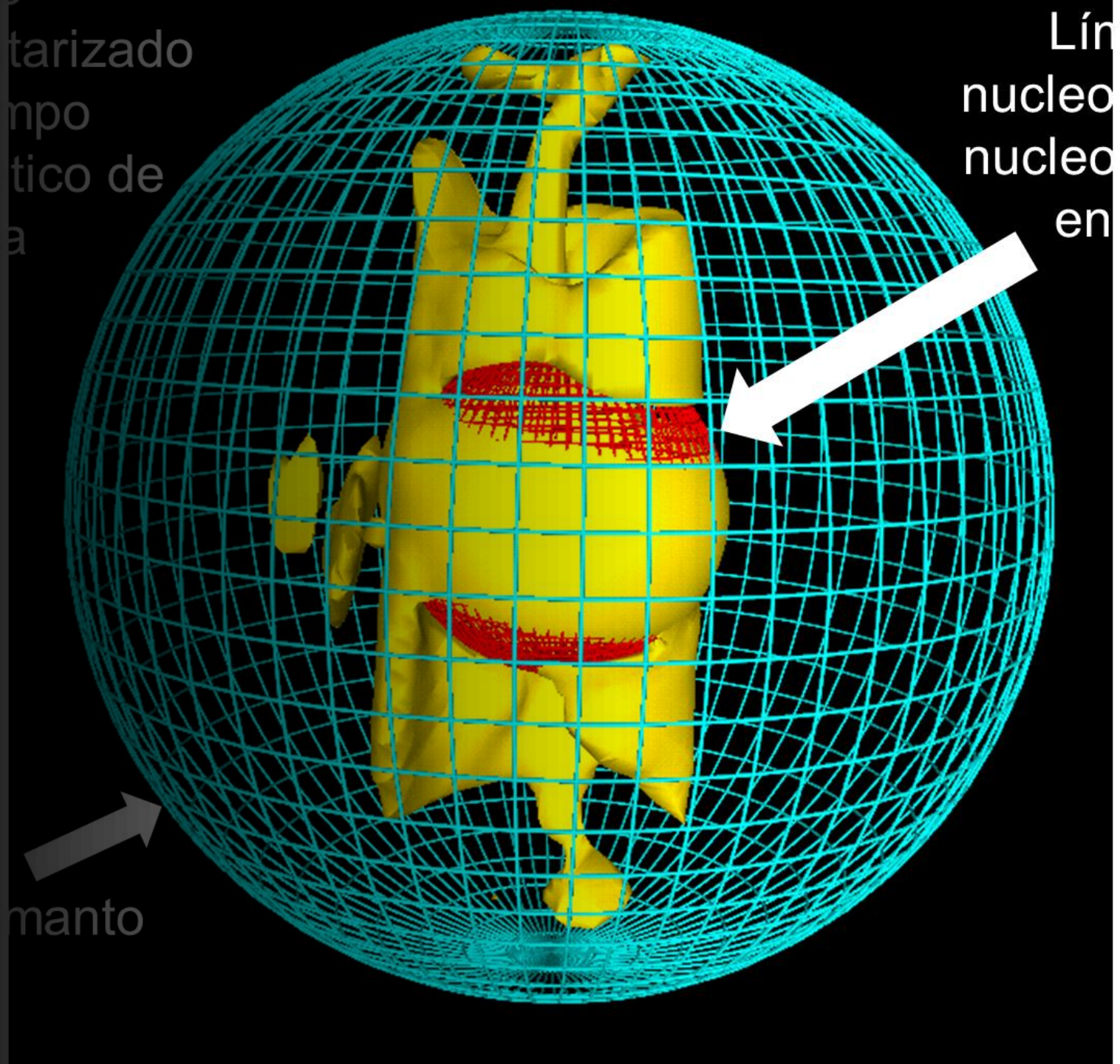
Prospección Magnetómetrica

Catedra de GEOFISICA

2024

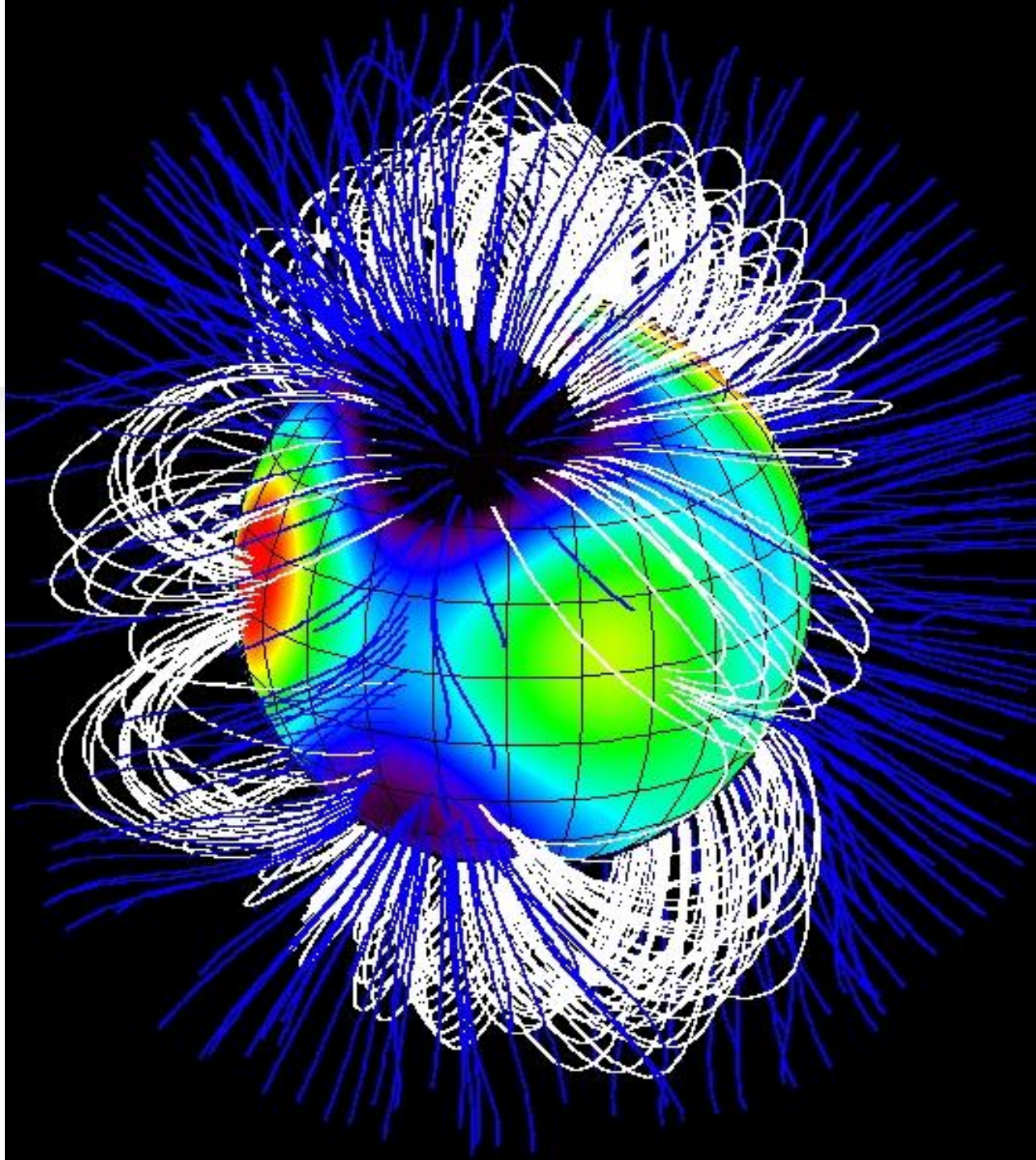


Campo y potencial geomagnético.

El campo geomagnético es el campo magnético que se extiende desde el núcleo interno de la Tierra hasta el espacio, donde interactúa con el viento solar. Este campo es generado principalmente por el movimiento de aleaciones de hierro fundido en el núcleo externo del planeta, un proceso conocido como la geo-dínamo.

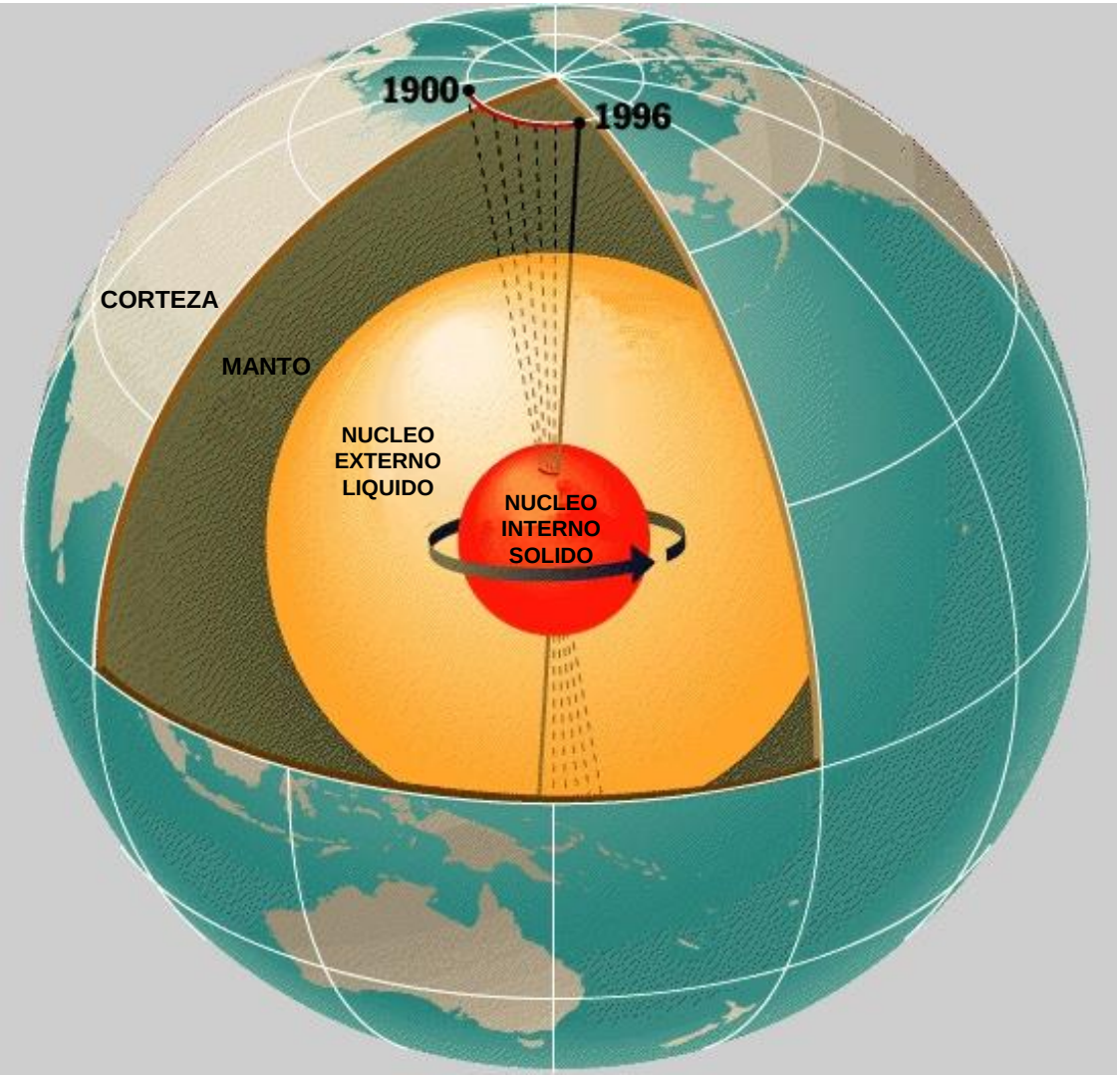
El campo geomagnético tiene dos componentes principales:

- **Interno:** Generado por el núcleo terrestre, responsable de más del 90% del campo observado. Este componente se asemeja al producido por un dipolo magnético situado en el centro de la Tierra.
- **Externo:** Proviene principalmente de la actividad solar y afecta la ionosfera y la magnetosfera. Este componente presenta variaciones periódicas, como la variación diaria y las tormentas magnéticas.



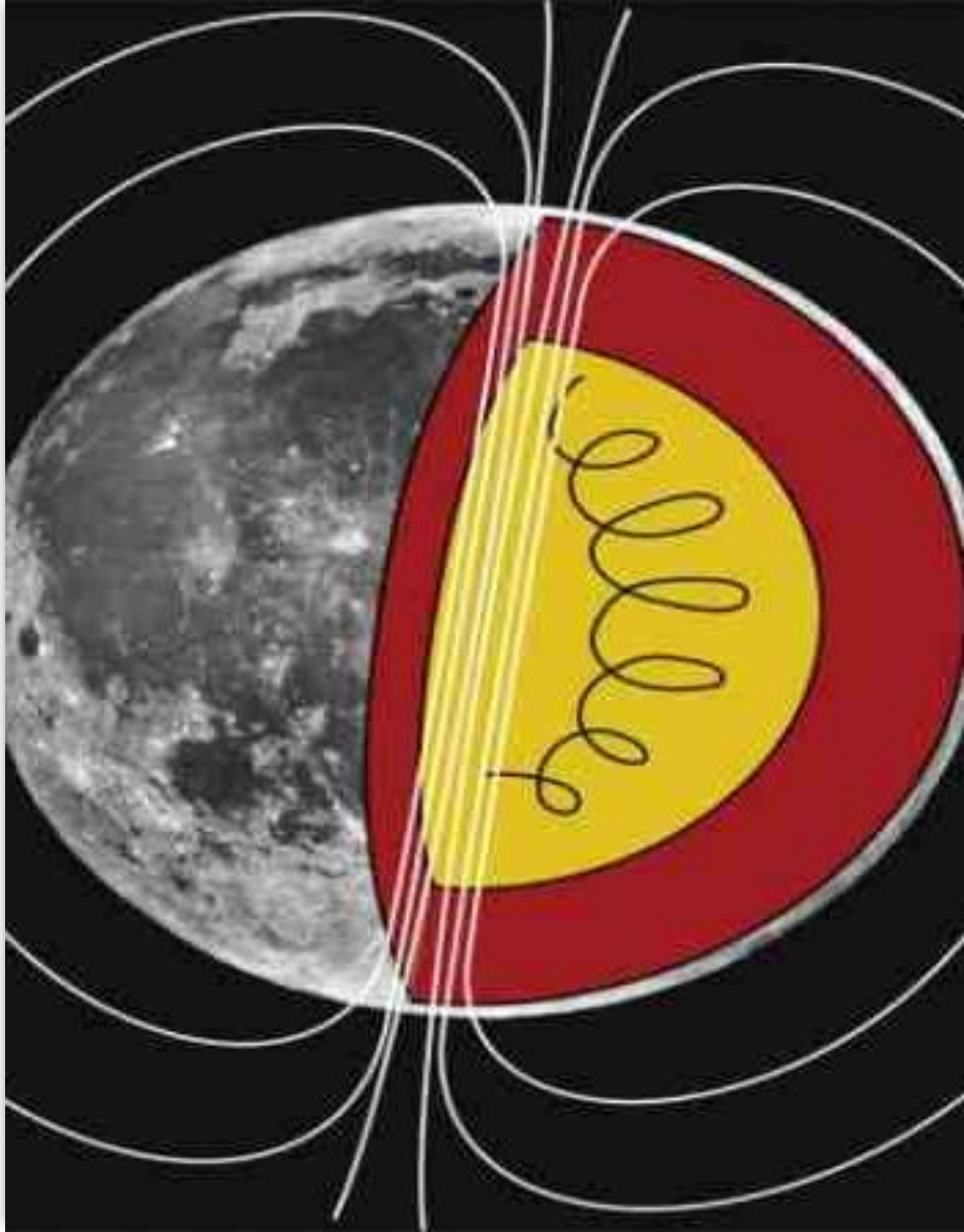
Importancia y Aplicaciones

El campo geomagnético es crucial para la navegación, ya que permite que las brújulas funcionen correctamente. Además, protege a la Tierra de las partículas cargadas del viento solar, que podrían destruir la atmósfera externa y la capa de ozono. En el ámbito de la geología y la minería, las anomalías magnéticas pueden ser utilizadas para detectar menas de minerales valiosos



Origen del Campo Interno

El campo geomagnético interno se origina en el núcleo externo de la Tierra, compuesto principalmente de hierro y níquel en estado líquido. Este núcleo externo está en constante movimiento debido a la rotación de la Tierra y las corrientes de convección causadas por el calor que se libera del núcleo interno sólido. Este movimiento genera corrientes eléctricas, que a su vez producen el campo magnético a través de un proceso conocido como la geo-dínamo.

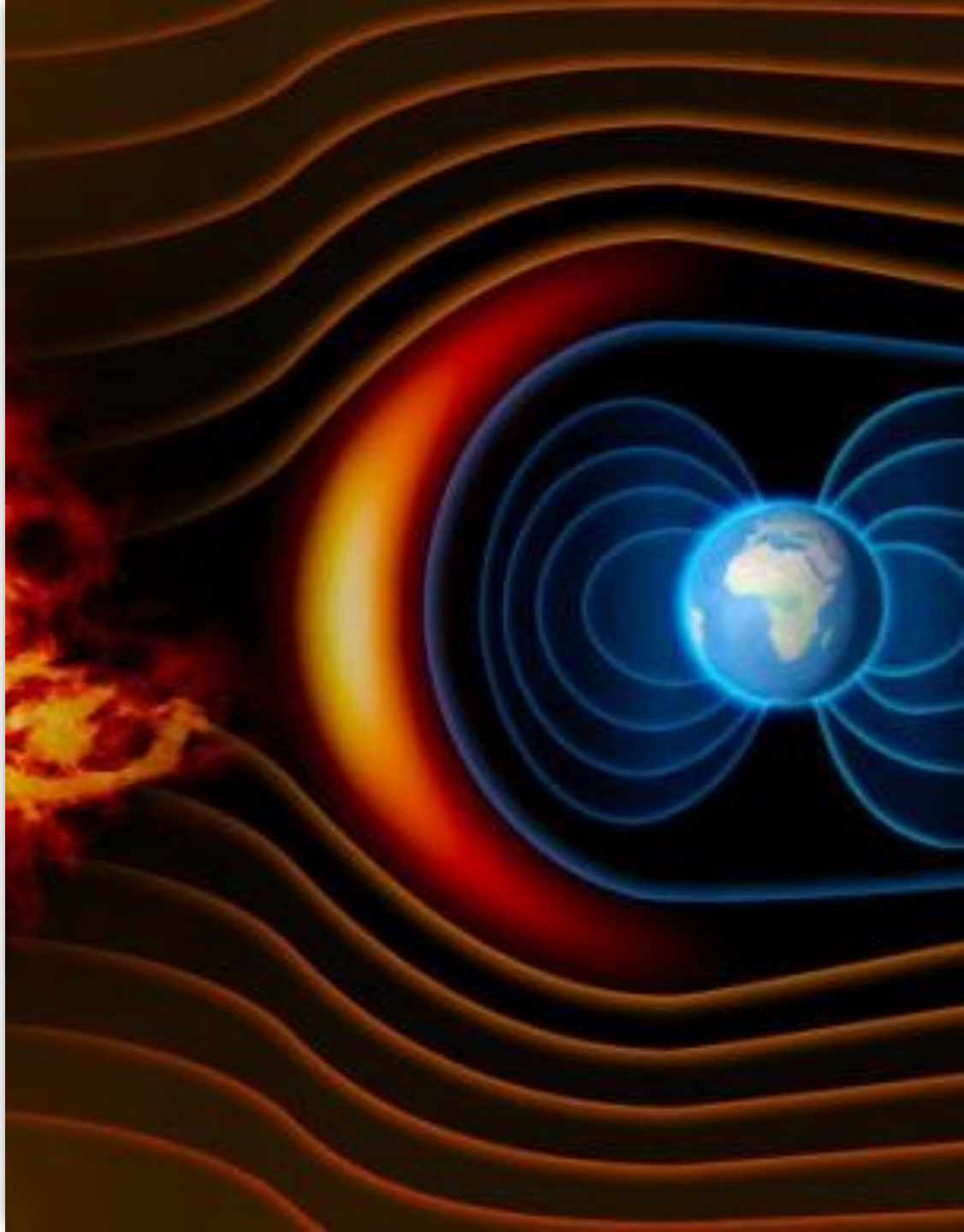


Origen del Campo Externo

El campo geomagnético externo se origina fuera de la Tierra y está influenciado principalmente por la actividad solar. Este campo se forma en la magnetosfera, una región del espacio dominada por el campo magnético terrestre que actúa como un escudo contra el viento solar. Las variaciones en el campo externo son causadas por:

- Viento Solar: Un flujo de partículas cargadas (principalmente protones y electrones) emitidas por el Sol. Cuando estas partículas interactúan con la magnetosfera, generan corrientes eléctricas que modifican el campo magnético externo.

- Tormentas Geomagnéticas: Eventos temporales causados por explosiones solares o eyecciones de masa coronal que aumentan significativamente la cantidad de partículas cargadas que alcanzan la Tierra, alterando el campo magnético externo

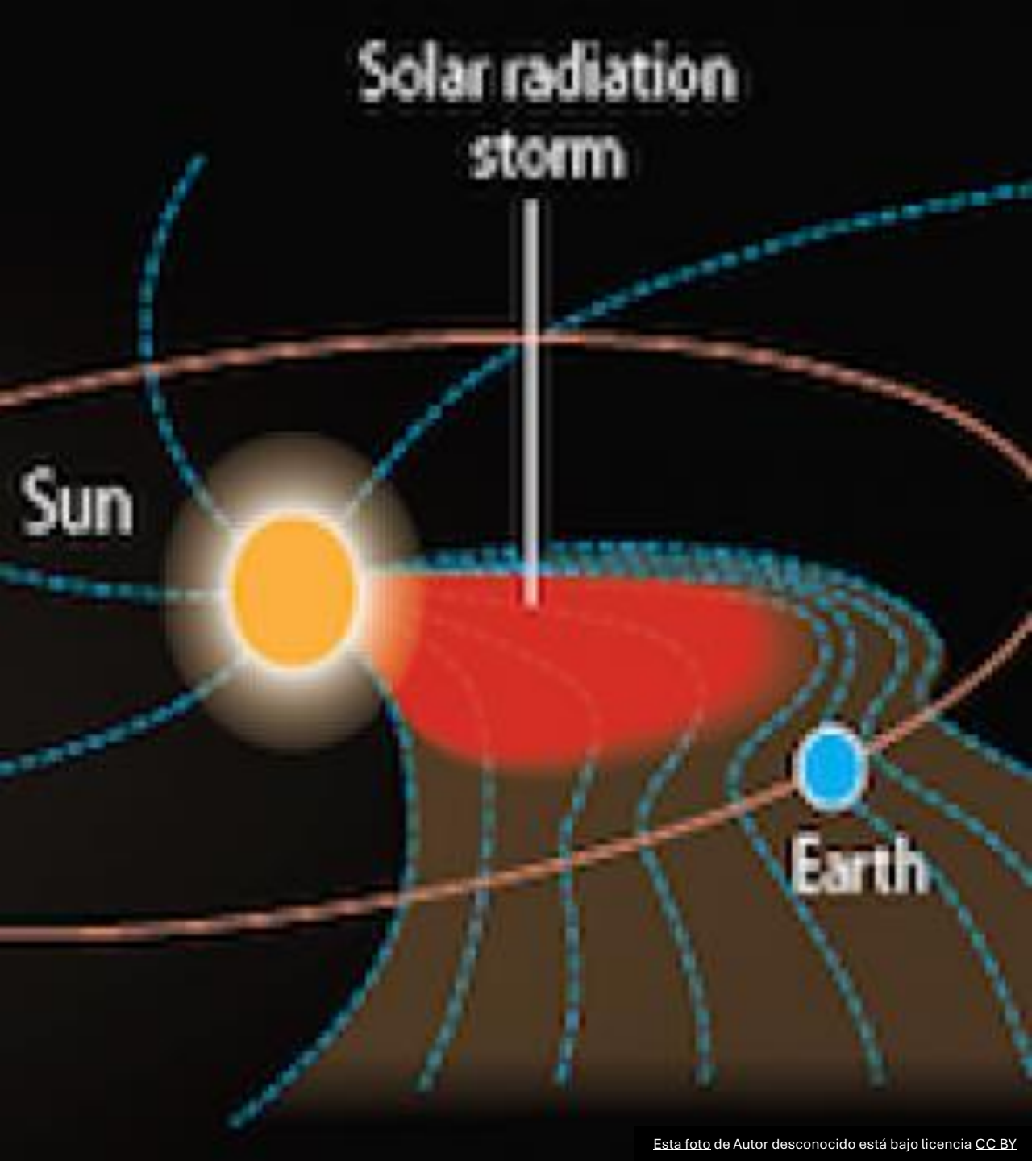


Variaciones temporales geomagneticas

Las variaciones temporales del campo geomagnético pueden ser clasificadas en varias escalas de tiempo, desde cambios rápidos que ocurren en segundos hasta variaciones que se extienden por millones de años.

Variaciones a Corto Plazo

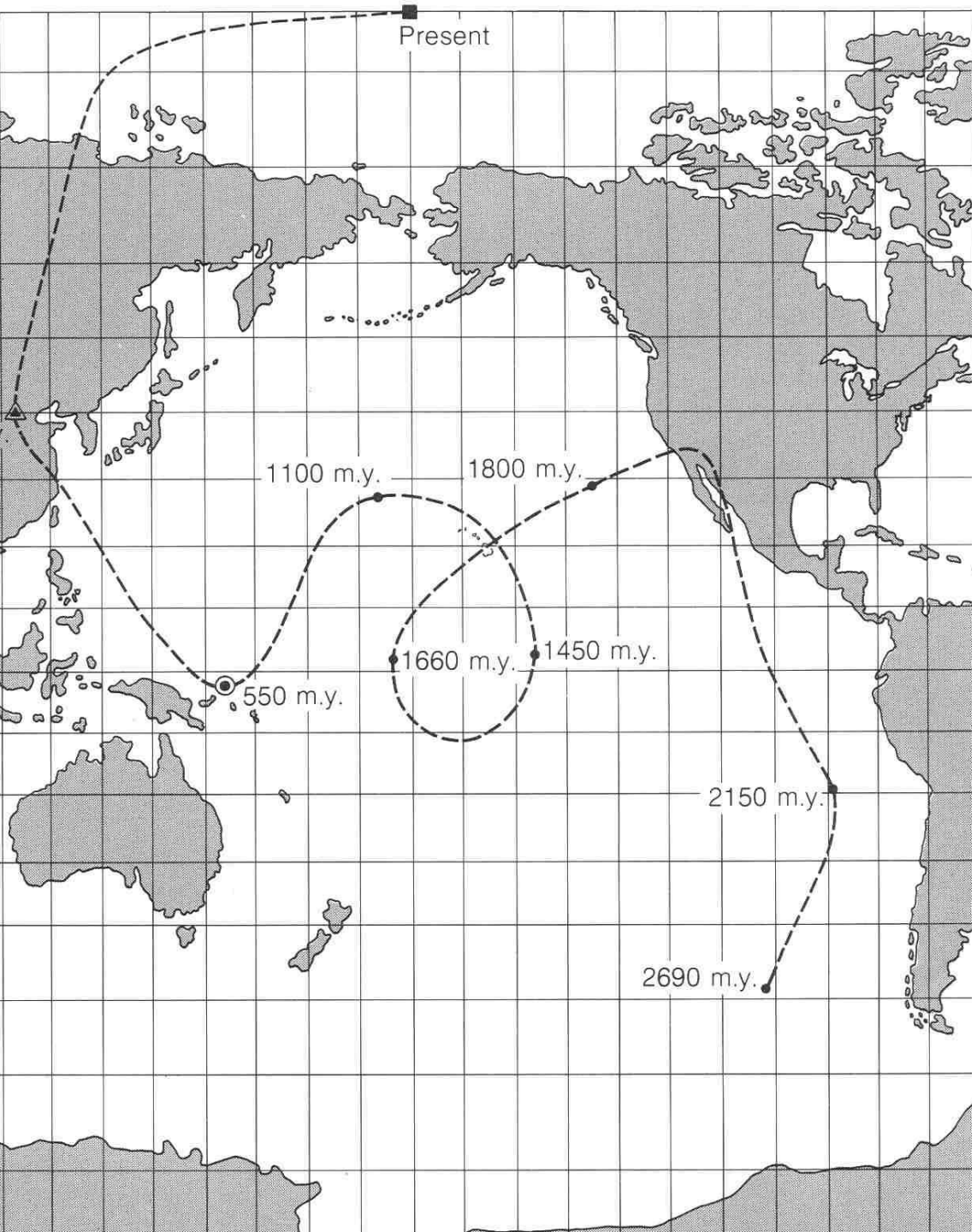
- Variación Diurna: Causada por la interacción del campo magnético terrestre con el viento solar, presenta un ciclo de 24 horas.
- Tormentas Geomagnéticas: Eventos temporales intensos causados por explosiones solares o eyecciones de masa coronal que pueden durar desde horas hasta varios días.
- Pulsaciones Magnéticas: Oscilaciones rápidas en el campo magnético que pueden ocurrir en segundos o minutos



Esta foto de Autor desconocido está bajo licencia CC BY

Variaciones a Mediano Plazo

- Variación Secular: Cambios lentos y continuos en el campo magnético que ocurren en escalas de tiempo de años a siglos. Estos cambios reflejan principalmente procesos en el núcleo externo de la Tierra.
- Jerks Geomagnéticos: Cambios abruptos en la variación secular que ocurren en escalas de tiempo de años



Variaciones a Largo Plazo

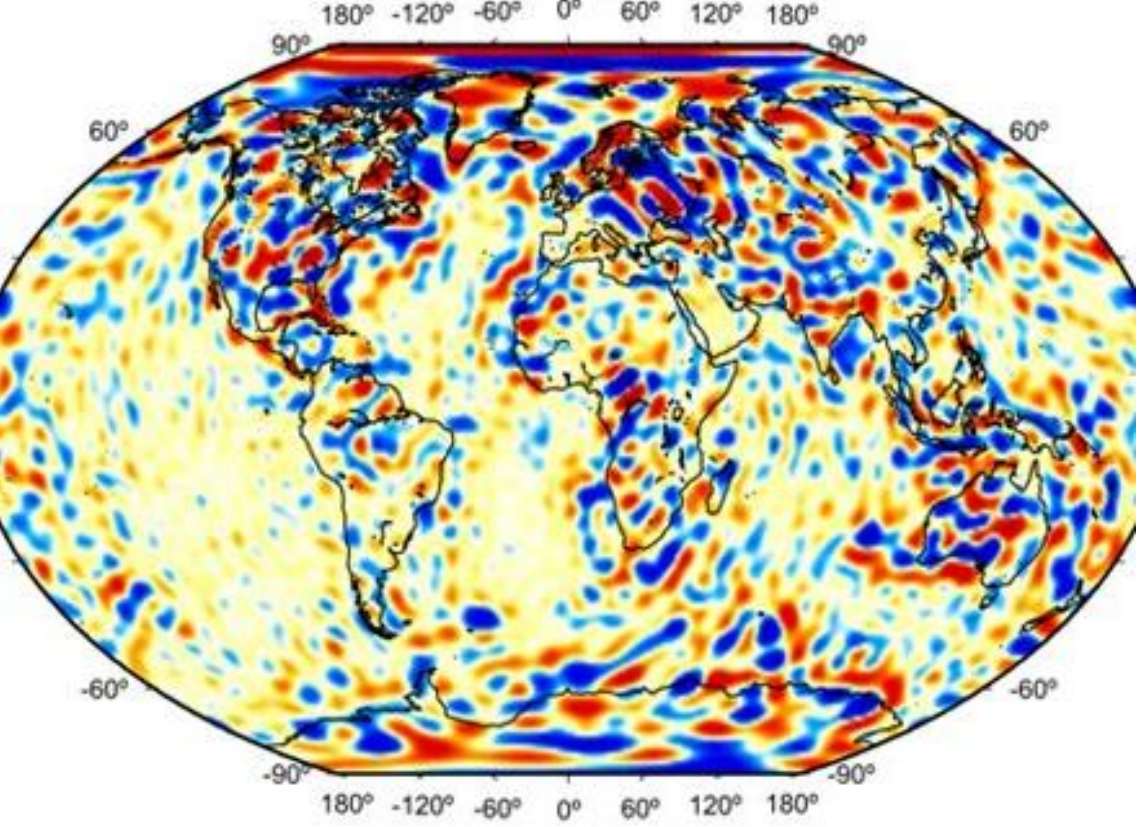
- Transiciones de Polaridad: Cambios en la dirección del campo magnético terrestre que ocurren en escalas de tiempo de miles a millones de años. Durante estas transiciones, el campo magnético puede debilitarse significativamente antes de invertir su polaridad.
- Anomalías Magnéticas Regionales: Variaciones locales del campo magnético que pueden persistir durante miles de años, como la Anomalía del Atlántico Sur.

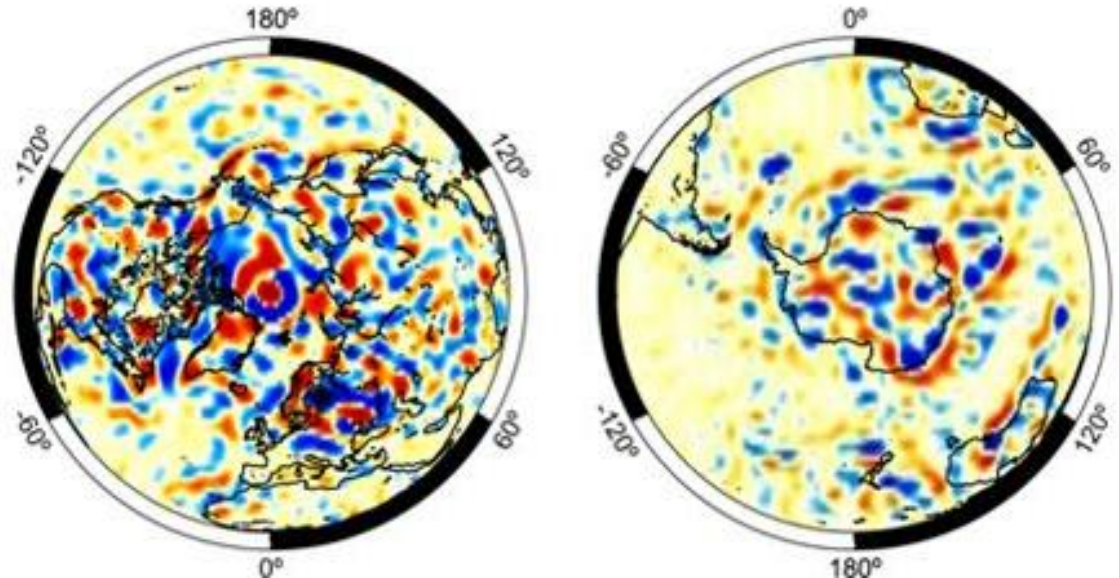
Propiedades magnéticas de las rocas y minerales

Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad magnética mide la capacidad de un material para magnetizarse en presencia de un campo magnético externo. Las rocas y minerales pueden clasificarse en tres categorías principales según su susceptibilidad:

- Diamagnéticos: Materiales que tienen una susceptibilidad negativa y son repelidos por un campo magnético. Ejemplos incluyen el cuarzo y la calcita.
- Paramagnéticos: Materiales con una susceptibilidad positiva pero baja, que se magnetizan débilmente en presencia de un campo magnético. Ejemplos incluyen la biotita y la olivina.
- Ferromagnéticos y Ferrimagnéticos: Materiales con una alta susceptibilidad magnética que pueden retener una magnetización remanente. Ejemplos incluyen la magnetita y la pirrotita1



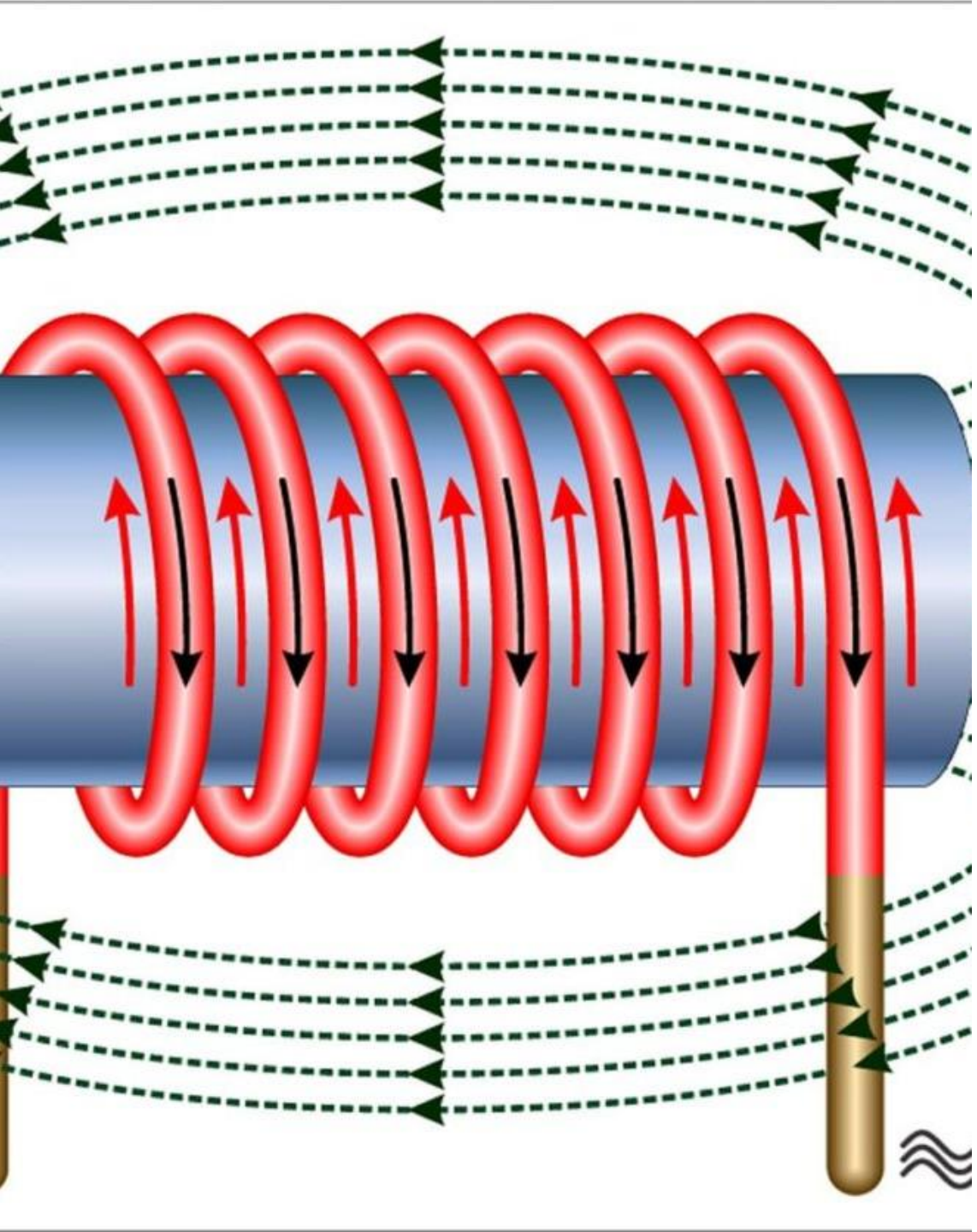


Remanencia Magnética

La remanencia magnética es la capacidad de un material para retener una magnetización después de que el campo magnético externo ha sido removido. Esta propiedad es crucial para el estudio del paleomagnetismo y la interpretación de anomalías magnéticas en la exploración geofísica

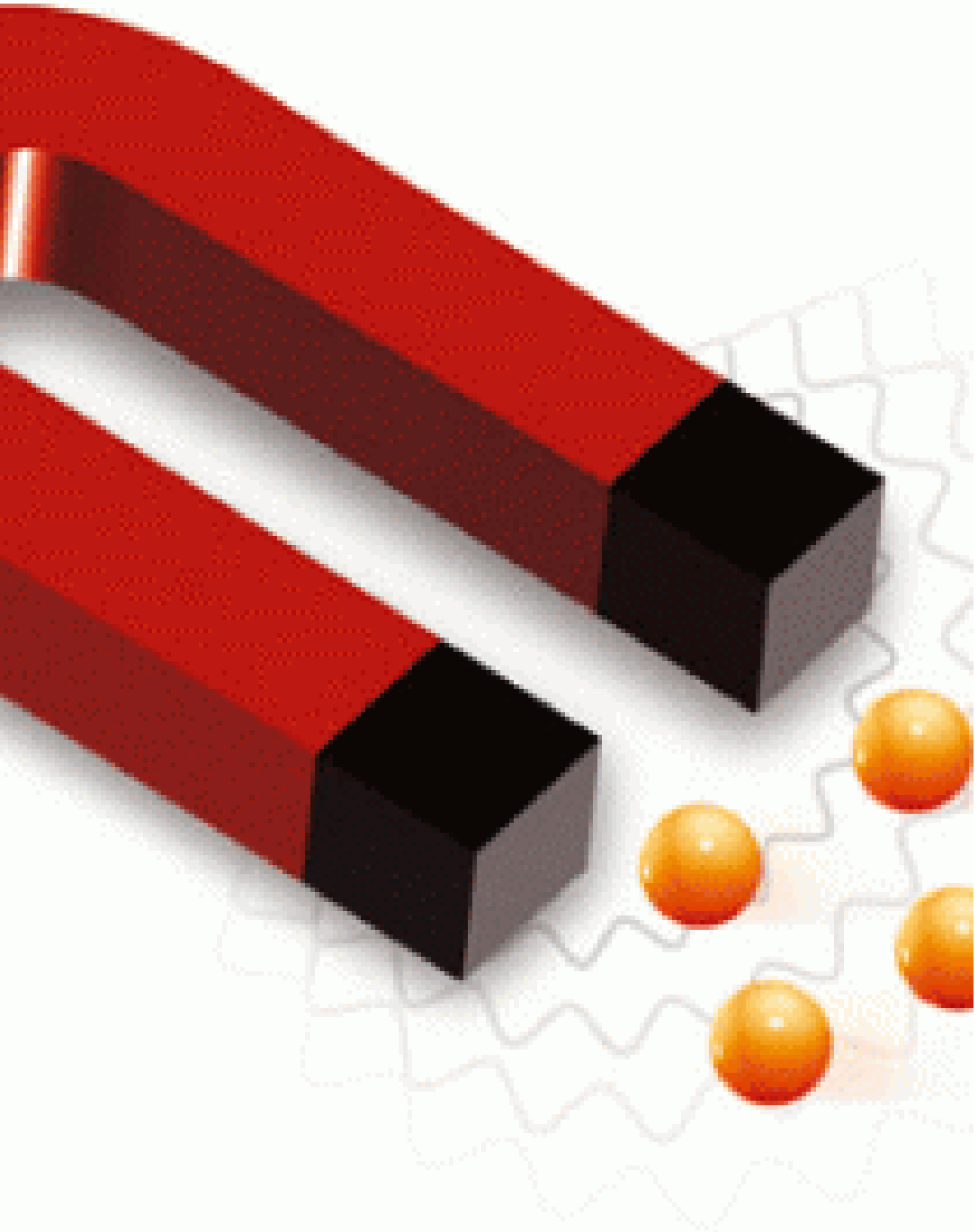
Minerales Magnéticos Comunes

- Magnetita (Fe_3O_4): Es el mineral magnético más común y tiene una alta susceptibilidad magnética y una temperatura de Curie de aproximadamente 578°C.
- Pirrotita ($Fe_{1-x}S$): Tiene una susceptibilidad magnética variable dependiendo de su composición y es común en depósitos de sulfuros.
- Hematita (Fe_2O_3): Aunque es antiferromagnética y no produce anomalías magnéticas significativas, puede ser importante en ciertos contextos geológicos.



Magnetización Inducida

La magnetización inducida ocurre cuando un material es expuesto a un campo magnético externo. Este campo provoca que los momentos magnéticos de los átomos o moléculas dentro del material se alineen en la dirección del campo aplicado. La magnetización inducida es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético externo y desaparece cuando el campo es removido



Magnetización Remanente

La magnetización remanente es la magnetización que persiste en un material después de que el campo magnético externo ha sido retirado. Esta propiedad es crucial en el estudio del paleomagnetismo y en la interpretación de datos geofísicos, ya que proporciona información sobre la historia del campo magnético terrestre y la composición de las rocas

Diferencias Clave

Duración:

- Inducida: Solo persiste mientras el campo magnético externo está presente.
- Remanente: Persiste incluso después de que el campo magnético externo ha sido removido.

Aplicaciones:

- Inducida: Utilizada en aplicaciones temporales como electroimanes.
- Remanente: Importante en el estudio del paleomagnetismo y en la identificación de depósitos minerales.

Minerales Magnéticos Comunes

Magnetita (Fe_3O_4):

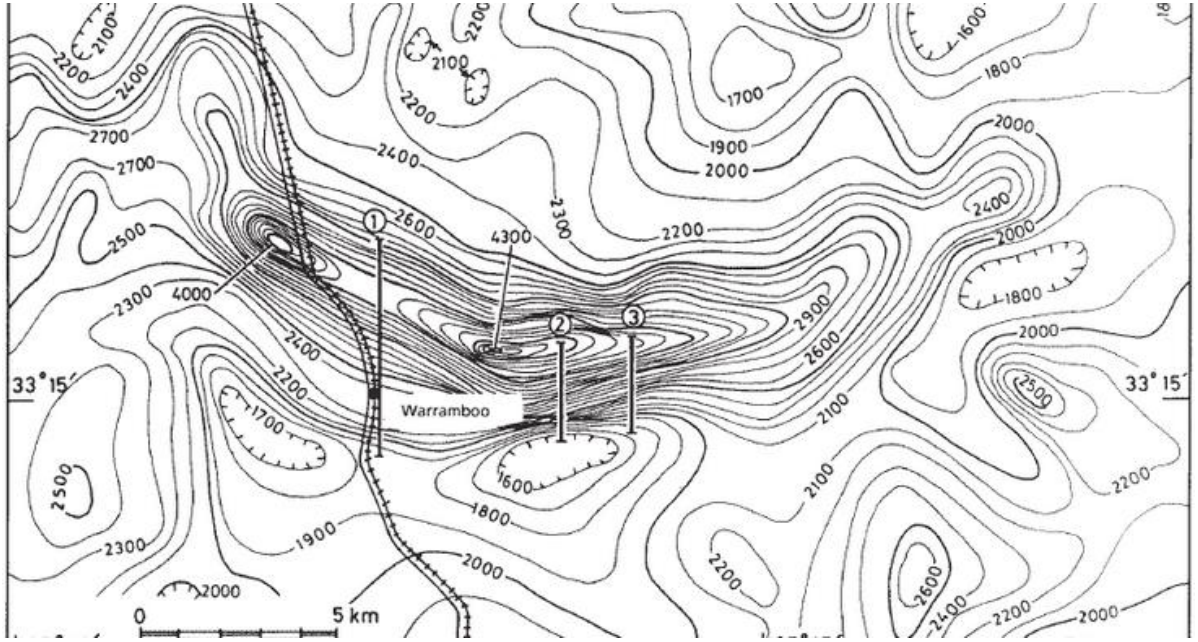
- Propiedades: Alta susceptibilidad magnética y temperatura de Curie de aproximadamente 578°C.
- Importancia: Es el mineral magnético más común en las rocas.

Pirrotita ($Fe_{1-x}S$):

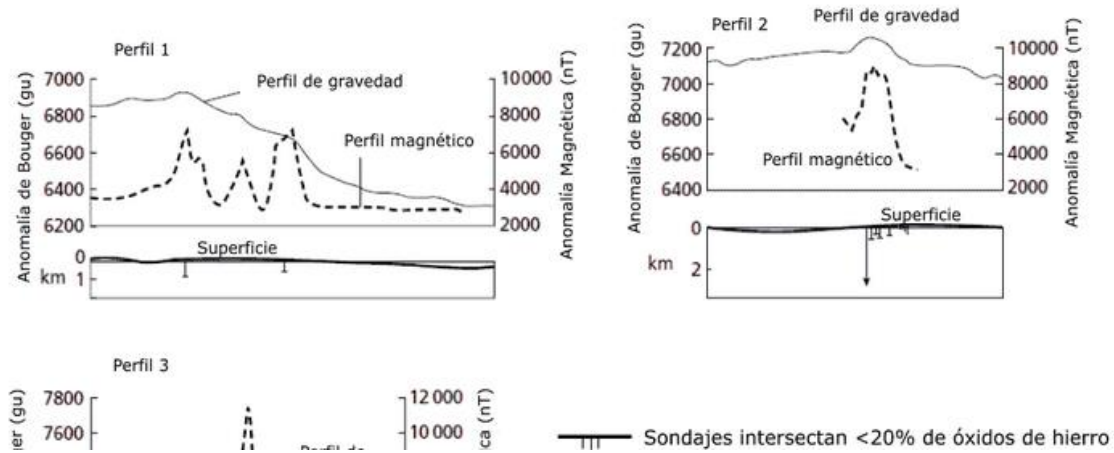
- Propiedades: Susceptibilidad magnética variable dependiendo de su composición.
- Importancia: Común en depósitos de sulfuros.

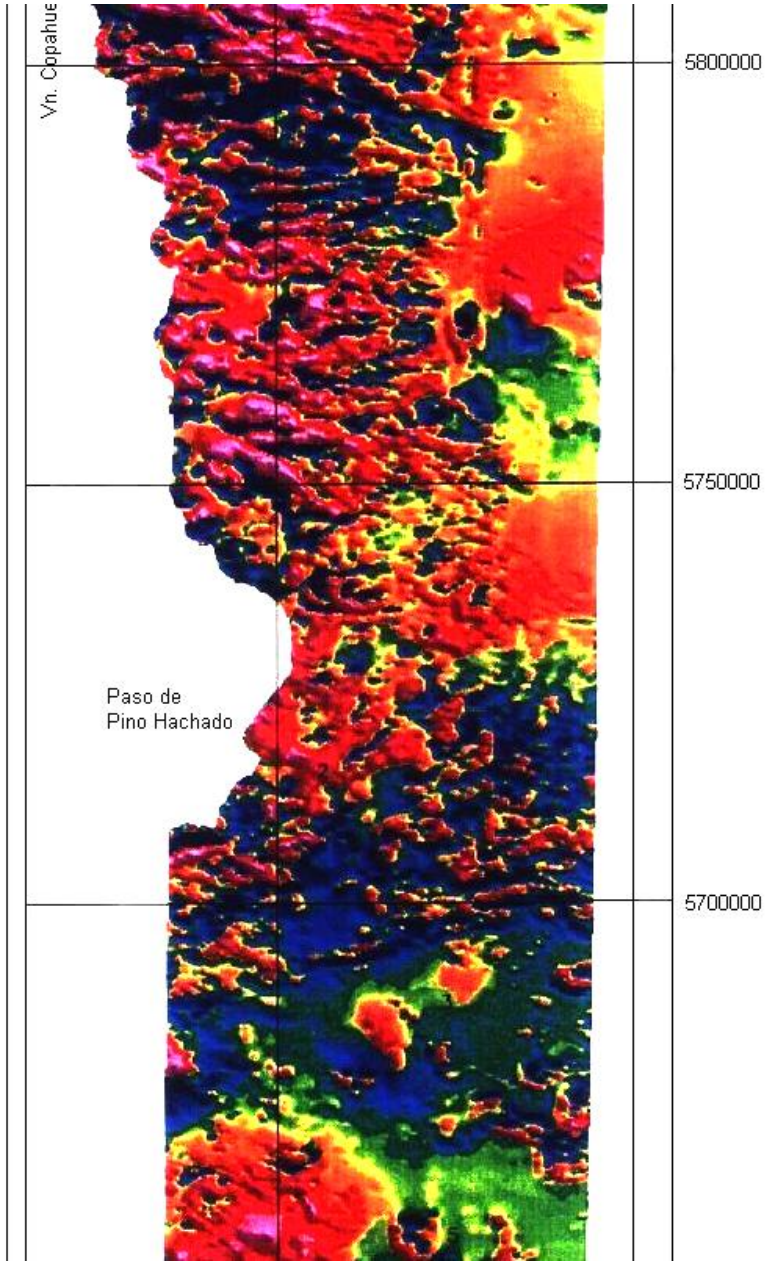
Hematita (Fe_2O_3):

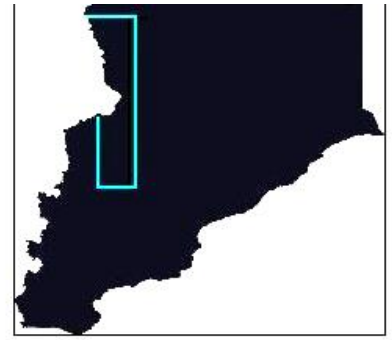
- Propiedades: Antiferromagnética y no produce anomalías magnéticas significativas.
- Importancia: Puede ser relevante en ciertos contextos geológicos



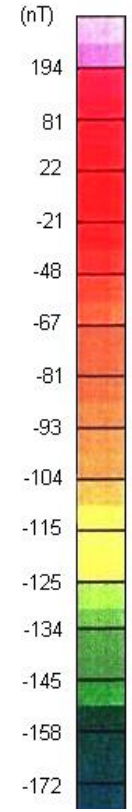
Perfiles de gravedad y perfiles magnéticos sobre una parte de la península de Eyre (Sur de Australia)

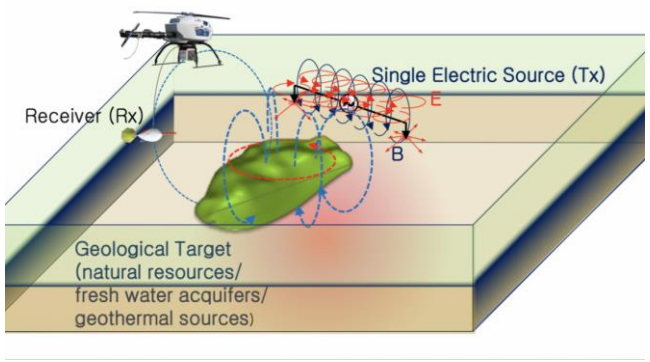






Ubicación de la región

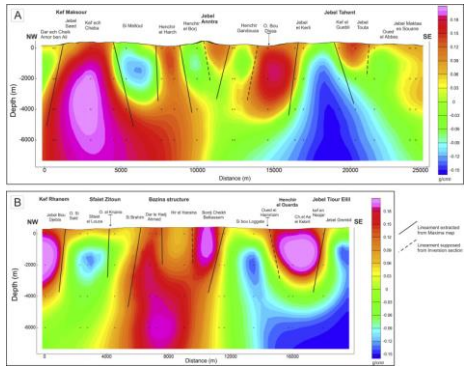


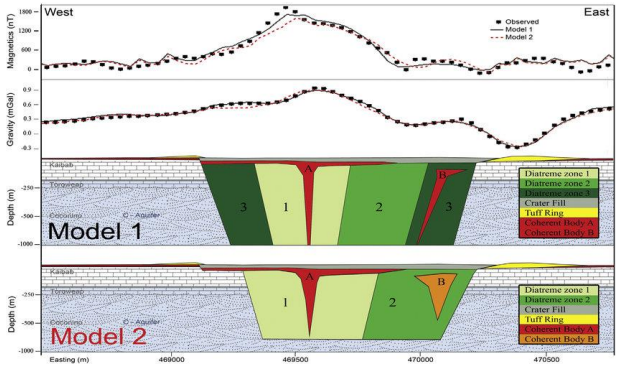


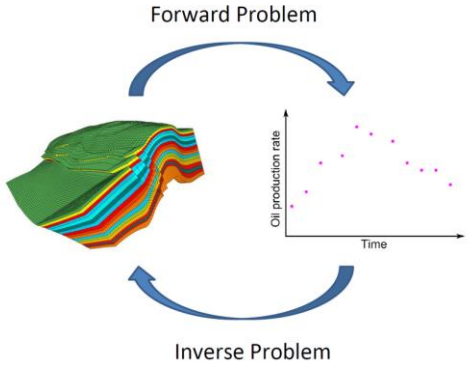
Rock	Dry density (g/cm^3)	Porosity (%)	Schmidt Hardness	Cerchar Abrasivity index	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)	Coefficient of permeability (m/s)
Igneous							
Granite	2.53-2.62	1.02-2.87	54-69	4.5-5.3	4500-6500	3500-3800	10^{-14}-10^{-12}
Diorite	2.80-3.00	0.10-0.50		4.2-5.0	4500-6700		10^{-14}-10^{-12}
Gabbro	2.72-3.00	1.00-3.57		3.7-4.6	4500-7000		10^{-14}-10^{-12}
Rhyolite	2.40-2.60	0.40-4.00					10^{-14}-10^{-12}
Andesite	2.50-2.80	0.20-8.00	67	2.7-3.8	4500-6500		10^{-14}-10^{-12}
Basalt	2.21-2.77	0.22-22.1	61	2.0-3.5	5000-7000	3660-3700	10^{-14}-10^{-12}
Sedimentaary							
Condlomerate	2.47-2.76			1.5-3.8			10^{-10}-10^{-8}
Sandstone	1.91-2.58	1.62-26.4	10-37	1.5-4.2	1500-4600		10^{-10}-10^{-8}
Shale	2.00-2.40	20.0-50.0		0.6-1.8	2000-4600		
Mudstone	1.82-2.72		27				10^{-11}-10^{-9}
Dolomite	2.20-2.70	0.20-4.00			5500		10^{-12}-10^{-11}
Limestone	2.67-2.72	0.27-4.10	35-51	1.0-2.5	3500-6500		10^{-13}-10^{-10}

LA GEOFISICA PURA

- La física de las rocas
- La observación físicas de las rocas
- Estimulación física
- La observación directa e indirecta
- La teoría geofísica



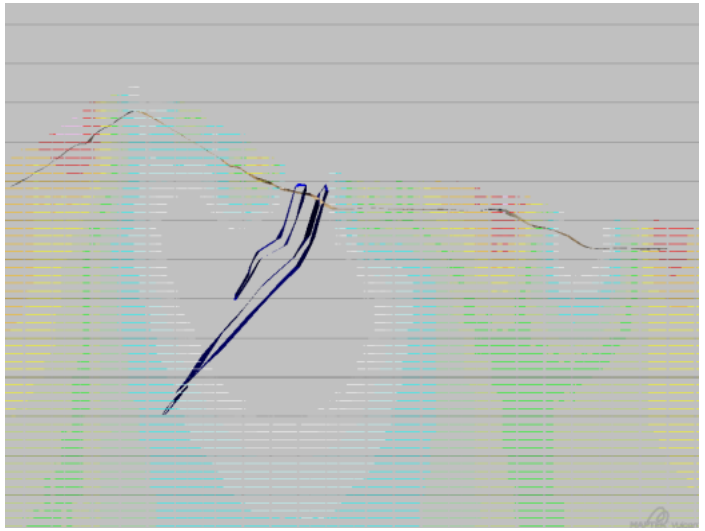


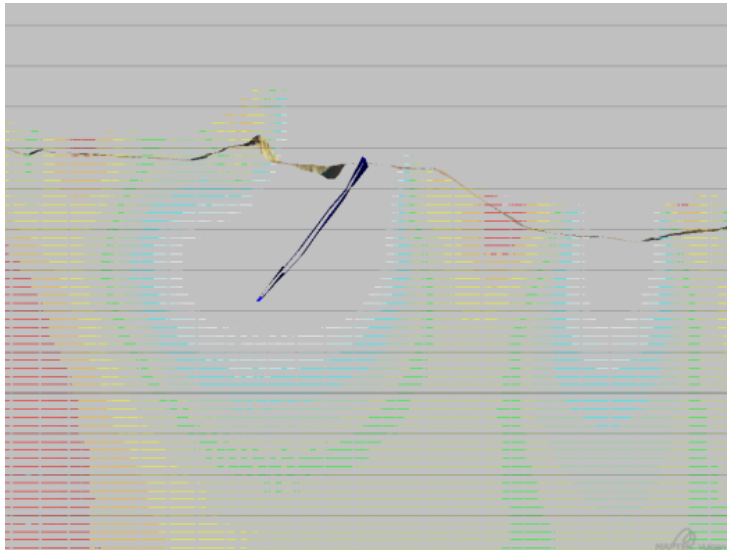


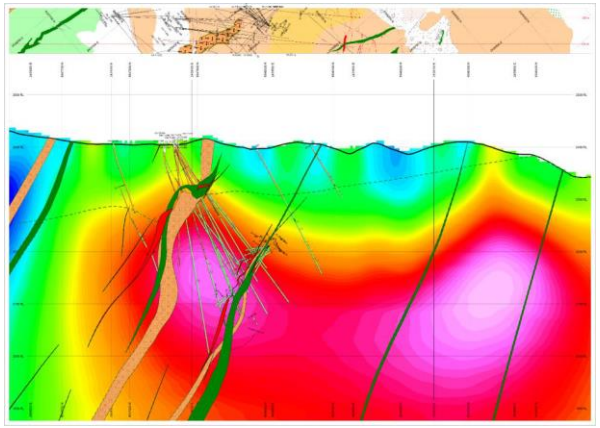
LOS MODELOS INVERSOS

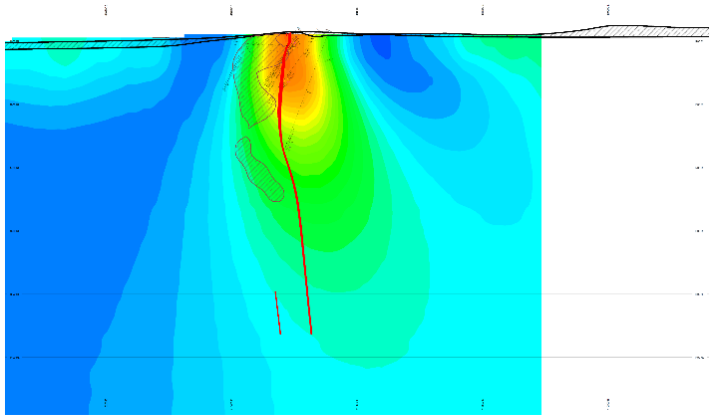
- Los modelos directos
- Los modelos indirectos
- Resolver el problema inverso:
  - Plantear el modelo
  - Encontrar los parámetros del modelo
- Por que la geofísica se basa en modelos?
- Los resultados geofísicos son siempre modelos ?

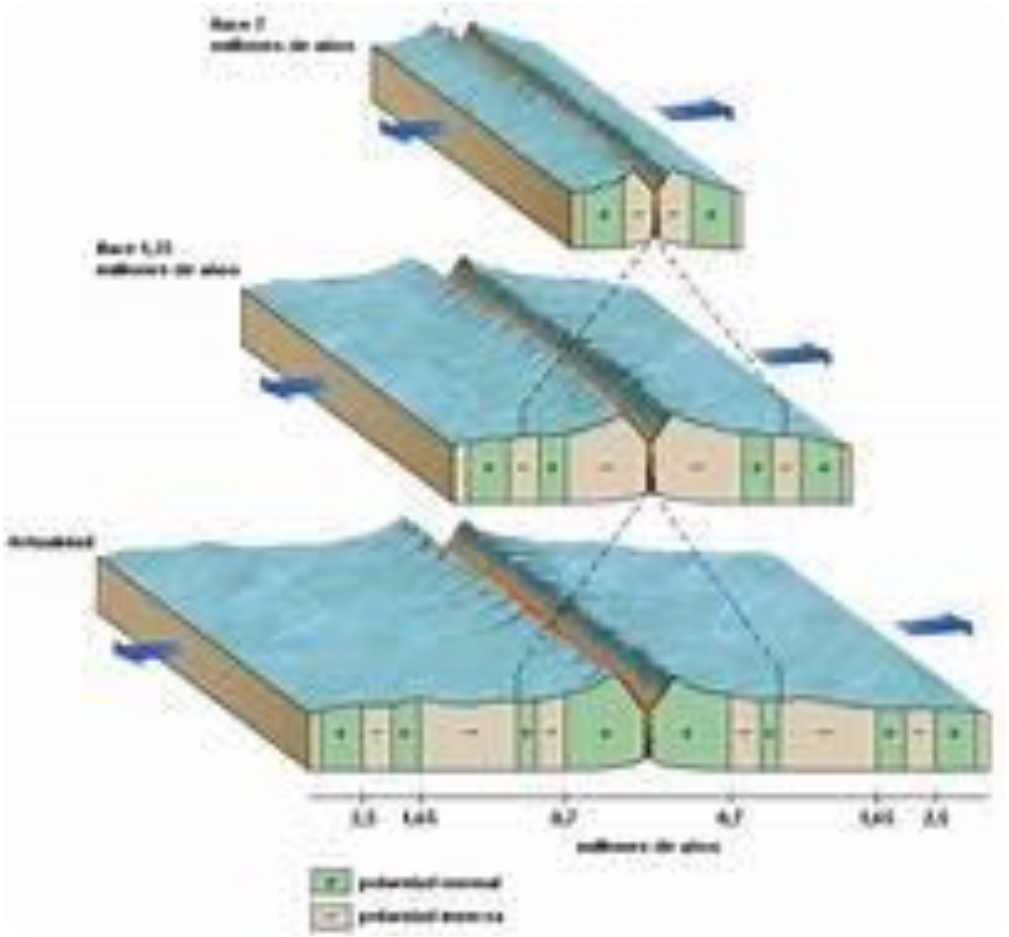
MODELOS Y REALIDAD











Paleomagnetismo

El paleomagnetismo es una disciplina dentro de la geofísica que estudia el campo magnético de la Tierra en el pasado, registrado en rocas, sedimentos y materiales arqueológicos. Este campo de estudio ha permitido comprender mejor la historia geológica de nuestro planeta, incluyendo el movimiento de las placas tectónicas y las inversiones del campo magnético terrestre.

Uno de los aspectos más fascinantes del paleomagnetismo es cómo los minerales magnéticos en las rocas pueden retener la dirección del campo magnético en el momento de su formación. Esto se debe a procesos como la **termorremanencia**, donde los minerales se magnetizan al enfriarse por debajo de su temperatura de bloqueo. Estos registros magnéticos han sido cruciales para desarrollar teorías como la deriva continental y la expansión del fondo oceánico.

Declinación magnética

La declinación magnética es el ángulo entre el norte verdadero (geográfico) y el norte magnético, que es la dirección que señala una brújula. Este ángulo varía dependiendo de la ubicación geográfica y cambia con el tiempo debido a las variaciones en el campo magnético terrestre.

Factores que Afectan la Declinación Magnética

- **Ubicación Geográfica**: La declinación puede variar significativamente de un lugar a otro. Por ejemplo, en algunas regiones puede ser positiva (norte magnético al este del norte verdadero) y en otras negativa (norte magnético al oeste del norte verdadero).
- **Variaciones Temporales**: La declinación cambia con el tiempo debido a las variaciones seculares del campo magnético terrestre. Estas variaciones pueden ser de varios grados por siglo.
- **Anomalías Locales**: Depósitos de minerales magnéticos como la magnetita pueden causar variaciones locales en la declinación.

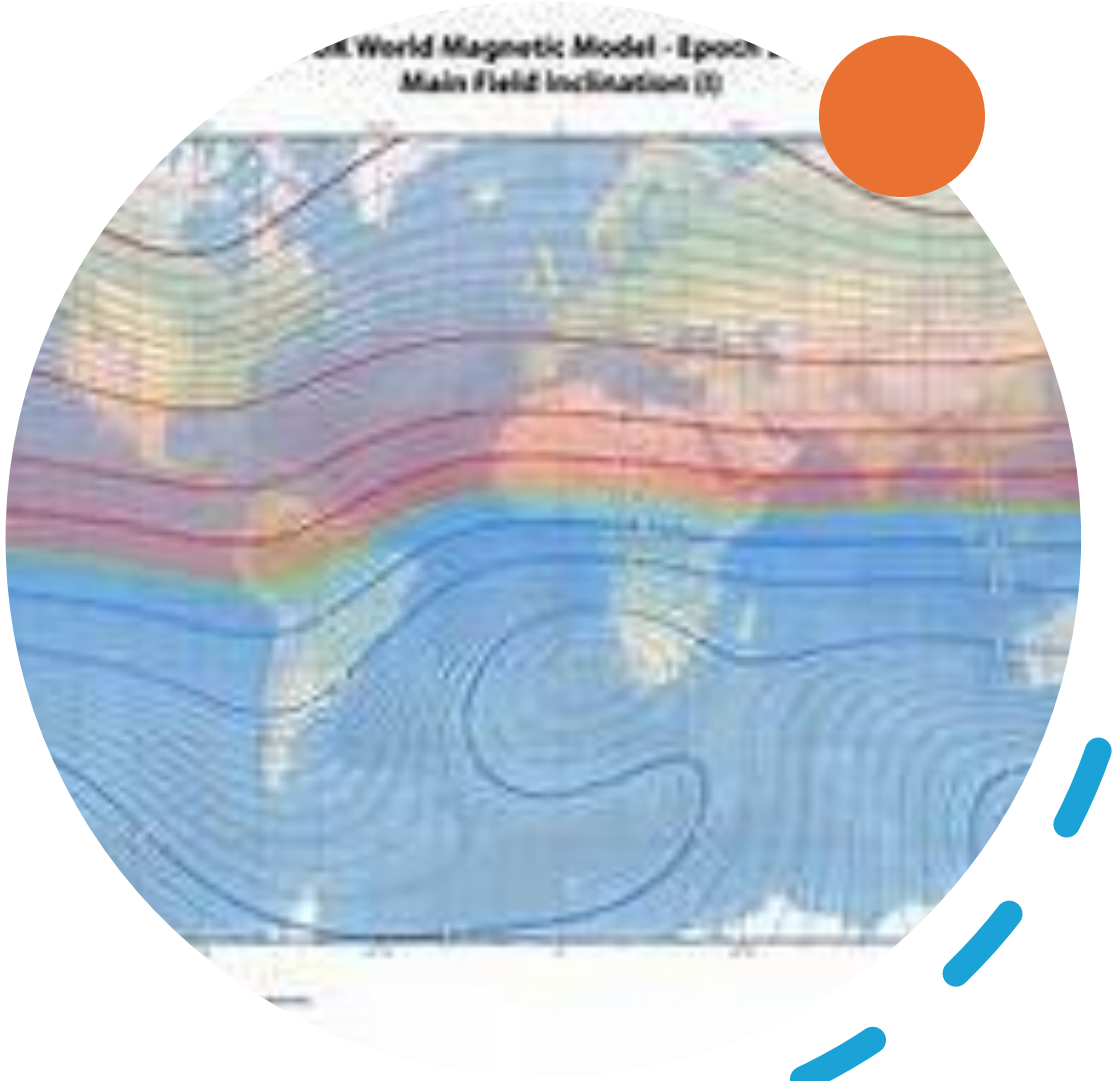
Inclinación magnética

La inclinación magnética, también conocida como ángulo de inmersión, es el ángulo que forma el campo magnético terrestre con el plano horizontal tangente a la superficie de la Tierra. Este ángulo varía en diferentes puntos del planeta y es crucial para entender cómo el campo magnético interactúa con la superficie terrestre.

Conceptos Clave

Valores Positivos y Negativos: Valores positivos indican que el campo magnético apunta hacia abajo (hacia el interior de la Tierra), mientras que valores negativos indican que apunta hacia arriba.

Variación Geográfica: La inclinación magnética varía dependiendo de la ubicación geográfica. En el ecuador magnético, la inclinación es cercana a 0°, mientras que en los polos magnéticos puede alcanzar ±90°



Unidades de campo magnético

Las unidades de campo magnético son esenciales para medir y describir la intensidad y dirección de los campos magnéticos en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas.

Sistema Internacional de Unidades (SI)

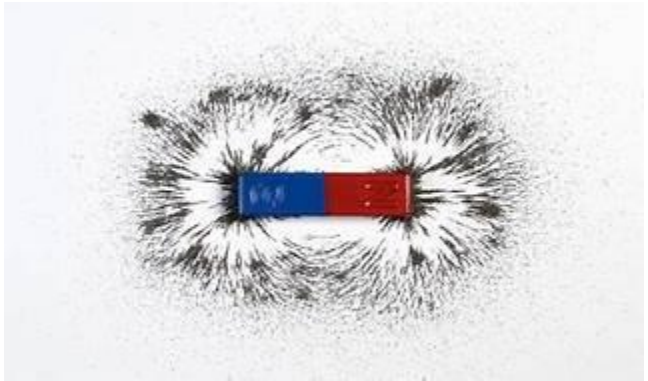
Tesla (T): Es la unidad principal para medir el campo magnético en el SI. Un tesla se define como la cantidad de campo magnético que produce una fuerza de un newton sobre un conductor de un metro de longitud que transporta una corriente de un amperio perpendicular al campo.

Sistema Cegesimal de Unidades (CGS)

Gauss (G): Es la unidad utilizada en el sistema CGS. Un tesla es igual a 10,000 gauss, lo que significa que el gauss es una unidad mucho más pequeña.

Relación entre Tesla y Gauss

1 Tesla (T) = 10,000 Gauss (G)



Correcciones del método magnético

Corrección de la Variación Diurna

- El campo magnético terrestre varía a lo largo del día debido a la actividad solar. Para corregir estas variaciones, se utilizan magnetómetros de base que registran las fluctuaciones del campo magnético en un punto fijo. Estos datos se utilizan para ajustar las mediciones tomadas en el campo.

Corrección de la Declinación Magnética

- La declinación magnética es el ángulo entre el norte verdadero y el norte magnético. Es crucial ajustar las lecturas de brújula para tener en cuenta esta diferencia y obtener direcciones precisas.

Corrección de la Inclinación Magnética
La inclinación magnética, o ángulo de inmersión, también debe ser corregida para interpretar correctamente los datos magnéticos. Esto es especialmente importante en regiones cercanas a los polos magnéticos, donde la inclinación puede ser significativa.

Corrección Topográfica
Las variaciones en la topografía del terreno pueden afectar las mediciones magnéticas. Se utilizan modelos digitales de elevación para ajustar los datos y eliminar estos efectos.

Corrección de Anomalías Locales
Depósitos de minerales magnéticos como la magnetita pueden causar anomalías locales en el campo magnético. Estas anomalías deben ser identificadas y corregidas para no interferir con la interpretación de los datos geofísicos.

Deriva magnética

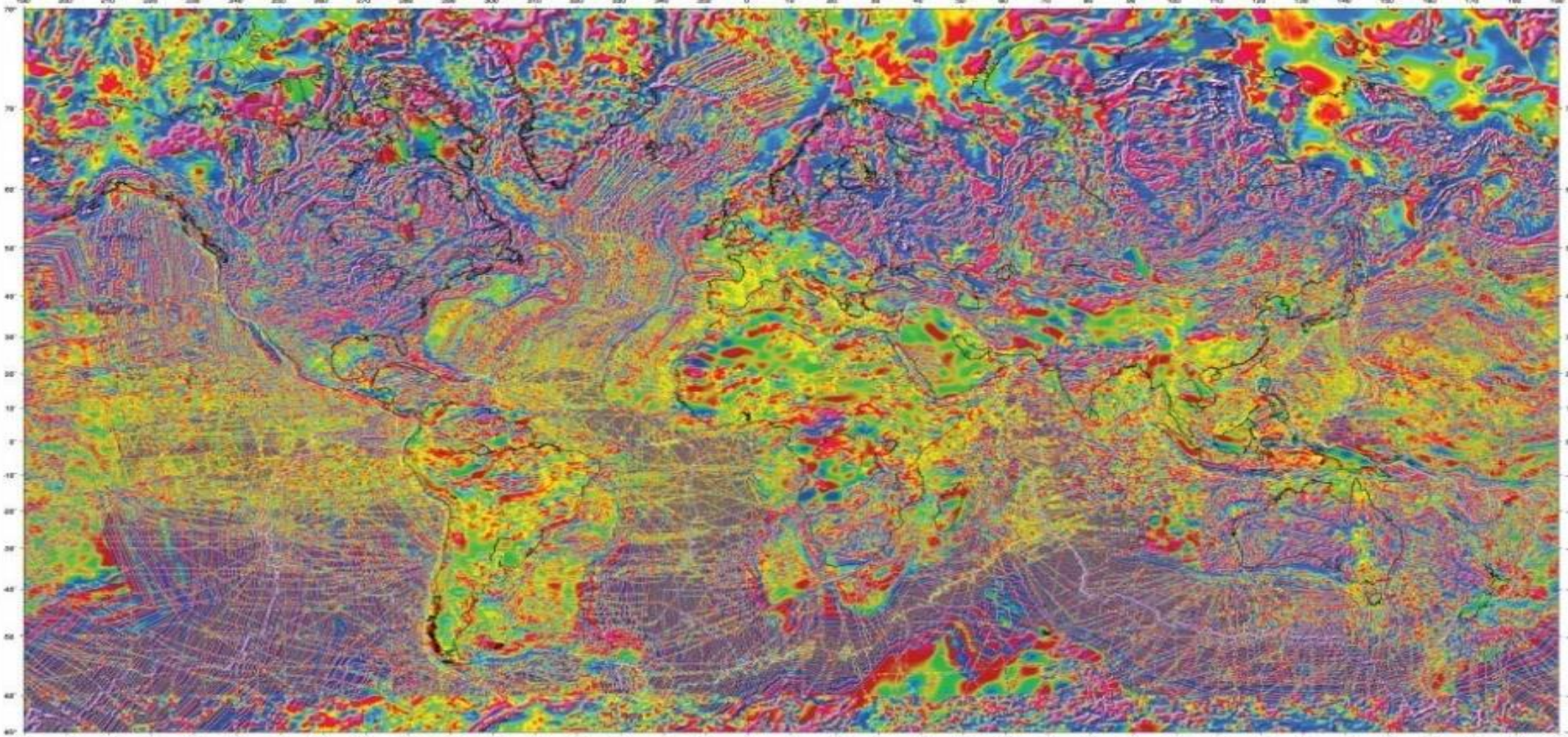
La deriva magnética se refiere al fenómeno en el que el campo magnético de la Tierra cambia gradualmente con el tiempo, lo que provoca que las brújulas se desvíen del norte verdadero. Este fenómeno es causado principalmente por el movimiento del hierro fundido dentro del núcleo exterior de la Tierra.

Factores que Contribuyen a la Deriva Magnética

Movimiento del Núcleo Terrestre: Las corrientes de hierro fundido en el núcleo externo de la Tierra generan el campo magnético terrestre. Los cambios en estas corrientes afectan la posición de los polos magnéticos.

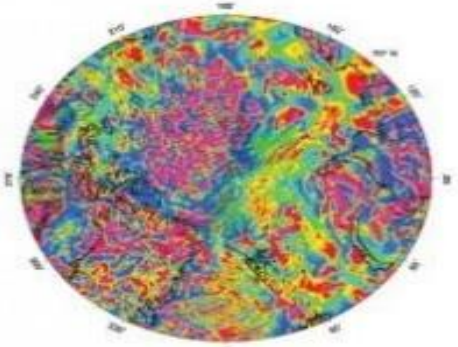
Variaciones Seculares: Estos son cambios lentos y continuos en el campo magnético terrestre que ocurren a lo largo de décadas o siglos.

Anomalías Locales: Depósitos de minerales magnéticos pueden causar variaciones locales en el campo magnético



MAGNETIC ANOMALY MAP OF THE WORLD

CARTE DES ANOMALIES MAGNÉTIQUES DU MONDE



COMMISSION FOR THE GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD · *COMMISSION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DU MONDE*

MAGNETIC ANOMALY MAP OF THE WORLD

CARTE DES ANOMALIES MAGNÉTIQUES DU MONDE

Scale 1:50,000,000 *Echelle 1 / 50 000 000*

(2007th Ist Edition) Map published by CGMW with support of UNESCO
(2007e Ière Edition) Carte publiée par la CGMW avec le concours de l'UNESCO

Authors / Auteurs

John V. Korhonen, J. Derek Fairhead, Mohamed Hamoudi, Kumar Hemant, Vincent Lesur, Moana Mandea, Stefan Maus, Michael Purucker, Dhananjay Ravat, Tatiana Sazonova and Erwin Thébault

With data contribution by

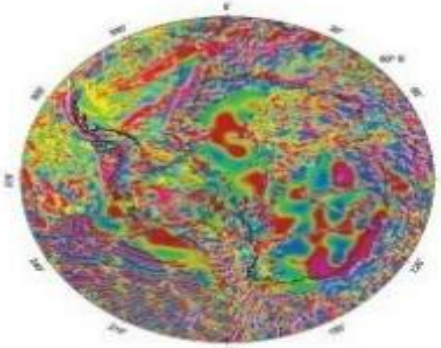
Sven Aero, Tianra Ali Carlos Judge Chernicoff, Massimo Chiappini, Alejandro Cuevas, J. Derek Fairhead, Maria Ghidella, Taivani Ishitsera, Julia V. Korhonen, Anant Khokpal, Robert P. Kotha, Moana Mandea, Stefan Maus, Susan McLean, Peter Milliger, Jean-Louis Le Mouël, Tjipo Nguenanyi, Odleh Olesen, Oleg Petrov, Mark Pilkington, Michael Purucker, Jonas Sakkeus, Jose Manuel Shellnhuber Salome, Edgar Stettler, Robert Supper, Dhananjay Ravat, Colin Reeves, Ben Vahar, Maarten de Wit and Thomas Woods

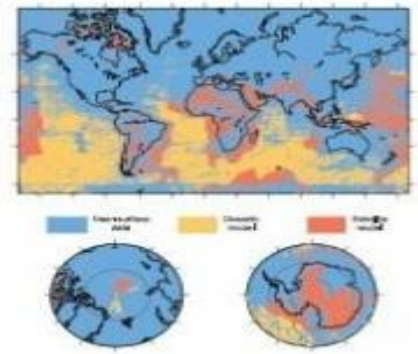
Internal review organized by Dhananjay Ravat and Colin Reeves
Other reviewers: Taivani Ishitsera, Julia V. Korhonen, Vincent Lesur, Stefan Maus, Peter Milliger and Michael Purucker

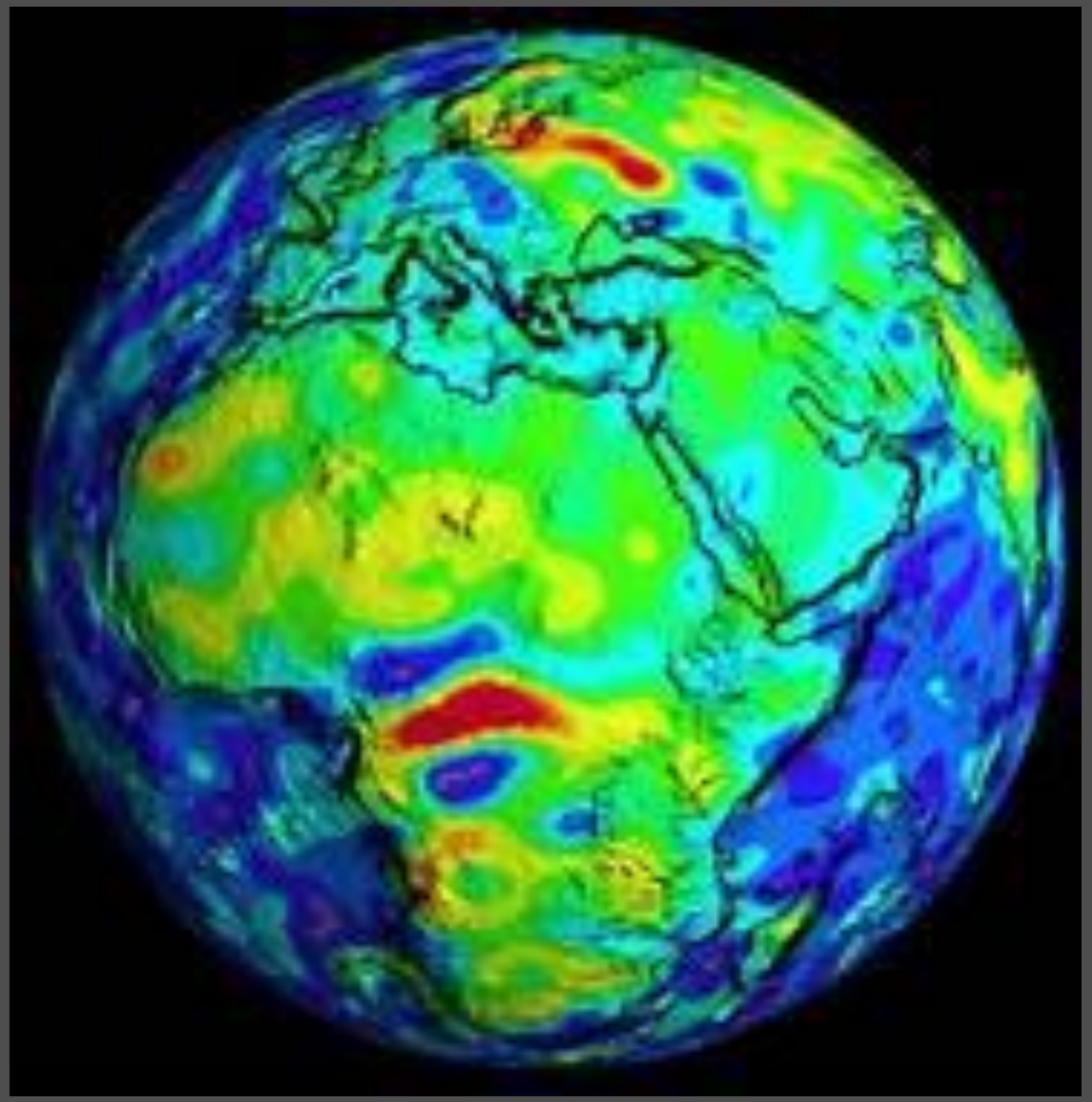
External scientific review organized by Jean-Paul Cadet and Philippe Rosé
Reviewers: Patrick Taylor and Kathryn Whaler

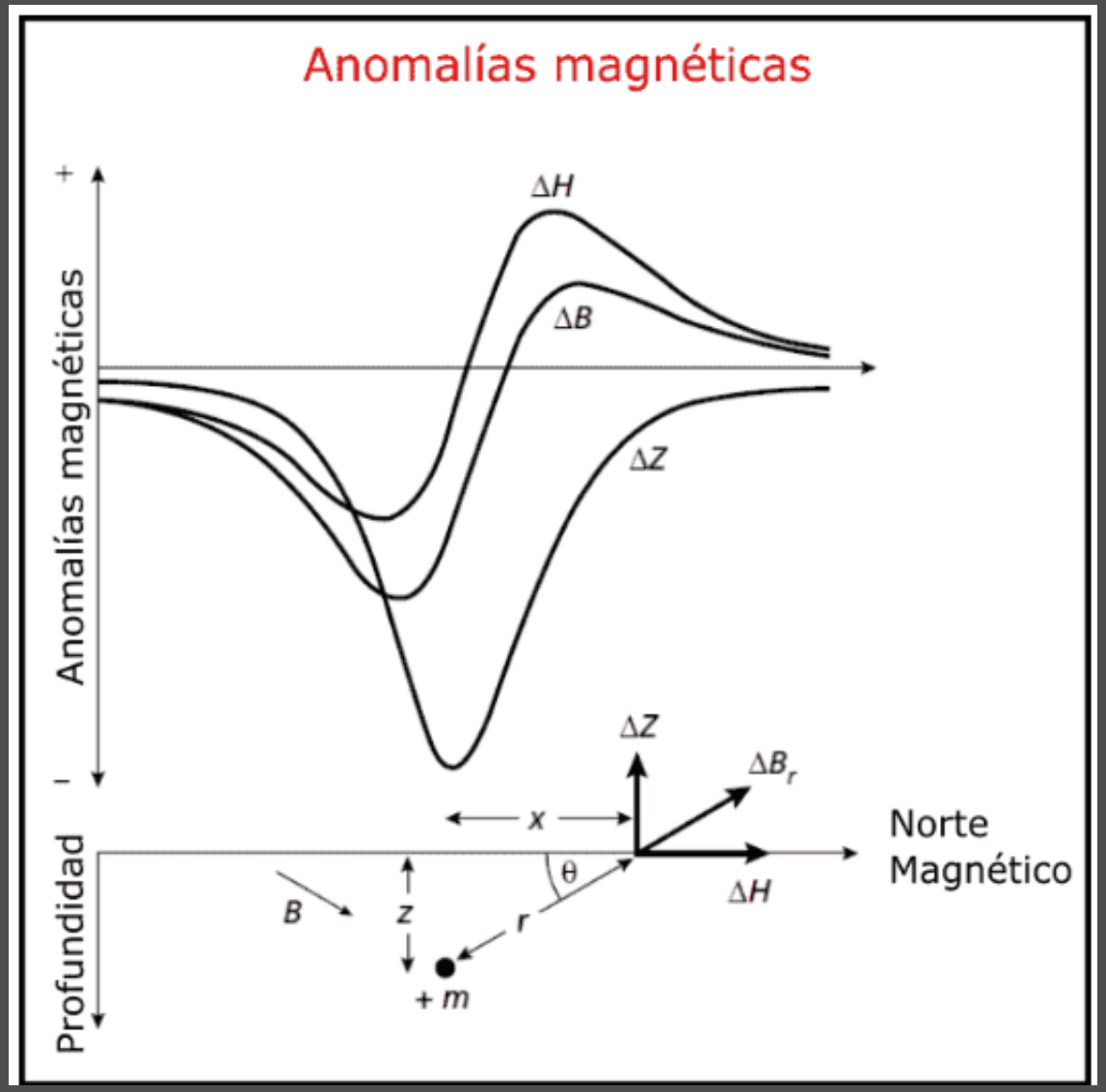
WDMAM executive committee: Julia V. Korhonen, Colin Reeves, Maria Ghidella, Taivani Ishitsera, Tamara Litvinova, Moana Mandea, Stefan Maus, Susan McLean, Peter Milliger, Michael Purucker and Dhananjay Ravat

International umbrella: Lili Sharrit, Charles Barton, Jean-Paul Cadet and Philippe Rosé








Anomalías magnéticas
+
−
Anomalías magnéticas
ΔH
ΔB
ΔZ
ΔZ
ΔB_r
x
θ
ΔH
Norte
Magnético
B
z
r
+ m
Profundidad

Tipos de Magnetómetros

Magnetómetros de Inducción: Miden los cambios en el flujo magnético a través de una bobina de alambre. Cuando un campo magnético variable atraviesa la bobina, induce una corriente eléctrica proporcional a la velocidad de cambio del campo.

Magnetómetros de Protones (NMR): Utilizan el principio de resonancia magnética nuclear. Los protones en un fluido se alinean con un campo magnético externo y, al retirarse el campo, los protones liberan energía detectable.

Magnetómetros de Efecto Hall: Basados en el efecto Hall, miden la tensión creada en un conductor por un campo magnético perpendicular a la corriente eléctrica que pasa a través del conductor.

Magnetómetros SQUID (Dispositivos Superconductores de Interferencia Cuántica): Utilizan superconductores y el principio de interferencia cuántica para detectar campos magnéticos extremadamente débiles con alta precisión

Aeromagnetometría

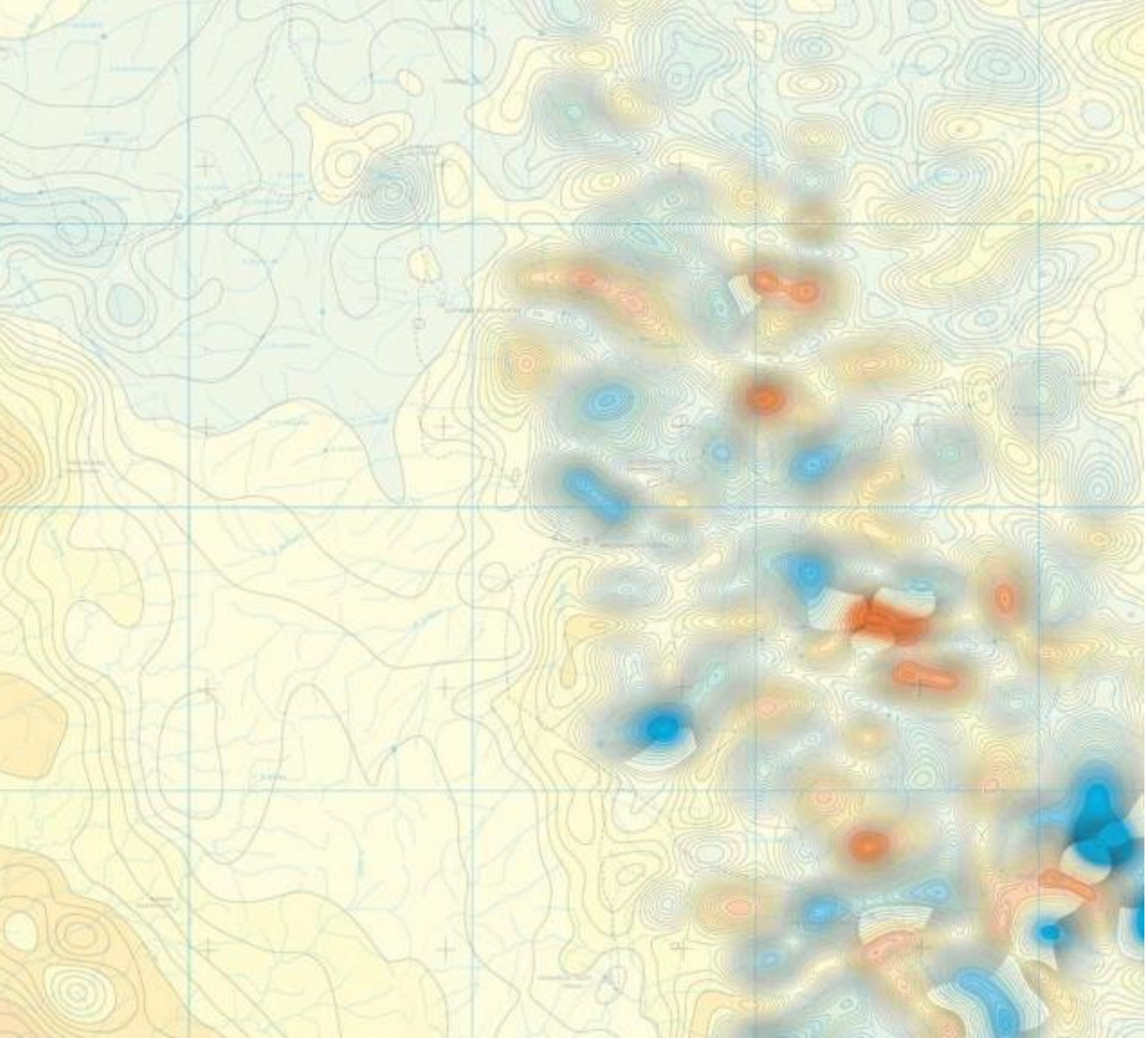
La aeromagnetometría es una técnica geofísica que utiliza magnetómetros montados en aeronaves para medir las variaciones en el campo magnético terrestre desde el aire. Esta técnica es ampliamente utilizada en la exploración minera, la cartografía geológica y la búsqueda de recursos naturales.

Ventajas de la Aeromagnetometría

Cobertura Rápida y Eficiente: Permite cubrir grandes áreas en poco tiempo, lo que es especialmente útil en regiones remotas o de difícil acceso.

Alta Resolución de Datos: Los magnetómetros aéreos pueden detectar pequeñas variaciones en el campo magnético, proporcionando datos de alta resolución que son esenciales para la identificación de anomalías magnéticas.

Versatilidad: Puede realizarse con diferentes tipos de aeronaves, incluyendo aviones, helicópteros y drones, lo que permite adaptar la técnica a las necesidades específicas del proyecto



Proceso de Aeromagnetometría

- **Planificación del Vuelo:** Se diseñan rutas de vuelo para cubrir el área de interés de manera eficiente.

- **Adquisición de Datos:** Los magnetómetros a bordo de la aeronave registran las variaciones en el campo magnético mientras se vuela sobre el área objetivo.

- **Procesamiento y Análisis:** Los datos recogidos se procesan y analizan para generar mapas y perfiles de anomalías magnéticas

Aplicaciones al estudio de reservorios

Identificación de Estructuras Geológicas

La aeromagnetometría permite mapear estructuras geológicas como fallas, pliegues y diques, que son cruciales para la identificación de trampas estructurales y estratigráficas donde pueden acumularse hidrocarburos.

Caracterización de Reservorios

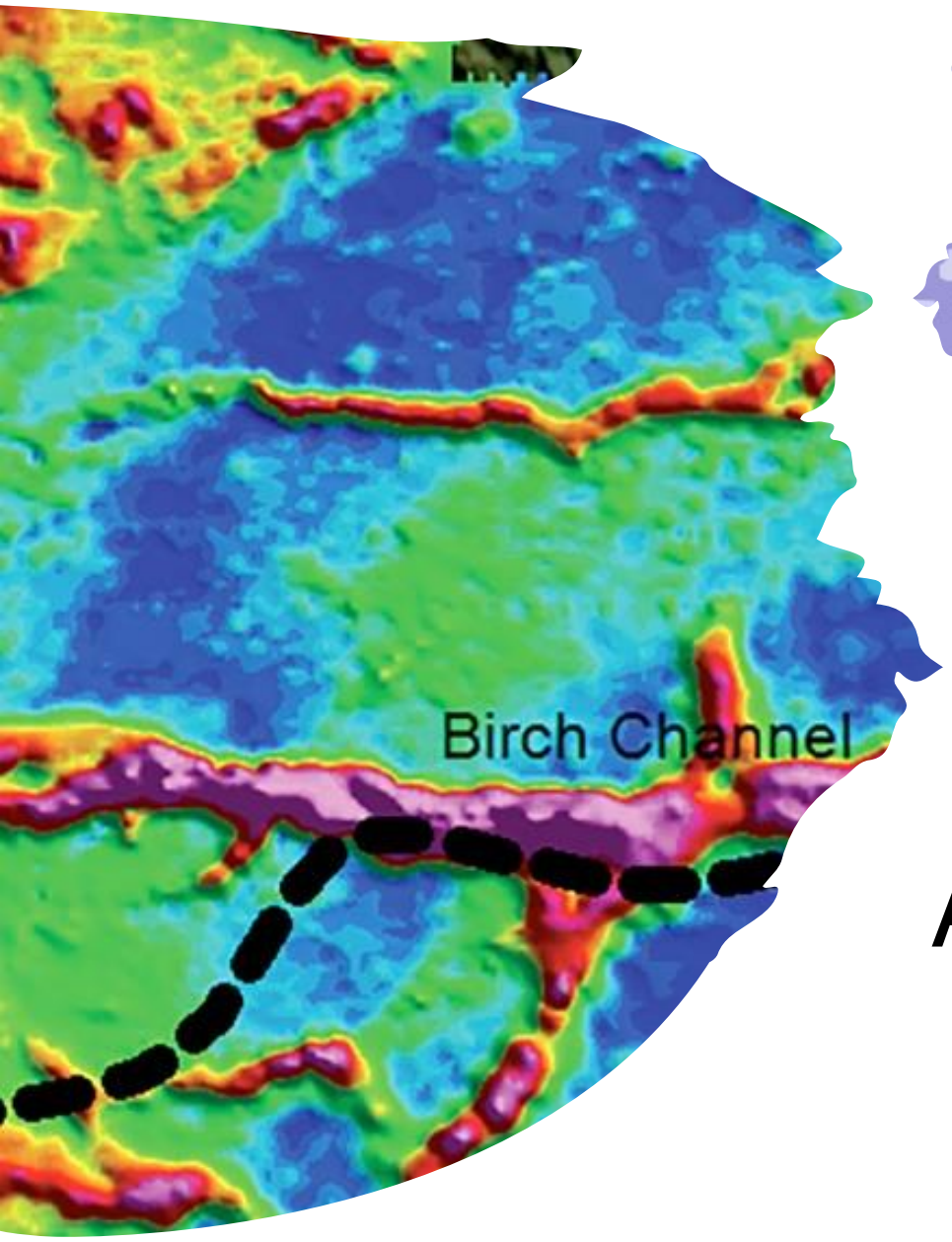
Los datos magnéticos ayudan a caracterizar la litología y la distribución de los fluidos en el reservorio. Esto incluye la identificación de zonas con alta permeabilidad y porosidad, que son esenciales para la producción eficiente de hidrocarburos.

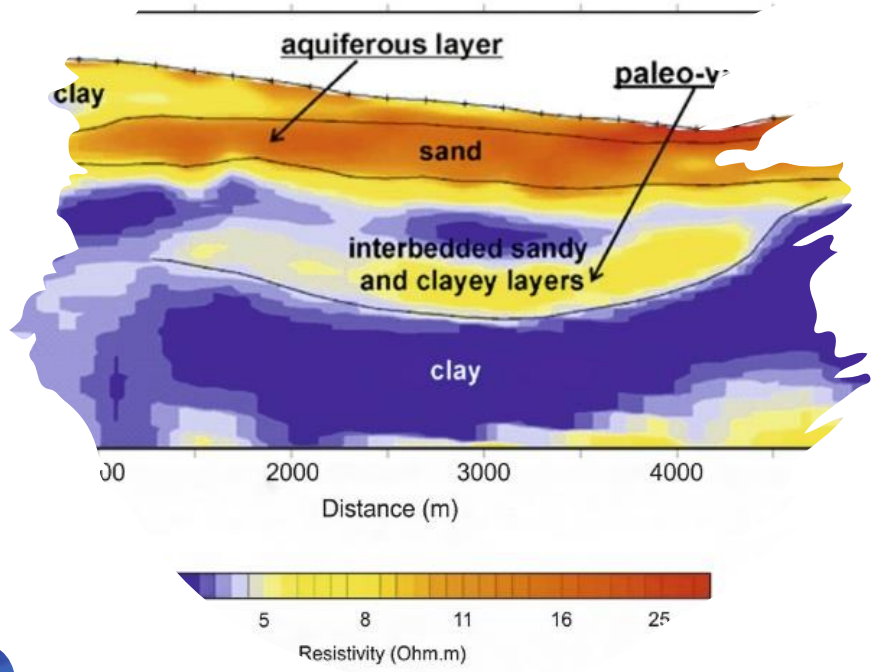
Modelado de Reservorios

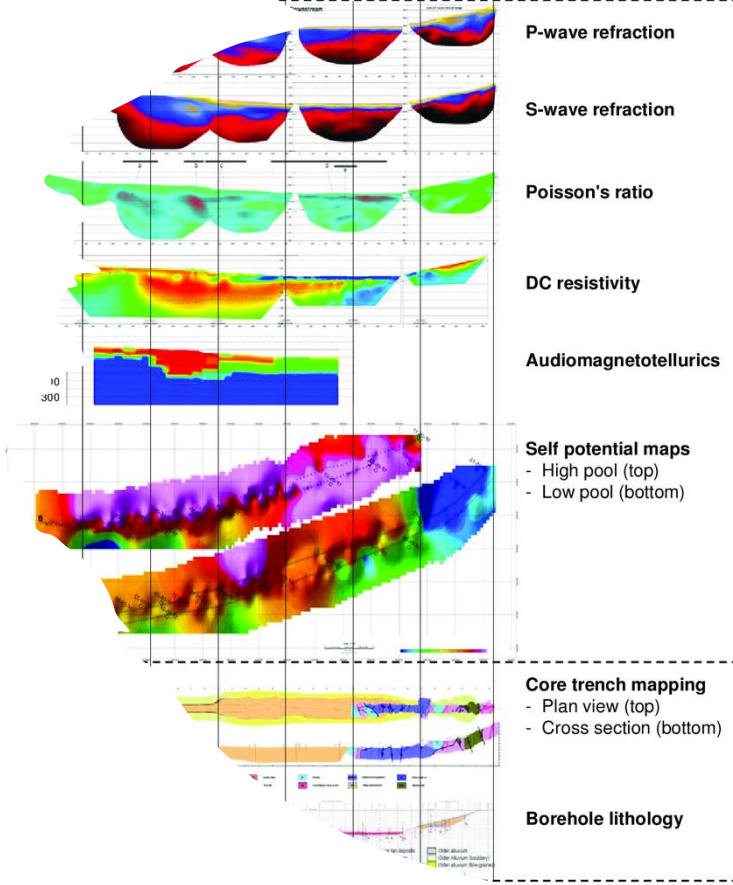
La integración de datos magnéticos con otros datos geofísicos y geológicos permite la creación de modelos tridimensionales de los reservorios. Estos modelos son fundamentales para planificar la perforación y optimizar la producción.

Monitoreo de la Producción

El monitoreo continuo de las anomalías magnéticas puede ayudar a detectar cambios en la saturación de fluidos y la presión del reservorio, proporcionando información valiosa para la gestión y optimización de la producción

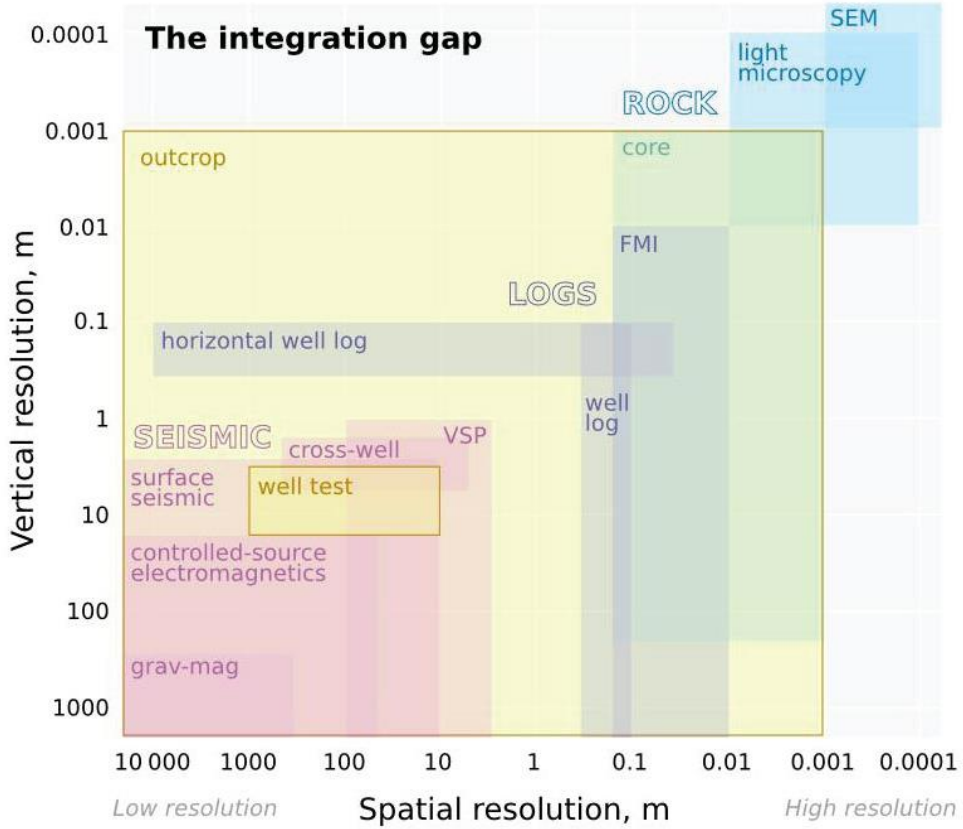


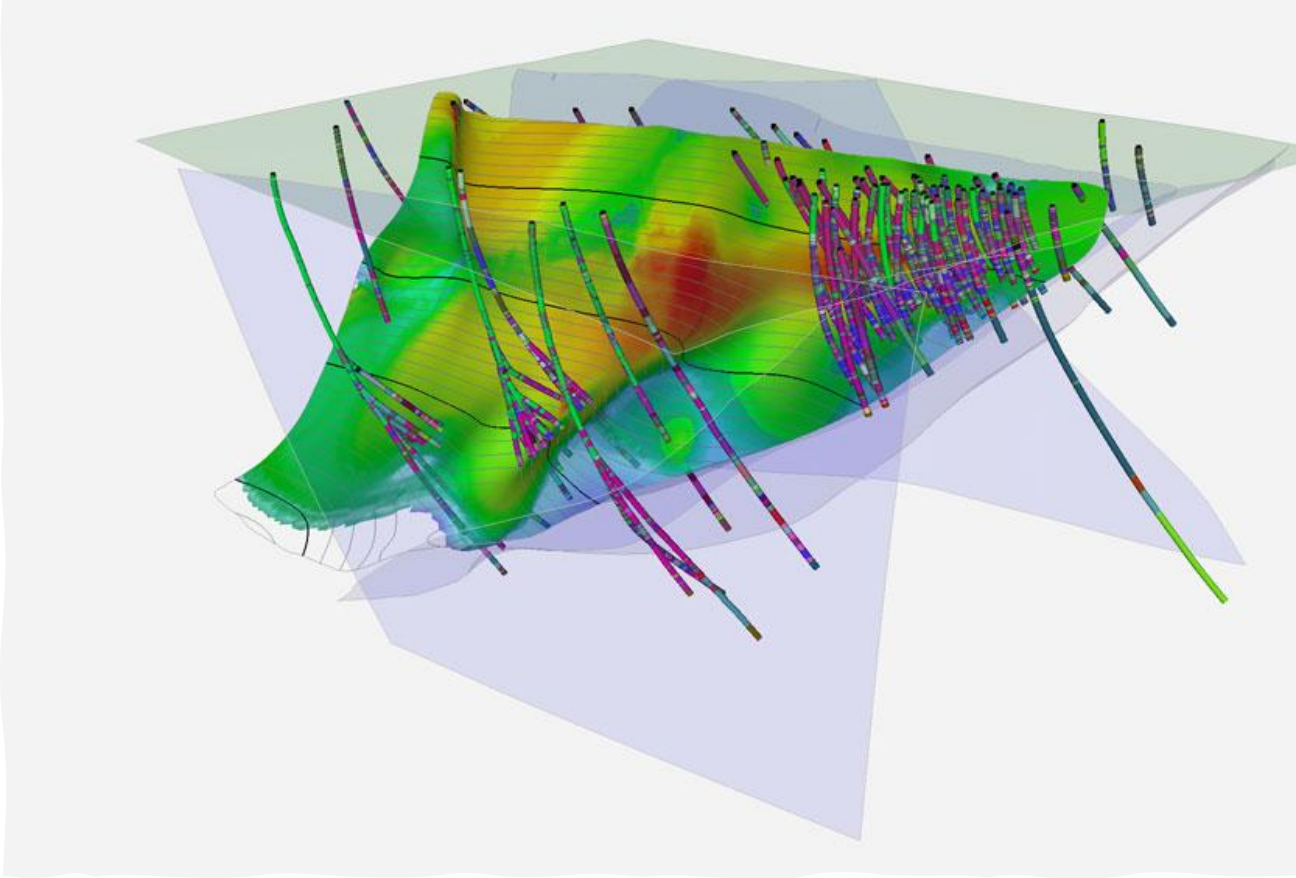




Aplicación

- AGUAS SUBTERRANEAS
- Fuerte desarrollo en los últimos 10 años.
- INGENIERIA CIVIL





MINERIA

- Segunda industria con mas uso de geofísica
- Los desafíos en minería. Resolución, integración, y presupuestos.
- Múltiples geofísicas como soporte en la toma de decisiones de exploración.
- La geofísica, como dato base en la futura exploración minera.