

Biominaerales

Édinson Muñoz C., Armando Jiménez ** & Natalia Martínez Sánchez***

Introducción

“Cada vez más materia inerte ha ido cobrando vida, literalmente, con el paso del tiempo. Buena parte de los minerales del mar están ahora incorporados en tegumentos, conchas y huesos de criaturas vivas. Nuestros propios esqueletos están hechos de fosfato cálcico, una sal que inicialmente era una molestia o un peligro para nuestros remotos ancestros; protistas marinos que al final encontraron la forma de limpiar sus tejidos aprovechándola de algún modo. Tanto la variedad como la masa de los elementos químicos presentes en los organismos han aumentado a lo largo del tiempo geológico. Mientras que todas las células requieren compuestos estructurales de hidrógeno, oxígeno, azufre, fósforo, nitrógeno y carbono, esenciales para la vida desde sus comienzos, los compuestos de silicio y calcio son relativamente recientes.”

**LYNN MARGULIS & DORIAN SAGAN
(1996)**

Los biominaerales son estructuras minerales de naturaleza biogénica generadas a partir de la actividad metabólica de los organismos. La distribución de biominaerales entre los cinco reinos de la naturaleza viviente muestra que 37 de ellos son formados por animales, diez por protistas, veinticuatro por mórneras

(bacterias y algas verdeazuladas), once por plantas vasculares y diez por hongos.

Conforman el producto de una compleja serie de eventos en los que la acción sinérgica de diversas células genera sólidos que cristalizan y crecen de un modo definido y ordenado para formar huesos, dientes, caparazones, cáscaras, perlas, corales, etc. La estructura y propiedades de estos biomateriales difieren bastante de las características que al respecto presentan los minerales y sus derivados de reacciones químicas inorgánicas.

Biominaerales más significativos

De los minerales biológicos ya identificados, en cuanto a estructura se refiere, se sabe que alrededor de un 80% son cristalinos y un 20% amorfos; el calcio constituye cerca del 50% de todo el biominaeral conocido y un 25% de él se le atribuye a los fosfatos, que parecen estar esencialmente asociados a los organismos del reino animal. También el ópalo y los óxidos de hierro presentan una amplia difusión.

* Biólogo (U de A), Magíster Bosques y Conservación Ambiental (U N, sede Medellín). Director Fundación Con Vida y Revista Ambiental ÉOLO. Representante de las Organizaciones Socio Ambientales en el Consejo Directivo de Corantioquia y en el Consejo Ambiental Metropolitano del Valle de Aburrá. edimciro@gmail.com

**Médico U Nacional; especialización en Nutrición Clínica, en la U de California, San Diego. armandojs@hotmail.com móvil 301 230 24 30

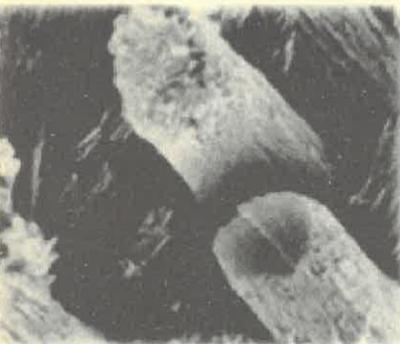
***Tecnóloga Forestal y Técnica Profesional en Manejo y Aprovechamiento de Bosques (SENA); equipo editorial ÉOLO 2008; natalia.0814@gmail.com

Tabla 1. Principales minerales producidos de manera biogénica

MINERAL	FÓRMULA	ORGANISMO	FUNCIÓN
Carbonato cálcico			
Calcita	CaCO_3	Algas trilobites	Exoesqueleto cristalino
Aragonita	CaCO_3	Peces, moluscos	Dispositivo de gravedad de exoesqueletos
Vaterita	CaCO_3	Ascidia	Espículas
Amorfo	$\text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Plantas, móneras, protozoarios	Reservas de calcio
Nota general	Presente en precipitados extracelulares de bacterias, hongos y plantas; en caparazones de amebas y foraminíferos; en corales, conchas de moluscos, esqueletos de equinodermos, esponjas calcáreas y cálculos renales.		
Fosfato cálcico			
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Vertebrados	Endoesqueletos, dientes, reservas de calcio.
Fosfato octacálcico	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$	Vertebrados	Formación de precursores en la etapa ósea.
Amorfo	?	Mejillón, vertebrados	Reserva de calcio. Formación de precursores en la etapa ósea.
Nota general	Presente en precipitados extracelulares de hongos; conchas de braquiópodos; dientes, huesos y cálculos renales de vertebrados.		
Oxalato cálcico			
Whewellita	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Plantas	Reservas de calcio
Weddelita	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Plantas	Reservas de calcio
Nota general	Presente en la angiosperma <i>Dieffenbachia</i> y en la mayoría de cálculos renales		
Sulfatos del grupo II			
Yeso	CaSO_4	Larva de medusa	Dispositivo de gravedad
Barita	BaSO_4	Algas	Dispositivo de gravedad
Celestita	SrSO_4	Acanto	Soporte celular
Óxidos de hierro			
Magnetita	Fe_3O_4	Bacterias, algún molusco	Magnetotaxia, dientes
Lepidocrocita	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Algún molusco	Dientes
Ferrihidrita	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Animales y plantas	Proteínas de almacenamiento de Fe
+ Fosfato		Animales, plantas y bacterias	Almacenamiento Fe
Nota general	Otros biominerales basados en el hierro son la greigita (Fe_3S_4 presente en los magnetosomas), siderita (FeCO_3), vivianita ($[\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ presente en precipitados extracelulares), goethita ($x\text{Fe} \cdot \text{OH}$ presente en los precipitados extracelulares y en los quitones de los animales)		
Dióxido de Silicio			
Sílice	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Algas	Exoesqueleto
Nota general	Presente en los precipitados de bacterias; caparazones de diatomeas y radiolarios, placas de mastigotos, espículas de esponjas, fitolitos de gramíneas y tallos de cola de caballo.		

Fuentes: Casas J.S. Sordo (2000); Margulis & Sagan (1966).

*Con sustitución parcial de Ca por Mg en algunos casos. **Microorganismos que tienden a nadar guiándose por las líneas del campo magnético terrestre.



Fosfatos de calcio (Fuente: www.espacial.org/planetarias/astrobiologia/)

Carbonato cálcico: Cuando se forma en sistemas biológicos, adopta, en la mayoría de los casos, estructuras de calcita y aragonita; en algunos organismos, sin embargo, se ha detectado la vaterita, un mineral polimorfo cristalino menos estable. Los biominerales formados por esta sal constituyen un soporte estructural de muchos organismos. Entre otras funciones en las que pueden participar, se destacan los pequeños cristales de calcita presentes en el oído interno, que actúan a través de la conexión con la membrana subyacente donde se sitúan las células sensoras, como un dispositivo para detectar cambios en la aceleración y contribuir así al control del equilibrio. En el reino vegetal, algunas plantas almacenan calcio depositando carbonato cálcico amorfo en sus hojas.

Fosfato cálcico: Cumple una función “plástica” (síntesis proteica) sobre todos los tejidos animales, en los que fortalece su estructura ósea (dientes y huesos) y actúa sobre las membranas celulares limitantes. El fosfato cálcico surgido de una mineralización de hidroxiapatita dentro de una matriz de colágeno y proteínas, se ve sometido a un proceso de crecimiento, disolución y remodelado continuo, de forma tal que se le puede considerar un *mineral vivo*.

Óxidos de hierro: En el caso de animales como abejas, moscas, mariposas, tortugas, salamandras, salmones, atunes, ballenas, delfines, tiburones y palomas, entre otros, los diferentes mecanismos de detección del campo magnético (magnetorrecepción) son menos conocidos y mucho más complicados que en los microorganismos. En varias de estas especies se han encontrado partículas de material magnético biomineralizado, en general magnetita, que es el óxido de hierro magnético más común en la naturaleza, con tamaños de aproximadamente cuatro a diez millonésimas de centímetro.

Entre los animales, los insectos (abejas, hormigas, avispas y termitas, entre muchos otros grupos), constituyen la clase dominante en cuanto a número de especies y biomasa. La orientación magnética en estos insectos ha sido estudiada (Vácha, 1997), y la abeja *Apis mellifera* es el insecto al cual se le han dedicado más estudios, demostrando su capacidad para detectar el campo geomagnético. La presencia de magnetita en el abdomen de esta especie de abejas ha estimulado la aplicación y el desarrollo de la hipótesis ferromagnética para explicar su magnetorrecepción (Gould et al, 1978).

Sulfuros de hierro: Se ha encontrado recientemente que ciertos tipos de bacterias presentes en contornos ricos en ión sulfuro, sintetizan para formar el mineral ferromagnético greixita; en tanto que algunas especies de estas bacterias asociadas también forman cristales de pirita. Este proceso de formación de hierro intracelular en bacterias, puede ser un ejemplo de lo que sucedió en épocas primigenias de la Tierra, cuando dominaba la química del ión sulfuro. Lo anterior evidencia que los materiales inorgánicos se formaron en diferentes contornos y fueron adaptados a funciones biológicas específicas.

Sílice: A diferencia del grado de cristalinidad que presentan los biominerales basados en el Ca (II), los fundamentados en el sílice se conocen como “sílice amorfo” e incluyen una enorme variedad de formas estructurales en las que se encuentran agregados opalinos ordenados y especies con estructuras análogas.

Casos particulares en tres diferentes reinos de la naturaleza

Biomíneralización fúngica

Formación de biomínerales en sistemas biológicos

Si bien la mayoría de los organismos no forman depósitos minerales, ha sido identificada una gran cantidad de tipos de minerales biológicos. La mineralización se realiza en función de las necesidades de cada organismo y se genera en zonas con contornos específicos donde las células realizan la deposición controlada de biomínerales.

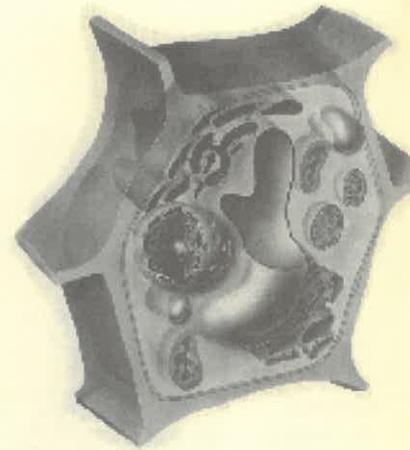
La ubicación de estos procesos generalmente puede corresponderse con: a) *Epicelular*, por ejemplo en la membrana exterior de la pared celular de las bacterias; b) *Intracelular*, en las vesículas de organismos unicelulares; c) *Intercelular*, en los espacios existentes entre las células de algas en formación de coral; d) *Extracelular*, en la matriz de colágeno. De estas posibilidades, las que se localizan en la pared celular y el interior de la célula (casos a y b), se observan en organismos unicelulares; y las que se relacionan con los espacios extracelulares (casos c y d), se presentan predominantemente en los organismos multicelulares.

Salvo en algunos casos macroscópicos, el tamaño de la zona de biomíneralización es microscópico y la zona donde se inicia la nucleación es muy pequeña, con frecuencia en la escala de los nanómetros; tal y como acontece en las regiones interfibrilares (40x3 nm) en la matriz de colágeno extracelular donde se produce la deposición inicial de fosfato cálcico.

En el caso particular de los biomínerales de oxalato de calcio han sido identificadas dos especies: whewellita, de forma monohidratada y fórmula $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; y weddellita, polihidratada, correspondiente a la fórmula $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot (2+X)\text{H}_2\text{O}$. Ambas especies minerales biogénicas resultan muy raras en ambientes geológicos pero son comunes en tejidos vegetales, animales y, —en mayor medida— fúngicos, cuyas especies, particularmente, producen biomínerales de carbonato y de oxalato de calcio (como lo señaló por primera vez Schmidt en 1847 (Horner *et al*, 1983). Desde entonces se han realizado numerosas investigaciones sobre la presencia de estos biomínerales asociados a distintos grupos de hongos.

El conocimiento construido sobre el proceso de biomíneralización fúngica, se concreta en las siguientes tres hipótesis explicativas sobre la génesis de estos materiales: La primera, plantea el origen en la naturaleza extracelular y argumenta que los cristales de oxalato de calcio resultarían de la interacción entre el ácido oxálico excretado por los hongos y el calcio disponible en el ambiente (Graustein *et al*, 1977; Cromack *et al*, 1979).

La segunda, formula la hipótesis sobre la causa intracelular y sostiene que la formación de cristales se da dentro de la hifa como resultado directo del metabolismo fúngico (Arnott 1982). La tercera, establece una visión alternativa a las anteriores, y esboza la posibilidad de que el hongo intervenga activamente en la producción de los cristales y los retenga temporalmente a través de una envoltura extraparietal (Lapeyrie 1988).



Biominales presentes en bacterias

Algunos microorganismos acuáticos, entre los que se destacan las bacterias, son magnetotácticos; es decir, tienden a nadar guiándose por las líneas del campo magnético terrestre. Tal propiedad biológica ha sido ampliamente estudiada en estas bacterias y se relaciona con la capacidad que poseen de sintetizar pequeñas cadenas de cristales de magnetita (Fe_3O_4) y/o greigita (Fe_3S_4); metabolizadas a partir del hierro que obtienen sin dificultad, en concentraciones de aproximadamente un mg/l, en los ambientes naturales donde habitan.

En el interior de las células, cada cristal está recubierto de una fina membrana que mantienen a las partículas en una posición fija; las cadenas de cristales son transportadas dentro de la estructura celular, unidas entre sí por material orgánico estable y dispuestas en cadenas paralelas al eje mayor de la célula. De este modo se constituyen las estructuras celulares conocidas como magnetosomas.

La magnetita es un óxido de hierro con propiedades magnéticas, por lo que una cadena de magnetosomas constituye una brújula biomagnética de suficiente potencia como para orientar a la bacteria, de un modo eficaz, en la dirección de las líneas de fuerza del campo geomagnético terrestre. Éste apunta hacia el Norte y hacia abajo en el hemisferio septentrional; y al Norte y hacia arriba, en el meridional. Así, las

bacterias del hemisferio septentrional nadan buscando el Norte (hacia abajo), y las del meridional buscan el Sur (también hacia abajo).

Con base en lo expuesto, se postula que la magnetotaxia bacteriana es un mecanismo para migrar hacia el fondo de las masas de agua y permanecer en los sedimentos: el campo geomagnético terrestre orienta la cadena de cristales —y, por ende, a la bacteria— en una dirección semivertical, y la bacteria se desplaza impulsada por su flagelo hacia los sedimentos. Y para aquellas que son anaerobias o microaerófilas, esta tendencia a migrar al fondo, a los lugares con menor concentración de oxígeno, constituye una ventaja evolutiva: ya que les permite localizar la situación óptima, en un gradiente vertical de concentración de O_2 , en la zona transicional oxigénica/anoxigénica en las interfaces agua-sedimento de los sustratos cenagosos y los depósitos que habitan.

Función de los Biominales en los seres humanos

Además de los biominales con funciones significativas en el conjunto de la biósfera, existen bioelementos fundamentales para el metabolismo y otras funciones fisiológicas humanas, tales como las sinapsis que subyacen al pensamiento.

En todo ser vivo, y concretamente en los seres humanos, el **metabolismo** es un proceso complejo mediante el cual el organismo interactúa con el medio ambiente para incorporar las sustancias que necesita para vivir y expeler las que ya no requiere. Este proceso comprende dos fases: **anabólica**, mediante la cual asimila los elementos o nutrientes (proteínas, hidratos de carbono, lípidos o grasas, agua, vitaminas, minerales y los oligoelementos o elementos traza) que ha tomado, y que en el caso de los

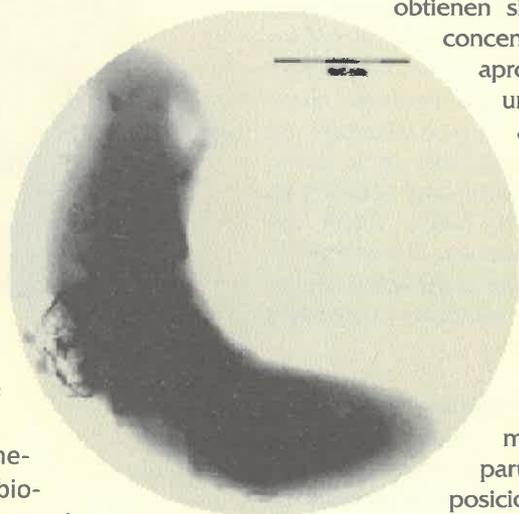


Figura 1: Ejemplar de bacteria magnetotáctica (Fuente: www.espa-cial.org/plane-tarias/astrobi-ologia/magnetotaxia)

mamíferos compromete los órganos del sistema digestivo (especialmente hígado y páncreas); y **catabólica**, mediante la cual elimina los desechos o detritus resultantes de la fase anabólica, para lo cual se aplican, en nuestro caso, los riñones, los pulmones, la piel y el último segmento del aparato digestivo.

Los estudios en animales indican que en los procesos metabólicos participan quince elementos inorgánicos: **hierro, zinc, cobre, cromo, selenio, iodo, cobalto, manganeso, níquel, molibdeno, flúor, estaño, sílice, vanadio y arsénico.**

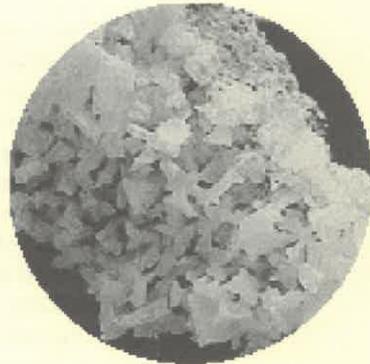
Los **elementos traza** son los inorgánicos esenciales cuyos requerimientos diarios no superan los 100 mg y son necesarios para la utilización y aprovechamiento de los macronutrientes; se absorben como sustancias inorgánicas y en los alimentos se asimilan como compuestos orgánicos. Una vez incorporados, operan en el organismo como complejos unidos a proteínas no siempre en equilibrio.

Ejemplo de esta situación es el cobre, cuya cantidad intercambiable se encuentra unida a la albúmina, en concentraciones muy bajas. La proporción no intercambiable es la mayor parte de este mineral y circula como ceruloplasmina. Por ésta y otras razones, las concentraciones de elementos traza circulantes no corresponden a los requerimientos necesarios para suplir las necesidades nutricionales diarias.

La eliminación por el tracto gastrointestinal es una característica sustancial de la mayoría de estos elementos. En consecuencia, cualquier incremento de las pérdidas digestivas puede aumentar sus requerimientos; pero, salvo el cromo, su cantidad no disminuye en caso de insuficiencia renal.

Algunos de los oligoelementos más relevantes

Zinc: Elemento ampliamente distribuido en los alimentos y el cuerpo humano. Forma parte de unas 120 enzimas (anhidrasa carbónica, carboxipeptidasa, fosfatasa alcalina, lipasa, oxireductasa, tranferasa, hidrolasa e isomerasa). Participa en el crecimiento fetal, la formación del colágeno y la elastina, la cicatrización de heridas, la locomoción intestinal y el funcionamiento de próstata y ovarios. Su insuficiencia afecta el metabolismo de ácidos nucleicos y aminoácidos (proteínas) y puede alterar la síntesis proteica y el crecimiento. El zinc se excreta a través de las heces y, en menor proporción, por la orina.

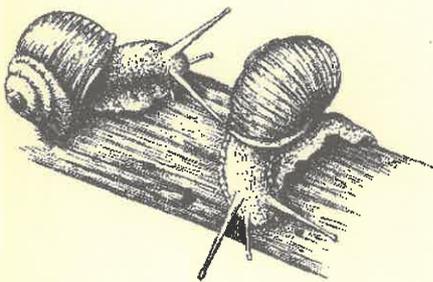


Cobre: Se encuentra en la cocoa, carnes, moluscos y legumbres. Es coenzima de enzimas como la citocromo-oxidasa y forma parte de los tejidos del cerebro, corazón, hígado y riñones.

Cromo: Se halla en la levadura de cerveza, aceite de maíz, vegetales y granos enteros. En animales se ha observado que su deficiencia produce intolerancia a la glucosa, reversible con la suplementación. *In vitro*, este oligoelemento aumenta el estímulo de la insulina para la oxidación de glucosa y la lipogénesis; en el músculo se observa un mayor efecto de la insulina sobre la glicogénesis y el transporte de aminoácidos.

El cromo se distribuye en todo el organismo y su concentración disminuye con la edad. Esta disminución se asocia con la intolerancia a la glucosa frecuente en el adulto mayor. Estudios realizados con el método *dobles ciego*, en los que se aporta cromo y placebo, han demostrado que es posible revertir la intolerancia a hidratos de carbono. Como compuesto orgánico, se absorbe alrededor del 10-25% en la dieta. Se excreta por la orina y las pérdidas aumentan cuando existe glucosuria (presencia de azúcar en la orina); un pequeño porcentaje se elimina por las heces.

Selenio: Por su acción antioxidante o de neutralización de los radicales libres, se le relaciona con la vitamina E; en muchas ocasiones, la deficiencia de uno de estos nutrientes se recupera con el suministro de la otra. Contribuye a la tonicidad de la piel. Se encuentra en el pescado (especialmente atún), carne, cebollas y vísceras (hígado, riñón, páncreas y corazón). En la sangre se localiza en el plasma y los eritrocitos. Ingresa a los tejidos para formar parte de proteínas y de la glutatión peroxidasa (GSHpx) y de aminoácidos sulfurados. Tanto las formas inorgánicas como las orgánicas se absorben en el duodeno. Los requerimientos estimados son de 54 ug/día en adultos sanos. La absorción es muy eficiente (75-100%). Una vez absorbido, se une a la albúmina y, después de ser metabolizado por los glóbulos rojos, circula asociado a las beta-lipoproteínas. Se excreta por las heces (50-60%), por orina (29-43%) y pulmones. Las pérdidas aumentan cuando existen procesos purulentos y fístulas. Pacientes con nutrición parenteral prolongada, desarrollan -con frecuencia- deficiencia de selenio, asociada con dolores musculares y cardiomiopatías.



Manganeso: Abunda en las mitocondrias (en las que se encuentran la mayoría de los 12 a 20 mg de este mineral en nuestro organismo), donde es fundamental para la super-oxi-dismutasa mitocondrial. Aunque el rol de este elemento traza no está bien definido en el ser humano, se ha observado que es significativo en la acción de la enzima glicosil-transferasa que actúa al nivel del cartílago de crecimiento en animales.

También parece ser necesario en la acción coagulante de la vitamina K. Participa en las funciones reproductivas. Su deficiencia genera náuseas, pérdida de peso y dermatitis. Se halla en los granos enteros, legumbres y algunos tipos de té y en la dieta es absorbido en tan sólo un 3-4%. Circula en el organismo unido a una beta globulina y se excreta por el intestino. Una dieta normal aporta 2-3 mg/d; y aún no se conocen con precisión sus requerimientos

Magnesio: Preserva la tonicidad de la piel. Su carencia genera irritabilidad, fatiga, calambres y palpitaciones.

Molibdeno: Se encuentra en las leguminosas, vísceras y levaduras. Se concentra en mayor grado en el hígado y los riñones. Es un componente esencial de las enzimas xantin-oxidasa (cataliza la conversión de doce oxipurinas a ácido úrico), aldehído-oxidasa y sulfidil-oxidasa, que actúa en forma similar en la conversión de sulfidrilos a sulfatos y cuya carencia se ha asociado con anomalías neurológicas. En ausencia del molibdeno, los niveles de las oxipurinas aumentan y disminuye el ácido úrico. Se ha observado que pacientes con nutrición parenteral pueden desarrollar estados de coma, reversibles con aporte de 300 ug de este mineral, cuando se les infunden soluciones de aminoácidos con una

alta concentración de sulfidrilos. Se absorbe como molibdato-hexavalente. Se excreta por la orina. Los sulfatos de la dieta y la producción endógena aumentan la eliminación urinaria. Las dietas ricas en molibdeno incrementan la excreción de cobre por orina. Sus requerimientos aún no se han establecido con exactitud. Estudios preliminares sugieren que individuos sanos mantienen el equilibrio con un aporte de 48-96 ug/día. En pacientes con pérdidas anormales se sugiere un aporte de 300 ug/día.

Para el resto de los elementos traza, como **flúor, estaño, arsénico, sílice, vanadio, cadmio y mercurio**, no se ha demostrado la importancia que tienen en la dieta del ser humano. Y algunos de ellos, como flúor, mercurio, aluminio y cadmio, son tóxicos si se ingieren en grandes concentraciones.

Para complementar la ilustración sobre la relevancia de los minerales en nuestro organismo, exponemos a continuación algunas funciones claves de otros minerales:

Sodio: Hidratación celular y excitabilidad muscular.

Potasio: Imprescindible en los intercambios intra y extra celulares.

Calcio: Componente esencial en la formación y preservación del sistema óseo y la dentadura. Fundamental en funciones neuromusculares. Su carencia genera osteoporosis. Entre sus fuente naturales se destacan los lácteos, el brócoli y la coliflor.

Hierro: Principal componente de la hemoglobina, proteína de la sangre sin la cual los glóbulos rojos no podrían transportar el oxígeno a las

células del organismo. Su deficiencia o carencia genera una modalidad de anemia.

Fósforo: Imprescindible en la formación de huesos y dientes; fundamental en la síntesis de proteínas y de la hormona ACTH (adenosín-tri-phosphato) producida en la hipófisis, que estimula las glándulas suprarrenales (situadas sobre cada uno de los riñones), que, a su vez, secretan los andrógenos, los gluco y mineralocorticoides.

Yodo: Constituyente primario de las hormonas tiroideas.



Una mirada al pasado

La biomineralización da cuenta de un complejo fenómeno que ha modificado los ciclos biogeoquímicos en la Tierra; permite registrar la historia de la biósfera y constituye uno de los fundamentos de la vida y su evolución.

Hace unos 570 millones de años —MA—, se registra de forma casi simultánea, la presencia de numerosos grupos de organismos que desarrollaron la capacidad de producir tejidos duros (mineralizados) y por lo tanto susceptibles de fosilización. Los paleontólogos han denominado al período de tiempo que va desde ese momento hasta la actualidad *Fanerozoico*, que significa “animal visible”, para diferenciarlo del período anterior (Precámbrico) en el que la presencia de fósiles es muy escasa.

No obstante, la historia de la biomineralización se extiende mucho más atrás de este período. Los fósiles más antiguos hasta ahora conocidos son los estromatolitos, con una edad de 3500 MA (300 MA más recientes que las primeras rocas). Éstos conforman estructuras laminares de acreción formados por actividad fotosintética de cianobacterias y otros microorganismos. El consumo de dióxido de carbono en la fotosíntesis produce la precipitación del carbonato cálcico que queda englobado junto a partículas de sedimento y el mucílago de las colonias de bacterias.

Otros depósitos minerales asociados a la actividad fotosintética de los microorganismos son las formaciones de hierro bandeado, resultado de la oxidación del hierro presente en los océanos (3800-1800 MA). También existen depósitos minerales de azufre y manganeso con más de 2500 MA producidos por la actividad biológica de bacterias reductoras. Estas mineralizaciones son inducidas biológicamente, consecuencia indirecta de un proceso metabólico que tiene como resultado la eliminación o

liberación de determinados compuestos inorgánicos al medio.

Tuvieron que pasar aún centenares de millones de años para producirse la gran revolución biológica que marca el inicio del Fanerozoico (límite entre el Precámbrico y el Cámbrico, hace unos 570 MA): la llamada *Explosión del Cámbrico*, con la que se asocia uno de los hitos capitales en la evolución de la vida: el devenir del fenómeno de la biomineralización hacia la formación de esqueletos: poríferos, braquiópodos, moluscos, artrópodos, equinodermos y vertebrados.

Posterior a este período, ha resurgido en pocos grupos de seres vivientes la capacidad de controlar la mineralización. Llama la atención que desde ese momento los organismos utilicen los minerales que constituyen la mayor parte de las estructuras esqueléticas.



A modo de conclusión

La posibilidad de generar nuevos materiales y procesos a partir de biominerales multiplica las posibilidades de desarrollo en todos los campos del quehacer humano, con un impacto sobresaliente en medicina, geología, arquitectura, ingeniería, obras civiles, cristalografía y restauración ambiental; entre una miríada de aplicaciones posibles.

Si bien el estudio de estos temas se encuentra aún en ciernes, se puede visualizar ya un impacto en la técnica y la tecnología del presente y el futuro.

La relevancia de los biominerales se aprecia en las entidades biológicas, cuyos organismos y componentes presentan estas estructuras y les confieren propiedades que hasta ahora no han sido replicadas por la técnica humana.

Los biominerales hacen parte de nuestra cotidianidad, y con ellos acontece lo mismo que con muchos otros elementos que la conforman: sólo apreciamos su importancia cuando desaparecen. En el caso de los elementos traza, la carencia revela su carácter imprescindible.

Bibliografía

CASAS J.S., J. SORDO, *Aspectos básicos de biomineralización*, Universidad de Santiago de Compostela. Revista Galega do Ensino, N° 29 – Novembro 2000.

ESTEBAN D., Francisco. *Caracterización microestructural y cristalográfica de la concha prismatofoliada de pectinoidea, anomioidea y ostreoidea (Pteriomorpha: Bivalvia). Implicaciones Evolutivas*. Tesis Doctoral. Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 2006.

MARGULIS, LYNN & DORIAN SAGAN. *¿Qué es la Vida?* Prólogo de Niles Eldredge. Colección Metatemas. Traducción: Ambrosio García. 1996. Primera edición en inglés: 1995.

Enlaces de internet:

Efecto del campo geomagnético en insectos:

<http://bio.infodj.com/articulos/Efecto-Campo-geomagnetico.html>.

<http://alquimicos.blogspot.com/2007/05/biominerales-hasta-en-el-desayuno.html>

<http://cabierta-uchile-cl/revista/22/articulos/>

www.espacial.org/planetarias/astrobiologia/magnetotaxia

