfuerzos transcurrentes se han interpretado los rasgos lineales debidos a la presencia de venas enriquecidas en oro que se desarrollaron en sectores distensivos y que, por la presencia de sulfuros oxidados, causan una deflexión fuerte en los perfiles que las atraviesan (puntos color violeta).

Los dos cortes en la parte inferior de la página muestran la influencia de la corrección topográfica sobre los datos de PE crudos y cómo resulta su ajuste al corregir por cota. Fueron obtenidos para prospección geotérmica en la isla de Flores, Indonesia –donde los pequeños *Homo floresiensis* o *hobbits* convivieron con elefantes enanos, ratas gigantes y dragones de Komodo antes de ser eliminados por los *Homo sapiens* hace sólo 12.000 años–.

(perfiles modificados de Yasukawa *et al.*, 2002)

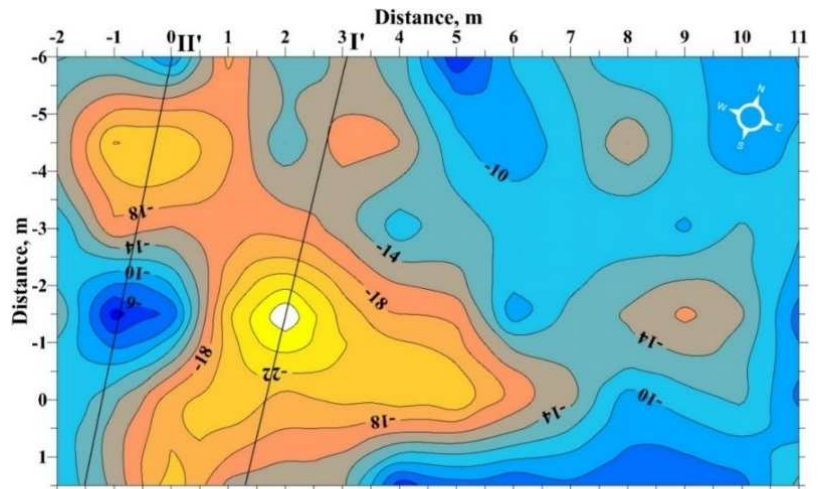




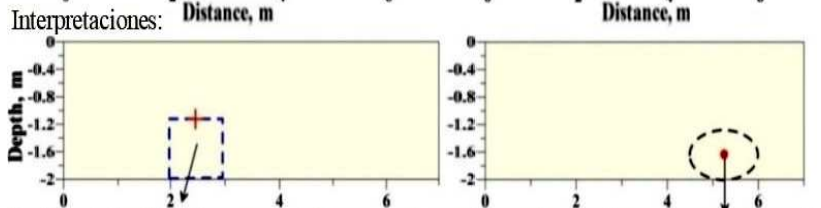
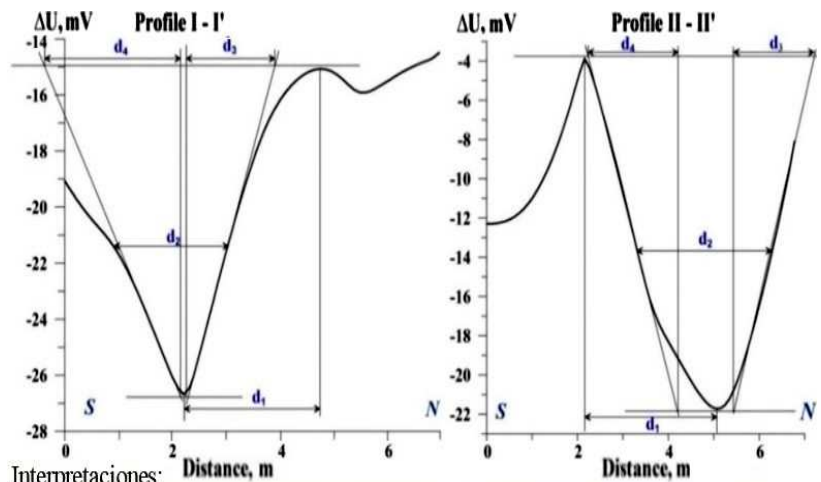
Gruta dedicada al dios griego Pan, en Banias, norte del Golán (foto de Gugganij)

Finalmente, un caso de aplicación del potencial espontáneo con una finalidad arqueológica en un sector sirio ocupado por Israel –donde la colonización violenta y la expulsión poblacional de gran parte de los territorios palestinos y la criminal reacción de organizaciones árabes dejan la conocida secuela de decenas de miles de inocentes muertos, huérfanos y mutilados, en su inmensa mayoría palestinos–. Pero convulsiones sociales ocurrían allí ya en los tiempos de la invasión romana, a los cuales en Banias corresponden los hallazgos de un cementerio, restos de un acueducto y otros. El registro de potencial espontáneo en este caso ilumina dos pequeños relictos a ser develados mediante futuras excavaciones. Véanse el mapa y los dos perfiles que lo atraviesan.

Abordaremos más adelante el registro y aplicaciones del PE (o *SP*) en pozos petroleros: Tema 06-07-08(b). A pesar de que también el petróleo ha sido motivo de las peores masacres.



Mapa de Potencial Espontáneo del sitio Banias, norte de Israel.



Perfiles I-I' y II-II' (ver mapa). La cruzesita roja es el tope de una anomalía y el punto rojo es el centro de la otra. Las flechas indican el vector de polariz. espont. (modificado de Eppelbaum, 2021)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué corrientes eléctricas circulan naturalmente en la Tierra?
- Dar los fundamentos del método Telúrico.
- Explicar las curvas RTE-RTM y PTE-PTM.
- Referir las distintas variantes del método MT y sus aplicaciones.
- ¿Qué distintos orígenes tienen los potenciales espontáneos?
- ¿Cómo se registran los potenciales espontáneos en superficie?
- Indicar las posibles aplicaciones concretas del PE.

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Booker, J., Pomposiello, C., Favetto, A., Narod, B. & Giordanengo, G., 2002. Electrical conductivity structure beneath Cordoba Province, Argentina. XV Congreso Geológico Argentino, Actas (p 313-316).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 388-393). Librería de Ciencia e Industria.
- Chapman, S. & Bartels, J., 1940. Geomagnetism, V.1 & 2 (1049 p). Oxford University Press.
- Constable, S., Orange, A., Hoversten, G. & Morrison, H., 1998a. Marine magnetotellurics for petroleum exploration, Part I: a sea-floor equipment system. Geophysics, V.63 N°3 (p 816-825).
- Constable, S., Orange, A., Hoversten, G. & Morrison, H., 1998b. Marine magnetotellurics for petroleum exploration, Part II: numerical analysis of subsalt resolution. Geophysics, V.63 N°3 (p 826-840).
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 591-601). McGraw-Hill.
- Dupuis, A., 1997. A third of a century of magnetotellurics. The Leading Edge, V.16 N°5 (p 497-502).
- Eppelbaum, L., 2021. Review of processing and interpretation of self-potential anomalies: transfer of methodologies developed in magnetic prospecting. Geosciences-MDPI, V.11 N°194 (31 p).
- Fox, L., Ingerov, A., Abidov, A., Dovgopopov, F., Babajanov, T., Basov, M., Kocherov, A., Feldman, I., Avram, Y. & Finateu, C., 2003. Exploration for deep Paleozoic sediments in Uzbekistan using MT: Project Paleorift, A.S.E.G. Extended Abstracts, V.2 (p 1-4).
- Ernston, K., & Scherer, U., 1986. Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters. Geophysics, V.51 N°10 (p 1879-2018).
- Griffiths D. & King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p 19-84). Editorial Paraninfo.
- Herrero Ducloux, 1981. Memoria de los primeros 10 años de la unidad geofísica (86 p). INCyTH.
- Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 383-390). Ediciones Omega.
- Jansen, J. & Cristall, J., 2017. Mineral exploration using natural EM fields. En Proceedings of Exploration 17: 6° Decennial Internat. Conf. on Mineral Exploration (p 349-377); Tschirhart, V. & Thomas, M. Eds.
- Jewell, T. & Ward, S., 1963. The influence of conductivity inhomogeneities upon audio-frequency magnetic fields. Geophysics, V.28 N°2 (p 201-221).
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics (p 207-212, 225-228). Cambridge University Press.
- Lobo Guerrero, A., 2004. Application of spontaneous potential profiles for exploration of gold-rich epithermal low sulphidation veins in a humid region, Andes Colombianos. Economic Geology (p 1-5). Geoscience South Africa Conference.
- Orellana, E., 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua (461-488). Editorial Paraninfo.
- Parasnis, D., 1971. Geofísica minera (p 93-110). Editorial Paraninfo.
- Revil, A., Finizola, A. & Gresse, M., 2023. Self-potential as a tool to assess groundwater flow in hydrothermal systems: a review. Journal of Volcanology and Geothermal Research, V.437 (29 p).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 487-490). John Wiley & Sons.
- Sato, M. & Mooney, H., 1960. The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. Geophysics, V.25 (p 226-249).
- Serson, P., 1973. Instrumentation for induction studies on land. Physics of the Earth and Planetary Interior, V.7 N°3 (p 313-322).
- Schwalenberg, K., Willoughby, E., Mir, R. & Edwards, N., 2005. Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones. First Break, V 23 (p 57-63).
- Sharma, P., 1976. Geophysical methods in geology (p 293-294). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Stanley, W., Saad, A. & Ohofugi, W., 1985. Regional magnetotelluric surveys in hydrocarbon exploration, Paraná Basin, Brazil. A.A.P.G. Bulletin, V.69 N°3 (p 346-360).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 458-499). Cambridge University Press.
- Udías, A. & Mezcua, J., 1997. Fundamentos de geofísica (p 367-379). Alianza Editorial.
- Wallace, J. & Hobbs, P., 2006. Atmospheric science: an introduction survey (483 p). Elsevier Academic Press.
- Wannamaker, P., 1997. Tensor CSMAT survey over the Sulfur Springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, USA. Geophysics, V.62 N°2 (p 451-465).

- Yakubovskiy, Y. & Liakhov, L., 1964. Электроразведка (*Electrical prospecting*) (414 p). Nedra Public.
- Yasukawa, K., Andan, A., Kusuma, D., Uchida, T. & Kikuchi, T., 2002. Self-Potential mapping of the Mataloko and Nage geothermal fields, central Flores, Indonesia, for applications on reservoir modelling. Bulletin of the Geological Survey of Japan, V.53 N°2-3 (p 285-294).
- Zhamaletdinov, A., Shevtsov, A., Korotkova, T., Kopytenko, Y., Ismagilov, V., Petrishchev, M., Efimov, B., Barannik, M., Kolobov, V., Prokopchuk, P. *et al.*, 2011. Deep electromagnetic sounding of the lithosphere in the Eastern Baltic (Fennoscandian) Shield with high-power controlled sources and industrial power transmission lines (FENICS Experiment). Izvestiya, Physics of the Solid Earth, V.47 N°1 (p 2-22).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.