

“På undersökning av järnmalmsfyndigheter genom magnetiska metoder”

[“Sobre la prospección de yacimientos de mineral de hierro mediante métodos magnéticos.”]

Tobias Robert Thalén (1879)



Mina Bispbergs, Suecia, 1893 (fotos digitalmuseum.org)

**INSTRUMENTAL
Y APLICACIONES
MAGNETOMÉTRICAS**

Upsala es una ciudad un poco más chica que Comodoro Rivadavia y dista sólo 80 kilómetros de la capital sueca, Estocolmo. Al igual que en el caso de la comodorenses Universidad San Juan Bosco, la Uppsala Universitet también fue fundada por iniciativa de la iglesia católica. ¡Pero con cinco siglos de anticipación!: en 1477, es decir incluso antes del primer viaje de Colón; aunque cuatro siglos después del apogeo de sus ancestros vikingos, belicosos exploradores que llegaron hasta *Ísland* (tierra de hielos), *Grønland* (tierra verde o de prados, que sólo había algunito en la costa) y *Vinland* (tierra de vides, hoy Terranova, Canadá).

En Upsala hubo grandes investigadores, como **Anders Celsius**, **Torbern Bergman**, **Svante Arrhenius** y, entre tantos más, **Carl Linnaeus**, padre de la taxonomía moderna (la que dice que todo ser humano es un *Homo sapiens sapiens* y todo ser perruno un *Canis lupus familiaris*). También **Otto Nordenskjöld**, geólogo y explorador antártico que en 1903 fue rescatado por la corbeta ARA La Uruguay al mando del capitán Julián Irizar. El glaciar Upsala, uno de los tres mayores de Sudamérica, fue bautizado con ese nombre un día del verano de 1908 cuando otro geólogo sueco, **Percy Quensel**, con veintisiete años de edad, se halló frente a él y decidió honrar a la universidad que financiaba sus estudios en la Patagonia argentina.

Cuatro años antes del nacimiento de Percy, al celebrarse la pomposa conmemoración de los 400 años de la nórdica casa de altos estudios, otro sueco estaba trabajando ahí –aunque ese día seguramente participó de los brindis–, el profesor **Tobias Thalén**, quien se destacó por sus numerosas investigaciones astronómicas y terrestres relativas a electricidad, magnetismo, análisis espectral y otras, parte de ellas iniciadas como joven ayudante de **Anders Angström**, físico eminente a quien sucedió en el cargo.



Edificio antiguo de la Uppsala Universitet (foto Jeanette Hägglund)

Thalén, que además fue buen dibujante y retratista, devino pionero de la geofísica cuando en 1879 culminó el diseño y la fabricación del primer magnetómetro pensado para prospección, que fue también el primer instrumento específico de prospección geofísica de la historia. Lo hizo a partir de la balanza magnética de laboratorio que había pergeñado el inglés **John Mitchell** en 1750. Y **en ese 1879 publicó el primer manuscrito de la historia de la prospección geofísica**, referido a la exploración de menas de hierro en Suecia.

Contemporáneamente, su compatriota **Enoch Tiberg** inventó una brújula de inclinación también aplicable a prospección. La conjunción de ambos aparatos, hecha por Tiberg en 1884, produjo un robusto instrumento para medir la componente horizontal del campo y así buscar anomalías locales. Tiberg contribuyó también ideando una metodología de adquisición, corrección e interpretación de los datos magnéticos que fue aplicado al exitoso cateo de yacimientos ferríferos en Suecia, Alemania y otros países.

Thalén tuvo una hija y falleció a los setenta y ocho, tras perder a su esposa y fracturarse la cadera.

MAGNETÓMETROS PARA MEDICIONES RELATIVAS

Haremos a continuación una breve explicación del fundamento de los principales tipos de aparatos para tomar valores relativos (diferencias respecto a un punto de referencia).

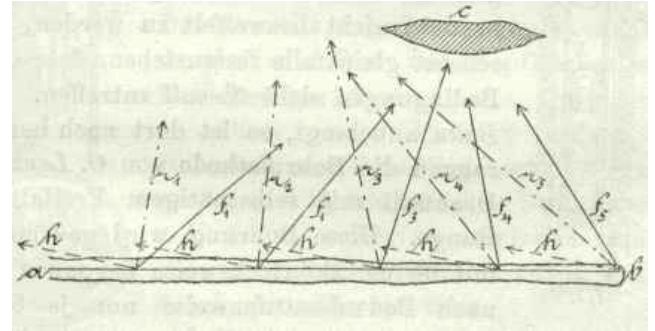
▪ Variómetros o balanzas magnéticas

Pueden ser de componente vertical u horizontal, según sea su tipo de construcción. Se mencionó en el Tema 04 que la balanza más antigua fue la de laboratorio que inventó **John Mitchell** en 1750. Y la primera para exploración acabamos de comentar que fue la de **Thalen y Tiberg**.

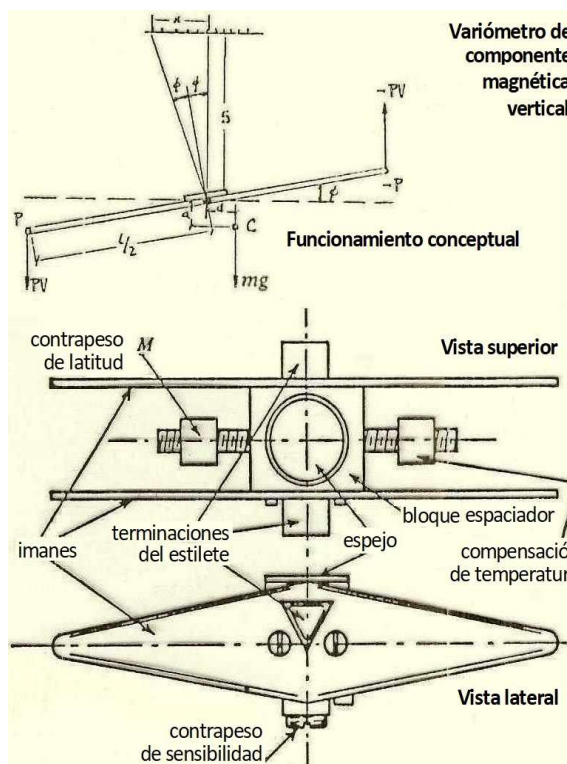
La **balanza del alemán Adolf Schmidt**, diseñada en 1914 en Potsdam, es de tipo vertical y ha sido de las más empleadas en las primeras épocas de la prospección magnetométrica –pero hace tiempo las balanzas son instrumentos en general históricos, sin uso actual–. Se trata de un imán pivoteando poco fuera de su centro de masa. El desequilibrio de gravedad así producido es compensado por medio de la componente magnética. Consta de un sistema óptico que permite observar las variaciones del imán, como muestra la figura.

▪ Magnetómetros de torsión

Evolucionaron a partir de la balanza de torsión que el francés **Charles Coulomb** diseñó en 1780 para medir las fuerzas eléctricas y magnéticas, la cual le permitió arribar a la antes referida ley fundamental que aplica a los campos eléctrico y magnético. Los alemanes **Karl Gauss** y **Wilhelm Weber** en 1833 inventaron un magnetómetro oscilatorio bifilar (construido con dos hilos de torsión



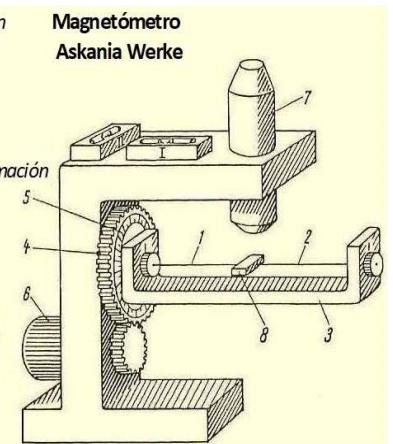
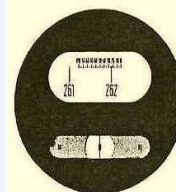
Método de Tiberg para prospección, de su puño y letra.



Balanza magnética de Schmidt (modificado de Griffiths & King, 1972)

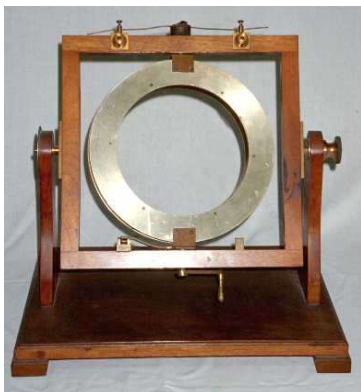


- 1 y 2 fibras de torsión
- 3 soporte en U
- 4 círculo de torsión
- 5 círculo graduado
- 6 perilla de ajuste
- 7 ocular de autocolimación
- 8 imán



Magnetómetro de torsión (modificado de Robinson & Coruh, 1988)

que soportan un imán cada uno) para hacer mediciones en los trabajos de investigación. Y luego para prospección se los construyó en base a un imán suspendido por hilos metálicos en tensión. La torsión del hilo es una medida directa que provee la intensidad vertical registrada en un disco graduado (figura precedente). Son aparatos prácticamente en desuso.



Inductor terrestre (foto nationalmaglab.org)

▪ Inductores terrestres

El primero de estos aparatos fue desarrollado por **Charles Delzenne** en Francia (1844) para investigación y décadas después modelos como el de la figura colindante comenzaron a ser empleados en ocasiones para prospección. Se basan en la medición de corriente inducida (mediante un galvanómetro de gran sensibilidad) en una bobina cuyo eje varía convenientemente de posición (sistema tipo cardan). Permiten medir inclinación y declinación magnéticas, como también la intensidad del campo en función del área y número de vueltas de cable (valores fijos para cada aparato) así como de la velocidad de giro que adopta, que resulta un poco complicado de manejar. (Un arreglo similar a éste, girando en base a una fuerza como el viento o el agua, constituye el conocido generador eléctrico).

El **Magnetómetro de bobinas de flujo** (*flip-coil magnetometer*), basado en el principio del inductor terrestre, es un diseño de mediados del siglo XX para ser montado en la cola de un avión. Tiene un sistema de compensación de masa (barritas de metal) y un sistema tipo cardan que permite la reorientación para medir la componente total en la dirección en la que éste es máximo. Posee tres elementos detectores formados por bobinas: dos son para posicionar a una tercera que mide el campo, ya que el potencial eléctrico inducido será proporcional a la fuerza del campo magnético en que se mueve.

▪ Brújulas de inclinación

Estos instrumentos (ejemplo a la izquierda) miden la variación de intensidad vertical Z (ó V). Se constituyen de una aguja imantada que puede moverse libremente en un plano vertical y que lleva fijado a un lado del eje un peso ajustable que genera un par de torsión gravitatorio que resulta equilibrado por un par de torsión magnético (imán). Cualquier variación de la componente vertical del campo terrestre cambia el momento de la fuerza magnética y por ende el ángulo de inclinación de la aguja. Se debe orientar el imán en un plano vertical y sus polos van paralelos a la dirección del componente total del campo. Se la emplea sólo para trabajos expeditivos que no requieren de mucha precisión.



Brújula de inclinación (foto de Howell, 1962)

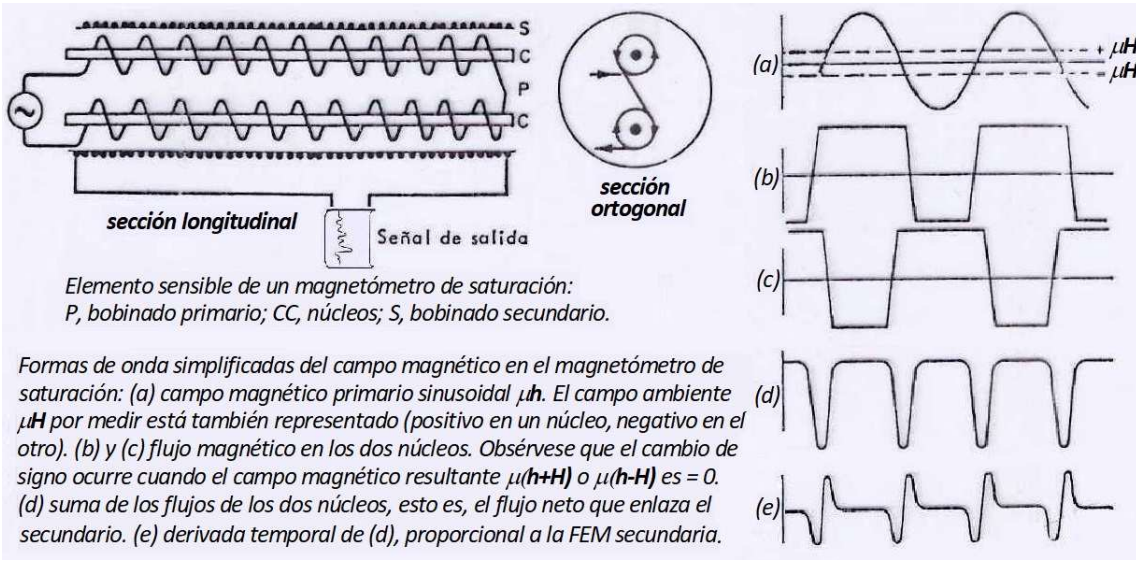
La **Superbrújula de (William) Hotchkiss**, patentada en los Estados Unidos en 1929 y cuya construcción la asemeja a la brújula de inclinación. Permite medir la variación de intensidad total F del campo magnético, para lo cual tiene una barra auxiliar no magnética, que lleva un contrapeso regulable extra. Para medir la variación de F los polos del imán

deben ser orientados paralelamente a la dirección del campo total y la medición se realiza orientando la superbrújula en una dirección perpendicular al meridiano magnético. Aunque es mejor que la anterior, se la ha utilizado en general sólo para trabajos expeditivos.

▪ Magnetómetros discriminadores de flujo (*fluxgate magnetometers*) o de saturación

El primero fue desarrollado a fines de la década de 1930 en Estados Unidos por el ruso **Victor Vacquier** y fue empleado durante la Segunda Guerra Mundial para detección de submarinos alemanes.

Si bien dan mediciones relativas, **pueden obtenerse valores absolutos mediante una calibración previa**. Tienen una precisión de 0,5 nT o mejor. En general se los orienta horizontalmente y miden las variaciones de la componente vertical del campo magnético, aunque existen modelos triaxiales. Se los conoce también como **de núcleo saturable** porque están basados en la saturación de un circuito electromagnético de dos bobinados paralelos sobre núcleos de ferrita (hierro α , cúbico, aislante), que forman el circuito primario por donde fluye una corriente eléctrica generando un campo magnético artificial en cada una. Como la dirección de la corriente es opuesta en una respecto a otra bobina, los campos magnéticos generados se anularían en ausencia de un campo externo. Pero, dado que el campo externo B existe (suma de $H + H' = \mu H$), entonces éste se superpone haciendo prevalecer una dirección de flujo sobre la otra, cosa que resulta detectada por un tercer circuito envolvente externo a los dos primeros, que es el de medición (circuito secundario). Esa detección en la gráfica está indicada por los armónicos que aparecen en la curva **d**, que es la diferencia entre **b** y **c** (próxima figura), la que resultaría nula si no existiera el campo B que se registra (μH).



Concepto del magnetómetro discriminador de flujo (modificado de Griffiths & King, 1972)

(foto gfz.de)

MAGNETÓMETROS PARA MEDICIONES ABSOLUTAS

A diferencia de lo que ocurre en gravimetría, varios de los aparatos que dan mediciones magnéticas absolutas son prácticos y rápidos, en concreto las **distintas variantes de resonancia magnética nuclear**, motivos por los cuales **son muy empleados en trabajos aplicados** a la búsqueda de recursos.

▪ Magnetómetros de resonancia magnética nuclear

Son escalares (no vectoriales) en sus tres variantes (RMN convencional, Overhauser y de vapor de álcali), midiendo la intensidad absoluta, pero no específicamente en la dirección del campo total F.

El principio de la RMN (o NMR, por *Nuclear Magnetic Resonance*) fue descubierto en 1938 en Estados Unidos por el polaco **Isidor Rabi** y aplicado desde 1946 por **Felix Bloch** y **Edward Purcell**. Se fundamenta en el movimiento precesional develado por el irlandés **Joseph Larmor** en 1898. Todos los núcleos atómicos con una cantidad impar de protones y/o neutrones poseen un momento magnético intrínseco dado que su espín total es no nulo, mientras que los núcleos con protones y neutrones pares tienen espín cero. Este argumento se trata con cierto detalle en el apartado de Magnetometría de Pozo (a partir de la pág.109). Existen tres variantes de magnetómetros de RMN, todos con una precisión máxima de 0.1 nT o menos.

- El **Magnetómetro de precesión protónica (PPM, Proton Precession Magnetometer)** se empezó a usar en prospección a fines de la década de 1950. **Se utiliza una muestra de agua dentro de una botella, sometiéndola a un campo magnético exterior artificial para orientar los momentos magnéticos** de los protones de los núcleos de hidrógeno. Al cesar el campo artificial, tales protones tenderán a orientarse según el campo magnético terrestre de acuerdo a un movimiento de precesión amortiguado. Este movimiento produce una variación del flujo magnético y entonces en una bobina se genera una FEM (fuerza electro-motriz) de una frecuencia que puede medirse. Como los núcleos de oxígeno (pares) no dan respuestas magnéticas, **toda la resonancia se debe a los protones del hidrógeno**, cuya constante



magnetómetro de flujo APS 520A (GFZ Potsdam)

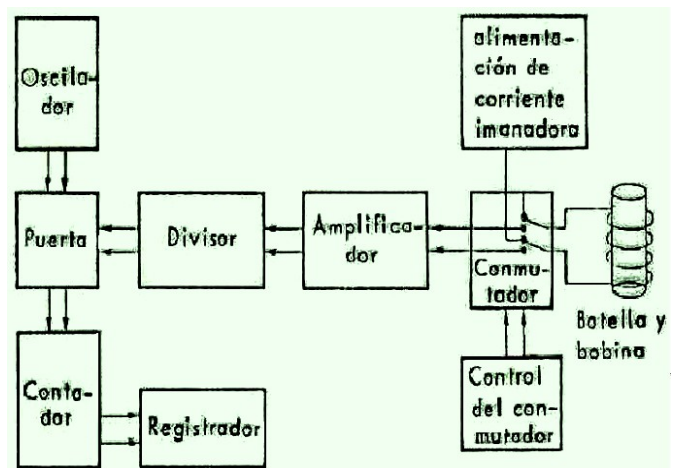


Diagrama de bloques del magnetómetro protónico. (modificado de Griffiths & King, 1972)



girométrica es de $23,5 \gamma/Hz$. Pueden operar con gradientes magnéticos de hasta 3.000γ ó nT/m y hacen una medición cada 0,5 segundos o menos. Tienen a ser reemplazados por los magnetómetros de Overhauser y de vapor de álcali.

Magnetómetros de precesión protónica, manual y heliotransportado; el sensor se mantiene alejado del control electrónico y de la aeronave para evitar la interferencia de campos magnéticos instrumentales (modificado de Robinson & Coruh, 1988)

- El **Magnetómetro de Overhauser** (ver foto) es bastante semejante al anterior, pero en este caso **la resonancia magnética, además de a nivel protónico, tiene lugar también en los iones paramagnéticos** que conforman la sustancia, fenómeno descubierto por el estadounidense **Albert Overhauser** en 1953. Se lo emplea en actividades prospectivas desde la década de 1960.

Se aplica primero un campo de microondas que produce la resonancia del espín de los electrones no apareados de la sustancia líquida, para después aplicar una emisión de radiofrecuencia que genera el acople de la señal resonante de los electrones con la señal de los núcleos, efecto que suele dar **respuestas de una intensidad unas**



Unidad de control del magnetómetro de Overhauser GSM-19 y arreglo gradiométrico en z con dos de ellos superpuestos.

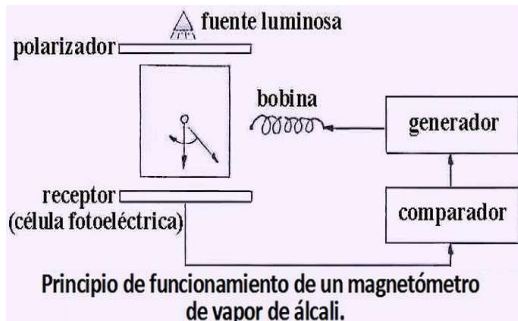


(imágenes toshindia.com)

1.000 veces mayor que la RMN pura, pero que requiere de un mayor intervalo entre medidas sucesivas (unos 5 segundos). Pueden operar con gradientes de hasta $10.000 nT/m$.

- El **Magnetómetro de absorción óptica (optically pumped) o de vapor de álcali** constituye otra variante del magnetómetro de RMN utilizado desde mediados de la década de 1960 a partir de los estudios del alsaciano **Alfred Kastler**, entre otros. Se

distingue por el dispositivo de medición de la frecuencia de Larmor, en virtud del auxilio de la inestabilidad óptica que manifiestan los vapores de helio o de álcalis, como potasio, rubidio o cesio.



(modificado de Telford et al., 1976)

Adquisición de datos con un magnetómetro de vapor de cesio Geometrics 858 (foto GeoView)



Prospección subácea con un magnetómetro de vapor de cesio Geomatrix 882 sumergible (foto Arqueonautas)

El holandés **Pieter Zeeman** en 1896 descubrió el fenómeno de separación del espectro luminoso a causa de la modificación de niveles energéticos en presencia de un campo magnético: división de cada línea espectral en varias componentes, análogo al **efecto Stark** para campos eléctricos. (Este **efecto Zeeman** permite estimar la intensidad del campo magnético de otros astros). **Cuando los núcleos atómicos del vapor de álcali entran en**

resonancia, el paso de luz polarizada bombeada a través de la misma se hace casi nulo, minimizándose en consecuencia la intensidad luminosa detectada, a partir de lo cual automáticamente se regula la frecuencia entregada por un generador a los valores de resonancia en Hz, que se pueden equiparar a intensidad en γ . Operan con gradientes magnéticos de hasta 30.000 nT/m. y toman muchas mediciones o muestras por segundo. En la página previa se presenta el esquema y fotografías de un modelo terrestre y de otro marino.

- Un **Gradiómetro magnético** es un arreglo de dos *magnetómetros para medición de gradiente*, vertical en la disposición de la foto previa de Overhauser, pero asimismo posible de aplicarse en las direcciones horizontales y con otros tipos de magnetómetros, a fin de *registrar las derivadas de B en x, y o z, como en gravimetría, Uzz, Uzx, Uzy*. También puede hacerse desde barco o avión y sus datos ser valioso complemento de la sísmica (Wold & Cooper, 1989).

■ Magnetómetros criogénicos (o SQUID)

Acrónimo de *Superconducting QUantum Interference Device*, son modernos dispositivos de muy alto costo y altísima precisión que registran mediante un toroide superconductor en el que *en todo momento se genera una corriente eléctrica cuya tensión es proporcional al campo magnético terrestre*. Igualmente se los emplea para la determinación de la susceptibilidad en muestras de laboratorio, en reemplazo (superador) de otros dispositivos más convencionales.

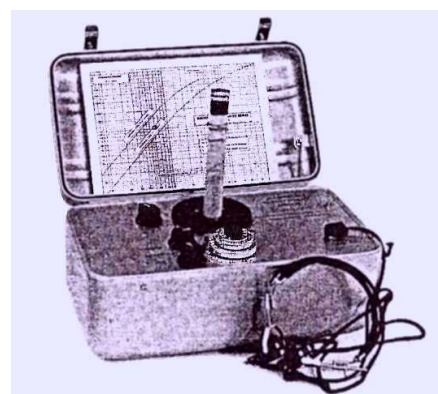
Magnetómetro SQUID S700X con su consola de mandos electrónicos (foto aml-tech.com)



APARATOS DE LABORATORIO

Para conocer el valor de k en especímenes seleccionados puede emplearse alguno de los siguientes instrumentos:

- **Balanza magnética** (variómetro) de laboratorio, como la del francés **Louis Gouy** o la del inglés **Dennis Evans**, que funcionan de manera parecida a las balanzas magnéticas de campo.
- **Puente de inductancia** (*inductance bridge*), dispositivo muy utilizado que consiste en un circuito doble que induce un campo EM prefijado sobre cada muestra tomada de la superficie o de pozos, calicatas o galerías. El voltaje necesario para balancear la respuesta de la roca o mineral muestreado en el puente es función de su susceptibilidad magnética.
- **Magnetómetro de muestra vibrante** (o *VSM, Vibrating Sample Magnetometer*) que es un instrumento moderno de alta precisión en el que se hace vibrar la muestra dentro de un circuito inductivo.
- **Dispositivo de extracción de campo pulsada** (*pulsed field extraction device*), también moderno y muy preciso, opera a través de bobinas captadoras.
- **Dispositivo de torque magnético**, aparato de última generación, que puede ser incluso más sensible que el *SQUID*, midiendo el torque que actúa sobre el momento magnético de la muestra, mediante el empleo de piezoelectricidad, capacitancia o interferometría óptica.
- **Magnetómetro de fuerza de Faraday**, que se basa en la medición de la luz que atraviesa una muestra de mineral magnético, lo que se conoce como efecto Faraday (hallado por el inglés **Michael Faraday** en 1845).
- **Magnetometría óptica**, fundamentada en el efecto magneto-óptico de Kerr (que fue descubierto por el escocés **John Kerr**, en 1877), mide la intensidad de la luz que es reflejada por una muestra que se halla en estado de magnetización.



Puente de inductancia electromagnética para mediciones de la susceptibilidad magnética en muestras de roca (imagen de Robinson & Corugh, 1988)

PROSPECCIÓN AEROMAGNÉTICA

La aérea es la modalidad prospectiva más ampliamente utilizada en magnetometría. Tiene como *ventajas* una mayor rapidez para ejecutar los trabajos, la posibilidad de obtener datos sobre regiones pantanosas, junglas, turberas, etc. y la minimización de los efectos perturbadores debidos a irregularidades próximas a la superficie

que dificultan el reconocimiento de las anomalías producidas por rocas más profundas, así como ruidos causados por la presencia de objetos metálicos, aunque *seguirán siendo detectables desde el aire plantas generadoras, líneas de alta tensión, grandes ductos y cisternas de aleaciones de Fe, etc.* Como en gravimetría, el análisis fractal puede ayudar a definir el mallado más apropiado según el objetivo (véase Dimri, 1998).

Alturas de vuelo (en línea recta y a velocidad constante) típicas en prospección minera son 150 a 200 metros, mientras que suele volarse a 1.000 ó más metros para exploración de hidrocarburos. **La separación lateral entre líneas tiende a ser una distancia que duplica la altura de vuelo y no mayor que la profundidad máxima de interés** (por ejemplo, el basamento de una cuenca). Como ya se dijo, debe haber un segundo magnetómetro fijo



Magnetómetro de precisión instalado en la cola de un avión en Western Australia (foto Frontier Resources)



Dron que lleva un magnetómetro de flujo en China central (foto Global Sources)

para **definir la deriva diurna**, o alternativamente volver a volar sobre puntos-base cada hora o menos, salvo que haya datos de un observatorio en la zona de trabajo. Normalmente se mide la **componente total en la dirección del campo magnético del área interesada**, es decir que las anomalías registradas resultan de la suma de las locales más las del campo terrestre.

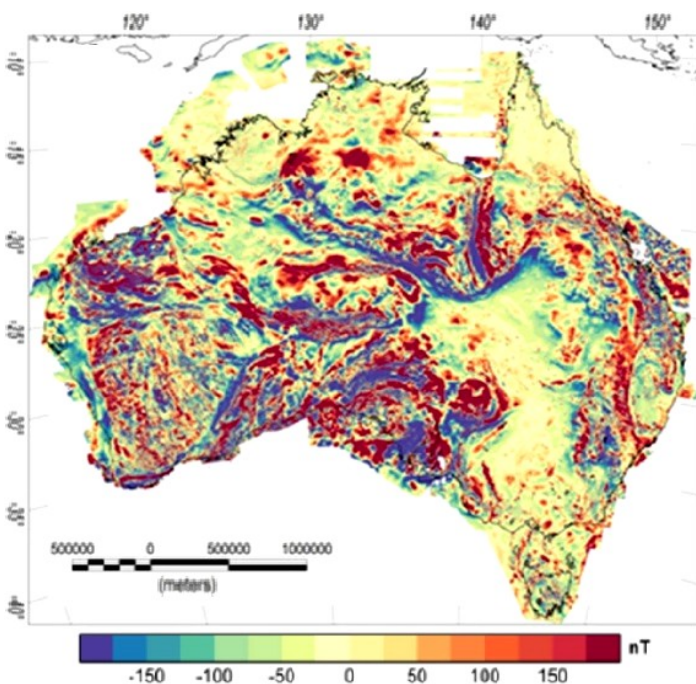
Los magnetómetros utilizados son los discriminadores de flujo y los de resonancia magnética en cualquiera de sus variantes. Desde un **avión** se los puede llevar en la proa, la cola o en el extremo de un ala, o raramente en un planeador remolcado. Desde **helicóptero** lo más común es llevar el magnetómetro pendiendo de un cable (foto pág.97) y existe la **alternativa de emplear arreglos gradiométricos**, como ya mencionamos, **con la gran ventaja de independizarse de las fluctuaciones dadas por el vuelo** (lecturas simultáneas, ambas afectadas por igual si se altera la navegación) y así obtener el gradiente. En casos muy raros se los monta en **globos** de navegación estable. Asimismo está empezándose a recurrir al uso de vehículos aéreos de mando remoto (**drones**, del inglés, zángano, porque los primeros salían zumbando sin retorno, como el zángano, desalojado tras la cúpula). Tienen menor complejidad técnica que los que son de uso militar, pero mayor –y más aburrida– que la requerida para hacer volar un fantasmita de la B...

Abajo, el mapa de gradiente vertical del continente australiano, obtenido a partir de la normalización de parámetros de registro y proceso y la integración de numerosos trabajos aeromagnéticos de variable cobertura areal, distintas alturas de vuelo, diferentes densidades de muestreo, etc.

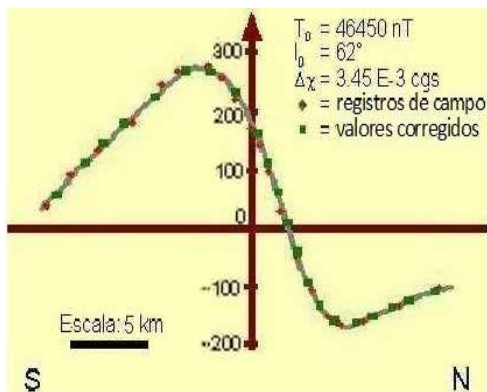
APLICACIONES DE LA MAGNETOMETRÍA

En la interpretación magnetométrica, una vez que han sido descartados los rasgos de origen humano y ruidos de diverso origen, suele ser difícil decidir si los cambios a lo largo de un mapa o perfil se deben a estructuras, emplazamientos ígneos o a cambios estratigráficos laterales.

En el caso de que no se pueda definir claramente la forma de una anomalía magnética o en presencia de una anomalía que fue previamente detectada por otros métodos geofísicos o geológicos, conviene orientar el eje de la anomalía magnética en la misma dirección que el eje de la otra anomalía equivalente, que por ejemplo podría ser conductiva, hallada mediante geoelectrónica, o de gravedad como se ve en la figura interpretada en la página sucesiva.



Mapa aeromagnético integrado de Australia (modificado de Franklin & Milligan, 2010)



Anomalía magnetométrica en Lausana, Suiza, cotejada con la anomalía gravimétrica –centro– de la que se deducen dos bloques separados por una falla –abajo–, δ son densidades (modificado de Gravity, C.A. Universität Kiel)

Esto podría responder a la presencia de una falla delimitando un pilar tectónico elongado, de interés como trampa de hidrocarburos, o de un dique con una probable mineralización metalífera, según sea la escala de la estructura y el ámbito geológico en la que se encuentra. En muchas ocasiones varias estructuras causantes de anomalías magnéticas son paralelas entre sí, como es el caso de un sistema de diques subparalelos, o de estratos muy inclinados entre los que se intercalan algunos que poseen alto contenido en minerales magnéticos.

Aplicaciones magnetométricas mineras

Este método geofísico se aplica en las exploraciones mineras con diversos objetivos.

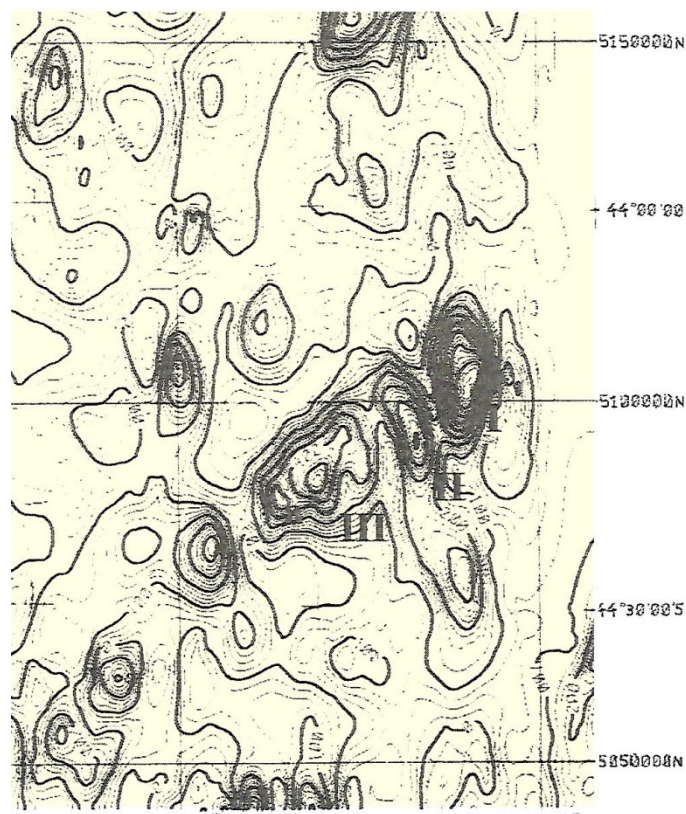
- Búsqueda de **minerales magnéticos** como por ejemplo magnetita, ilmenita o pirrotina.
- Localización de minerales magnéticos **asociados paragenéticamente** con minerales no magnéticos de interés económico.
- Determinación de las dimensiones (volumen, área, perímetro, profundidad) de **estructuras de zonas mineralizadas** cubiertas por capas aluviales o vegetación.

La mayor parte de la **producción de hierro** mundial se explota de depósitos de génesis sedimentaria de composición primaria oolítica

y silíceo. El resto se extrae de depósitos de origen magmático con minerales de Fe de ese mismo origen o bien residuales después de la meteorización de las demás componentes de las rocas magmáticas.

Las taconitas, por ejemplo, son depósitos de hierro de origen sedimentario, con intercalaciones silíceas o carbonáticas, con alrededor de un 30% de magnetita dispersa. Su carácter magnético depende de su estado de alteración por oxidación: las taconitas oxidadas son mucho menos magnéticas que las taconitas inalteradas, lo que hace más difícil su detección magnetométrica. Los depósitos de Fe asociados con rocas magmáticas frecuentemente están caracterizados por un cociente magnetita/hematita alto y en consecuencia pueden ser detectados directamente por las mediciones magnéticas. En el caso de que se tenga una anomalía central y otras flanqueándola, una interpretación posible, entre muchas otras, sería la presencia de un cuerpo de peridotita (roca plutónica de olivino y piroxeno) rodeado por sulfuros de alto contenido en pirrotina (FeS).

Un caso de rocas plutónicas intruyendo metamórficas se expone en la figura a la derecha, resultante de un cateo aeromagnético en el centro-norte del Chubut, con tres anomalías principales en el departamento Mártires. (Nombre que refiere a los tres galeses asesinados por los hombres del cacique Foyel en 1883 –tiempos de Thalén–, salvándose Evans gracias al salto al barranco de su caballo Malacara; hecho consecuente del genocidio aborigen llevado a una latitud en la que galeses y tehuelches habían convivido bien).

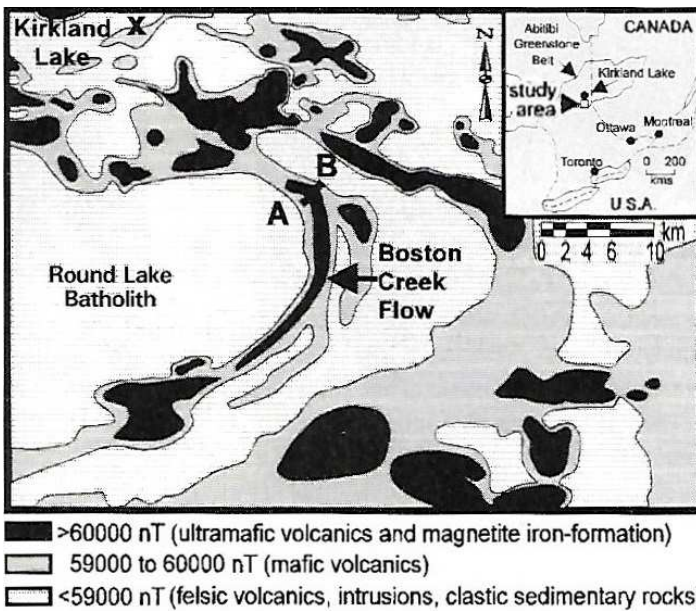


Mapa de isolinias magnéticas (intervalos 25 y 100 nT), Departamento Mártires, Provincia del Chubut. I, II y III: segmentos de la anomalía. Ver texto (modificado de Chernicoff & Paterlini, 1998)

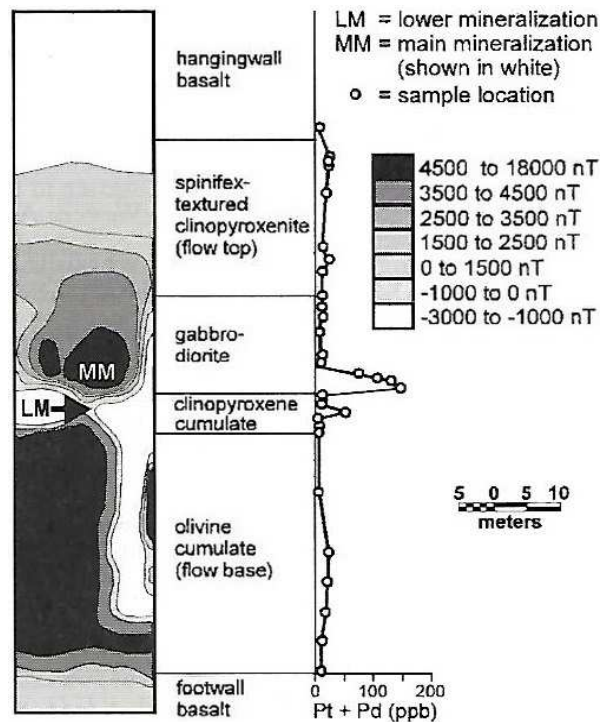
La anomalía de Mártires resalta con sus 40 km de largo y 18 de ancho, 160 nT/km de gradiente máximo horizontal y 700 nT de máxima amplitud, dividida en tres segmentos. La forma y perímetro se definió con las soluciones de la deconvolución de Euler para un rango de profundidades de 1-500 a 1-700 m e índice estructural 0,1, con un contraste de susceptibilidad de 0,0002 SI. Sumando el conocimiento geológico regional se interpretó como una concentración de magnetita derivada de metamorfismo termal de un complejo magmático del Paleozoico Superior que intruyó sedimentos del Paleozoico Inferior. Este modelo es comparable con el que se determinó para el yacimiento de hierro del Silurico-Devónico de Sierra Grande en el sureste de Río Negro.

En efecto, el método magnético permite localizar depósitos de Fe situados a cierta profundidad y cubiertos por otras formaciones geológicas no magnéticas, tal el caso de los rellenos hidrotermales de fracturas de Pea Ridge Mountain, Missouri, descubiertos por medio de sondeos realizados a lo largo de una anomalía magnética de forma longitudinal. Un ejemplo opuesto es el del gran yacimiento de hierro del Lago Allard, en Canadá, donde el mineral ferrífero, *la hematita*, al ser antiferromagnética, *es indetectable* por este método.

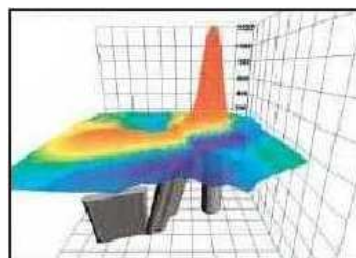
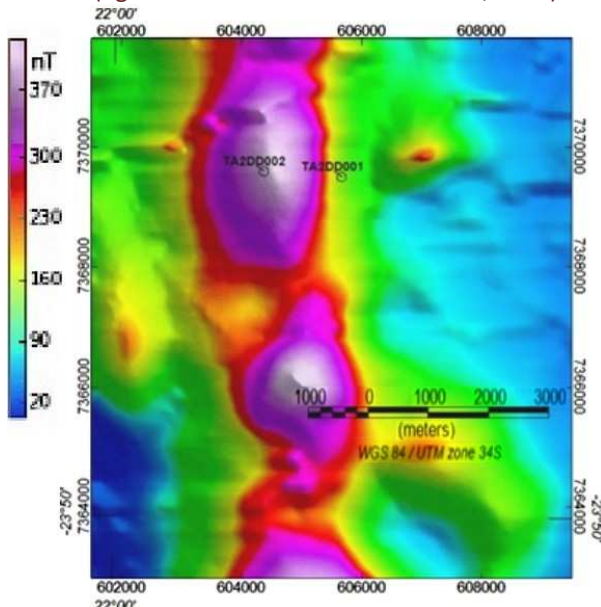
Por su asociación paragenética con minerales magnéticos, otros que no lo son, como por caso los metales básicos **níquel**, **cobre** y **oro**, pueden ser asimismo detectados por magnetometría. También el **platino**, como se aprecia en el siguiente trabajo prospectivo en Ontario, Canadá, vinculado con una colada volcánica dentro del cinturón de rocas verdes Abitibi del Arqueano.



Mapa aeromagnético de la anomalía positiva asociada a la colada volcánica Boston Creek; la línea AB indica la sección geológica a través de la colada (figuras modificadas de Larson *et al.*, 1998)



Mapa magnético residual de la franja que bordea la sección AB, junto al perfil geoquímico sobre los principales sectores mineralizados (LM y MM); MM coincide con gabro-dioritas enriquecidas en magnetita con alto valor de Pt-Pd y LM con rocas alteradas con un nivel portador de clinopiroxenos con un pico menos marcado de Pt-Pd.



Mapa magnético terrestre residual -izq.- y modelado 3D de diques y chimeneas volcánicas diamantíferas en el Kalahari, Botswana (modificado de Spectral Geophysics)

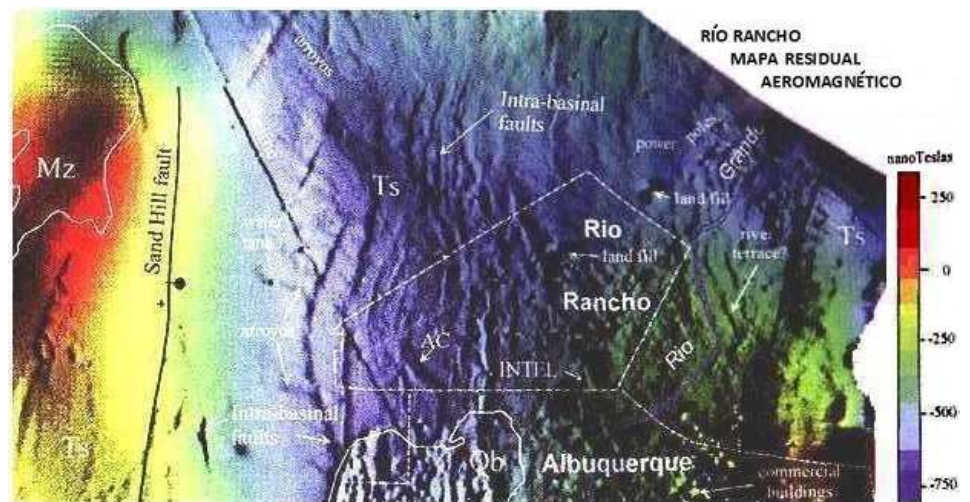
También se emplea la magnetometría con frecuencia en la exploración de **diamantes**, contenidos en chimeneas volcánicas de kimberlitas o lamprófidos hipabisales, debido a que sus contenidos en magnetita e ilmenita permiten que sean localizadas por este método. Se han encontrado chimeneas de kimberlitas en los Estados Unidos, Canadá, la ex Unión Soviética, Namibia y Sudáfrica (de donde provienen su nombre y el del club marplatense) así como en Botswana, país al que corresponden las figuras obtenidas en el desierto del Kalahari, al pie de la página anterior.

La magnetometría igualmente puede ayudar a localizar algunas zonas donde la roca original ha sido desmagnetizada por la acción que los **fluidos termales** ejercieron sobre la susceptibilidad de la magnetita.

Otras aplicaciones

Más ampliamente, la prospección magnetométrica es útil para estudiar el subsuelo, diferenciando la mayor o menor presencia, en extensión o profundidad, de rocas que poseen altas concentraciones de minerales magnéticos respecto de otras que los poseen en escaso porcentaje. Y esta información puede permitir interpretaciones sobre problemáticas geológicas muy diversas.

Una aplicación geológica regional puede ser el **levantamiento de tendencias estructurales** en una zona extensa de rocas afloradas saltuariamente como consecuencia de una cobertura de sedimentos geológicamente recientes o un desarrollo de suelo con vegetación. El complemento de un relevamiento aeromagnético cuyo mapeo resultante ilumine tales tendencias, por ejemplo el rumbo de emplazamientos intrusivos o de planos de falla, etc., puede ser de gran ayuda para completar el mapeo geológico. De modo tal que las tendencias aeromagnéticas registradas se combinan con aquellos datos geológicos que se han recabado de los afloramientos distribuidos irregularmente en el área.



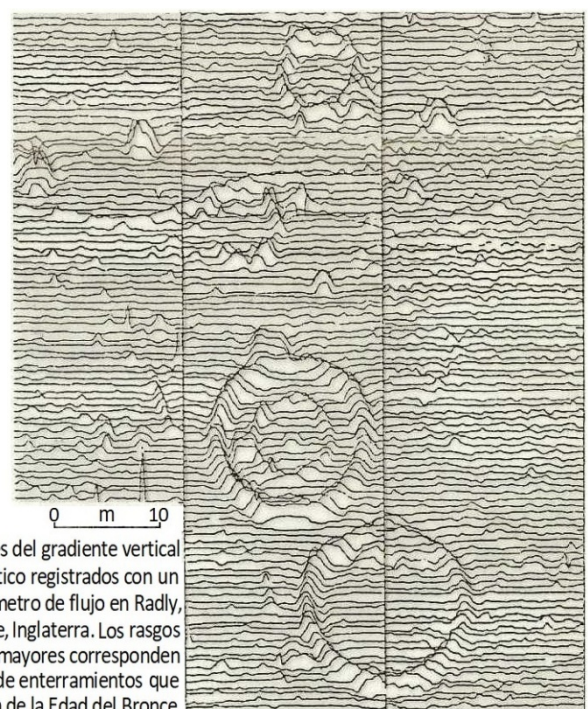
Aeromagnetometría en Nuevo México, U.S.A; en rojo área aflorada; en azul área de cuenca con bloques de falla N-S; la larga recta oblicua es un ducto, también dan respuesta edificios, tanques, rellenos y una usina (modific. de Grauch & Millegan, 1998)

Análogamente a los trabajos regionales, puede suceder que, poseyendo datos geológicos de sondeos con **objetivos mineros, hidrogeológicos, geotérmicos o petroleros**, los datos magnéticos aéreos o terrestres ofrezcan una muy valiosa información complementaria.

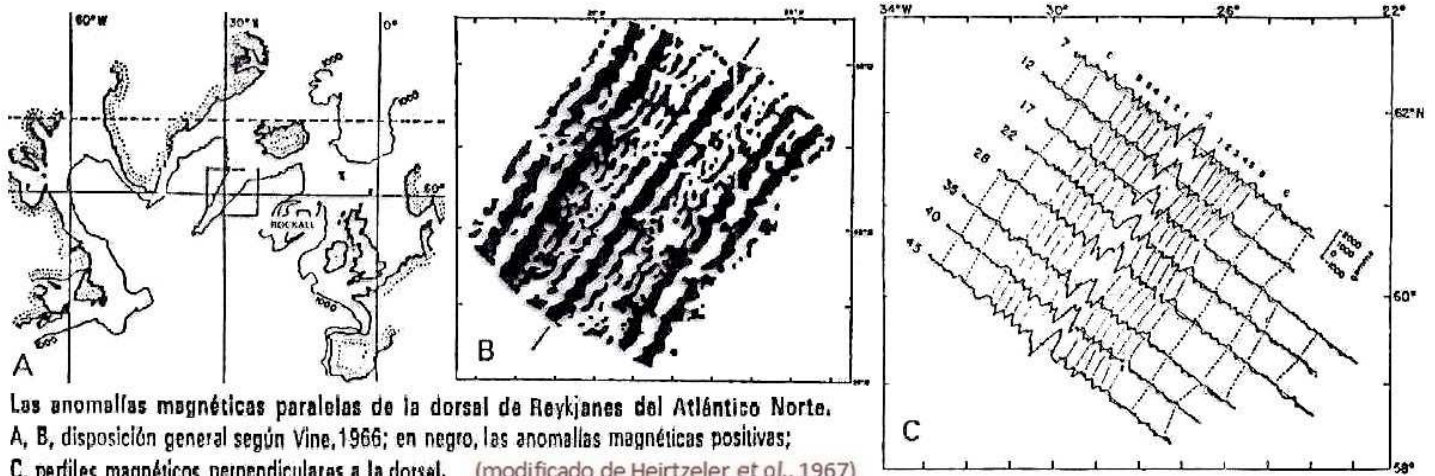
Existen otras posibles aplicaciones de la prospección magnetométrica, como las de tipo **arqueológico**. Tal es el caso de la figura a la derecha, donde puede verse el recurso de graficar los sucesivos perfiles magnetométricos rebatidos en planta, de manera que dan una imagen con relieve aparente de las ruinas sepultadas.

A escala geotectónica, la presentación de perfiles rebatidos puede mostrar la simetría a ambos lados de una **dorsal mesoceánica**, ya que la intensidad del campo actual se ve reforzada por magnetismo remanente de similar orientación y disminuida por la de sentido opuesto (figura al inicio de la siguiente página).

(modificado de Clark, 1986)



Perfiles del gradiente vertical magnético registrados con un magnetómetro de flujo en Radly, Oxfordshire, Inglaterra. Los rasgos circulares mayores corresponden a fosas de enterramientos que datan de la Edad del Bronce.



Las anomalías magnéticas paralelas de la dorsal de Reykjanes del Atlántico Norte. A, B, disposición general según Vine, 1966; en negro, las anomalías magnéticas positivas; C, perfiles magnéticos perpendiculares a la dorsal. (modificado de Heirtzler et al., 1967)
 La dorsal de Reykjanes corresponde a la dorsal centro-atlántica al sur de Islandia. El rift volcánico que atraviesa esta gran isla puede ser considerado como la traza del rift centro-oceánico. Los dos hechos fundamentales son: el paralelismo de las anomalías con respecto al rift centro-oceánico y la simetría de las mismas dos a dos, a una parte y otra del rift. Esta simetría del océano con respecto a su rift conduce naturalmente a la idea de un nacimiento del material oceánico a su nivel.

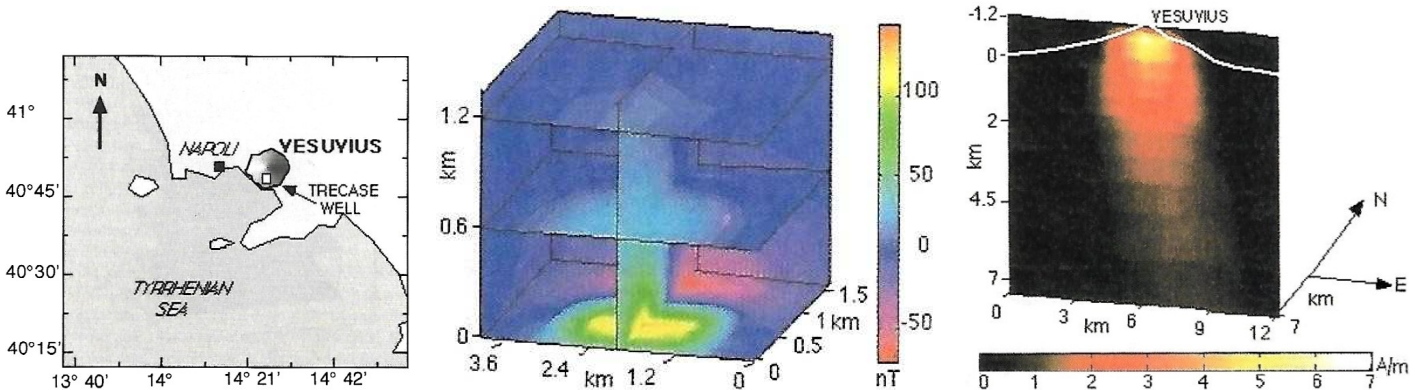
También existen aplicaciones de índole *medioambiental*, eventualmente para posteriores remediaciones, siempre que el déficit o el exceso de magnetita (o de chatarra o cualquier material con alta susceptibilidad magnética) sean indicativos de anomalías causadas por la actividad humana.

Y hay más aplicaciones. Como la referida a la lluvia de rocas de la que hace unos 4.000 años fueron testigos los pueblos originarios (Qom y otros), evento al que bautizaron “pedras del rayo”. Se trató de *sideritos* (meteoritos metálicos) que se precipitaron con trayectoria rasante sobre la zona limítrofe entre Chaco y Santiago del Estero, sobre un área elíptica de unos 1.350 km² que fue llamada Campo del Cielo. Se trata de los restos de un asteroide de unas 800 toneladas de hierro y níquel cuyo mayor pedazo (Gancedo, masa esférica de 2,5 metros de diámetro, con más de 30 toneladas, enterrado a poco más de 2 metros) fue hallado con magnetometría en 2016. Es apenas mayor que el fragmento Chaco descubierto en 1969 y ha pasado a ser el segundo del mundo, detrás del Hoba, hallado en Namibia en 1920 (que cayó hace unos 80.000 años, supera las 66 toneladas y es el monumento natural de su país).



Meteorito Gancedo (foto TELAM)

Las siguientes figuras sintetizan una investigación que a **Plinio el Viejo** seguramente le hubiese gustado conocer: los sucesivos subsuelos del edificio del volcán Vesuvio, a fin de contribuir a la predicción de futuras erupciones. La última fue en 1944, cuando una colada de lava destruyó la mitad del pueblo de San Sebastiano, a 10 km de Nápoles.



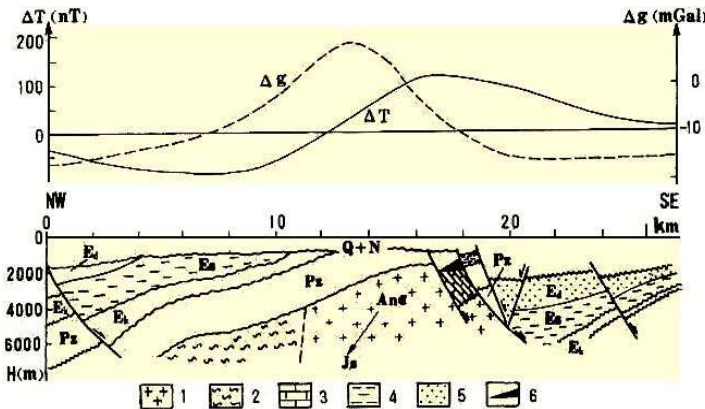
Monte Vesuvio: mapa de ubicación, modelo magnético 3D desde la cota 0 y sección hasta 7 km de profundidad donde se ve la alta magnetización en la parte central del volcán; topografía en línea blanca (modificado de Fedi & Rapolla, 1999)

Exploración magnética para hidrocarburos

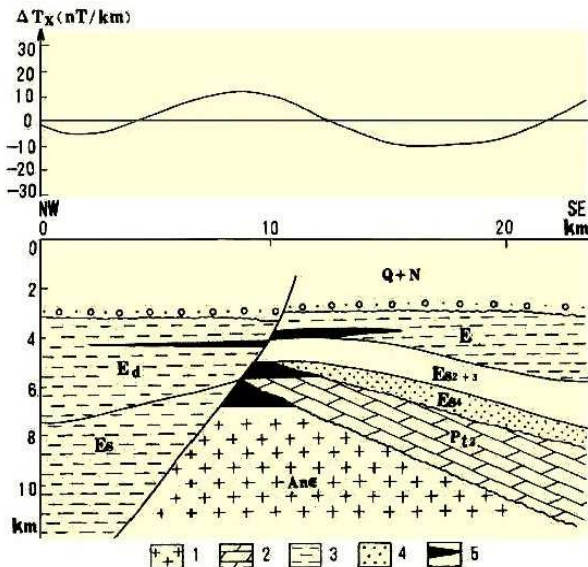
En la búsqueda de petróleo y gas natural el método magnético se emplea para *determinar la geometría (extensión, dimensión y potencia) de cuencas sedimentarias* capaces de generar, migrar y entrapar hidro-

carburos, *así como sus estructuras significativas*: anticlinales, pilares tectónicos (véanse las dos secciones y perfiles de la izquierda), rocas ígneas intrusivas e incluso domos de sal en función de su carencia de minerales magnéticos. Ha de tenerse presente que el basamento ígneo o metamórfico, que posee mayor susceptibilidad magnética, se aproxima a la superficie en la periferia de una cuenca o en los altos intracuencales, sitios donde entonces se expresan mayores valores de esta anomalía geofísica.

Otras veces los resultados magnéticos *permiten planificar y definir más ajustadamente la eventual cobertura de los registros sísmicos*, que suelen dar una información bastante más rica pero son mucho más costosos en comparación al método magnético. *O suplir parcialmente su ausencia*, si la adquisición de sísmica no pudiera hacerse por restricciones poblacionales o ambientales del área de interés.

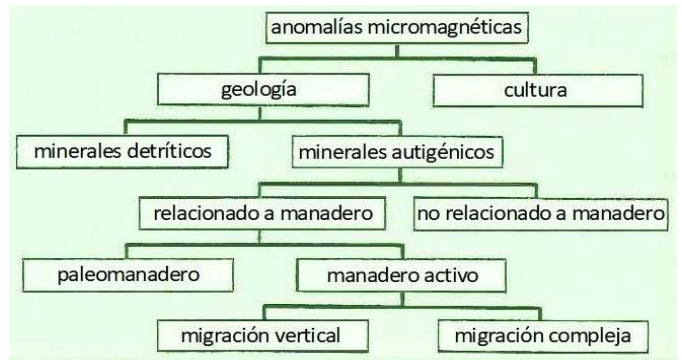


Corte geológico y perfiles gravimétrico y magnetométrico del alto tectónico de Niutuozhen, China. La falla mayor al SE del alto se asocia con yacimientos de petróleo adyacentes a carbonatos paleozoicos. (1) basamento de rocas magnéticas cristalinas precámbricas, (2) gneises y esquistos precámbricos, (3) rocas carbonáticas paleozoicas, (4) fangolitas paleógenas, (5) areniscas paleógenas, (6) reservorio de petróleo.

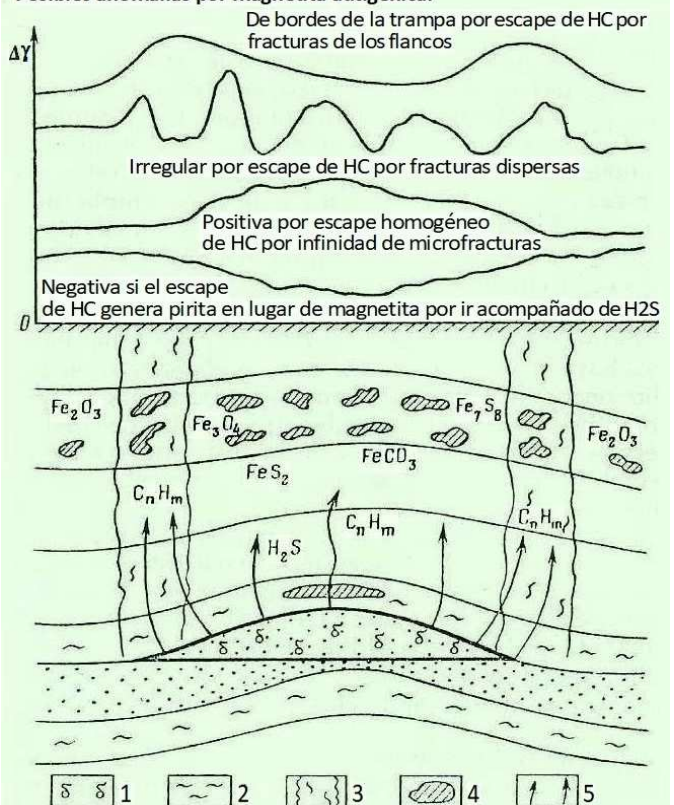


Corte geológico y perfil magnetométrico de Hejian, China. (1) granitos gneísicos precámbricos, (2) dolomitas mesoproterozoicas, (3) fangolitas paleógenas, (4) areniscas paleógenas, (5) reservorio de petróleo.

(figuras modific. de Zhang, 1994)



Posibles anomalías por magnetita autigénica:

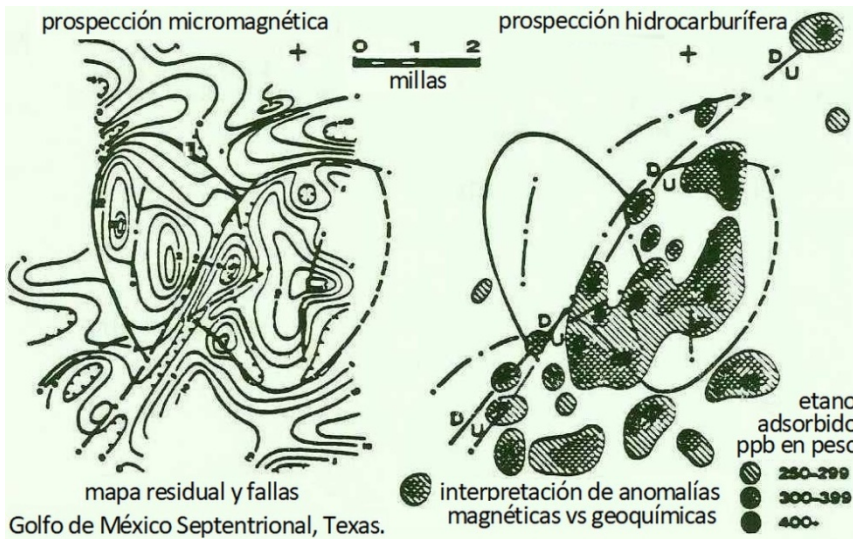


Modelo conceptual. (1) acumulación de petróleo, (2) sello, (3) zonas de inhomogeneidades verticales, (4) cuerpos magnéticos secundarios, (5) vías de migración de los hidrocarburos.

(modificado de Berezkin et al., 1978)

Micromagnetismo

Es un tipo de *aplicación cada vez más empleada*. Parte de hacer mediciones locales de cierta precisión desde las que *se puede inferir la presencia de hidrocarburos* cuando, como suele ocurrir naturalmente, los sellos de las trampas no han sido totalmente eficientes y pequeñas filtraciones o manaderos de hidrocarburos generaron condiciones de magnetización en los sedimentos someros a causa de la *formación de minerales magnéticos*



mapa residual y fallas
Golfo de México Septentrional, Texas.
Mapa residual micromagnético versus mapeo geoquímico de etano manado hasta la superficie desde trampas profundas (modificado de Land, 1993)

autigénicos vinculada a procesos de biodegradación de los petróleos que ascienden hasta arribar a niveles subsuperficiales o incluso la superficie del terreno. En la página precedente, a la derecha se ilustra un esquema de análisis general de las anomalías micromagnéticas y el modelo conceptual relacionado con la presencia de hidrocarburos.

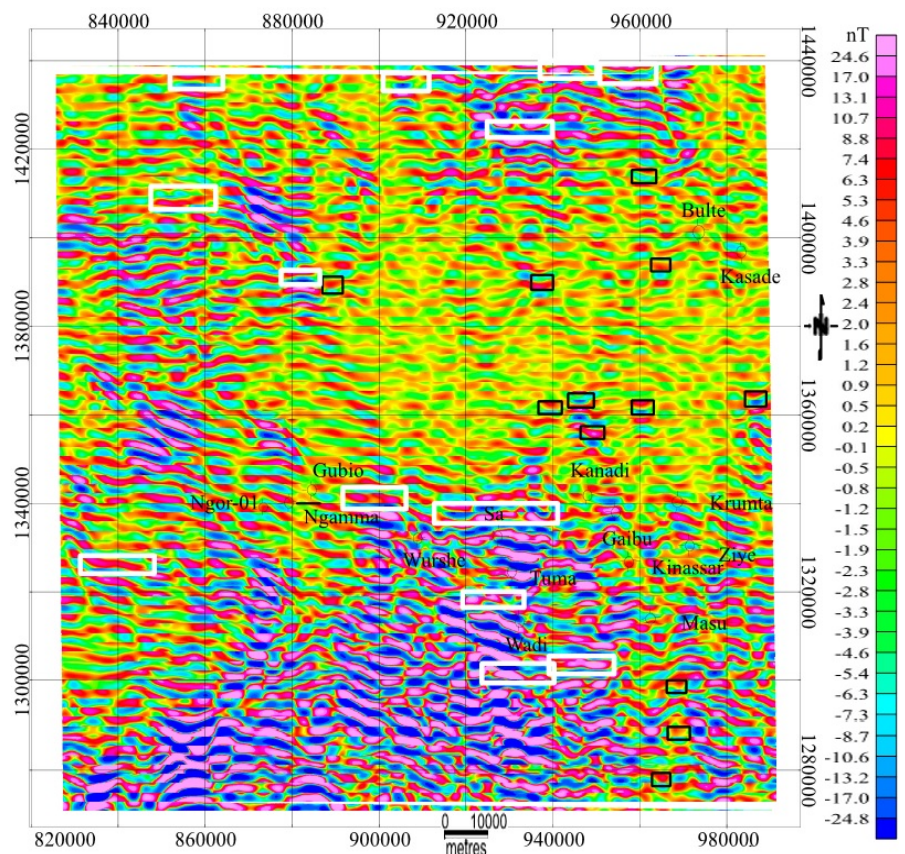
Acá al costado un ejemplo en un área hidrocarbúrfica en Texas, confrontando el plano micromagnético con el mapa geoquímico de etano adsorbido, mostrando buena correspondencia, lo cual valida su utilidad en otras zonas similares, tal el caso del área subsahariana cuyo

mapeo se presenta ahora a la derecha, en un ámbito cuencial de fallas extensionales con un rumbo general este-oeste.

Mapa residual en un sector nigeriano de la cuenca de Chad; las principales anomalías micromagnéticas están enmarcadas en negro mientras que los nombres indican viejos pozos perforados, todos ellos improductivos, sugiriéndose nuevos pozos en las zonas indicadas por este estudio; los recuadros blancos en cambio son anomalías causadas por inducción geomagnética, elongadas en sentido E-O, sin que presenten importante concentración de magnetita autigénica (modificado de Aderoju *et al.*, 2016)

Comparación de los métodos magnético y gravimétrico

La prospección magnética tiene aspectos en común con la de gravedad. Ambas emplean campos potenciales (el trabajo para cambiar de nivel es independiente del camino recorrido), detectan anomalías producidas por variaciones en las propiedades de las rocas en la corteza terrestre superior (la gravimetría también en la inferior y el manto cuspidal), sus respuestas disminuyen cuadráticamente con la distancia desde el punto de medición al emplazamiento anómalo y tienen aplicaciones similares en la exploración petrolera. A partir de los datos gravimétricos se asignan densidades; a partir de los datos magnéticos se asignan susceptibilidades magnéticas y la imantación remanente referida a rasgos definidos en conjunción con otros métodos, por ejemplo sísmica de reflexión. Combinando los resultados magnéticos, gravimétricos, radiométricos, sísmicos y otros pueden alcanzarse inferencias acerca de la litología, de gran importancia en la evaluación de proyectos de exploración y desarrollo de hidrocarburos, de menas metálicas y muchas otras. (Mineral deriva de la palabra mina; mena y mina provienen del francés *mine* y a su vez del celta *mein*, metal en bruto; galés *mwyn*, irlandés *míanach*; nada

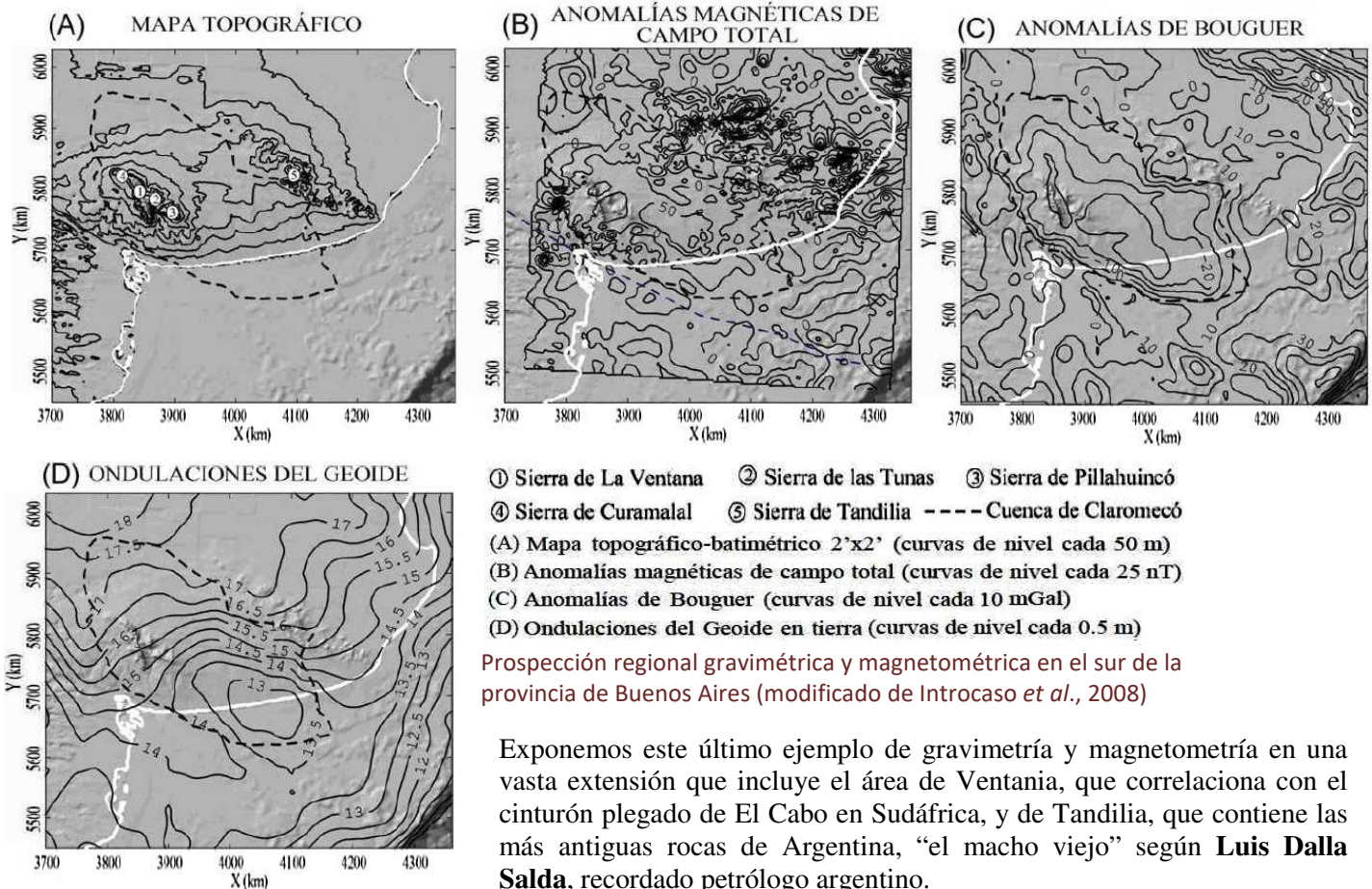


que ver con las minas bélicas, del latín *minae*, puntas salientes ocultas defensivamente en torno a cada *castrum*: fortificación militar romana).

En cuanto concierne a la interpretación, el método magnético resulta ser más complejo comparado con el gravimétrico, si bien, como se apuntó, la gravedad debe medirse con gran precisión (variación máxima de 5 en 1.000 a escala de todo el planeta) en tanto el magnetismo es 1.200 milésimos mayor, o sea más del doble en los polos que en el ecuador. Pero la intensidad magnética, además de magnitud, hemos explicado que tiene dirección muy variable y depende de la susceptibilidad magnética y de la imantación remanente de la roca, esto además de que sufre variaciones temporales de alta variabilidad, mucho mayores que las experimentadas por la gravedad, que deben ser corregidas con extremo cuidado.

Los efectos magnéticos pueden ser causados por componentes de poca abundancia en una roca. En el caso del método gravimétrico la masa que determina la gravedad solo tiene magnitud variable y depende de la densidad. La fuerza gravitatoria sabemos que es sólo atractiva, en tanto la fuerza magnética puede atraer o repeler. Generalmente los efectos gravitatorios se originan en los constituyentes principales de una roca. Los efectos magnéticos residen, en cambio, en la magnetita y otros minerales que son casi siempre minoritarios.

Ambos métodos son, después de la sísmica, los más utilizados en geofísica de superficie.



Exponemos este último ejemplo de gravimetría y magnetometría en una vasta extensión que incluye el área de Ventania, que correlaciona con el cinturón plegado de El Cabo en Sudáfrica, y de Tandilia, que contiene las más antiguas rocas de Argentina, “el macho viejo” según **Luis Dalla Salda**, recordado petrólogo argentino.

Posdata: Las fuerzas magnéticas y gravitacionales, a veces también las eléctricas, suelen invocarse con los más disparatados fines de engaño pseudocientífico y deliberado afán de lucro. La ignorancia es campo fértil para variopintas creencias improbables, mucho más que la ciencia que no promete soluciones mágicas. Una de ellas, se sabe, es la astrología nacida en tiempos babilónicos, con las doce constelaciones de la franja de tránsito del Sol y los planetas, que es como el piso por donde gira todo en el sistema Solar, que en el cielo vemos de canto, como casi una línea en vez de un plano. En griego ζωδιακός κύκλος (*zōdiakós kýklos*, rueda de animales). Serían catorce esas agrupaciones arbitrarias de estrellas (desvinculadas en el cosmos), pero como en un año caben doce ciclos lunares completos, dos de ellas fueron descartadas: Ofiuco y Cetus. Esta última en verdad un solo día del año está por detrás del sol al mediodía, que es el concepto por el cual se asigna el signo zodiacal. Que significaría que un parto anticipado del día 21 al 20 cambiará la personalidad del neonato y que durante los nueve meses en gestación habrá estado a salvo de toda influencia astral. Tampoco importa que los signos se

hayan corrido a causa de la precesión del eje terrestre en un ciclo de 25.800 años y que, por ejemplo, Tauro ahora abarque del 14 de mayo al 19 de junio. Y es interesante que cuando se hacen las predicciones se recurre a la influencia de los planetas, incluyendo Plutón que jugó en la A hasta 2006. Mientras que varios otros planetas enanos no son tenidos en cuenta, como el asteroide Ceres que por cercanía influenciaría mucho más que Plutón. Fiascos entonces probabilísimos en las predicciones durante milenios, hasta el descubrimiento en 1741 de Urano, en 1846 de Neptuno y en 1930 del (ahora descendido) noveno planeta... Pero cada astrólogo ofrece su propias previsiones bien genéricas para que le quepan a cualquiera. Salvo cuando a no pocos signos se les anunció largos viajes justo antes de la última pandemia... que ningún astro ayudó a anticipar con sus “influidos magnéticos”... (pero sí varios epidemiólogos). Y, si fuera por la aceleración gravitacional, la partera influiría inmensamente más que Marte, aunque fuese anoréxica.

CUESTIONARIO BÁSICO

- En pocas palabras, ¿en qué se basan los distintos instrumentos magnetométricos relativos y absolutos?, en especial los más utilizados en la actualidad.
- ¿Cómo podemos obtener gradientes magnéticos?, ¿qué ventajas tienen?
- ¿Qué se busca medir con los aparatos de laboratorio?
- ¿Cómo se opera en aeromagnetometría?, ¿qué ventajas tiene y qué instrumentos pueden emplearse?
- Indicar aplicaciones de los mapas isoanómalos magnéticos.
- ¿Qué aplicaciones petroleras tiene el método desde la superficie?
- ¿Qué es el micromagnetismo y cuál su aplicación?
- ¿Cuáles son las diferencias entre los métodos magnetométrico y gravimétrico?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Aderoju, A., Ojo, S., Adepelumi, A & Edino, F., 2016. A reassessment of hydrocarbon prospectivity of the Chad Basin, Nigeria, using magnetic hydrocarbons indicators from high-resolution aeromagnetic imaging. *Ife Journal of Science*, V.18 N°2 (p 503-520).
- Burger, H., 1992. *Exploration geophysics of the shallow subsurface* (p 389-452). Prentice-Hall.
- Berezkin, V., Kirichek, M. & Kunarev, A., 1978. *Применение геофизических методов разведки при прямых поисках месторождений нефти и газа (Application of geophysical exploration methods for direct prospecting of oil and gas fields)*. Недра (*Subsoil*) (223 p).
- Cantos Figuerola, J., 1972. *Tratado de geofísica aplicada* (p105-180). Librería de Ciencia e Industria.
- Chernicoff, C. & Paterlini, C., 1998. Interpretación geológica de la anomalía magnética del Departamento Mártires, Provincia del Chubut. X Congreso Latinoamericano de Geología, Simposio de Geofísica Aérea (p 31-42).
- Clark, A., 1986. *Archaeological geophysics in Britain*. *Geophysics*, V.51 (p 1404-1413). Society of Exploration Geophysicists.
- Dimri, V., 1998. Fractal behavior and detectability limits of geophysical surveys. *Geophysics*, V.63 N°6 (p 1943-1946).
- Dobrin, M., 1976. *Introduction to geophysical prospecting* (p 476-567). McGraw-Hill.
- Fedi, M. & Rapolla, A., 1999. 3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution. *Geophysics*, V.64 N°2 (p 452-460).
- Foote, R., 1996. Relationship of near-surface magnetic anomalies to oil and gas producing areas. En *Hydrocarbon migration and its near-surface expression* (p 111-126). Schumacher, D. & Abrams, M. Eds, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 66.
- Franklin, R. & Milligan, P., 2010. *Magnetic anomaly map of Australia*, 5th edition, 1:5 million scale. Australian Government.
- Grauch, V. & Millegan, P., 1998. Mapping intrabasinal faults from high-resolution aeromagnetic data. *The Leading Edge*, V.17 N°1 (p 53-55).

- Grauch, V. & Hudson, M., 2007. Guides to understanding the aeromagnetic expression of faults in sedimentary basins: lessons from the central Río Grande rift, New Mexico. *Geosphere*, V.3 N°6 (p596-623).
- Griffiths, D. & King, R., 1972. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos* (p 181-208). Editorial Paraninfo.
- Heirtzler, J., Le Pichon, X. & Baron, J., 1966. Magnetic anomalies over the Reykjanes ridge. *Deep Sea Research*, V.13 (p 427-443).
- Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 367-381, 390-405). Ediciones Omega.
- Introcaso, A., Ghidella, M., Ruiz, F., Crovetto, C., Introcaso, B & Paterlini, C., 2008. Métodos gravimagnetométricos modernos para analizar las características estructurales de la plataforma continental argentina. *Geoacta*, V.33 (p 1-20).
- Isles, D. & Rankin L., 2013. Geological interpretation of aeromagnetic data (365 p). Australian Society of Exploration Geophysicists.
- Land, J., 1993. Some basic similarities and differences of micromagnetics and conventional magnetic surveys. *Houston Geological Society Bulletin*, V.35 N°9 (p 24-25 y 50-51).
- Larson, M., Stone, W., Morris, W. & Crocket, J., 1998. Magnetic signature of magnetite-enriched rocks hosting platinum-group mineralization within the Archean Boston Creek Flow, Ontario. *Geophysics*, V.63 N°2 (p 440-445).
- Lowrie, W., 1997. *Fundamentals of geophysics* (p 229-305). Cambridge University Press.
- Machel, H., 1996. Magnetic contrasts as a result of hydrocarbon seepage and migration. En *Hydrocarbon migration and its near-surface expression* (p 99-110). Schumacher, D. & Abrams, M. Eds, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 66.
- Nettleton, L., 1976. Gravity and magnetics in oil prospecting (p 307-452). McGraw-Hill.
- Parasnis, D., 1971. *Geofísica minera* (p 36-110, 305-310). Editorial Paraninfo.
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. *Basic exploration geophysics* (p333-444). John Wiley & Sons.
- Sharma, P., 1976. *Geophysical methods in geology* (p 159-259). 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 105-217). Cambridge University Press.
- Udías, A. & Mezcua, J., 1997. *Fundamentos de geofísica* (p271-362). Alianza Editorial.
- Wold, R. & Cooper, A., 1989. Marine magnetic gradiometer; a tool for the seismic interpreter. *The Leading Edge*, V.8 N°8 (p 22-27).
- Zhang, Y., 1994. Aeromagnetic anomalies and perspective oil traps in China. *Geophysics*, V 59 N°10 (p 1492-1632).

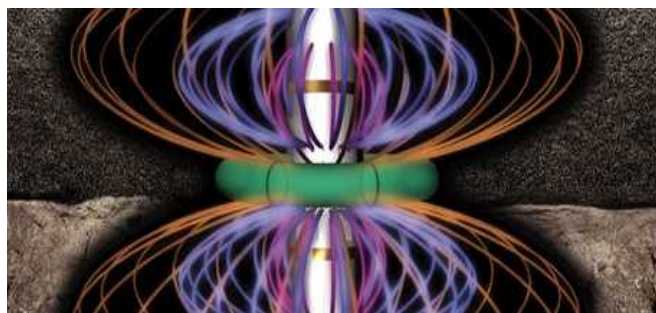
Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.

“Every other Jewish mother in Brooklyn would ask her child after school: So? Did you learn anything today? But not my mother. 'Izzy,' she would say, 'did you ask a good question today?' That difference –asking good questions– made me become a scientist.”

[“Cualquier otra madre judía en Brooklyn le preguntaba a su hijo al volver de la escuela: ¿Y?, ¿hoy aprendiste algo? Pero mi madre no. 'Izzy', decía ella, '¿hoy hiciste alguna buena pregunta?'. Esa diferencia –hacer buenas preguntas– me hizo ser un científico.”]

Isidor Isaac Rabi (circa 1944)

PERFILES MAGNÉTICOS DE POZO



Campo inducido en pozo (modificado de Baker Hughes)

Isidor Rabi nació en 1898 en el pueblo de Rymanów, en el extremo sur de Polonia, que entonces formaba parte del Imperio austrohúngaro. Pero su infancia no transcurrió en el seno de una familia influyente, como **Lorand Eötvös**, ni tampoco lo hizo en Europa, sino en un hogar judío de inmigrantes de clase media-baja en el populoso Brooklyn neoyorkino.

Tras su adolescencia, realizó sus estudios superiores en las universidades de Cornell y Columbia, después estuvo un par de años perfeccionándose en Europa y, a su regreso, comenzó investigaciones sobre el núcleo atómico. Hasta que en 1938 logró desarrollar la técnica para utilizar la resonancia magnética nuclear a los fines de discernir el momento magnético y el espín nuclear de los átomos –fundamentado en el movimiento precesional que había develado el irlandés **Joseph Larmor** en 1898–. Por esa importante contribución a la ciencia Rabi recibió el premio Nobel de física en 1944, cuando todavía no había finalizado la Segunda Guerra Mundial, siendo consultor externo del Proyecto Manhattan que, para pesar suyo, culminaría en los horrores que el presidente Truman ordenó ejecutar sobre la población civil de Hiroshima y Nagasaki.

Isidor (dos hijas) escribió algunos libros, vio prosperar su técnica y falleció a la edad de noventa, en 1988 (y su esposa Helen a los ciento dos).

Columbia University (foto Columbia Magazine)



El principio de la RMN (o *NMR* por *Nuclear Magnetic Resonance*) comenzó a tener aplicaciones desde 1945 gracias al estadounidense **Edward Purcell** y al suizo **Felix Bloch** (quien, como muchos otros judíos, había huído de Alemania en 1933, tras la llegada de Adolf Hitler al poder). Ambos realizaron investigaciones independientes y complementarias que también los llevaron a ganar el Nobel (en 1952) y que años después evolucionarían hacia diversas aplicaciones a la medicina, la prospección geofísica y otras.

Durante la década de 1950 en los Estados Unidos diversas compañías petroleras y de servicios comenzaron a

desarrollar la utilización del concepto de RMN para la detección de fluidos en pozo. Pero recién en la década de 1990 fue posible tener a disposición las primeras herramientas eficaces de tecnología moderna, con su correspondiente procesamiento computarizado. Su uso empezó entonces a ser cada vez más frecuente en la evaluación de fluidos producibles de los yacimientos de hidrocarburos –a pesar de tener un mayor costo que el de herramientas clásicas–, con resultados superadores en los hallazgos de la cuenca Golfo San Jorge y también en varias otras en el mundo.

PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA RMN

Como ya hemos comentado, todos los núcleos atómicos con una cantidad impar de protones y/o neutrones generan un momento magnético intrínseco porque su espín total no resulta cero, mientras que los núcleos con número par de protones y neutrones tienen un espín total nulo. Recuérdese que el espín de cada partícula –del inglés *spin*, girar, de donde el clasemediero *spinning* hoy de moda– solamente puede tomar valores que sean múltiplos enteros de $\hbar/2$, siendo $\hbar = h/2\pi$, donde h es la constante fundamental de la física hallada en 1900 por el alemán **Max Planck**: $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s., energía por segundo, cantidad mínima o cuanto de acción, *wirkungsquantumen* en la lengua de quien habría de ser premio Nobel.

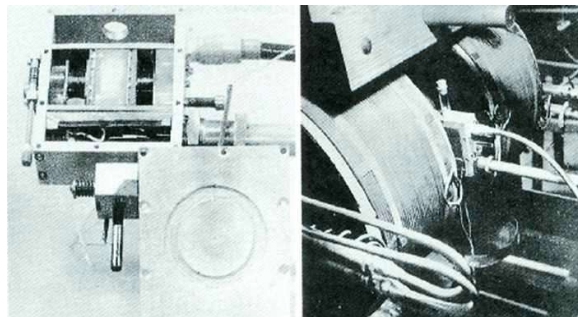
El fenómeno de cabeceo o precesión, por el cual los protones actúan como diminutos trompos o giróscopos cuando son excitados magnéticamente, es el principio de medida aplicado sobre los núcleos de hidrógeno para luego analizar las señales que éstos emiten. Pero, a diferencia de los magnetómetros de superficie, en un pozo no hace falta una botella con un fluido que tenga tales núcleos, ya que el objetivo acá es conocer los fluidos con hidrógeno en los reservorios atravesados por la perforación: se está adentro de una especie de larga botella y quiere saberse qué fluido hay en sus paredes porosas y cuán porosas son éstas. La amplitud de las señales es proporcional a la cantidad de hidrógeno contenida en el espacio poral de cada estrato, ya que el único protón del H (número impar) manifiesta un momento magnético intrínseco, mientras que ni el oxígeno ni el carbono 12 (isótopo más abundante del C) poseen un espín que responda magnéticamente.

Es comparable a su aplicación en medicina, donde la heterogénea distribución de fluidos habilita producir imágenes aplicables a diagnósticos sobre la salud humana –o más raramente de otros animales e incluso de vegetales–. En el mundo petrolero el paciente no está adentro sino alrededor del resonador y la idea es poder diagnosticar su salud productiva.

Todas las mediciones de resonancia magnética nuclear implican el uso de un campo magnético y **de ondas electromagnéticas de amplitud, frecuencia y duración controladas (pulsos) que se emiten desde la antena** de una herramienta de perfilaje. En ciertas condiciones los núcleos de hidrógeno responden emitiendo también ondas electromagnéticas de una determinada frecuencia, las que se denominan ecos y son detectadas por la misma antena. Los datos primarios obtenidos en cada ciclo de medida son **trenes de ecos, sucesiones de momentos magnéticos en fase caracterizados por su amplitud y por la variación de ésta con el tiempo**. Estos dos factores son muy importantes, dado que la variación de la amplitud da una idea de la proveniencia de la señal (agua ligada a la arcilla de la matriz o fluido neto en los poros), valor que a su vez depende del número de núcleos que pudo ser excitado en la zona de medida. El sistema está calibrado de manera tal que las amplitudes se expresan en unidades de porosidad.

La rotación de la carga eléctrica (momento magnético) del núcleo atómico de los hidrógenos alrededor de su eje genera un campo magnético semejante al de un imán con sus polos N-S orientados sobre el eje de rotación del núcleo. En los fluidos los momentos magnéticos de los núcleos de H se disponen de manera aleatoria, de modo que la suma de todos es nula. La forma de detectar el magnetismo asociado con ellos es ordenándolos para que sus momentos magnéticos se sumen en alguna dirección preferencial, cosa que se consigue aplicando un campo magnético artificial.

En presencia de un fuerte campo exterior B_0 , aplicado con un potente imán, los hidrógenos se orientan en una misma dirección (z) pero con sentidos opuestos: paralelos y antiparalelos al mismo. **Aquí se mide el tiempo de polarización T1 (longitudinal, z) que toman los protones para poder alinearse con B_0** , el cual aumenta para mayores tamaños porales y para viscosidades decrecientes. Podemos imaginar los núcleos de H como trompos que giran sobre sí mismos y que simultáneamente manifiestan un giro de precesión alrededor de un eje que es



Aparato de RMN de Bloch y Purcell, *circa* 1946: izquierda, receptáculo de la muestra, y derecha, electroimán (fotos Analytical Chemistry, Eric Decker)

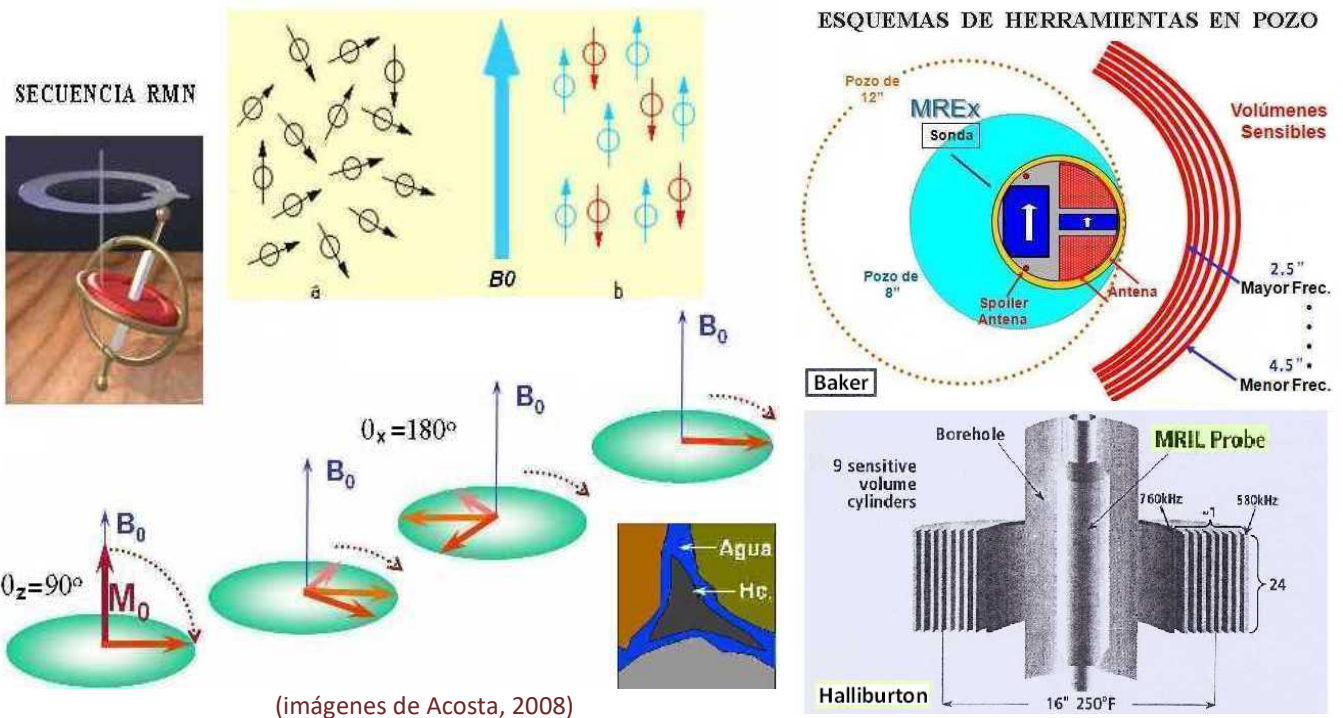
coincidente con la dirección del campo B_0 empleado (parte superior de la figura de la izquierda).

El vector de magnetización obtenido es la componente en la dirección del campo magnético externo longitudinal (z), resultante de la suma vectorial de los momentos magnéticos en el fluido debidos en esencia a la respuesta de los núcleos de H. Las componentes en el plano transversal se cancelan entre sí, por lo cual puede decirse que la magnetización resultante en el plano transversal es nula.

En este estado de magnetización estable comienza a aplicarse una sucesión de pulsos electromagnéticos de radiofrecuencias con la antena de la herramienta. Éstos comunican energía a los protones provocando un giro de su momento magnético que es proporcional a la intensidad de la misma, generando resonancia magnética según la frecuencia de Larmor del H. Tal frecuencia precesional será por ende proporcional a B_0 .

Se aplica entonces el **primer pulso (de 90°)** como consecuencia del cual **los momentos magnéticos son llevados giroscópicamente al plano transversal (x)** rotando a la frecuencia de Larmor (véase en la figura siguiente ese pulso de 90°, de valor M_0). Luego se aplica un **pulso de oscilación opuesta sobre este plano transversal** (como se ilustra) y, como en el volumen investigado existe una banda de frecuencias de Larmor en lugar de una única, esto hace que en esta imaginaria pista los protones más veloces tomen distancias de los más lentos y se pierda la coherencia que permite detectarlos.

Luego, **con un pulso de 180° (polaridad inversa), ocurre el retorno** en el mismo plano transversal (x), lo que provoca que al cabo de cierto tiempo los protones más rápidos alcancen a los más lerdos y todos los vectores pasen simultáneamente por el mismo lugar emitiendo una señal electromagnética de microvoltios que detecta la antena de la herramienta: es el primer **eco (señal en fase de los momentos magnéticos)**. Éste tiene la información de la cantidad de protones que participaron en la competencia y, como éstos están contenidos en los fluidos, la amplitud del eco es proporcional a la porosidad del medio investigado.

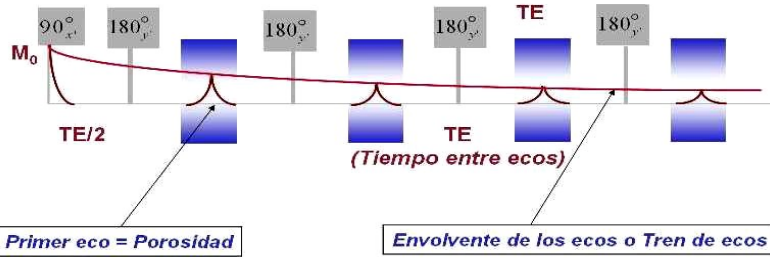


(imágenes de Acosta, 2008)

Las herramientas de perfilaje de RMN o precesión protónica (figuras de la derecha) continúan con una secuencia de pulsos (a intervalos constantes) que permite mensurar cómo retorna sucesivamente la magnetización a su estado de equilibrio inicial, cuyo proceso de recuperación decae exponencialmente.

En suma, **la magnetización en el plano transversal comienza desde un valor M_0** . La posterior secuencia de pulsos de 180° (π) produce una **serie de ecos que son proporcionales a la magnetización total que va quedando** en dicho plano, por lo que su amplitud se va reduciendo según una función exponencial decreciente con una constante T2 del tiempo de relajación transversal.

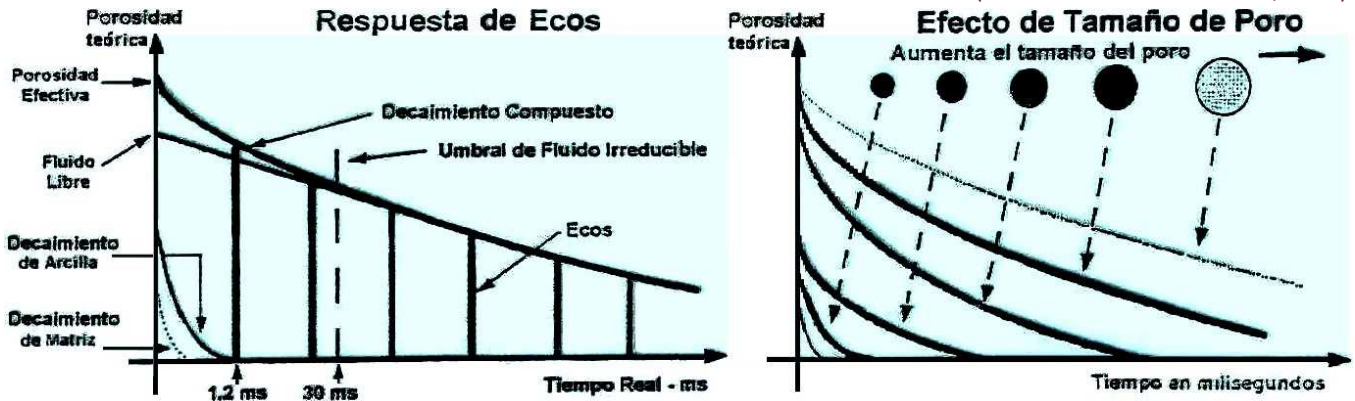
El **decaimiento es causado por tres factores**: el desfase de los núcleos de H que “chocan” con las paredes porales –es como que se van saliendo de la pista– por lo que resulta más acentuado cuanto más chicos son los poros; las interacciones entre las moléculas del fluido que los ocupa (agua, petróleo o gas), y el efecto de la difusión que se acentúa por medio de la aplicación de un gradiente del campo magnético B_0 .



Este tren de ecos registrados (izquierda) es la información primaria que se obtiene con la herramienta de perfilaje. Pero en él no resultan evidentes los datos de utilidad práctica, que desde un modelo teórico se indican en el par de figuras siguientes.

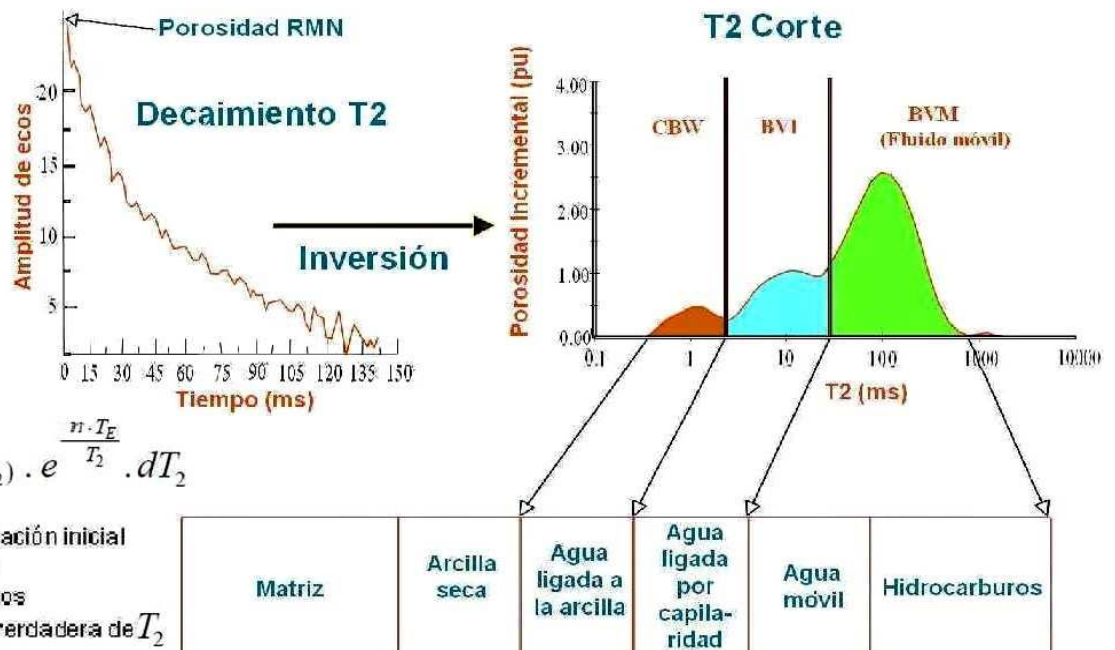
Tren de ecos (de Acosta, 2008)

(modificado de Halliburton., 2000)



Es por esto que *debe ser realizado un proceso de inversión*, que consiste en generar un espectro de las constantes de la función de decaimiento T2 a partir de los trenes de eco obtenidos. A estos trenes se los conoce también como datos en el dominio del tiempo, y a los espectros de T2 como datos en el dominio de T2, los cuales se obtienen mediante la utilización de la **transformada de (Pierre) Laplace** (creada en 1785 en Francia) escrita abajo, aplicada a una distribución de valores (T2) a partir de una condición inicial (M). Es decir que *en abscisas se pasa de unidades de tiempo entre ecos a la proyección de las pendientes o derivadas T2, y en ordenadas de amplitud de ecos a unidades de incremento de la porosidad*.

En las mediciones de porosidad utilizando RMN se asocian los poros grandes a T2 grandes y los poros chicos a T2 chicos. Es posible fijar límites en el espectro de T2 de manera de dividir la porosidad, que es el área del espectro de T2, en porciones que representen muy aproximadamente a las porosidades efectiva, irreducible y móvil, lo que dependerá de una correcta elección del método de adquisición y de los valores T2 límite o de umbral o corte (*cutoffs*) elegidos. Téngase presente que siempre hay también ruido térmico.



(modificado de Acosta, 2008)

$$M_{(n \cdot T_E)} = \int_0^{\infty} P_{(T_2)} \cdot e^{-\frac{n \cdot T_E}{T_2}} \cdot dT_2$$

$M_{(n \cdot T_E)}$: Magnetización inicial

n : número de eco

T_E : tiempo entre ecos

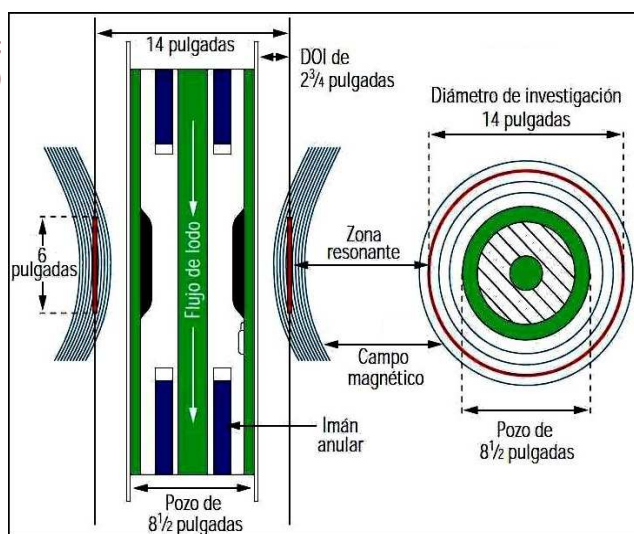
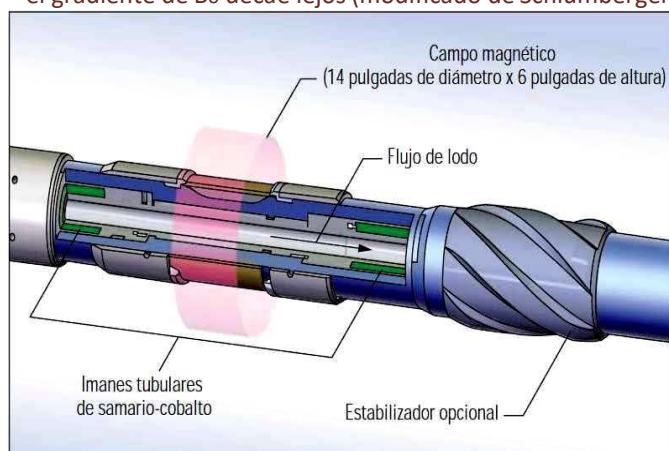
$P_{(T_2)}$: distribución verdadera de T_2

HERRAMIENTAS DE CABLE Y DE SARTA DE PERFORACIÓN

Las **herramientas de RMN de cable (wireline)** perfilan entre 500 y 1.000 m/hora. Pueden emplearse **distintas frecuencias para distintas profundidades de investigación (distancias horizontales desde la pared del pozo)**, unos 5 cm con frecuencias altas y 10 cm con menores frecuencias. Y en sentido vertical los modernos arreglos de alta resolución en casos muy favorables pueden permitir la identificación de intervalos laminados de hasta un mínimo de 10 cm de espesor.

Desde el año 2000 hay herramientas adaptadas para **registrar durante la perforación (LWD, logging while drilling)**, que se emplazan por encima del conjunto de fondo y envían la información por telemetría. El movimiento impide buenas lecturas y los datos tienen menor calidad que la conseguida con herramientas de cable, pero permiten tomar decisiones inmediatas sobre ensayos, densificación de lodos u otras que pueden redundar en mayor producción o menores costos.

Herramienta LWD proVision alojada dentro del portamecha; el gradiente de B_0 decae lejos (modificado de Schlumberger)



PRONÓSTICOS DE FLUIDOS REALIZADOS EN BASE A LA RMN

La información se registra con un conjunto básico de **perfiles de pozo abierto** constituido por una herramienta resistiva, un calibre y la herramienta de resonancia magnética nuclear centralizada o excéntrica que ofrecen las distintas compañías de servicios petroleros. Su evaluación provee indicadores tales como:

- **Porosidad Efectiva** ϕ_e **independientemente de la matriz rocosa** (éste es el dato fundamental).
- **Índices de calidad petrofísica del reservorio:**

$MBVM$, índice de porosidad asociada a fluidos móviles, así como $MBVI$ para fluidos inmóviles (*Magnetic Bulk Volume Movable, Magnetic Bulk Volume Irreducible*).

K_c , índice de permeabilidad de Coates (definido en 1995 por el estadounidense **George Coates** y colaboradores de la compañía Halliburton, a partir de investigaciones del turco **Aytekin Timur** en 1968), siendo: $K_c = (\phi_e / C)^4 (MBVM / MBVI)^2$ con la constante $C=5,8$ para la C.G.S.J.

Los índices $MBVM$ y K_c permiten caracterizar los reservorios de manera bastante confiable, minimizando el punzado de capas "sin entrada" de fluidos y facilitando la elección de otras capas que habrá que estimular mediante fracturación hidráulica, acidificación, etc.

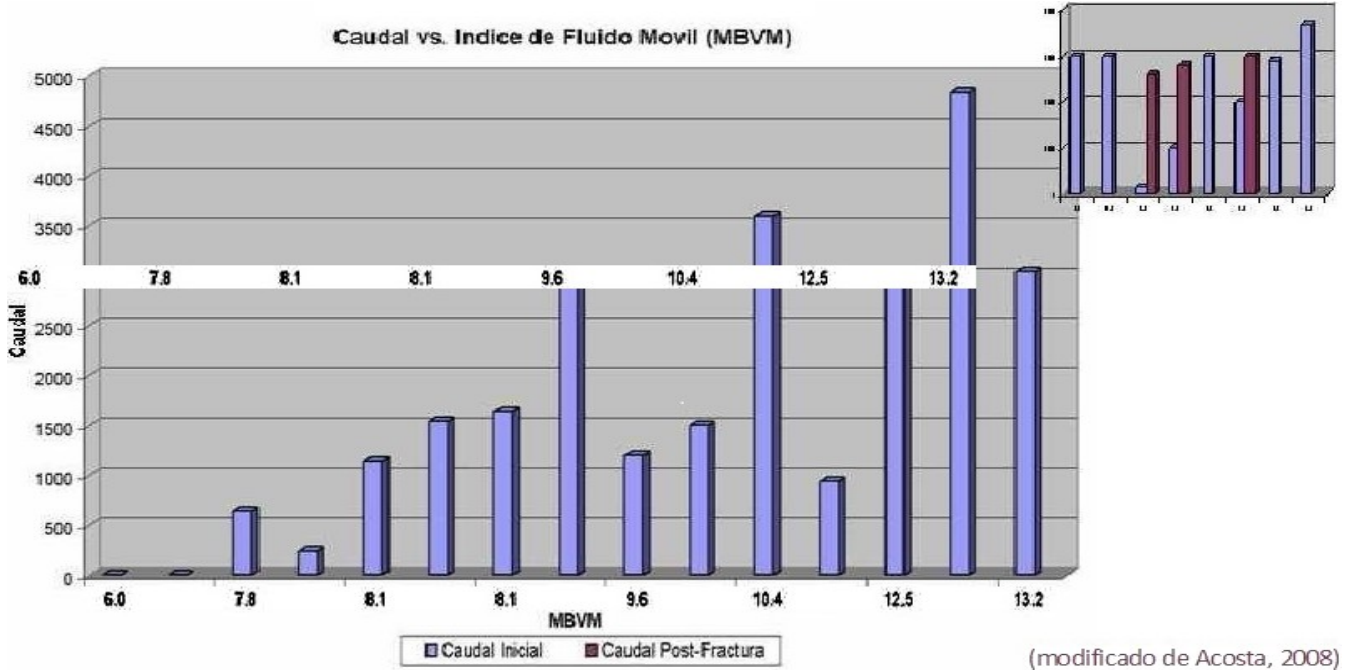
En ciertas modalidades de RMN se obtienen tres espectros de T2 correspondientes a registros conjuntos (tres pistas "GTE" con diferentes valores de Gradiente del campo magnético B_0 –del orden de 3 G/cm– y Tiempo entre Ecos –del orden de 400 μs –) para poder realizar mejores pronósticos de los fluidos presentes en los reservorios, en función de la difusividad que caracteriza a cada uno.

Metodología de trabajo

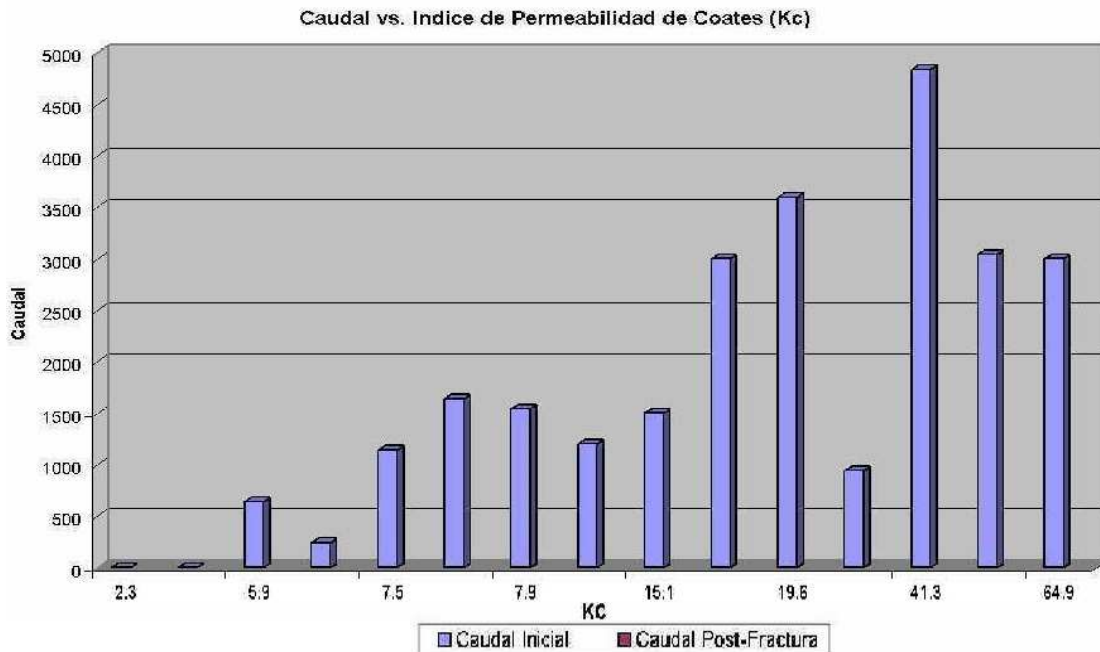
La metodología empleada es muy simple, limitándose a la aplicación de valores límite a los índices de calidad petrofísica, resultando "buenos" reservorios aquellos que posean valores de K_c y $MBVM$ mayores a los mismos, y "malos" o "pobres" reservorios aquellos cuyos valores estén por debajo de tales límites. (No es casual que malo pueda ser sinónimo de pobre –y hasta siniestro– y bueno lo rico y lo derecho)... Nada, la discriminación entre buenos y malos reservorios se realiza tomando como base el caudal obtenido durante el ensayo de terminación cuando éstos se han realizado de forma individual y no en conjunto.

Seguidamente se presentan dos histogramas. En el mayor de ambos nótese la relación de proporcionalidad

directa entre indicadores y caudales: con valores bajos de los indicadores se obtuvieron bajos caudales; por ende los caudales bajos de capas que tienen indicadores con altos valores permiten inferir posibles daños de formación y sugerir algún tipo de estimulación, como una fractura hidráulica, que permita remover el daño y aumentar el caudal obtenido en la terminación. Esta conclusión está claramente indicada en el pequeño histograma superior derecho: el recuadro muestra el incremento del caudal post-fractura en capas con índices altos de calidad de reservorio.



Los gráficos para el índice de permeabilidad de Coates muestran un comportamiento similar a los de porosidad asociada a fluidos móviles, lo que permite sacar conclusiones similares. De esta manera se obtienen los valores límite que permiten discriminar entre reservorios de buena, regular o mala calidad.



La clasificación de los fluidos diagnosticados se realiza aprovechando una propiedad característica de cada uno, el **coeficiente de difusión**, que provoca un decaimiento adicional de los ecos en presencia de un campo magnético gradacional como suele aplicarse en los pozos. Esta difusión es análoga a la de una gota de tinta en un vaso de agua; es la medida de la habilidad de las moléculas para moverse aleatoriamente en el fluido, es una propiedad inherente a la composición molecular y su magnitud varía con la temperatura y la presión.

La existencia de **un gradiente del campo magnético B_0 hace que la frecuencia de Larmor cambie espacialmente de acuerdo a cómo cambia el campo**, provocando una compensación incompleta con la secuencia de pulsos y ecos conocida como de CPMG: en Estados Unidos **H. Carr** y **E. Purcell** fueron quienes primero hicieron el experimento en 1954, y **S. Meiboom** y **D. Gill** lo perfeccionaron en 1958. Esto sucede porque hay protones con movimiento browniano –descrito por el escocés **Robert Brown** en 1827 en partículas dentro de vacuolas de granos de polen–. Estos protones se mueven a lugares con distinto B_0 modificando sus frecuencias precesionales e impidiendo reajustar sus desfases relativos, **anulándose anticipadamente la componente de magnetización transversal y consecuentemente acortando T_2** .

El fenómeno ocurre mayormente en los fluidos de baja viscosidad y **la propiedad se aprovecha para separar las señales de RMN provenientes del agua de las debidas al petróleo**, dado que los coeficientes de difusión de ambos difieren debido sobre todo a sus distintas viscosidades. Y **para utilizar la propiedad de difusión de los fluidos en los registros de pozo se requiere proceder a una adquisición con distintas frecuencias y a distintos valores de gradiente del campo aplicado**, obteniéndose distintos espectros de T_2 .

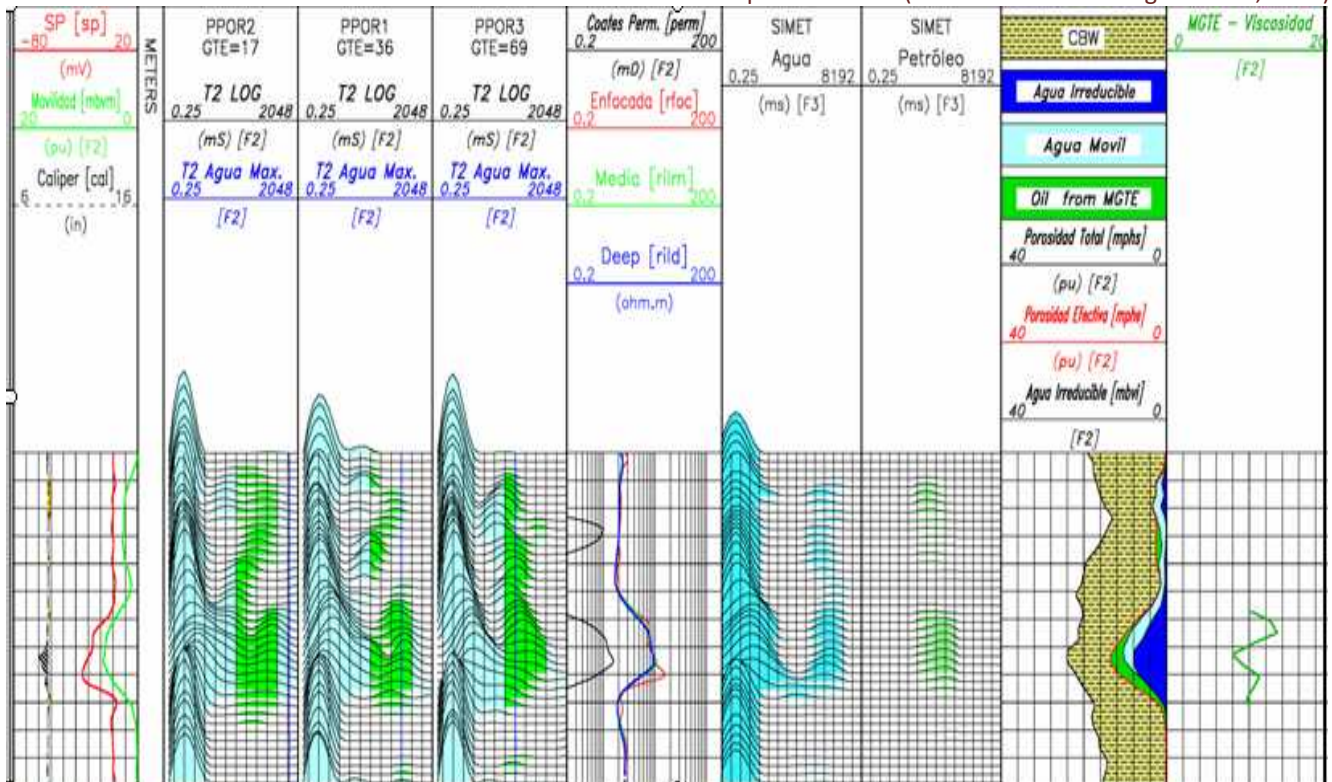
Los espectros pueden calcularse a partir de experimentos (adquisiciones) GTE realizados cada uno con un gradiente de campo magnético (G) y un tiempo dado entre ecos (TE), llamados **espectros de T_2 aparente**. De éstos es posible hallar matemáticamente el espectro que tendría un experimento hipotético con $TE = 0$, denominados **espectros de T_2 intrínsecos**, sin los efectos de la difusión (SIMET en las figuras siguientes).

El **diagnostico de fluidos** en los pozos se realiza por comparación visual de los espectros de T_2 teniendo en cuenta las caracterizaciones que a continuación se exponen, que se ajustan a medida que avanza un proyecto.

- Cuando el fluido presente en el reservorio analizado es petróleo:

Los espectros deberán presentarse prácticamente iguales (sin desplazamientos relativos). El espectro de T_2 correspondiente al GTE de 69 (ubicado a la derecha en la siguiente figura) no deberá estar desplazado hacia la izquierda respecto de los GTE de 36 y 17 (espectros ubicados a la izquierda). Esto responde a la poca difusión que presenta este tipo de fluido.

Presentación de perfil de RMN (modificado de Domínguez et al., 2005)

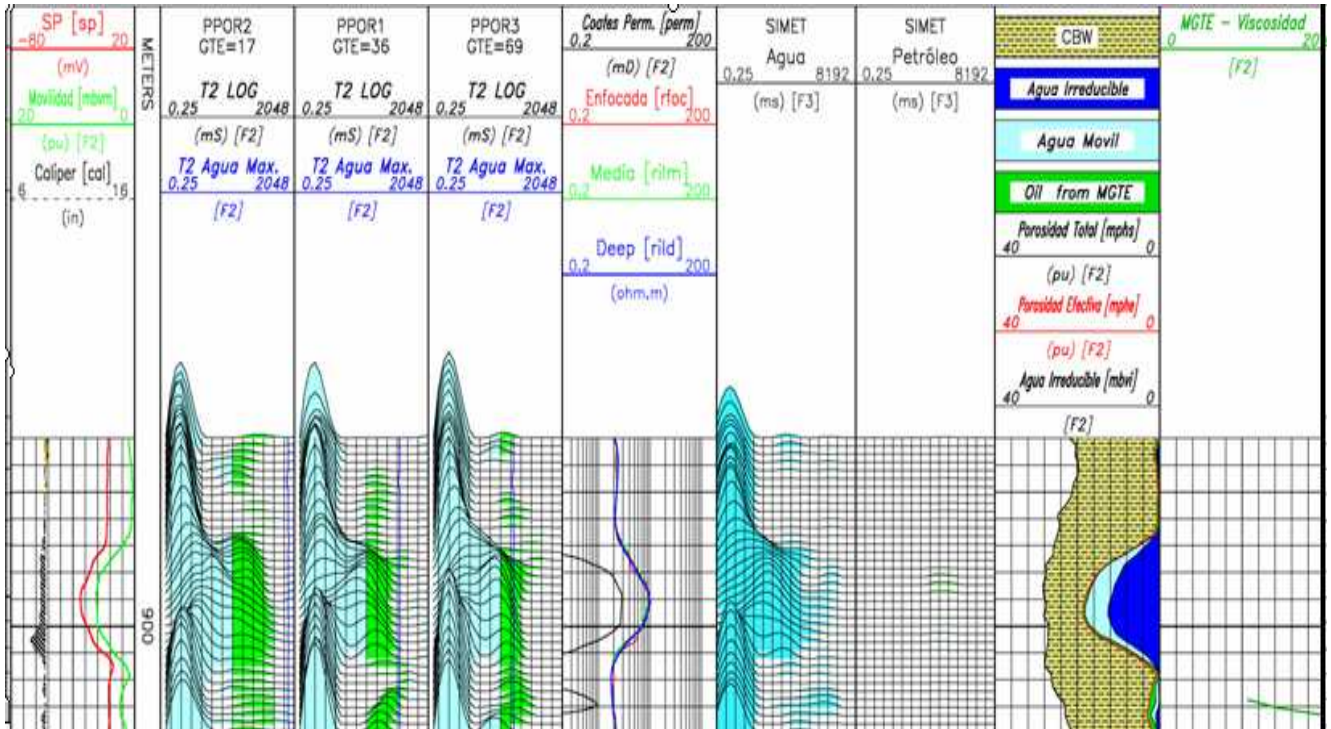


SP: potencial espontáneo; Caliper: calibre del pozo –diámetro real–; Enfocada, Media y Deep: resistividades a distintas profundidades laterales; CBW –clay bond water, agua ligada a las arcillas–; para los parámetros de RMN ver el texto.

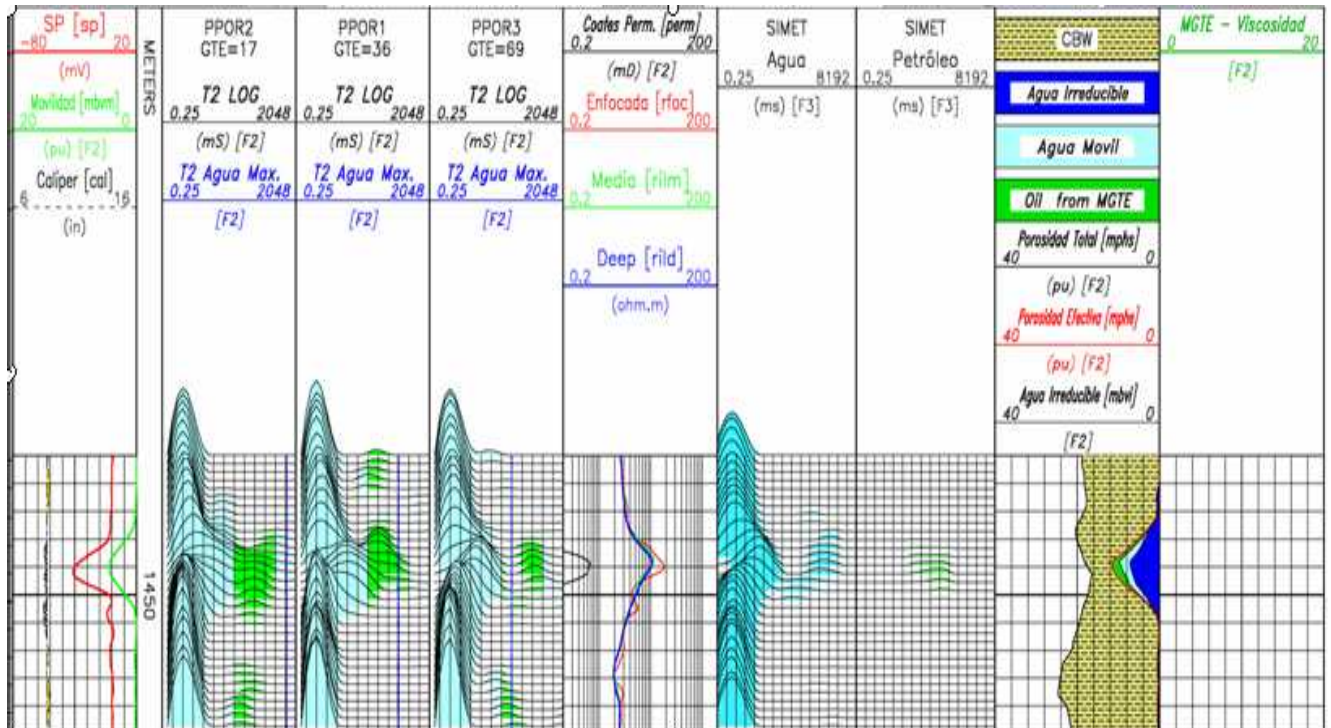
- Cuando el fluido es agua de formación:

Dado que el agua presenta mayor difusión, cuando sea éste el fluido contenido en el reservorio, el espectro de la derecha presentará un desplazamiento (*shift*) hacia la izquierda respecto a los del GTE de 36 y 17, tal como se

muestra en la siguiente figura. Nótese el valor bajo para el índice de movilidad asociado a fluidos móviles en las capas sin entrada de fluido en el ensayo de terminación.

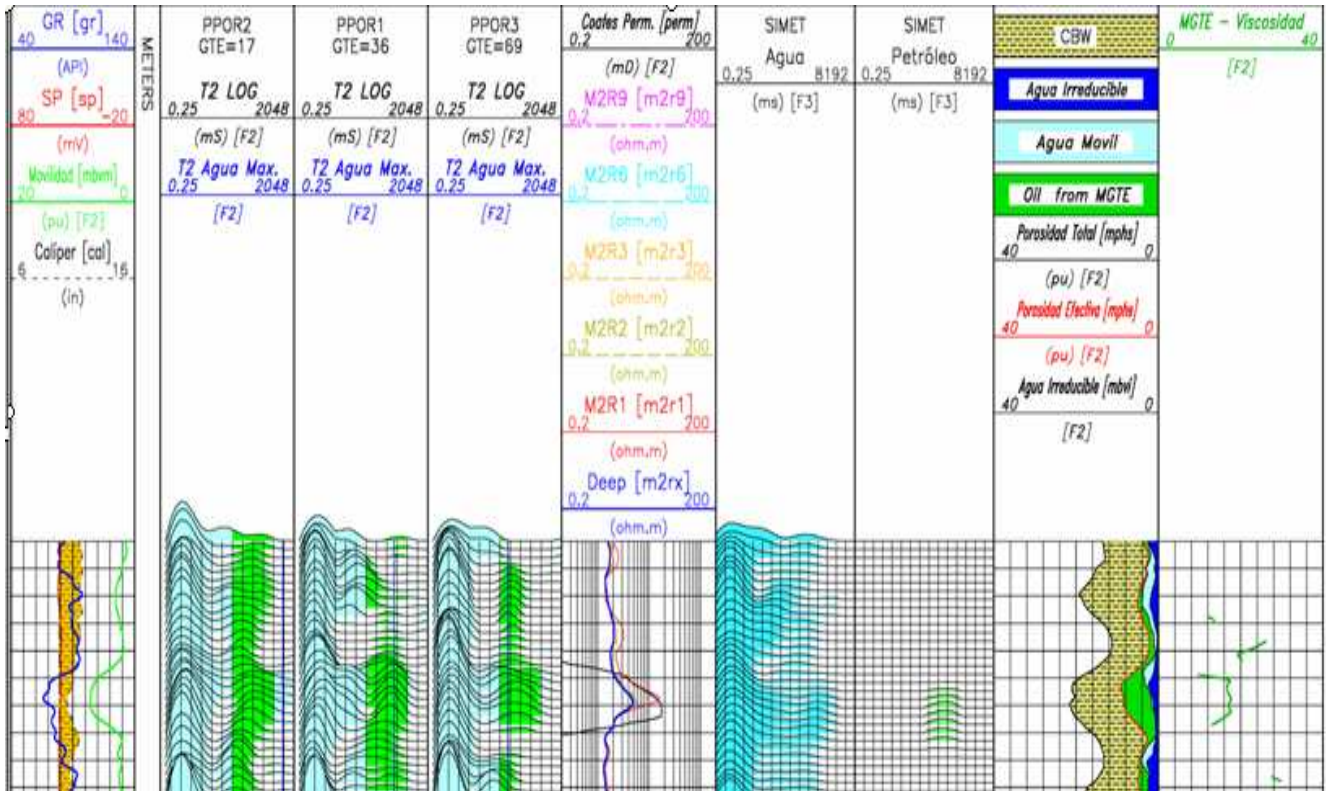


(tramos de perfiles modificados de Domínguez et al., 2005)



Téngase presente que la movilidad (en centipoise = milipascal . s) es dependiente de la viscosidad y de la permeabilidad y puede ser mayor para el agua que para un petróleo denso (menor a 10°API).

Otro elemento utilizado para el diagnóstico de petróleo que aprovecha los efectos de la difusión es el valor de T2Máx del agua, que depende de los parámetros de adquisición, de la temperatura y de la viscosidad del agua. Este valor máximo está representado en el registro de RMN por una línea de color azul colocada en el espectro de T2 correspondiente al GTE de 69. Toda señal que exceda esa línea es producida por petróleo que se encuentre en la zona de lectura de la herramienta.



(modificado de Domínguez et al., 2005)

El análisis de espectros en ocasiones puede presentar una escasa diferenciación, dependiendo de la densidad específica, pero más que nada de la viscosidad de los hidrocarburos. Por tal motivo en ocasiones resulta un poco difícil la caracterización antes mencionada. Esto hace necesaria la **inversión simultánea del total de la señal registrada** mediante una técnica que en forma iterativa busca el mejor modelo que reproduzca la totalidad de los trenes de ecos implicados, **separando en grupos según la difusividad de los átomos de hidrógeno** –y evaluando también la calidad de esta simulación–. La salida de este proceso consiste en espectros separados de T2 provenientes del agua y el petróleo (y eventualmente gas). A partir de ellos es posible estimar volúmenes de hidrocarburos en la zona de medida de la herramienta. La evaluación de dichos espectros se utiliza conjuntamente con los espectros llamados MGTE para discriminar fluidos (columna de la derecha en todos los perfiles precedentes).

En los casos en que los poros son llenados sólo por la fase humectante (agua), los espectros representan tamaños porales, correspondiendo al agua ligada a las arcillas los valores más bajos de T2 y a los fluidos móviles los valores más altos de éste. Cuando en los poros existen dos fluidos, uno humectante y otro no (hidrocarburos), **la señal del fluido no humectante no depende de los tamaños porales** (al no “chocar” con las paredes), sino sólo del tipo de fluido, principalmente de su viscosidad (T2 altos si ésta es baja y viceversa).

La tabla a la derecha expresa los valores típicos de las magnitudes que permiten distinguir los posibles fluidos presentes en los reservorios.

Dado que existe un gran contraste del coeficiente de **difusión del gas** respecto a la de los demás fluidos, tal propiedad podría utilizarse para identificarlo. Pero las bajas presiones a las que se encuentra el gas en los reservorios de la cuenca Golfo San Jorge hacen que el índice de hidrógeno asociado sea escaso, generando en consecuencia una señal de muy baja intensidad que normalmente queda enmascarada por la fuerte señal que producen las altas saturaciones de agua irreducible que son típicas de esta cuenca hidrocarburífera. (O sea, las menores saturaciones de agua en la zona invadida, S_{wi} , que pueden obtenerse mediante la presión de empuje final, haciendo fluir petróleo o gas).

Propiedades RMN de los Fluidos

	T1	T2	HI	Do
Agua	1-500	0.67-200	1.0	7.7
Petróleo	5000	460	1.0	7.9
Gas	4400	40	0.38	100

- T1: Tiempo de polarización en milisegundos
- T2: Tiempo de relajación en milisegundos
- HI: Índice de hidrógeno como fracción decimal sin dimensiones
- Do: Coeficiente de Difusión Molecular en cm^2/seg por 10^{-5}

(modificado de Halliburton., 2000)

Limitaciones del Método de Evaluación

Es importantísimo conocer las situaciones que nos pueden motivar prognosis desacertadas.

Sabemos que en muchas ocasiones los radios de invasión del filtrado de lodo resultan bastante extensos, razón por la cual las *lecturas hechas por RMN (cuya profundidad lateral no supera los 10 cm)* provienen de la zona lavada, sin llegar a verse la zona no contaminada. Así, *un petróleo de baja viscosidad que sea casi completamente desplazado de la zona lavada, podría ser interpretado como agua* debido a que se observará un desplazamiento de los espectros producidos por efecto del agua del filtrado. Es una circunstancia que podrá motivar fallos en los diagnósticos de fluidos que llevarán a confundir reservorios petrolíferos con capas únicamente acuíferas. Por otro lado, un reservorio fundamentalmente acuífero que tiene alojado algo de petróleo de alta viscosidad dentro de la zona de lectura podrá producir diagnósticos erróneos que lleven a confundirlo con un reservorio petrolífero.

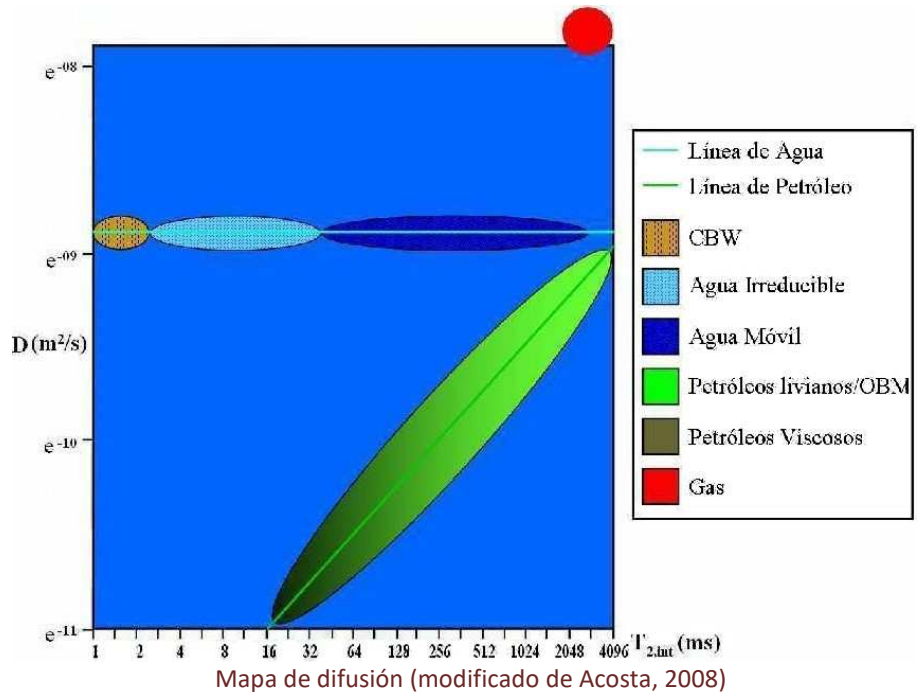
Por fortuna el tipo de petróleo más común en la cuenca Golfo San Jorge (de viscosidad media), tiende a reducir estos problemas, permitiendo que esta metodología de evaluación de fluidos generalmente no falle. Y *los datos de RMN son útiles además como relevante complemento en la caracterización de reservorios.*

Interpretación de los mapas de difusión

Una imagen en 2D de RMN (mapa de difusión) es análoga a los gráficos que se usan en el análisis de pozo abierto. Por ejemplo aquellos que emplean conjuntamente los datos de densidad y neutrónico (Tema 09) para determinar tipo de roca y porosidad.

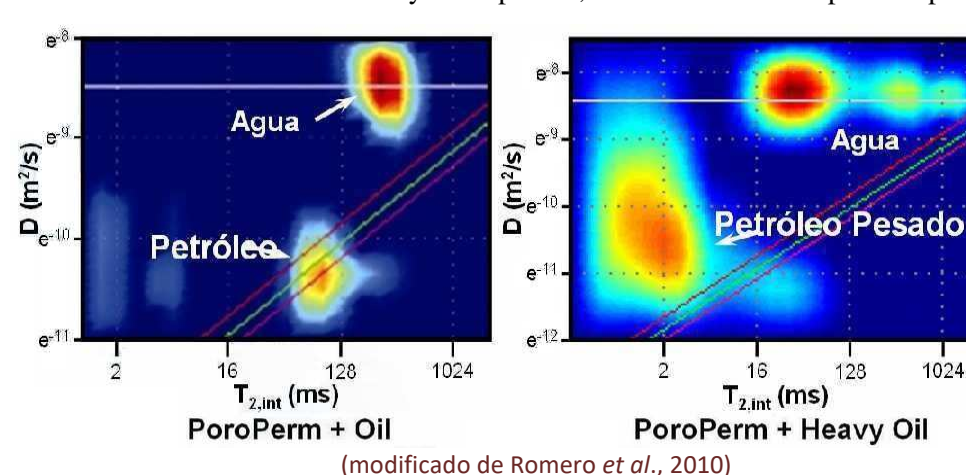
En forma similar sirve graficar en 2D los datos de la RMN (Difusión vs. T2 Intrínseco) para de esta manera poder diferenciar los fluidos con el mismo T2 pero distinta difusión.

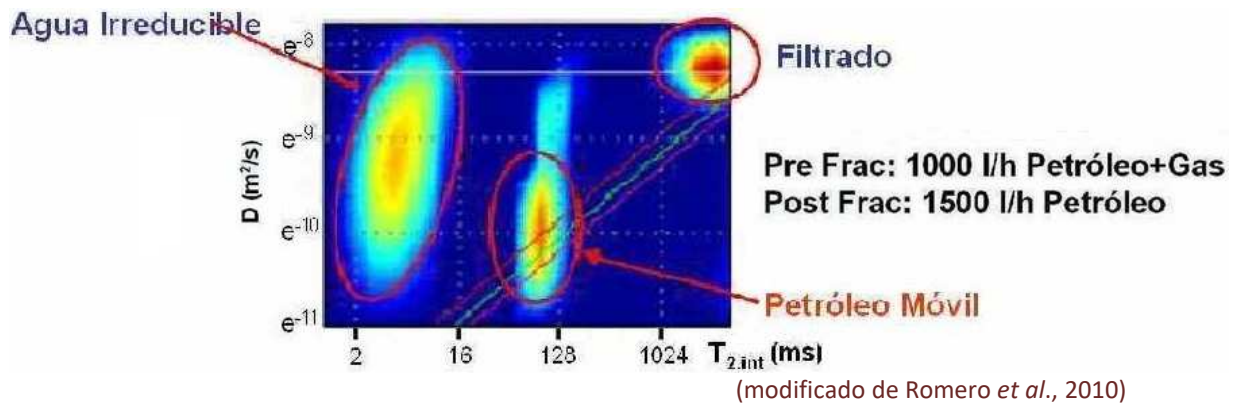
(Para calcular el coeficiente D deben estimarse la temperatura y la presión de cada intervalo analizado.) Se grafican líneas para el agua y el petróleo. El gas ocupará la esquina superior derecha. El volumen de cada fluido está representado por un color diferente.



En la cuenca del Golfo San Jorge estas técnicas de identificación de fluidos han permitido predecir con un promedio de acierto de más de 75% qué zonas son probablemente más productivas de hidrocarburos, lo cual ha minimizado la necesidad de ensayos de prueba, ahorrando a las empresas operadoras dinero y tiempo en la

tarea de terminación de los pozos. En la figura contigua pueden verse los mapas de difusión de un intervalo productivo con petróleo normal y de otro que tiene petróleo pesado. En este último se puede identificar un petróleo móvil, tal como lo demostró el posterior ensayo de terminación (figura sucesiva).





Cuadro General de la Prognosis de Fluidos

PRONÓSTICO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES	ENSAYO PROBABLE	RESULTADO ACERTADO	RESULTADO NO ACERTADO
AF	Agua de formación	Respuesta de agua de formación en todo el espesor de capa	100 % agua de formación con o sin rastros de petróleo	100 % agua de formación con o sin rastros de petróleo	Cualquier % de petróleo en el ensayo
AF c/RP	Agua de formación con rastros de petróleo	Señal de agua de formación y escasas señales puntuales de petróleo de formación	100 % agua de formación con o sin rastros de petróleo	100 % agua de formación con o sin rastros de petróleo	Cualquier % de petróleo de formación en el ensayo
PF o PV	Petróleo de formación o petróleo viscoso	Señal de petróleo de formación en toda la capa	Petróleo de formación (el porcentaje de agua es incierto)	Cualquier % de petróleo de formación presente en el ensayo	100 % agua de formación con o sin rastros de petróleo
AF + PF	Agua de formación y petróleo de formación	En general para capas de espesor considerable que muestran respuesta de ambos fluidos	Petróleo de formación (probable porcentaje de agua elevado)	Cualquier % de petróleo de formación presente en el ensayo	100 % agua de formación con o sin rastros de petróleo
SE	Sin entrada	Valor de porosidad asociada a fluidos móviles menor de 5 (límite utilizado)	No aporte de fluido o caudales muy bajos	No aporte de fluido o caudales muy bajos	Caudal considerable de cualquier tipo fluido
G	Gas de formación	Cruces de densidad-neutrón	Gas de formación	Gas de formación	Cualquier otro fluido o no aporte de fluido

Consideraciones a Tener en Cuenta para la Estimación del Porcentaje de Aciertos en la Prognosis de Fluidos

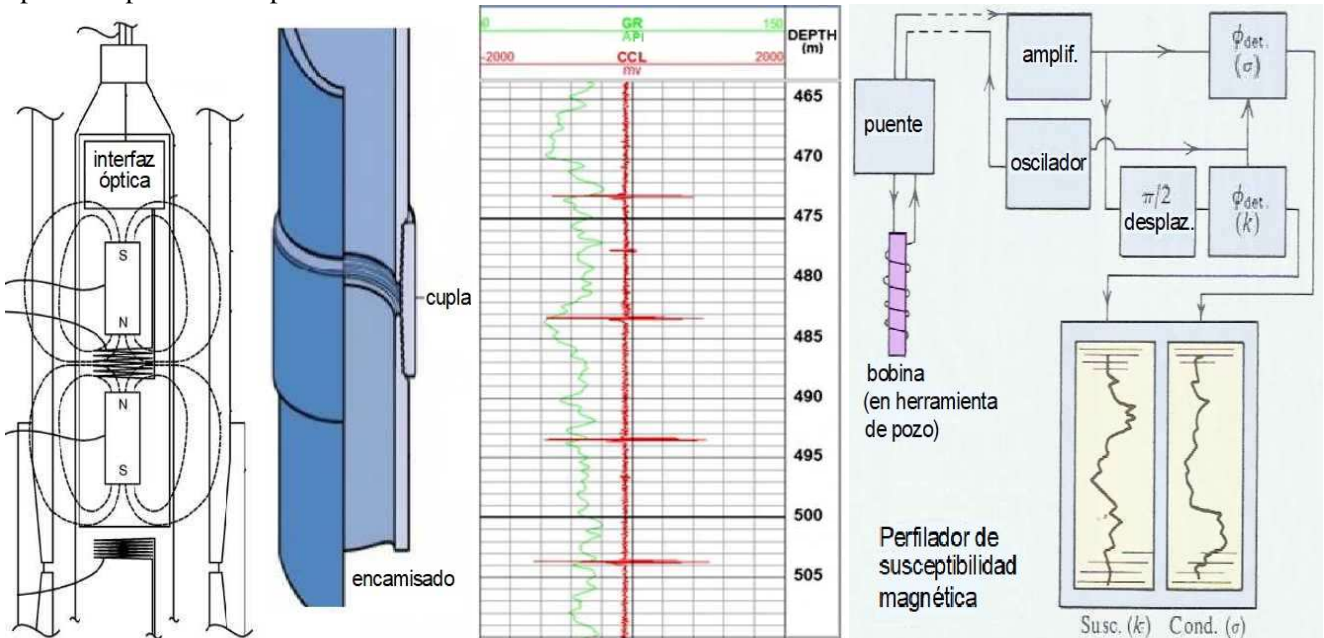
- La zona de lectura de la herramienta corresponde a la zona invadida (4 pulgadas de profundidad de investigación) lo cual torna imposible hacer cuantificaciones que permitan la estimación de porcentajes de fluidos en los ensayos.
- No se consideran los resultados de los ensayos en los siguientes casos:
 - Ensayos en conjunto que involucren capas con diferentes prognosis.
 - Bajos caudales obtenidos en los ensayos (por ejemplo, menos de 160 litros) de capas de alta calidad de reservorio (MBVM alto), en esos casos se infiere probable daño de formación y, de no ser estimuladas, no se las tiene en cuenta.
 - El resultado sin entrada en una capa con prognosis de fluido y en la cual la calidad de reservorio sugiera una estimulación no se considera en la estadística dado que un probable daño de formación podría ser la causa del resultado y sin estimulación **no** es posible conocer el fluido que se encuentra en el reservorio.
- En caso de capas estimuladas mediante fractura hidráulica se toma en consideración el resultado del ensayo post-fractura.

OTROS REGISTROS MAGNÉTICOS DE POZO

Muy utilizada es la herramienta cuentacuplas. Más raramente el perfil de susceptibilidad magnética.

- La **Herramienta Cuentacuplas** (CCL, casing collar locator, esquema a la izquierda) se corre a pozo entubado con el fin de identificar los ensambles o collares entre los caños del revestimiento o encamisado (casing), a partir de incrementos en la señal dados por un magnetómetro discriminador de flujo (fluxgate). Suele correrse junto al perfil radiométrico de rayos γ (ver perfil central) para tener una referencia adicional, resultando **útil para correlacionar perfiles obtenidos a pozo entubado o bien para servir de guía de las profundidades** en las operaciones de terminación.

Existen desarrollos modernos con 8 ó más flejes, cada uno con un sensor magnético, que permiten medir el espesor de la cañería (**magnetic casing thickness tool**) y determinar sectores con corrosión interna o externa a partir de la generación de imágenes tridimensionales. También el complemento de sistemas del calibre de pozo con múltiples dedos desplegados cada 15 ó menos grados de azimut y de nuevos algoritmos que permiten la mejor identificación de sectores de tubería anómala (véase por ejemplo Gava *et al.*, 2023, trabajo para pozos de Vaca Muerta en la cuenca Neuquina) generando la herramienta denominada ADL (**Anomaly Detection Tool**) que no está diseñada para detectar señal magnética pero complementa la herramienta cuentacuplas con el fin de prevenir problemas operativos.



Boceto de herramienta cuentacuplas –izq– y del revestimiento del pozo; luego perfil CCL registrado: GR es el de rayos γ (modific. de petro-pedia.com)

(modificado de Telford *et al.*, 1976)

- El **Perfil de Susceptibilidad Magnética** (figura de la derecha) permite definir el valor de k en los intervalos atravesados en un pozo y es **útil para correlacionar formaciones, contribuir a la identificación de capas de interés minero o petrolero y sobre todo para detección de rocas con minerales metalíferos**, aunque por sí solo no define el tipo de roca.

Está basado en un puente de inductancia y su funcionamiento (esquemático en la figura a la derecha) es como en su equivalente de laboratorio. El solenoide envuelve un núcleo que posee baja reluctancia magnética (en el circuito la reluctancia $R = longitud / \mu \cdot \text{área}$) y está conectado al puente: si éste está balanceado en un ambiente estéril luego se desbalanceará al atravesar formaciones de k y conductividad eléctrica (σ) anómalas –dado que k tiende a producir un voltaje en cuadratura ($\pi/2$) y σ un voltaje en fase–. Ambos efectos se grafican por separado para una más clara interpretación.



China, camión de perfilaje en boca de pozo (foto North Benz)

En esta convivencia de instrumental *vintage* y de última generación, la IA, si bien de enorme ayuda, todavía no es capaz de reemplazar la experiencia de un ingeniero, geofísico o geólogo en la toma de decisiones críticas para preservar la buena salud del pozo.

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿En qué se fundamentan los perfiles de resonancia magnética nuclear en pozo?
- ¿Qué indicadores provee esta metodología?
- ¿Cómo se realiza el proceso de inversión de datos?
- ¿Cómo es evaluado el potencial de un reservorio con RMN?
- ¿Cuál es el planteo en la identificación de gas?
- Definir T2 intrínseco.
- ¿Qué son los mapas de Difusión y cuál es su utilidad?
- ¿Qué aplicaciones tienen la herramienta *countup* y el perfil de susceptibilidad en pozo?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Acosta, N., 2008. Análisis de resonancia magnética nuclear para la caracterización de reservorios clásticos de ambiente continental, cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *Naturalia Patagónica*, V.4 N°1 (p 23-36).
- Acosta, N., Romero, P., Magenta, G., Potas, G., Cabrera, C., Coccia, C., Di Benedetto, L. & Ferreira, L., 2007. Methodology for characterization of a clastic reservoir based on correlations between electrofacies, NMR and image logs. A case study from the Golfo San Jorge Basin (6 p). 10° Congreso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica.
- Broding, R., Zimmerman, C., Somers, E., Wilhelm, E. & Stripling, A., 1952. Magnetic well logging. *Geophysics*, V.17 (p 1-26).
- Cerdá, M., Quintavalla, C. & Salas, V., 2013. Evaluación de integridad de cañerías en pozos de la cuenca Golfo San Jorge. *Petrotecnia*, N°8 (p 56-66).
- Chen, S., Edwards, C. & Thern, H., 1998. Advances in NMR log processing and interpretation. Paper L, 4th well logging symposium of Japan: Society of Professional Well Log Analysts, Japan Chapter (8 p).
- Colo, C., Salvay, R., D'Onofrio, M. & Demuro, D., 1997. Importancia de la litología en el uso de la resonancia magnética. *Boletín de Informaciones Petroleras*, N°52 (p 29-37).
- Connell, M., Howard, R., Glennon, C., & Ligertwood, J., 2000. High-pressure/high-temperature coiled tubing casing collar locator provides accurate depth control for single-trip perforating. *SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable* (8 p).
- Diaz, D., Breda, E., Minetto, C. & Chen, S., 1999. Use of NMR logging for formation damage prevention: water-flooding case study in Cañadón Seco, San Jorge Basin. *SPE Annual Technical Conference, Reservoir Engineering, Part 1* (p 79-90).
- Domínguez, H., Saavedra, B., Corbelleri, A. & Sliwinsky, L., 2005. Uso de resonancia magnética nuclear para la caracterización de reservorios y fluidos en yacimientos de la cuenca del Golfo San Jorge, Patagonia, Argentina. *VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, V.1 (p 59-71).
- Ellis, D. & Singer, J., 2007. *Well logging for Earth scientists* (p 415-478). Springer.
- Gava, L., Goñi, L., Nachef, P. & Bonapace, J., 2023. Anomaly detector tool - Integrating traditional casing collar locator with innovative algorithm for early casing anomaly identification. *SPE/AAPG/SEG Latin America Unconventional Resources Technology Conference*, V.1 (p 478-487).
- Halliburton, 2000. *NMR logging, principles and applications* (253 p).
- Romero, P., Acosta, N. & Serrano, H., 2010. New NMR-based methodology for inferring the presence of movable heavy oil in reservoir layers (10 p). *Search and Discovery Articles*, N°40519.

- 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 800-802). Cambridge University Press.
- Western Atlas, 1996. Nuclear magnetic resonance terminology glossary (26 p).

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