

## El misterio de las Tormentas y las Brújulas. Cómo la Ciencia embellece los fenómenos naturales.

ANTONIO HERNANDO GRANDE

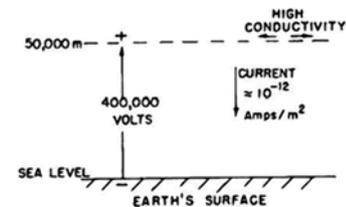
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid

### Cómo son y que intensidad tienen los campos estáticos, eléctrico y magnético, en la superficie de la Tierra

En la atmósfera están presentes un campo eléctrico y un campo magnético estáticos cuyo origen se cree asociado a dos fenómenos muy distintos. El campo eléctrico es debido a la carga eléctrica existente en la atmósfera, mientras que el campo magnético parece deberse a las corrientes eléctricas producidas en la parte líquida del núcleo del planeta, debido al aumento de volumen de su centro sólido, combinadas con la aceleración de Coriolis.

En la superficie terrestre el campo eléctrico es perpendicular a ella y dirigido hacia abajo (carga negativa en la superficie) y su valor promedio es de 100 V/m. Disminuye según ascendemos y se anula a una altura de 60 Km. El campo magnético sigue las líneas de los meridianos magnéticos y presenta dos componentes una paralela a la superficie y otra perpendicular, ambas del orden de décimas de Oersted. Los meridianos magnéticos son los meridianos correspondientes al eje formado por los polos magnéticos que está inclinado un ángulo de aproximadamente doce grados respecto al eje de rotación de la Tierra. Esta inclinación o desalineamiento de los dos ejes, magnético y geográfico, da lugar a la declinación magnética o ángulo formado en cada punto de la superficie por los dos meridianos, geográfico y magnético, (Un Oersted equivale a un campo una diezmilésima de Tesla o de 80 A/m. En una prueba de resonancia magnética nuclear se somete al

paciente a un campo de unidades de Tesla, es decir diez mil veces superiores al campo terrestre. El campo en el borde de un imán potente es próximo a un tesla aunque disminuye muy rápidamente con la distancia).



**Figura 1.** Perfil del campo eléctrico estático en la superficie de la Tierra. Benjamin Franklin realizó experimentos pioneros importantes.

La existencia del campo eléctrico se ha manifestado a la humanidad desde la más remota antigüedad por medio de sobrecogedores fenómenos naturales como son los rayos y relámpagos y sus, a veces, dolorosas consecuencias. No fue hasta la época científica y en concreto desde tiempos de Franklin y Coulomb entre mediados y finales del siglo XVIII que pudo contarse con un esquema de arranque para la teoría de la electricidad suficientemente sólido y rigurosos como para definirse los conceptos de carga, campo y potencial. Lo más importante del momento fue el desarrollo simultáneo de conceptos y de los métodos e instrumentos de medida de las magnitudes eléctricas. Sin la balanza artesanalmente construida por Coulomb el concepto de carga eléctrica como magnitud física no se habría de-

sarrollado entonces. Desde los albores de la teoría de la electricidad se intentaron interpretar en su marco los numerosos experimentos realizados sobre la electricidad atmosférica.

Las fuerzas magnéticas también fueron detectadas muy tempranamente por la humanidad. Los Vedas hindúes, los historiadores griego y romanos hacen referencia a la piedra imán. Pero fueron los chinos los que parece ser que utilizaron por vez primera la brújula o aguja imanada para orientarse en sus navegaciones, probablemente hacia el 121 d.C. En una nota de ese año recogida en un diccionario se cuenta como una piedra-imán capaz de dar poder de atracción a una aguja de hierro. Sin embargo, hasta 1297 no existe documento chino en el que pueda verse una referencia explícita a la brújula. A comienzos del siglo XIII un ministro de Barbarroja, Guyot de Provins describe en la “Biblia Guyot” la forma en que los marineros tocan con una piedra oscura agujas de hierro que colocadas sobre paja flotando en agua se orientan hacia la estrella polar. A finales de este siglo, y merced a las cruzadas, el empleo de la brújula flotante estaba generalizado. (Fuente: Salvador Velayos, Historia del Magnetismo, Revista del Colegio Mayor Universitario Santa Cruz, Valladolid, 1950). La primera descripción detallada de la brújula con pivotes fue realizada por Pedro de Maricourt o Pedro El Ermitaño en 1269, discípulo de Roger Bacon, un auténtico investigador pre-científico por su época que se adelantó a su tiempo.

La orientación de la brújula es el signo de la existencia de un campo magnético en la superficie terrestre. Se cuenta que Colón entretenía a los marineros en sus largas travesías mostrándoles como unas agujas imanadas montadas sobre paja flotante en una cuba de agua se orientaban señalando una dirección constante.



Figura 2. Imagen del pastor Magnes.

La geometría del campo magnético terrestre parece corresponder con la del campo que crearía un dipolo magnético o pequeña barra imán situada en el centro de la Tierra y formando un cierto ángulo de doce grados con su eje de rotación.

El primer tratado riguroso de Magnetismo data de 1600, un contemporáneo de Shakespeare y médico de la Reina Isabel de Inglaterra, Sir William Gilbert escribió hacia ese año su libro titulado “*De Magnete, magnetisque corporibus et de magno magnete tellure...*”. En él se condensa todo lo que hasta esa época se conocía de Magnetismo y se explicaba el comportamiento magnético de la Tierra como el de un gigantesco imán. Algunas de las ideas expuestas por Gilbert en tan antigua recopilación impresionaron fuertemente a Galileo ya que encerraban la esencia del método científico. La Figura siguiente ilustra, la geometría del campo y algunas de las ideas originales de Gilbert.

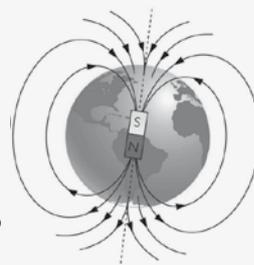
#### LA TIERRA ES UN GRAN IMÁN PERMANENTE

Escribe Gilbert en el prólogo del libro “*De Magnete*”, en 1600.



*Las razones poderosas se obtienen de los experimentos seguros y de los argumentos demostrados mas que de conjeturas probables y de las opiniones de filósofos especuladores.*

**Figura 3.** Geometría del campo magnético terrestre al que se refería Gilbert llamándole *Magno magnete tellure*. Fragmento del prólogo del libro que contiene un resumen esencial del método científico.



## INTRODUCCIÓN: LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA BIOSFERA

Desde el descubrimiento por Coulomb de la ley que lleva su nombre se precipitan una serie de experimentos y teorías que permiten en el intervalo de aproximadamente un siglo, el siglo XIX, dejar bien establecida la teoría física mejor acabada: El Electromagnetismo. Los experimentos de Oersted, Ampere, Biot, Savart y Faraday y los conceptos teóricos introducidos por Gauss, Poisson y Maxwell, permitieron resumir los experimentos sobre campos electromagnéticos en cuatro ecuaciones diferenciales, las ecuaciones de Maxwell, que han resistido inamovibles las profundas modificaciones introducidas en la Física clásica por la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad, desde los albores del siglo XX. La electrodinámica cuántica es sin duda la parte de la física actual más firmemente establecida, baste considerar que sus predicciones teóricas se ven confirmadas por los experimentos con asombrosos números de cifras significativas. Como gustaba calificar al Profesor Francisco Ynduráin la electrodinámica y los experimentos actuales alcanzan precisiones sobrehumanas.

La interacción electromagnética es sumamente importante para nosotros. De los cuatro tipos de fuerzas que conocemos a día de hoy la electromagnética es la responsable de la vida. Lo que llamamos química trata de la descripción de las combinaciones de átomos originadas por interacciones exclusivamente electromagnéticas. La Biología es una parcela especializada de la química y por tanto pertenece exclusivamente al reino de las fuerzas electromagnéticas. Cuando las bases de los cromosomas se atraen y se repelen lo hacen por fuerza electromagnéticas, cuando enviamos una orden a nuestro cerebro las comunicaciones son electroquímicas, corrientes sinápticas y post-sinápticas, mediadas por neurotransmisores con actividad química. Nada de la célula se escapa a la fuerza electromagnética.

La Biosfera tiene un motor electromagnético que es la luz del Sol, el chorro de campo electromagnético que nos llega gratuitamente con una potencia media de 240 vatios por metro cuadrado y que permite a los cloroplastos fabricar, mediante fotosíntesis las moléculas que necesitamos para vivir. Toda la atmósfera está llena de luz que es la energía vital y desde Maxwell sabemos que esa luz es campo electromagnético.

Desde Maxwell, también sabemos que los campos electromagnéticos tienen dos tipos de fuentes. Un campo eléctrico puede ser creado por carga eléctrica. Hoy sabemos que la carga es una propiedad que tienen los electrones y los protones, los primeros tienen carga negativa y los segundos positivos, pero la cantidad de carga que tienen en valor absoluto es la misma. Cualquier carga eléctrica debe ser un múltiplo de esta cantidad. El valor absoluto se muestra en la siguiente tabla. La única forma de producir carga es arrancar electrones a los átomos y moléculas en los que inicialmente al tener el mismo número de electrones que de protones tienen carga nula. Este proceso se denomina ionización y la energía que hay que gastar para ionizar es igual a la energía de enlace del electrón que se arranca que es menor cuando más externo sea.

### UNIDAD FUNDAMENTAL DE CARGA

$$e = 1.610^{-19}\text{C}$$

e: Carga del protón

-e: Carga del electrón Millikan 1909

### LA CARGA ESTÁ CUANTIZADA

*Todas las cargas observables se presentan en cantidades enteras de la unidad fundamental de carga e*

$$Q = \pm Ne$$

La carga eléctrica produce campo eléctrico y la carga eléctrica en movimiento, o corriente eléctrica, genera un campo magnético. Pero Faraday primero, mediante una serie de experimentos cruciales en la historia de la física con los descubrió la ley de la inducción en 1836, y Maxwell cuarenta años más tarde utilizando razonamientos de simetría matemática, descubrieron que existían otras fuentes de los campos eléctricos y magnéticos distintas de las cargas y de las corrientes. Faraday observó que un campo magnético variable en el tiempo producía un campo eléctrico, variable en el tiempo con la misma frecuencia que el magnético y Maxwell dedujo que un campo eléctrico variable en el tiempo era fuente de un campo magnético, también de la misma frecuencia que el eléctrico que lo induce.

La luz y todas las ondas electromagnéticas tienen como fuentes campos variables en el tiempo producidos por cargas aceleradas. Los campos estáticos, o constantes en cada punto a lo largo del tiempo solo pueden ser producidos por carga en reposo o corrientes estaciona-

rias. La luz que llena la Biosfera es campo electromagnético de frecuencias próximas  $10^{15}$  Hz, oscilaciones por segundo o hercios. Las ondas de telefonía móvil tienen una frecuencia del rango de  $10^9$  Hz. Las ondas de radio se encuentran generalmente en el intervalo de  $10^4$  a  $10^8$  Hz y los rayos X entre  $10^{17}$  y  $10^{18}$  Hz. La luz del sol se genera en los átomos de la superficie solar sometida a temperaturas de 5500 K.

Los campos estáticos terrestres, tanto eléctrico como magnético, deben tener su origen en cargas eléctricas en reposo y corrientes estacionarias, respectivamente. Repasamos a continuación la historia de los descubrimientos claves sobre el origen de ambos.

## EL CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

### El origen de la carga atmosférica e historia de su descubrimiento

La historia de la investigación experimental sobre la electricidad atmosférica es una historia jalonada de héroes que perdieron su vida realizando experimentos temerarios. En 1752 Franklin descubrió la naturaleza eléctrica de los rayos como simples descargas electrostáticas. Desde entonces se realizaron múltiples experimentos que permitieron conocer la existencia de un campo eléctrico en la superficie de la Tierra que tiene en el suelo con buen tiempo un valor medio de 100V/m y que se modifica profundamente durante las tormentas. G. Beccaria en 1775 infirió que el aire estaba cargado positivamente. H. B. Saussure en 1779 descubrió que el valor del campo variaba con la altura, para ello desarrolló un aparato que medía la carga inducida en un conductor situado en la atmósfera, y que puede considerarse un precursor de los electrómetros. En 1785 Coulomb descubrió la conductividad eléctrica del aire. En 1842 Peltier comprobó experimentalmente la propuesta teórica previa de Erman sobre el carácter negativo de la carga de la superficie de la Tierra. Con el desarrollo de los electrómetros portátiles al comienzo del siglo XX se multiplicaron las observaciones experimentales de la electricidad atmosférica.

El descubrimiento de este campo planteó una pregunta doble aún no completamente contestada a día de hoy: ¿Qué carga eléctrica produce este campo? ¿Qué

mantiene a esta carga fija? Al ser un campo estático sus cargas fuentes deben estar en reposo. Pero si en un medio conductor hay carga, ésta inmediatamente se redistribuye de modo que anula el campo. Si hay carga en la atmósfera, debida a iones de átomos y moléculas cargadas por exceso o defecto de electrones, respecto al número total de protones, esta se movería en el medio gaseoso hasta hacer desaparecer ese campo. La superficie de la Tierra debe estar cargada negativamente para explicar el sentido y la dirección del campo. Pero si en la atmósfera hubiera carga positiva inmediatamente se precipitaría hacia la superficie para anular su exceso de negatividad, eliminando el campo.

Comencemos por ver cómo se investigó la primera parte de esta pregunta. ¿De dónde viene la carga que produce el campo, la negativa del suelo y la más positiva del aire atmosférico? En 1896 Becquerel descubrió la radiactividad. Su descubrimiento propició la propuesta de Rutherford según la cual algunas de las partículas emitidas por los núcleos radiactivos tendrían energía suficiente para arrancar electrones de los átomos y moléculas de gas atmosférico, tanto como de nano y micro-partículas flotantes en el aire, produciendo pares cargados de electrones e iones positivos.

Esta atractiva idea fue rápidamente intentada de comprobar por Paccini con unas medidas realizadas con gran profusión de publicidad en la Torre Eiffel. Sus resultados fueron difíciles de interpretar por efecto de las perturbaciones que eran del mismo orden que las diferencias que se pretendían encontrar. Si la hipótesis de la radiactividad fuera cierta la carga eléctrica debería ser de máxima densidad en las proximidades del suelo y decrecer según aumentaba la altura.

El electrómetro desarrollado por Wulf en 1909, permite medir la densidad de cargas eléctricas a partir de la medida de la conductividad del aire. Consta de un capacitor cargado por una batería que se desconecta y se mide entonces el tiempo que tarda en descargarse que es inversamente proporcional a la conductividad. Este instrumento fue utilizado con éxito por Victor Hess en 1912 quien usando un globo aerostático comprobó que la tasa de ionización atmosférica se multiplicaba por un factor 4 a 5200 m de altitud. De este modo hizo posible descartar la hipótesis de la radiactividad como fuente de la carga eléctrica atmosférica y permitió descubrir los rayos cósmicos, como los bautizó Millikan, como

causa de la carga atmosférica. Estas observaciones le valieron la concesión del premio Nóbel.



**Figura 4.** Victor Hess en su globo aerostático en el que transportaba tres electrómetros Wulf que le permitieron descubrir los rayos X, midiendo la carga atmosférica a 5200 m de altitud.

La observación de Hess permitió encontrar una explicación a la presencia de pares de iones y partículas cargadas, negativamente y positivamente, en el aire. Son los rayos cósmicos que provienen del espacio exterior la causa de la ionización de los átomos. A día de hoy sabemos que la radiación cósmica está formada por partículas de muy alta energía, una media de 0.3 GeV, provenientes de esta y otras galaxias. Algunas de estas partículas, que viajan desde unos pocos focos como Cygnus X-3, son de altísima energía, comprendida entre 100 y 1000 TeV. (La energía de enlace del átomo de hidrógeno es 13.6 eV, las interacciones electromagnéticas son del orden de 1 eV, y estas son las energías capaces de ionizar átomos arrancando electrones. 1 GeV o giga electrón voltio corresponde a  $10^9$  eV y es un orden de magnitud característico de las interacciones nucleares. El TeV o teraelectron voltio corresponde a  $10^{12}$  eV. El gran colisionador de hadrones tiene una capacidad máxima de acelerar partículas hasta 14 TeV dos o tres órdenes de magnitud menores que el de los rayos cósmicos de altísima energía).

La radiación cósmica está formada en un 90% por protones, en un 9% por partículas  $\alpha$  o núcleos de helio

y 1% de electrones y átomos ligeros. Se distribuyen en la atmósfera aumentando su densidad con la altura, lo que resulta de su origen en el exterior. Como Pfozter descubrió en 1936 la distribución tiene un pico a 15 Km de altitud indicando que su detección realizada a partir de la medida de carga atmosférica, se enmascara por la gran mayoría de partículas secundarias detectadas. En 2007 un grupo argentino observó que la mayoría de la radiación cósmica proviene de la constelación cercana, Centaurus, que contiene un núcleo activo formado por un agujero negro supermasivo, donde parte de las partículas que caen se escapan centrífugamente debido a las grandes velocidades.

Las estrellas binarias de rayos X también pudieran ser fuente de rayos cósmicos.

Ahora que sabemos el origen de la carga atmosférica, pasemos a la siguiente pregunta.

### ¿Qué baterías mantienen constante la diferencia de potencial atmosférica?

Hemos visto en la figura 1, como en un día de buen tiempo la tierra tiene una carga negativa que crea un campo de 100 V/m y que se anula a 60 km de altura. A esta altura la atmosfera se comporta como un conductor perfecto y cualquier carga situada en ella tiene una movilidad infinita. La diferencia de potencial entre esta capa y el suelo es de 400.000 V. La densidad de corriente que fluye bajo la acción de este campo es de  $10^{-12}$  amperios/ metro cuadrado (A/m<sup>2</sup>). Como la superficie del Planeta es de  $1.25 \cdot 10^{15}$  m<sup>2</sup>, la intensidad de corriente es de 1250 A. La potencia realizada por el campo para desplazar esta carga es el producto del voltaje por la intensidad y resulta ser de  $5 \cdot 10^8$  watos. La corriente de 1250 A descargaría el sistema y anularía la diferencia de potencial en unas horas. ¿Cómo se mantiene entonces la corriente? Es sabido que el mantenimiento de una diferencia de potencial constante entre dos puntos de un medio conductor requiere la acción de una batería que por medio de su energía química sea capaz de re-establecer la diferencia de potencial inicial bombeando carga eléctrica en contra del campo. ¿Dónde están esas baterías gigantescas que mantienen la diferencia de potencial entre el suelo y la capa situada a 60 Km de altura? La respuesta se halla en la Figura 5.



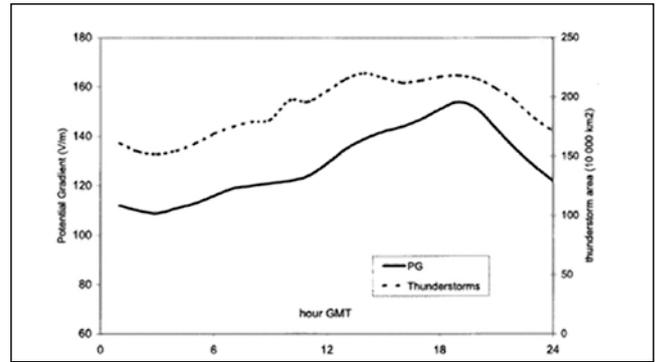
**Figura 5.** Los rayos son las baterías que mantienen el potencial atmosférico.

Los rayos traen carga negativa a la Tierra que suple la que se ha ido neutralizando por la llegada de carga positiva con la corriente atmosférica. Para comprender el proceso, solo parcialmente comprendido hoy, hay que repasar la dinámica elemental de las tormentas.

### ¿Cómo se supo que las tormentas son las baterías del campo atmosférico?

Ya que la corriente eléctrica espontánea generada por el campo tiende a eliminar la carga negativa del suelo, por la atracción que ejerce sobre la carga positiva del aire, la batería que mantenga constante la carga negativa del suelo debe transportar carga de este signo al suelo para que contrarreste a la positiva que llega con la corriente.

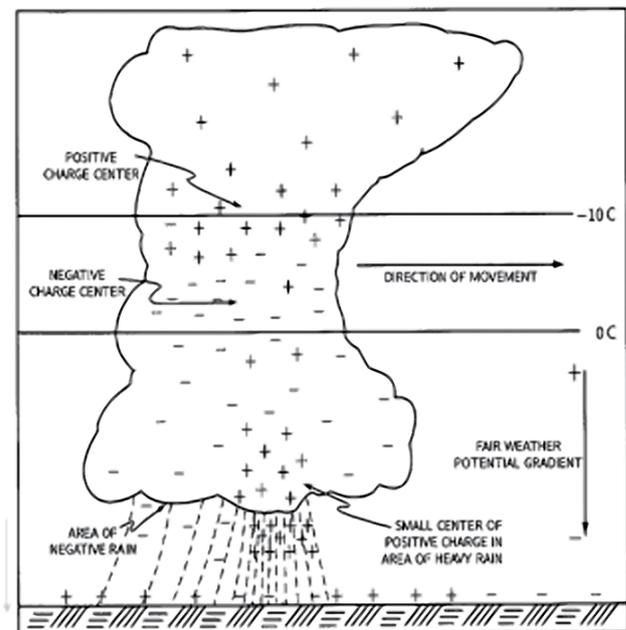
¿Cómo se sabe que las tormentas son las baterías que hacen este trabajo de transporte de carga contra el campo? Por la observación experimental. Durante años se ha estado midiendo la variación del campo eléctrico atmosférico a lo largo del día, en muy distintas latitudes. Cuando se dibuja el valor del campo en función de la hora, unificada a Greenwich, se observa la curva universal dibujada en la Figura 6, donde también se recoge la superficie de la Tierra sometida a tormentas. Se aprecia un máximo en torno a las 18 horas, independientemente de la hora local, hora que coincide con la del máximo de tormentas tropicales. La correlación de las dos curvas representadas en la Figura 6 es la base sobre la que se ha aceptado que las tormentas son la causa del mantenimiento del campo eléctrico atmosférico.



**Figura 6.** Se representa la intensidad del campo atmosférico medido en diferentes lugares geográficos y el número de tormentas sobre 10.000 Km<sup>2</sup> observados en función del horario de Greenwich.

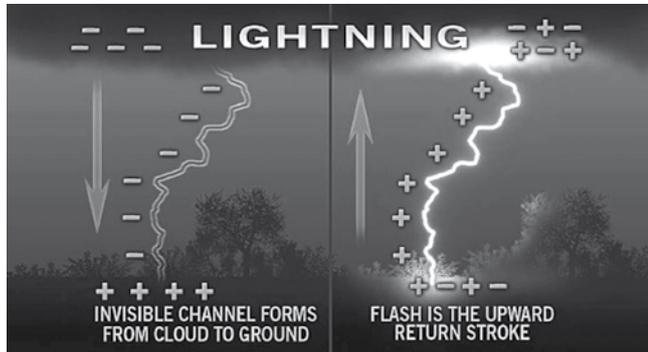
La siguiente pregunta incide sobre ¿cómo una tormenta puede transportar carga negativa al suelo de la Tierra?

Se sabe que una nube, en el momento que empieza a llover tiene carga mayoritariamente negativa en su superficie próxima a la Tierra, aunque posee una zona menor positiva, como indica la Figura 7. Los voltajes que aparecen entre nubes y tierra y nubes alcanzan valores de millones de voltios.



**Figura 7.** Perfil de nube. Se aprecia la carga negativa de la base de la nube, solamente alterada en una región de carga positiva.

Súbitamente aparecen, según trayectorias en zig-zag, luminosas pero pálidas, que van de la nube a la Tierra con segmentos recorridos a una velocidad de cincuenta metros por microsegundo. Esas líneas son causadas por carga negativa que de la superficie inferior de la nube busca a la carga positiva que se induce en el suelo debajo de ella, como ilustra la Figura 7. Cuando se aproxima lo suficiente, la carga positiva de la Tierra ioniza la región intermedia y sube con una gran explosión, el rayo, para compensar la carga negativa de la nube y deja, consecuentemente cargado el suelo negativamente. El rayo ascendente es luminoso intenso, mucho más intenso que las pálidas quebradas descendentes.



**Figura 8.** A la izquierda puede verse como de la nube surgen trayectorias en zig-zag de carga negativa que bajan hacia el suelo. Aunque la carga del suelo, en ausencia de tormenta es negativa, la presencia de la carga negativa intensa de la nube induce debajo de ella carga positiva. Cuando la distancia tierra-carga negativa descendente alcanza un umbral de disrupción se ioniza el aire intermedio y la carga positiva sube por el camino marcado por el zig-zag, dejando en la tierra un exceso de carga negativa. Este es el efecto batería de la tormenta sobre el campo atmosférico.

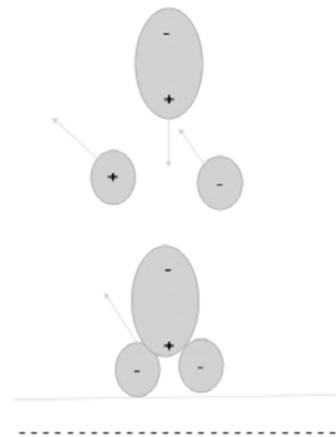
Resulta curioso constatar que la carga positiva, que forma el rayo, empieza su trayectoria en el suelo y la acaba en la nube. Hablando con propiedad diríamos que el rayo sube. Como se aprecia en la parte derecha de la Figura 8 y en el rayo fotografiado en la Figura 9



**Figura 9.** Un rayo viajando de la tierra a la nube.

Una vez comprendido el mecanismo general de mantenimiento del campo terrestre nos queda por contestar una última cuestión para entender en profundidad el proceso: ¿Por qué el suelo de la nube es mayoritariamente negativo? Esta pregunta no tiene respuesta cierta. Una teoría, de las muchas con que se ha intentado argumentar la acumulación de carga negativa es la de C.T. R. Wilson, inventor de la cámara de niebla y Premio Nobel de Física de 1927.

+++++



**Figura 10.** Un cristal de agua cae con su carga negativa en el borde inferior y positiva en el superior. Esta distribución es debida a la carga negativa del suelo y positiva del cielo indicadas en la Figura. Al encontrar iones positivos el borde inferior de la molécula los repele, pero atrae a los negativos a los que puede captar.

Según su modelo, parte de las moléculas de vapor de agua que suben en las chimeneas de aire ascendente que forman las nubes se cristalizan en nanocristales y microcristales de cloruro sódico que actúan de núcleos. Estos núcleos son lanzados a la atmósfera en enormes masas por unidad de tiempo debido al incesante batido de las olas. Como el proceso de cristalización de la molécula polar de agua tiene lugar bajo el campo atmosférico existe una tendencia mayoritaria a orientar la parte positiva de la molécula más próxima al suelo y la negativa más próxima al cielo, como indica la Figura 10. Al caer la molécula encuentra en su marcha a iones positivos y negativos, generados por la radiación cósmica. La punta inferior de la molécula repele a los iones positivos pero atrae y puede captar a los iones negativos. De esta forma es de esperar que al llegar al suelo de la nube el cristalito transporte primariamente carga negativa. Esta explicación plausible no es más que una conjetura probables y ya es bastante, aunque no suficiente para a formar que el fenómeno está conocido.

Queda, por tanto, terreno a investigar y descubrir en el fenómeno de las tormentas.

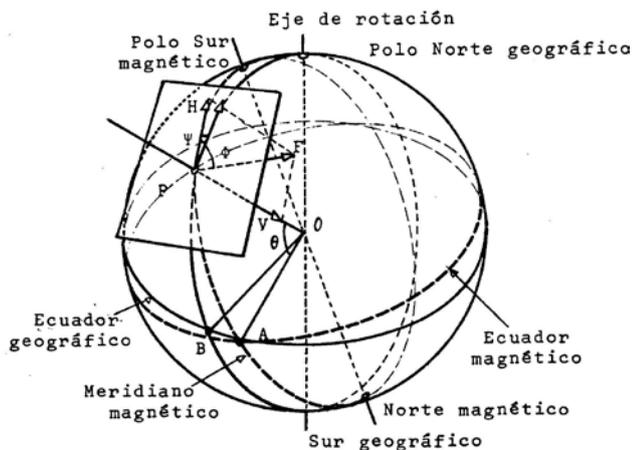
## CONCLUSIONES

Hoy sabemos que la carga atmosférica es prioritariamente originada por la radiación cósmica. Sabemos también que las tormentas y sus rayos son los responsables de que la carga del suelo sea negativa. Estas baterías están alimentadas por energía solar que produce los gradientes térmicos que originan el ascenso del agua y del vapor de agua que forman las nubes. No sabemos sin embargo por qué el suelo es negativo, ni cuál es el mecanismo que da lugar a la negatividad del suelo de la nube. El modelo de Wilson, por ejemplo, es autoconsistente en el sentido de que una vez que parte de la negatividad del suelo explica por qué el rayo vuelve a cargarle negativamente. Pero no responde a la causa de la negatividad.

### La Geometría del campo magnético terrestre

Las líneas del campo se corresponden con las que generaría un imán en forma de barra situado en el centro de la Tierra y que formara un ángulo de 12 grados con el eje geográfico norte-sur. El polo norte de la aguja magnética se reconoce porque apunta al norte geográfico, pero realmente apunta al polo sur magnético, por lo que se infiere que el polo magnético próximo al norte geográfico es el sur y viceversa.

Es interesante constatar que fue un marino y geógrafo español, Alonso de Santa Cruz cosmógrafo y piloto mayor de Carlos V quien determinó por vez primera la declinación magnética.



**Figura 11.** El campo magnético  $H$  tiene en cualquier punto de la superficie terrestre como el punto  $P$  una componente horizontal y otra vertical. La latitud magnética en el punto  $P$  es el ángulo  $POA(= \gamma)$  y la latitud geográfica es el ángulo  $POB$ .

Si el dipolo o imán equivalente situado en el centro de la Tierra estuviera orientado en la misma dirección que el eje norte-sur geográfico sería nula la declinación magnética y las latitudes geográfica y magnética coincidirían.

En la figura el ángulo  $\Psi$  es la declinación magnética. El ángulo que forma  $H$  con su componente horizontal es la inclinación magnética. En los polos magnéticos la componente de  $H$  es solo vertical por lo que la brújula, cuya aguja está en la horizontal, no encuentra ninguna dirección que la solicite y se dice que está en posición de *brújula loca* y así fue como Amundsen descubrió, en 1904, el norte magnético.

Un pequeño circuito plano con radio  $r$  y área  $S$  y recorrido por una corriente  $I$ , tiene un momento magnético  $m=IS$ , dirigido según la perpendicular al plano del circuito, y medido en amperios por metro cuadrado,  $\text{Am}^2$ . Cuando se determina el campo magnético que produce a una distancia  $R$  muy grande respecto a sus dimensiones,  $R \gg r$ , se observa que su intensidad es del orden de  $m/4\pi R^3$ . Si llamamos  $\theta$  al ángulo que forma la dirección del momento con el punto en que medimos sus efectos, la componente tangencial u horizontal de  $H$  en  $P$  viene dada por  $\frac{\mu m \cos \theta}{4\pi R^3}$  mientras que la vertical resulta  $\frac{\mu 2m \text{sen} \theta}{4\pi R^3}$ .

El campo magnético terrestre en el ecuador magnético ( $\theta=0$ ) solo tiene componente horizontal o tangencial y vale  $3.1 \cdot 10^{-5}$  Teslas o 0.31 gauss y en los polos magnéticos, donde  $\theta=90$  grados, solo existe la componente vertical vale 0.62 gauss. Si pasamos estos valores a Amperios metro menos 1 (1 gauss es aproximadamente 80 A/m) e igualamos estos valores a los dados por las fórmulas anteriores, tomando  $R = 6370 \text{ Km}$  como radio de la tierra, resulta que el valor que tiene que alcanzar  $m$  para ajustarse a los campos medidos es de  $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ . En resumen, el campo magnético terrestre actual es el que produciría un dipolo magnético situado en el centro de la tierra, formando un ángulo de 12 grados con el eje geográfico de rotación de la tierra y con un momento magnético de módulo  $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ .

El campo que produce un dipolo magnético o pequeño circuito eléctrico en puntos alejados de él es el mismo que el que crearía un imán orientado en la misma dirección que el dipolo. La dirección del momento dipolar es la perpendicular a la superficie encerrada

por el circuito y según el sentido que marca el de la corriente por la regla del sacacorchos. y la del imán la de su eje sur-norte.

### **Manifestaciones del campo terrestre y sus efectos más relevantes. ¿Qué puede producir el campo?**

Como es bien sabido el campo magnético ha servido para orientar a los navegantes desde la Edad Media con certeza y con cierta probabilidad con anterioridad. También es utilizado por aves migratorias aunque los mecanismos biológicos utilizados son motivo de investigación y discusión.

Un efecto importante del campo terrestre se deriva de la fuerza que ejerce sobre las partículas cargadas en movimiento o denominada fuerza de Lorentz. Esta fuerza que es proporcional a la carga y velocidad de la partícula incidente y a la intensidad del campo, acelera a las partículas cargadas hacia la dirección perpendicular al campo y a la velocidad. Al ser la fuerza de Lorentz perpendicular a la velocidad no es capaz de cambiar el módulo de ésta y solo produce un giro de la partícula en torno al campo. Cuando partículas altamente energéticas, como las que forman los rayos cósmicos referidos más arriba, inciden en la atmósfera comienzan a acelerarse por el campo terrestre desviándose de la tierra e impidiendo de este modo que incidan sobre su superficie. El campo magnético también genera fenómenos naturales de enorme belleza como son las auroras boreales debidas a las trayectorias de las partículas cargadas alrededor del campo, generadas por la fuerza de Lorentz, y cuyos radios son menores cuanto más intenso sea el producto de la carga de la partícula y la intensidad del campo.

El campo magnético terrestre ha resultado ser un instrumento útil en arqueología y prospección estratigráfica y, en general, geológica. Muchas rocas contienen fragmentos ferromagnéticos de distinto tamaño. Durante los procesos geodinámicos, las rocas se funden y recristalizan posteriormente al enfriarse. La fusión y posterior solidificación del magma son procesos que tienen lugar bajo la acción del campo magnético terrestre. Cuando nanopartículas o micropartículas magnéticas se encuentran en estados de muy baja viscosidad pueden girar bajo el efecto del campo orientado sus

momentos magnéticos paralelos al campo. Una vez que solidifican la imanación queda congelada y, por tanto, también queda inscrita como huella permanente, hasta una nueva fusión, la dirección del campo terrestre que actuó cuando solidificó la roca. Inversamente cuando se conoce la edad en que se formaron las rocas de un estrato se puede, a partir de la orientación de la imanación de sus fragmentos ferromagnéticos, conocer cuál era la dirección del campo en aquella fecha conocida. Estudios sistemáticos de geomagnetismo han puesto de manifiesto, por alternancia de la dirección de la imanación en estratos distribuidos a diferentes profundidades en el mismo lugar, que la polaridad del campo magnético terrestre ha variado con el tiempo e incluso ha sufrido inversiones de la polaridad, es decir inversiones de la disposición de los polos norte y sur magnéticos. Tal comportamiento implicaría que si el origen del campo fueran corrientes eléctricas estas cambiarían de sentido con el paso del tiempo.

El campo magnético terrestre varía en un punto a lo largo del tiempo con distintas frecuencia y con regularidad caótica. Hay variaciones diarias y variaciones seculares. Todos los datos experimentales sobre las fluctuaciones temporales del campo magnético, tanto de intensidad como de latitud magnética, inclinación y declinación son datos valiosísimos para poder contrastar las distintas teorías que tratan de explicar su origen. Los magnetómetros actuales y la posibilidad de medir con precisión los valores del campo en toda la atmósfera, hasta sus capas más altas serán fundamentales para resolver la cuestión más importante sobre el campo terrestre: ¿Cómo se genera?

Antes de sintetizar la explicación más plausible a día de hoy sobre el origen del campo terrestre conviene definir el origen de la dificultad intrínseca de la tarea. En electromagnetismo es relativamente sencillo calcular el valor de los campos producidos en cualquier punto del espacio por una distribución conocida de cargas y corrientes eléctricas. Basta usar las ecuaciones de Maxwell y sus integrales primeras para resolver el problema. Sin embargo, el problema inverso, que se define como el intento de calcular las posiciones e intensidades de las fuentes que producen un campo observado y medido en muchos puntos, aparte de ser mucho más complicado carece de solución única. Las fuentes del campo terrestre están con toda probabilidad en el interior del planeta, allí donde solo métodos indirectos

permiten observar la realidad material que esconde. Es posible describir el campo como si fuera el producido por un imán orientado a 12 grados del eje geográfico y con un momento magnético de  $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ , esta es una imagen sencilla de posibles fuentes. Pero todos aceptamos que la realidad será mas complicada, quien gira a ese imán o a esa corriente del dipolo equivalente, qué lo crea? El problema, pues, debe abordarse incorporando nuevas fuentes surgidas del avance de conocimiento geológico sobre el interior de la tierra, para explicar sobre esa base un sistema de corrientes que produjera un campo como el observado.

En ciertas épocas del pasado se indicaba la existencia de un núcleo terrestre rico en hierro y níquel, materiales ambos ferromagnéticos a temperatura ambiente, que podrían ser la causa del campo magnético ambiental. Hoy sabemos que independientemente de la naturaleza del núcleo, la temperatura es tan alta que ningún elemento conocido podría ser magnético. El hierro por encima de ochocientos grados centígrados deja de ser ferromagnético y el níquel lo hace por encima de 360 grados. Si existe un núcleo sólido es debido a la presión enorme, ya que la temperatura es de miles de grados.

Parece que el campo magnético terrestre tiene que ser originado por corrientes eléctricas, no por materiales magnéticos que actuaran como imanes permanentes. Estas corrientes eléctricas deberían mantenerse en medios líquidos o de baja viscosidad que permitieran a las cargas eléctricas moverse en su seno para producir corrientes eléctricas, ya que no es sencillo imaginar la existencia de conductores sólidos que forme circuitos cerrados en el interior del planeta. Del conocimiento actual del interior de la tierra sabemos que existe bajo la corteza y el manto un núcleo líquido que cubre al núcleo mas profundo y sólido. Parece pues razonable buscar en esta zona, en el núcleo líquido, algún mecanismo capaz de generar corrientes eléctricas.

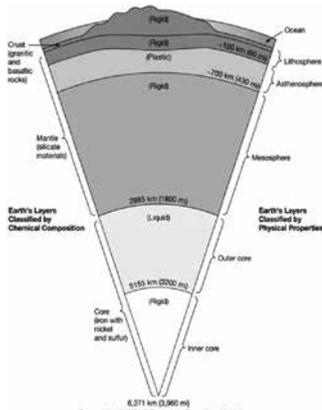
## La teoría de la geodínamo

La existencia de un mecanismo interno semejante al de una dínamo fue sugerido en 1919 por el físico J. Larmor para explicar el campo magnético solar, y parece ser el origen de todos los campos magnéticos celestes. La idea es que cualquier cuerpo cósmico que tenga un núcleo fluido y rote tendría campo magnético que al actuar sobre corrientes eléctricas inducidas por la combinación de la solidificación parcial del núcleo líquido y la rotación del conjunto produce un campo que le refuerza. Basta cualquier campo inicial para que las corrientes que se producen le refuercen y mantengan. La idea consiste en aceptar que el movimiento del fluido conductor en un campo produce corrientes inducidas que potencian el campo magnético de partida. E. Bullard en Cambridge en 1955 construyó un sistema de giro formado por un disco giratorio metálico con una bobina enrollada en su eje y dos contactos, uno con el eje y otro con el borde del disco. En 1958 Rikitake utilizó dos bobinas de Bullard acopladas y consiguió un campo dipolar y una variación caótica de la orientación de dicho campo incluyendo inversión de los polos.

La teoría de la geodínamo sería aplicable al sol, cuyo campo magnético tiene una variación regular de once años que se manifiesta por la aparición de manchas solares que son líneas de fuerza del campo magnético solar. El campo de Júpiter que tiene una intensidad de diez gauss, el de Venus que es como el creado por un dipolo en su ecuador o el de Marte que presenta unas características extrañas como la de tener imanación solo en su corteza y haber tenido un campo magnético anteriormente solo en su hemisferio sur.

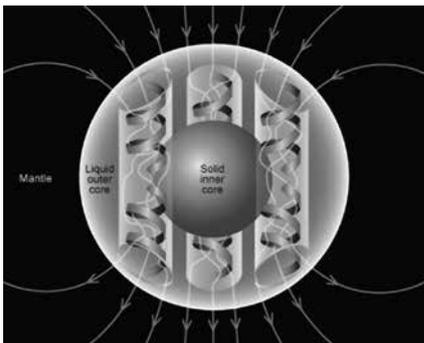
El modelo mas aceptado es que el progreso de la solidificación del núcleo deja en la interfase átomos ligeros libres que ascienden radialmente a través del fluido hacia su frontera con el manto. Durante esta trayectoria radial la fuerza de Coriolis y la del campo magnético obligan a las cargas a seguir trayectorias solenoidales que sería responsables del campo. Como es fácil comprender el tratamiento de las ecuaciones magnetohidrodinámicas que tengan en cuenta las condiciones del medio y los rozamientos del núcleo líquido con sus fronteras sólidas son de una complejidad asombrosa. En la actualidad grupos de primera

línea de física, no solo de astrofísica y geofísica, sino de plasmas y de dinámica de medios y fenómenos no lineales de las más prestigiosas universidades y centros de investigación son intensamente activos en la búsqueda de la comprensión del origen del campo terrestre en el marco de la teoría general de la geodinamo.

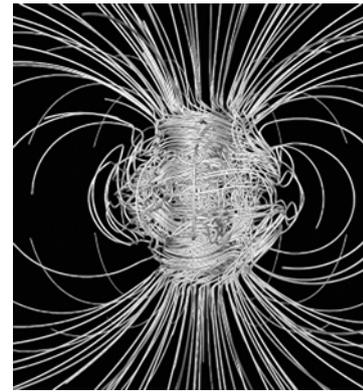


**Figura 12.** El núcleo líquido de la tierra en naranja es la zona en que puede haber corrientes capaces de generar una geodinamo. Tiene 2000Km de espesor y una densidad de 11000 Kg/m<sup>3</sup>. Está sometido a una presión de 260 GPa y a una temperatura de 5000 grados. La viscosidad del hierro es como la del agua. Las corrientes que se cree originan el efecto dínamo son debidas a un exceso de densidad de las partículas suspendidas en el fluido.

El esquema de las corrientes radiales perturbadas por Coriolis para generar trayectorias helicoidales se representa en la Figura 13.



**Figura 13.** Forma de las corrientes inducidas en el núcleo líquido.



**Figura 14.** Modelización de las líneas del campo magnético terrestre si fuera el producido por las corrientes calculadas y descritas en la Figura 14.

## CONCLUSIONES

El campo magnético terrestre y el campo eléctrico atmosférico encierran aún misterio suficiente como para dejar margen a la poesía y a la imaginación. Pero incluso el día en que la ciencia desvele los secretos del funcionamiento de ambos campos siempre permanecerán en nuestros genes que se cincelaron y mantuvieron bajo su influencia y hechizo.