

MAGNETOBIOLOGÍA: INTERACCIÓN CON CAMPOS MAGNÉTICOS

• INTRODUCCIÓN: EL CAMPO MAGNÉTICO.

Un campo eléctrico es aquel que rodea a toda carga eléctrica. La región del espacio que rodea a una carga móvil incluye un campo magnético además de un campo eléctrico. Un campo magnético también rodea a cualquier sustancia magnética.

Así, análogamente al campo eléctrico, el campo gravitacional $\mathbf{g}$ en un punto dado del espacio es la fuerza de gravedad por unidad de masa que actúa sobre una masa de prueba.

Si suponemos que no hay campo eléctrico ni gravitacional en la región de la carga, los experimentos sobre el movimiento de diversas partículas cargadas en un campo magnético brindan los siguientes resultados:

- La magnitud de la fuerza magnética es proporcional a la carga q y a la velocidad v de la partícula.
- La magnitud y dirección de la fuerza magnética depende de la velocidad de la partícula y de la magnitud y dirección del campo magnético.
- Cuando la partícula cargada se mueve paralela al vector de campo magnético, la fuerza magnética sobre la carga es cero.
- Cuando el vector velocidad forma un ángulo con el campo magnético, la fuerza magnética actúa en una dirección perpendicular tanto a $\mathbf{v}$ como a $\mathbf{B}$; es decir, $\mathbf{F}$ es perpendicular al plano formado por $\mathbf{v}$ y $\mathbf{B}$.
- La fuerza magnética sobre una carga positiva está en la dirección opuesta a la dirección de la fuerza sobre una carga negativa que se mueve en la misma dirección.
- Si el vector velocidad forma un ángulo con el campo magnético, la magnitud de la fuerza magnética es proporcional a $\sin \theta$.

Esto se puede resumir en la forma:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Para entender los estudios de los que se hablará en la continuación hay que definir algunos términos:

- Sustancias paramagnéticas: Son atraídas débilmente por un imán y prácticamente no se imantan. Ej: aluminio.
- Sustancias diamagnéticas: Son repelidas débilmente por un imán. Esto se debe a que algunos dipolos atómicos se orientan en sentido contrario al campo magnético exterior. Ej: cobre.
- Fuerza de Lorentz: $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} + e\mathbf{E}$
- Efecto Hall: Cuando un conductor que conduce corriente se pone en un campo magnético se genera un voltaje en una dirección perpendicular tanto a la corriente como al campo magnético.

• MECANISMOS DE INTERACCIÓN DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS CON SERES VIVOS.

El principal método de interacción de los campos magnéticos con los seres vivos es la magneto-orientación, en la que se funda este trabajo. Esto consiste en que la moléculas y átomos tanto de materiales diamagnéticos como para magnéticos en presencia de un campo magnético experimentan una fuerza que tiende a orientarlos en una configuración que minimiza la energía libre.

- ORIENTACIÓN MAGNÉTICA.

Los organismos se desarrollan y evolucionan en presencia del campo magnético terrestre y, por tanto, puede existir una ventaja evolutiva en poder detectar dicho campo ya que podría utilizarse, por ejemplo, para la orientación. Así, no debería ser sorprendente la existencia de muchas especies capaces de orientarse usando el campo magnético terrestre.

Se ha observado que durante los periodos de inversiones magnéticas han ocurrido extinciones en masa o especializaciones en animales. Las razones pueden ser múltiples, pero una de ellas puede ser la pérdida de referencias en animales que son capaces de detectar el campo magnético terrestre.

Se han observado estos efectos de los campos magnéticos en el comportamiento de una amplia variedad de organismos, y estos seres tienen la posibilidad de detectar el campo magnético terrestre y usar dicha capacidad para orientarse.

Para demostrar todas estas teorías se han hecho estudios en diversos grupos de animales, como veremos a continuación.

- Animales acuáticos con orientación magnética indirecta

Algunos animales acuáticos capaces de utilizar el campo magnético para orientarse, como el tiburón, la manta y la raya, aparentemente no detectan directamente el campo magnético, son sensibles a las líneas de campo magnético de una manera indirecta, a través de la detección, por medio de electroreceptores, de los campos eléctricos inducidos por la fuerza de Lorentz o efecto Hall. En el agua de mar hay disueltos iones por lo que las corrientes oceánicas implican corrientes eléctricas. Por tanto, tenemos una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético (el terrestre). La fuerza de Lorentz sobre ellas produce una separación de las cargas (efecto Hall) lo cual forma unos campos geoeléctricos que, por el ejemplo en la *Corriente del Golfo* alcanzan valores de alrededor de 0.5 microvoltios por centímetro (V/cm), equivalentes a una caída de potencial de 1 V en unos 20 km. Son estos minúsculos campos eléctricos los que son capaces de detectar los animales mencionados por medio de los electroreceptores basados en las *ampollas de Lorenzini*.

Esto fue demostrado en 1978 por el grupo de H. R. Brown.

- Orientación magnética en aves e insectos.

Basándose en el trabajo del grupo de Brown, otro grupo de investigadores (Jungerman y Rosenblum) realizó un trabajo teórico sobre la posibilidad de la existencia de un mecanismo de inducción magnética para orientarse los animales en el aire.

La evidencia de este mecanismo salió de un trabajo clásico de *Keeton* a finales de los 70 en palomas mensajeras. En dicho trabajo se colocaron pequeñas barras imantadas en la parte trasera de la cabeza de un grupo de palomas y se comparó su habilidad de volver a las jaulas del palomar con las de un grupo de control que solo llevaba barras de cobre. Cuando el cielo estaba cubierto, es decir, en un día nublado en que no se veía el Sol, la orientación de las palomas que llevaban imanes quedaba imposibilitada mientras que la del grupo de control se mantenía y era capaz de volver al palomar.

EN un paso siguiente del estudio se sustituyeron los imanes por *bobinas de Helmholtz* sujetas a las cabezas de

las palomas cuando el cielo estaba cubierto. Comprobaron que la dirección del vuelo dependía de la orientación el campo magnético generado con las bobinas. También se comprobó que las anomalías magnéticas y las tormentas magnéticas afectaban a la orientación. Trabajos posteriores mostraron que, además de tener una sensibilidad magnética las palomas podrían tener un mapa magnético. Quedó así claramente establecido que existe una orientación de las palomas a través del campo geomagnético.

Posteriormente, se comprobó que otras aves, como el petirrojo, y, en particular las aves migratorias, se orientaban también detectando el campo geomagnético. En particular, el petirrojo se orientaba a partir de la inclinación en el espacio de la dirección axial de las líneas de campo magnético.

En 1979, el grupo de C. Walcott publicó en la revista Science, un artículo que tiró por tierra la teoría de Jungerman y Rosenblum sobre el mecanismo de detección de campos magnéticos en las aves. El grupo de Walcott comprobó, diseccionando palomas con instrumentos no magnéticos que estos animales tenían material magnético en la cabeza y el cuello. La mayoría del material magnético se encontraba localizado en un tejido entre el cráneo y la dura, en una pequeña estructura de color negro situada entre el encéfalo y el cráneo. Cada paloma tenía un momento dipolar magnético remanente de 10^{-8} – 10^{-9} Am² que desaparecía a 575°C indicando que era Fe₃O₄, es decir, magnetita. Otro grupo encontró que había material genético y sensibilidad magnética en el cuello de palomas y cuervos migratorios, aunque no lo encontró en la cabeza. La sensibilidad de las aves a cambios del campo magnético puede ser tan baja como 0.1–0.2 T (el campo magnético terrestre es de 50 T).

Hoy en día se acepta que la magnetita es el sensor, pero para aclarar el mecanismo será necesario realizar estudios anatómicos muy precisos. Lo que está claro es que hay suficiente material magnético en el interior del ave como para localizar la dirección del campo geomagnético con alta precisión.

Se ha descubierto que casi todos los animales que utilizan el campo magnético terrestre para orientarse contienen partículas microscópicas de magnetita que incluso llegan a estar íntimamente relacionadas con las neuronas en los seres superiores. Aunque la pregunta se si un animal puede detectar directamente un campo magnético no puede ser contestada en el momento actual.

Se cree que el origen evolutivo de esta magnetita es la formación de depósitos minerales que son un subproducto del metabolismo animal. El hierro es un oligoelemento fundamental para la vida, que si el organismo no es capaz de eliminar se oxidará en el interior formando inclusiones de magnetita.

El caso de las abejas melíferas (*Apis mellifera*) muestra que el mecanismo del circuito conductor para explicar la orientación magnética no es posible en estos pequeños animales aéreos, puesto que no hay espacio. Pero se ha comprobado que están claramente influenciadas por los campos magnéticos ambientales, y en particular, poseen orientación magnética. Estas abejas comunican la posición de una fuente de comida a otros miembros de la colonia por medio de una danza aérea. El ángulo entre la dirección de la danza y la vertical indica el ángulo entre la fuente de comida y el Sol. Cuando el campo magnético se cancela por medio de bobinas se producen errores en el ángulo de danza y campos magnéticos débiles afectan a la dirección de la danza. También se ha comprobado que la construcción del panal tiene una orientación magnética y que el sentido del tiempo de las abejas está influenciado por las vibraciones del campo magnético terrestre.

Se demostró que las abejas aprenden a discriminar débiles anomalías magnéticas superpuestas al campo magnético terrestre de una manera muy fácil. El umbral medio de sensibilidad a pequeñas anomalías magnéticas estáticas superpuestas al campo magnético terrestre ambiental (50 T) es de alrededor de 0.25 T, es decir, una sensibilidad relativa del 0.6%. La máxima sensibilidad individual medida es de 25 nT (0.025 T), es decir, una sensibilidad relativa del 0.06%. Esta sensibilidad tan sorprendente es físicamente razonable para un sistema sensorial basado en magnetita. Una estimación del número de órganos sensoriales discretos por abeja necesarios para esta sensibilidad, basado en la medida del momento magnético, da como resultado varios millones.

Se ha comprobado que las abejas tienen partículas de magnetita en el abdomen, además de bandas de células alrededor de los segmentos abdominales que contienen numerosos gránulos ricos en hierro, que son principalmente de óxido de hierro hidratado, posible precursor del Fe_3O_4 .

EN las hormigas y mariposas se ha encontrado también magnetita y se ha demostrado que en dicho seres existe una orientación magnética. Sin embargo, no se han encontrado células nerviosas receptoras que conviertan la señal magnética en nerviosa por lo que no está muy claro como se orientan.

- Animales acuáticos con detección magnética directa.

El primer animal en el que se encontraron inclusiones de magnetita fue un molusco llamado quitón. Se encontraron en 1962, en los denticulos de los dientes (hasta 1mgr), pero parece que no la utilizan para la orientación sino que, aparentemente, es el mineral más denso y duro que puede ser sintetizado por un organismo vivo y éste animal lo utiliza para tener los dientes más duros y poder raspar así las algas presentes en algunas rocas.

En el fondo del océano se forman unas bandas magnéticas debido a las fisuras entre placas. La señal magnética de cada banda puede sumarse al campo geomagnético local, aumentando ligeramente el campo total (máximo magnético), o bien se opone al campo actual de la tierra, reduciéndolo (mínimo magnético). Estas bandas son verdaderas autopistas magnéticas. Se pueden detectar tales bandas de intensidad magnética máxima y mínima en regiones muy extensas del océano abierto.

El grupo de Joseph L. Kirsink ha demostrado que las ballenas y los delfines quedan con frecuencia varados en playas donde los mínimos magnéticos interceptan la tierra, lo que da pie a suponer que los cetáceos siguen esas rutas de migración. Estos animales también tienen magnetita en el cráneo y hay una evidencia de que nadan siguiendo las líneas del campo magnético terrestre. En el caso de las ballenas, cuando hay perturbaciones geomagnéticas, hay embarrancamientos en las costas debido a que pierden su orientación.

Estas sendas podrían proporcionar también información direccional a las tortugas migradoras. Estas tortugas encuentran playas específicas para poner los huevos que se encuentran a miles de kilómetros. Por ejemplo, la tortuga verde (*Chelonia mydas*) que se encuentra normalmente en Brasil, pone los huevos en la isla de la Ascensión en el Atlántico sur a 2000 km de distancia. Recientes experimentos usando satélites para el seguimiento de los desplazamientos muestran que frecuentemente siguen caminos en línea recta. Esta capacidad para orientarse no puede basarse en un mecanismo de aprendizaje. La tortuga hembra deposita los huevos en un agujero de la playa y retorna al mar enseguida y, desde el momento de nacer, las crías tienen la capacidad de dirigirse hacia alta mar siguiendo unas direcciones en línea recta hacia los lugares donde se alimentan. Por tanto, la capacidad de orientación debe ser innata.

Varios parámetros geomagnéticos varían de manera uniforme y predecible según la latitud: así, la inclinación de la líneas de campo magnético (ángulo con el que las líneas del campo magnético terrestre interceptan la superficie de la Tierra) y la intensidad del campo magnético en las direcciones horizontal y vertical. Cualquiera de estas magnitudes podría servir de componente en un mapa para determinar la posición con respecto a un objetivo. Se ha demostrado que las tortugas pueden detectar tanto la intensidad como la orientación del campo magnético terrestre con lo cual pueden usar un mapa magnético de dos coordenadas. Una diferencia importante entre las crías y los adultos de tortugas estriba en la capacidad de los segundos para fijar su posición con respecto al destino, esta capacidad recibe el nombre de *sentido de mapa*. –sabemos poco del sentido de mapa de los animales. Tan sólo se han investigado con profundidad en las aves.

También se ha encontrado magnetita en salmones, algunos moluscos, crustáceos, caracoles marinos, algas, gusanos, planaria, atún y marlín. Estos animales se comportan de tal forma que está claro que son capaces de captar el campo magnético terrestre y la magnetita debe ser el instrumento.

- Orientación magnética en bacterias y algas unicelulares.

La mejor y más completa documentación existente sobre la conexión entre comportamiento magnéticamente sensible y la presencia de Fe_3O_4 es para las bacterias acuáticas.

En 1975, Richard Blakemore, un microbiólogo, descubrió de forma casual en los sedimentos pantanosos unas bacterias que se desplazaban hacia un extremo de la gota de agua situada sobre la platina del microscopio. Inicialmente pensó que se movían en dirección a la luz, pero comprobó que pasaba lo mismo en ausencia de estímulo luminoso. Pronto comprobó que las bacterias se movían paralelamente a las líneas de campo magnético. Es decir, que su desplazamiento era sensible a la presencia de un campo magnético, por lo que las denominó *magnetotáticas* y al fenómeno *magnetotaxis*. Demostró que las bacterias nadaban siempre a lo largo de las líneas del campo magnético.

La demostración de que existe un material ferromagnético es el hecho de que al aplicarles un campo magnético de 0.1 T se conseguía convertir bacterias buscadoras del norte en bacterias que nadaban hacia el sur. La razón es la inversión de la polaridad del imán interior. Los análisis de microscopía electrónica y otras técnicas demostraron que en el interior de las bacterias magnetotáticas había cristales de magnetita.

El conocer la inclinación del campo magnético terrestre con respecto a la superficie les sirve a las bacterias para determinar la dirección de mayor profundidad del agua o del fango, medio en el cual viven. Hay que tener en cuenta que las bacterias magnetotáticas son anaerobias o microaerofilas, por ello encontrar la dirección de máxima profundidad (donde hay menos concentración de oxígeno) es vital para ellas. A la escala de las bacterias los movimientos del agua al azar, las corrientes de convección, la agitación térmica, etc. Son mucho más importantes que el efecto de la gravedad ya que su peso es muy pequeño. Así, el detectar la componente vertical del campo magnético terrestre es para las bacterias la mejor forma de encontrar el fondo.

Estas bacterias son muy frecuentes, encontrándose en cualquier parte del mundo y con una gran diversidad de tipos morfológicos, lo que sugiere que el fenómeno es característico de un gran número de especies bacterianas. Poseen varias partículas, de 50 nanómetros, varias partículas aproximadamente cúbicas formadas casi enteramente de magnetita pura. Esta magnetita se encuentra en el citoplasma envuelto por una membrana biológica, lo que prueba que forma parte de un orgánulo especializado. Por esta razón, se las denominó magnetosomas. Estos magnetosomas aparecen alineados formando una cadena paralela al eje de movilidad de la bacteria. Las interacciones magnéticas entre partículas de la cadena tienden a orientar sus momentos dipolares magnéticos en paralelo a lo largo del eje de la cadena. Debido a la orientación paralela de los momentos, el momento total de la bacteria es la suma de los momentos de las distintas partículas. El resultado es la formación de un dipolo magnético bastante intenso que orienta a la bacteria paralelamente a las líneas del campo magnético local. Así, la orientación de la bacteria en el agua esta determinada por el equilibrio entre la fuerza magnética y las fuerzas aleatorias que tienen su origen en el movimiento térmico de las moléculas del agua.

Los trabajos de Blackmore y Frankel han demostrado que esta configuración de los magnetosomas en hilera es totalmente singular, ya que es la única que permite la formación de un momento magnético macroscópico utilizable para orientación. En efecto, si los cubos de magnetita tuvieran un tamaño inferior (inferior a 40 nanómetros), la energía de agitación térmica impediría la formación de un paramagnetismo estable, es decir, de un imán. Si por el contrario, los magnetosomas fueran más grandes (mayores de 100 nanómetros), la cristalización espontánea de la magnetita se realizaría constituyendo dominios de diferente orientación que harían el momento magnético neto muy próximo a cero y, por tanto, o un imán muy débil o, incluso, no habría imán. La evolución parece haber seleccionado la única posibilidad de crear un imán de gran momento magnético relativo en el interior de la bacteria.

Estas hipótesis se han confirmado midiendo la velocidad de las bacterias en función del campo magnético. Así, a campos altos la velocidad era alta y el movimiento seguía perfectamente la línea del campo magnético.

A campos bajos, la agitación térmica afectaba notablemente a las bacterias: su natación se hacía más errática y la velocidad de desplazamiento en el sentido del campo disminuía.

Así las bacterias del hemisferio norte y sur son diferentes. La dirección del campo magnético que indica el fondo en el hemisferio norte es justo la contraria que en el hemisferio sur. Por dicha razón, si se lleva una colonia de bacterias magnetotácticas del hemisferio norte al hemisferio sur morirían pues confundirían el arriba con el abajo y se moverían en la dirección contraria. Para que el movimiento sea siempre hacia abajo, la dirección del momento magnético, en relación con el flagelo de la bacteria, debe ser contraria en las del hemisferio sur que en las del norte. En efecto, las bacterias halladas en el hemisferio sur geomagnético poseen un momento magnético antiparalelo a la dirección de movimiento, apuntando hacia el flagelo, mientras que las bacterias del hemisferio norte presentan una orientación del momento magnético inversa, es decir, paralelo a la dirección del movimiento.

En el caso de regiones que se encuentran en el ecuador magnético, donde la componente vertical es nula y las líneas del campo magnético terrestre son paralelas a la superficie, se encuentran los dos tipos de bacteria en igual concentración. La explicación es que el movimiento horizontal disminuye las incursiones letales hacia arriba. Es decir, ya que en esas regiones no son capaces de encontrar la vertical por medio de campo magnético terrestre, el mantenerse a una misma profundidad, moviéndose sólo horizontalmente, es una ventaja y por ello es indiferente la orientación del momento magnético.

La capacidad de sintetizar magnetita de las bacterias está codificada genéticamente, pero la polaridad no está determinada por el genoma. Cuando una bacteria son magnetosomas empieza a fabricarlos, tiene igual probabilidad de ser buscadora del norte como del sur. Sin embargo, una bacteria que ya tiene magnetosomas puede transmitir la polaridad a sus células hijas porque la cadena de magnetosomas se reparte durante la división de la célula. La célula hija hereda unos cuantos magnetosomas y cuando sintetiza nuevos magnetosomas en los extremos de la cadena heredada, estos quedan magnetizados en la misma dirección debido a su interacción con las otras partículas.

- Orientación magnética en animales terrestres.

Se ha demostrado claramente la orientación magnética en el caso de los roedores, en los cuales la magnetita se encuentra en la cavidad etmoidea en los huesos nasales. También se ha visto que en las proximidades de la magnetita hay terminaciones nerviosas por lo que se podría hablar de una función sensorial para detectar campos magnéticos. El problema de la conversión en impulso nervioso es común a todos los animales superiores que se orientan por medio de inclusiones de magnetita que se encuentran en su interior. Sobre los mecanismos de detección hay discusión en torno a tres posibilidades, pero datos y demostraciones son muy indirectas y debe hacerse un gran esfuerzo experimental en el aspecto fisiológico de conversión en impulso nervioso para que los mecanismos finales puedan ser claros.

En los monos y en el ser humano se ha encontrado magnetita tanto en la cavidad etmoidea como en otras partes. En particular, los tejidos blandos del cerebro contienen el equivalente de varios millones de magnetosomas por gramo. Esto implica que menos del 0.1 % de las células del cerebro humano contienen magnetita.

Hay experimentos sobre orientación magnética en personas ciegas pero no se ha demostrado claramente una orientación ya que los intentos de repetición del experimento han fallado por lo que la habilidad no está demostrada.

3.6. Otros casos de orientación magnética.

La salamandra cavernícola es capaz de orientarse y encontrar su camino en la oscuridad más completa. Esto se ha ido comprobando en el laboratorio por entrenamiento en laberintos con presencia de campos magnéticos de

distintas orientaciones. Puesto que las salamandras se mueven lentamente su capacidad para detectar campos magnéticos tiene que ser directa, es decir, no se puede pensar en corrientes inducidas al mover cargas eléctricas debido al movimiento de corrientes de aire pues en este caso no hay dicha posibilidad, ya que el aire no contiene una cantidad suficiente de iones como para justificar este mecanismo. Como no se ha descubierto magnetita en su interior, la solución al misterio no está clara.

En definitiva, existen órganos magnetorreceptivos en los seres vivos que tienen una gran importancia tanto en la filogenia como en la ontogenia de los mismos. Uno de los principales objetivos de la investigación biomagnética es conocer la naturaleza de los órganos magnetorreceptores y los materiales que puedan ser magnetizados permanente o inductivamente.

• PALEOMAGNETISMO

Al formarse las rocas en presencia del campo magnético terrestre, estas quedan con una orientación determinada en ciertos casos. Pues bien, el *Paleomagnetismo* es el estudio del antiguo magnetismo congelado en las rocas en el momento de su formación, que permite conocer algunos datos relativos al magnetismo existente en aquellas épocas.

Antes de que apareciera el campo magnético de la Tierra, la superficie de la misma estaba prácticamente esterilizada por la radiación cósmica de partículas de alta energía procedentes del espacio que alcanzaban la superficie de la Tierra. Después de la formación del campo magnético terrestre y de la aparición de la vida sobre la Tierra, una inversión magnética puede tener consecuencias desastrosas. En efecto, durante el proceso de inversión, el campo terrestre disminuirá y, por tanto, aumentará la radiación cósmica. Así la disminución del campo magnético terrestre puede causar que las se encontraban atrapadas por el campo geomagnético caigan a la superficie. La consecuencia es la exposición de los organismos vivos ya formados a fuertes radiaciones ionizantes las cuales serían la causa de un gran número de mutaciones. Como consecuencia, se daría origen a la formación de nuevas especies y la desaparición de otras.

Puede también ocurrir que el aumento de partículas cargadas en la parte alta de la atmósfera cause una modificación en la capa estratosférica el ozono que aumenta la radiación ultravioleta (UV) sobre la superficie terrestre. Se ha calculado que esta lluvia de partículas cargadas, principalmente protones, pueden aumentar la dosis de radiación UV un 15% y disminuir la radiación visible en la zona de 400 a 500 nm.

Así, las apariciones de nuevas especies podrían, por tanto, estar relacionadas con las inversiones del campo magnético terrestre. Actualmente se está formando un cuerpo de evidencias que lo confirman por la gran cantidad de datos que se obtienen de los fondos marinos y que indican la extinción y generación de nuevas especies relacionadas con las inversiones del campo magnético. Así, varias especies de *Radiolarios* procedentes de distintos océanos se extinguieron simultáneamente con una inversión del campo magnético terrestre y otras especies de *Foraminíferos* también se extinguieron en otra inversión. Es importante anotar que estos datos sobre extinción de especies biológicas e inversiones magnéticas son tomados del mismo estrato, por lo que estas correlaciones son precisas e indudables. Del estudio de los sedimentos marinos antárticos se comprueba que la actividad volcánica y las actividades volcánicas coinciden frecuentemente con cambios en la microfauna.

En los periodos magnéticamente estables como el Silúrico y el Carbonífero hay pocas extinciones, mientras que en el Pérmico hay un gran número de ellas. En un periodo muy estable como el Cretácico, en el que el campo terrestre permaneció sin ninguna inversión durante 35 millones de años, se acumularon la mayor cantidad de microorganismos sobre la Tierra. Con respecto al hombre, las especies generadoras como son los *Australopithecus* y el *Homo habilis*, se extinguen en el Plioceno coincidiendo con la última inversión del campo magnético terrestre.

El cambio que podría suponer una inversión del campo geomagnético en la información que algunos animales

reciben para su orientación y navegación podría ser crucial. Así, una inversión del campo magnético podría ser fatal para su supervivencia debido al cambio que se produciría en su migración. Todo ello indica que las inversiones influyen directamente en la evolución.

- BIBLIOGRAFÍA

- *Bioelectromagnetismo: Campos eléctricos y magnéticos y seres vivos*. Miguel Aguilar Gutiérrez. CSIC.
- *Física para la Ciencia y la Tecnología*. Paul a. Tipler. Ed. Reverté S.A.
- *Electricidad y magnetismo*. Serway. Ed. Mc Graw Hill.
- *Magnetic Orientation in animals*. R. Wiltschkos y W. Wiltschkos.