



BIOMINERALES DEL CUERPO HUMANO: PROPUESTA INTERDISCIPLINAR PARA LA BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE BACHILLERATO

Human body biominerals: Interdisciplinary proposal for the Biology and Geology in High School

Omid Fesharaki^{1*}, Irene Taboada-Trujols² y Nuria Sánchez-Pastor³

¹ Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. Calle José Antonio Novais 12, 28040, Madrid. *omidfesh@ucm.es

² PINNOVA-Docencia Geodivulgar: Geología y Sociedad. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Calle José Antonio Novais 12, 28040, Madrid. irenetaboada@ucm.es

³ Departamento de Petrología y Mineralogía, Universidad Complutense de Madrid. Calle José Antonio Novais 12, 28040, Madrid. nsanchez@geo.ucm.es

Abstract: Competency-based learning have been proved to be an effective learning method characterized by developing and applying specific skills that can then be used to obtain the required knowledge. Thus, the process of teaching and learning should be undertaken by combining active-learning and collaboration to help to retain the knowledge. Therefore, a multidisciplinary vision in which each professional contribute with a specific topic would be necessary. Few topics of the Earth and Life Sciences, taught in Spanish education, show the interrelations between Geology and Biology. On the other hand, Spanish students generally value Biology better than Geology, due to the combination of many factors such as the little presence of Geology in the curricula, the scarce relationship between these two sciences, the extremely theoretical classes or the greater knowledge that students have of job opportunities in the field of Biology. In this paper we revise the curricula of Spanish Bachelors degree (students from 16 to 18 years old) to find issues that can present an interdisciplinary vision related to Crystallography and Mineralogy, in which current learning is non integrated nor motivating as many studies show. We propose some contents that can be included in relation to the human body biominerals (bones, teeth, ...), their mineralogical characteristics and their anatomical and physiological functions. The main objectives are to use the good valuation of anatomical topics to introduce lesser-known concepts of Crystallography and Mineralogy, and at the same time to motivate the students to study and value these Geology fields emphasizing their importance in emerging research fields and new work opportunities such as Medical Geology.

Keywords: Geology didactics, Crystallography, Curriculum, High School, Mineralization.

Resumen: Pocos aspectos de las Ciencias de la Tierra y la vida, impartidos en Bachillerato, muestran las interrelaciones entre la Geología y la Biología. Además, los estudiantes españoles valoran, en general, mejor la Biología que la Geología, por la concurrencia de diversos factores como el desconocimiento de la Geología por su menor carga lectiva, los temarios excesivamente teóricos de esta, la escasa relación entre ambas ciencias o el mejor conocimiento que tienen de las salidas laborales de la Biología. En este trabajo revisamos el currículo estatal de Bachillerato para encontrar los bloques en los que es posible introducir una visión interdisciplinaria relacionada con la Cristalografía y la Mineralogía, cuya enseñanza actual es poco integrada y motivadora como muestran diversos estudios. Proponemos diversos contenidos que se podrían abordar en las programaciones de aula relacionando los biominerales del cuerpo humano (huesos, dientes, etc.) y sus características mineralógicas y cristalográficas con su función anatómica y fisiológica. Los objetivos son, por una parte, utilizar la buena valoración de cuestiones sobre anatomía para introducir conceptos de Mineralogía menos conocidos y, por otra, motivar al alumnado por su estudio y valoración mostrando la importancia de estos en investigaciones y salidas laborales emergentes como la Geología Médica.

Palabras clave: Didáctica de la Geología, Cristalografía, Currículo, Bachillerato, Mineralización.

Fesharaki, O., Taboada-Trujols, I., Sánchez-Pastor, N., 2019. Biominerales del cuerpo humano: propuesta interdisciplinaria para la Biología y Geología de Bachillerato. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (1): 63-76.

Introducción y marco teórico

El actual Sistema Educativo español, de forma general, presenta poca integración de los contenidos de las diferentes materias que se imparten en cada curso. Este hecho se agrava en cursos preuniversitarios, especialmente en las asignaturas de Ciencias, que no presentan la suficiente interrelación como para permitir a los alumnos la adquisición de un conocimiento integrado. Así la mayoría de las unidades didácticas en las que actualmente están divididos los libros de texto y las programaciones de Biología y Geología que desarrollan los currículos de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato no fomentan esta visión interdisciplinar. Incluso asignaturas que nacieron, en parte, para cumplir con esta misión (Anguita, 1994), como las “Ciencias de la Tierra y Medioambientales” de 2º de Bachillerato, no han sabido, en general, generar la integración entre las ramas de las Ciencias Naturales y por extensión entre las diferentes ciencias que sustentan sus diferentes unidades (Pascual Trillo, 1998). Sin embargo, la mayor parte de los problemas que surgen en relación con el medio natural no tienen una solución única que provenga de una única rama de las ciencias y se hace imprescindible la colaboración entre los profesionales de los diferentes campos del saber científico. Esta colaboración se antoja complicada si no existen unos conocimientos básicos y globales sobre todas estas ciencias. Por lo tanto, consideramos importante realizar propuestas que integren diferentes temáticas que pertenezcan a los ámbitos de la Geología, la Biología, la Química y otras ciencias y que permitan al alumno valorar la importancia de un conocimiento global y le motiven por el trabajo en equipos multidisciplinares. Gimeno Sacristán (2005) propone “organizar globalizadamente los contenidos en unidades complejas que exijan la coordinación de profesores y la docencia en equipo”, y esta sería también la propuesta de uno de los sistemas educativos más elogiados en las últimas décadas, el finlandés, que desde el curso 2016-2017 suprime las asignaturas, por el momento en la Educación Primaria, e impone que los conocimientos se impartan de una forma integrada en grandes bloques temáticos (Niemi *et al.*, 2016).

Además, el aprendizaje basado en competencias, que es el que predomina en las propuestas curriculares actuales, se caracteriza por su carácter integral y transversal. Por lo tanto, el proceso de enseñanza-aprendizaje debe emprenderse desde diferentes áreas de conocimiento, e incluso debe superar los ámbitos formales y llegar a los no formales. Esto es así, ya que las competencias no se pueden adquirir en un determinado momento, sino que conllevan un proceso más lento en el que cada estudiante va adquiriendo los conocimientos (conceptos), habilidades (procedimientos) y valores e intereses (actitudes) según se van reforzando estos en múltiples actividades desde todos los ámbitos. Por lo tanto, será necesaria una visión multidisciplinar en la que cada especialista (por ejemplo: biólogo, geólogo, pedagogo, etc.) aporte sus conocimientos sobre cada tema concreto.

Datos preliminares de una serie de encuestas realizadas por Fesharaki (2016) muestran que la mayoría de los alumnos de ESO y Bachillerato encuestados se sienten más motivado por la Biología y la considera más útil que la Geología para su futuro. En cuanto a las diferentes ramas de esta última, las que más motivan a los estudiantes son similares a las que creen que van a tener más salidas laborales, destacando claramente el medioambiente y los riesgos geológicos, quedando mal valoradas otras como, por ejemplo, los recursos minerales. Esta característica ya ha sido destacada por Giné (2009) que indica que los alumnos suelen tener una mayor motivación por aquello que creen más útil o con más aplicaciones y salidas laborales. Los trabajos de Romero-Nieto *et al.* (2014a, b) indagan en las razones de los bajos conocimientos paleontológicos y proponen actividades didácticas para mejorar las nociones que tienen los estudiantes en este campo que, por otra parte, es muy valorado como ocio por parte de los mismos alumnos encuestados, algo que parece ser común también a nivel europeo (Fermeli *et al.*, 2015). Sin embargo, este caso parece más relacionado con la mayor presencia de la Paleontología en los medios (películas, libros e incluso reclamos comerciales en forma de juguetes, pegatinas, etc.).

Diversos factores han relegado la Geología a un segundo plano frente a la Biología tras las múltiples leyes de Educación que se han sucedido en España (Pedrinaci, 2012; Pascual Trillo, 2017). Además de la baja interrelación entre la Biología y la Geología como principales componentes de las Ciencias Naturales, otros factores como las propuestas curriculares excesivamente amplias y en las que se favorecen los contenidos biológicos, un tratamiento extremadamente teórico de la Geología en los libros de texto, contenidos poco contextualizados, los menores conocimientos didácticos del profesorado sobre temas de Geología, su menor presencia en los medios y peor conocimiento social, han sido decisivos en este hecho (Del Toro y Morcillo, 2011; Calonge, 2013; entre otros). Sin embargo, la Geología es una ciencia global y que con unos planteamientos adecuados puede ser un elemento integrador de las ciencias básicas. En el área de las Ciencias Naturales, diversos autores han realizado trabajos de índole multidisciplinar e interdisciplinar, por ejemplo, en relación con el origen de la vida y la aportación del medio químico y mineral a ese origen (Casado *et al.*, 2011) o relacionando efectos medioambientales con las labores mineras tanto históricas como actuales (Oliás y Nieto, 2012). Sorauf (2005) y Boskey (2007) consideran la biomineralización como uno de los tópicos que debe ser valorado como nexo de unión entre ciencias como la Paleontología (que estudia los restos fosilizados de dientes, huesos, conchas, etc.), la Mineralogía (que ayuda a comprender cómo los materiales mineralizados constituyeron vías para descifrar microestructuras complejas o los cambios diagenéticos que han ocurrido en los fósiles) y la Biología (que estudia la fisiología, funciones vitales, etc. de los seres vivos que produjeron esos biominerales). Finalmente, la Geología Médica, es una rama emergente de la Geología que rela-

ción factores geológicos con la salud humana y la distribución geográfica de patologías relacionadas con factores ambientales. Esta es una ciencia multidisciplinar que aúna conceptos y métodos de ciencias como Mineralogía, Biología, Ciencias Ambientales, Geografía o Medicina (Sahai *et al.*, 2006).

De entre todas las posibilidades de unidades interdisciplinarias que encontramos con solo hojear los currículos oficiales, en el presente artículo se hace una propuesta concreta de un “tema puente” entre contenidos biológicos (fisiología y patologías humanas) y contenidos geológicos (procesos de mineralización, estructura y cristalografía mineral y estabilidad mineral, entre otros). En los actuales currículos de materias científicas de ESO y Bachillerato la promoción de la salud, la anatomía y fisiología humana, la inmunología y la bioquímica son ampliamente tratados y son, en general, bien conocidos y valorados por los estudiantes. Por esta razón, se puede aprovechar esta predisposición positiva del alumnado para introducir conceptos de Cristalografía y Mineralogía menos conocidos, y por lo general, peor valorados por estos. La implementación de unidades interdisciplinarias se puede realizar para todas las etapas educativas y tiene una gran importancia para las competencias básicas de cada una de estas etapas. Sin embargo, en este trabajo se ha optado por centrar la revisión curricular en el Bachillerato y realizar una propuesta que pueda servir como punto de partida en el tratamiento de temas de Mineralogía y Cristalografía en programaciones de aula. Esta elección responde a dos hechos principales. Por una parte, son cursos decisivos para la elección de los futuros estudios universitarios que realizarán los estudiantes y, por lo tanto, es vital que conozcan, entiendan y valoren la importancia de la Geología y sus diferentes ramas para la sociedad, así como para las posibilidades profesionales y laborales posteriores que puede abrir el conocimiento de estas ciencias. Por otra parte, tras superar la ESO, es esperable que los alumnos hayan aprendido una serie de conceptos y adquirido habilidades y actitudes básicas relacionadas con la Biología y la Geología que faciliten la introducción de conceptos algo más complejos en unidades interdisciplinarias durante el Bachillerato.

El principal objetivo de este trabajo es servir como un documento de apoyo para profesores de la materia Biología y Geología de Bachillerato para la preparación de clases alternativas o complementarias (por ejemplo en el tratamiento de la diversidad para ampliar unidades didácticas dirigidas a alumnos superdotados) a las habituales, con una visión interdisciplinar que relacione conceptos de Geología (Mineralogía y Cristalografía) con otros biológicos (Anatomía y Fisiología) y químicos. Para poder realizar esta propuesta, primero se exponen de una forma somera algunas características del actual currículo de Bachillerato a nivel estatal y se seleccionan posibles bloques de esta materia en las que se podría introducir la propuesta que se hace. Posteriormente, para mostrar la viabilidad de una enseñanza interdisciplinar, se desarrolla el tema de los biominera-

les del cuerpo humano, mediante el ejemplo de los huesos y los dientes que relacionan conceptos de Cristalografía y Mineralogía con otros de Fisiología y Anatomía humana.

Análisis del Currículo

La Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la Mejora de la Calidad Educativa (LOMCE: BOE número 295, de 10 de diciembre de 2013) expone en varios puntos de su preámbulo, en algunos artículos y disposiciones, la importancia de una enseñanza integrada e interdisciplinar. Se exponen a continuación algunas frases que reflejan esto:

“Una sociedad más abierta, global y participativa demanda nuevos perfiles ciudadanos y trabajadores, más sofisticados y diversificados, de igual manera que exige maneras alternativas de organización y gestión en las que primen la colaboración y el trabajo en equipo, así como propuestas capaces de asumir que la verdadera fortaleza está en la mezcla de competencias y conocimientos diversos” (preámbulo IV); “La revisión curricular que suceda a la aprobación de la ley orgánica deberá tener muy en cuenta las necesidades de aprendizaje vinculadas a los acelerados cambios sociales y económicos que estamos viviendo. Las claves de este proceso de cambio curricular son favorecer una visión interdisciplinar [...] teniendo en cuenta el principio de especialización del profesorado” (preámbulo IX); “El currículo estará integrado por los siguientes elementos: a) [...], b) Las competencias, o capacidades de aplicar de forma integrada los contenidos propios de cada enseñanza y etapa educativa, con el fin de lograr la realización adecuada de actividades y la resolución eficaz de problemas complejos, c) [...]” (Capítulo III, artículo 6: Currículo), etc.

Con esta perspectiva se ha revisado el Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato (BOE número 3, de 3 de enero de 2015). De nuevo en este documento se encuentran varias referencias al carácter integrador e interdisciplinar que debe primar en estas etapas: “El aprendizaje basado en competencias se caracteriza por su transversalidad, su dinamismo y su carácter integral. El proceso de enseñanza-aprendizaje competencial debe abordarse desde todas las áreas de conocimiento [...]”; “Para lograr este proceso de cambio curricular es preciso favorecer una visión interdisciplinar y, de manera especial, posibilitar una mayor autonomía de la función docente [...]”; etc.

Avanzando en la lectura de este documento, el capítulo III sobre las enseñanzas de Bachillerato expone en el artículo 25 los objetivos del Bachillerato, de los que destacan dos en relación con este trabajo: “comprender elementos y procedimientos fundamentales de la investigación y de los métodos científicos. Conocer y valorar de forma crítica la contribución de la ciencia y la tecnología en el cambio de las condiciones de vida, así como afianzar la sensibilidad y el respeto hacia el medio ambiente”. De nuevo, aunque no de forma ex-

Bloque	Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
3 (Histología)	Principales tejidos animales: estructura, función y relación entre la parte orgánica y la inorgánica. <i>Conceptos de Biomineral, biomineralización y sus tipos.</i>	Reconocer la estructura y composición de los tejidos animales relacionándolos con las funciones que realizan; <i>relacionar las funciones de las células óseas, el metabolismo y las variaciones (cristalográficas o mineralógicas) de las fases inorgánicas con algunas patologías óseas; conocer los biominales funcionales (huesos, dientes y otolitos) y sus principales características mineralógicas y cristalográficas; conocer algunos métodos de caracterización de las fases inorgánicas de los tejidos; asociar imágenes microscópicas con el tejido al que pertenecen.</i>	Relaciona tejidos animales con sus células características, asociando a cada una de ellas la función que realiza; <i>conoce los principales biominales del cuerpo humano; describe las funciones de los principales biominales en relación con sus características cristalográficas y mineralógicas usando terminología científica; relaciona imágenes microscópicas con el tejido al que pertenecen; valora el estudio cristalográfico y mineralógico de huesos con patologías como una importante fuente de información y de aplicaciones médicas.</i>
6 (Los animales: sus funciones y adaptaciones al medio)	Funciones de nutrición en los animales. Aplicaciones y experiencias prácticas. <i>Los biominales como componentes del aparato masticador.</i>	Diferenciar la estructura y función de los órganos del aparato digestivo; <i>conocer los principales biominales patológicos, sus características composicionales (fosfatos, carbonatos y oxalatos) y su relación con los órganos que intervienen en la nutrición; realizar experiencias de fisiología animal incidiendo en la relación entre partes mineralizadas y partes orgánicas.</i>	Relaciona cada órgano del aparato digestivo con las funciones que realiza; <i>conoce los principales biominales distinguiendo algunas patologías y la composición de los biominales asociados a éstas; valora la importancia del estudio de la parte orgánica e inorgánica para una comprensión completa del tejido; realiza experiencias de fisiología animal.</i>
7 (Estructura y composición de la Tierra)	<i>Conceptos de Cristal, cristalización, Mineral y Roca. La estructura interna. Experiencias de cristalización y cristalización inducida o controlada por organismos. Estabilidad y transformación mineral.</i>	Seleccionar e identificar los minerales y rocas más frecuentes [...] de interés social o industrial; <i>diferenciar entre los conceptos de cristal, mineral, biomineral y roca; conocer los conceptos de estabilidad y transformación mineral y usar diagramas de fases sencillos; conocer las principales causas de las transformaciones minerales.</i>	Identifica las aplicaciones de interés social o industrial de determinados tipos de minerales y rocas; <i>diferencia los conceptos de cristal, mineral y roca; conoce los biominales más frecuentes en el cuerpo humano y su interés aplicado en medicina o farmacia; comprende que los cristales y minerales no son estáticos y que pueden formarse, crecer, transformarse o disolverse en relación con las condiciones del medio.</i>
9 (Historia de la Tierra)	(No se mencionan los fósiles) <i>La Paleontología como ciencia interdisciplinar. Proceso de fosilización y tipos de fósiles. Importancia evolutiva de esqueletos internos y externos mineralizados y relación con su mayor representatividad en el registro geológico.</i>	Interpretar el proceso de fosilización y los cambios que se producen; <i>valorar los biominales como los elementos que mejor fosilizan; conocer los principales cambios que se producen en los biominales (esqueletos, conchas,...) tras la muerte del organismo; valorar la aparición de partes mineralizadas como hito evolutivo y su relación con la preservación en el registro y los datos bio-geológicos que proporcionan.</i>	(No se menciona explícitamente la fosilización) <i>Comprende el proceso de fosilización y los cambios que se producen en la composición y textura de los restos fósiles; comprende que el registro paleontológico no es completo y la importancia de las partes mineralizadas para su preservación; valora la importancia evolutiva de la aparición de partes mineralizadas; conoce algunos ejemplos de datos bio-geológicos que proporcionan los fósiles.</i>

Tabla 1.- Bloques de Biología y Geología de 1º de Bachillerato seleccionados por su interés para la propuesta que se hace en este trabajo. Se incluyen los contenidos, criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables que se indican en la LOMCE (BOE número 295, de 10 de diciembre de 2013). En cursiva se indican posibles contenidos relacionados con la Mineralogía, así como los criterios y estándares para su evaluación que podrían ser tratados en estos bloques.

pública, se muestra una visión interdisciplinar e integrada, ya que, como se ha comentado en la introducción, tanto en el mundo de la investigación científica como en el laboral, es muy complicado resolver un problema sin tener en cuenta las aportaciones de diversas ciencias. Además, esta temática está en clara relación con cuestiones que afectan a la salud y condiciones de vida de los ciudadanos, y su tratamiento didáctico puede mostrar la importancia de algunos campos de la Geología que los alumnos no consideran como los propios de esta ciencia.

Se ha elegido la materia Biología y Geología de 1º curso de Bachillerato (materia de opción del bloque de asignaturas troncales) para la revisión y propuesta (Tabla 1). En esta materia, como la predecesora inmediata de la materia Geología (2º curso de Bachillerato), es importante que los alumnos reciban una información geológica motivadora, que les permita apreciar la importancia social de esta ciencia y sus aportaciones a otras ciencias, como la Biología o la Medicina, y sus posibles salidas laborales. Así, una vez que tengan que elegir las materias optativas de 2º curso no tendrán el actual desconocimiento o rechazo hacia la Geología.

Dado que el 2º curso de Bachillerato está fuertemente condicionado por un amplio temario y la presión de las pruebas de acceso a la Universidad, parece complicado introducir otras visiones a nivel de centro o aula por iniciativa de los docentes, por lo que esta labor sería más propia de las administraciones a través de cambios curriculares. Sin embargo, en las materias de este curso, tal vez a modo de información complementaria se podrían comentar algunas relaciones entre cada aspecto tratado con lo que aportan otras ciencias a ese conocimiento. Por ejemplo, en el tema que nos ocupa en este trabajo, en Biología se podrían citar la importancia de las características mineralógicas y cristalográficas de los biominerales del cuerpo humano al influir en las características anatómicas y fisiológicas. Así, determinadas enfermedades óseas o disfunciones del esqueleto están directamente relacionadas con problemas de excesiva o deficiente mineralización o con problemas en la relación entre los cristales inorgánicos y la materia orgánica que los rodea. En cuanto a las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente o la Geología, se podría usar la distribución de los diferentes tipos de rocas y su relación con la composición de las aguas de consumo, que en ocasiones pueden influir de forma decisiva en riesgos para la salud relacionados con los biominerales, como es el caso de la fluorosis esquelética o la mayor predisposición de los habitantes de ciertos lugares a desarrollar cálculos renales a causa de las grandes concentraciones de determinadas sales disueltas en sus aguas de consumo.

A pesar de las numerosas veces que se señalan la integración de conocimientos o la interdisciplinariedad en el currículo, estos no se traducen en unos criterios de evaluación o estándares de aprendizaje evaluables que muestren claramente esa interrelación entre la Geología y la Biología (Tabla 1). De hecho tampoco hay una destacable integración entre los diferentes conocimientos que aportan las diferentes ramas dentro de la Biología o de la Geología. Solo en contados epígrafes, como en el bloque 4 de la asignatura de Biología y Geología “la biodiversidad”, se puede ver esta interrelación en el currículo, por ejemplo, cuando se considera el contenido “factores que influyen en la distribución de los seres vivos: geológicos y biológicos” o su estándar de aprendizaje “relaciona la latitud, la altitud, la continentalidad, la insularidad y las barreras orogénicas y marinas con la distribución de las especies”.

La Tabla 1 recoge algunos de los contenidos mínimos, criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables de varios bloques seleccionados que se prescriben a nivel estatal para la asignatura Biología y Geología. En la misma tabla, a modo de propuesta, se indican conceptos o estándares de aprendizaje más interdisciplinares que se podrían ofrecer. En esta materia no se nombran explícitamente los procesos de cristalización, los factores que afectan a la cristalización o el propio concepto de cristal, siendo para esta etapa básico comprender que los minerales se caracterizan por su estructura interna organizada formando cristales para evitar errores conceptuales como los indicados por Durán y Puigcerver (2017). Estos autores detectaron que el término “inorgánico” de la definición de mineral no era usado correctamente por los estudiantes. La implementación conjunta de actividades sobre los biomi-

nerales y prácticas de cristalización en el laboratorio podría ser un buen complemento para clarificar este término. De forma implícita puede deducirse, y cabe esperar que los docentes expliquen estos conceptos en relación con los bloques 7 (Estructura y composición de la Tierra) u 8 (Los procesos geológicos y petrogenéticos). Otra característica curiosa es que ni en los contenidos ni en los estándares del bloque 9 (Historia de la Tierra) aparece alusión alguna al concepto de fósil o a los cambios químicos que se generan durante el proceso de fosilización, por ejemplo, en la composición de huesos o dientes; sin embargo, sí aparece en los criterios de evaluación. En todo caso, los bloques 3, 6, 7 y 9 podrían recoger los conceptos que se indican en la tabla y describen en los próximos apartados para introducir en esta materia la Cristalografía y la Mineralogía. Los profesores de esta asignatura pueden plantear esta labor como un complemento a uno o varios de estos bloques en sus programaciones de aula.

Para facilitar la labor del docente en su programación de aula el próximo apartado organiza y relaciona aspectos de Mineralogía y Cristalografía con otros de Anatomía y Fisiología humana. Además, se indican otras ciencias que se ven involucradas en este aprendizaje interdisciplinar. No es objeto de este trabajo, ni hay espacio para ello, secuenciar o explicar detalladamente cada fase de una posible propuesta didáctica, ni una metodología o actividades concretas, que quedan abiertas a las condiciones de cada aula y las propuestas que cada docente considere más oportunas para el grupo de alumnos a los que vaya dirigida.

Biominerales del cuerpo humano: ejemplo de una temática interdisciplinar

Generalidades sobre los biominerales

Hasta el momento se han distinguido más de 64 especies de 12 grupos minerales presentes en las biomineralizaciones de los seres vivos (Dove, 2010). De estos, solo tres grupos están realmente presentes en el cuerpo humano: los fosfatos, los carbonatos y los oxalatos (Tabla 2). Las estructuras biomineralizadas (como conchas o huesos), constituidas por minerales y compuestos orgánicos generalmente de tamaño nanométrico, presentan una naturaleza biocompuesta. En la mayoría de los casos la estructura base puede ser fibrilar, como en algunos huesos y en la dentina, o multi-laminar, como en el caso de algunos huesos y diversos tipos de cálculos renales y biliares (Skinner, 2005). La Biomineralización se define como el conjunto de los procesos fisiológicos y moleculares, por los cuales los seres vivos sintetizan minerales cristalinos o amorfos a partir de soluciones acuosas que contienen iones inorgánicos (“precursores”) y una gran cantidad de macromoléculas y metabolitos (Marín *et al.*, 2014).

Hay dos tipos de biomineralización conocidos: la mineralización inducida biológicamente, que resulta de los efectos de la actividad biológica en microambientes contiguos, y la mineralización controlada biológicamente, donde las células de los organismos inician la nucleación, intervienen en el crecimiento, y determinan la forma y posición final de la materia mineral (Weiner y Dove, 2003). La relación entre la parte

orgánica e inorgánica es el factor estructural determinante para que los biominales puedan desarrollar diferentes funciones biológicas (soporte estructural, corte y machacado, sensores de gravedad, etc.; Dove, 2010). La biomineralización en los seres humanos puede ser funcional (huesos, dientes y otolitos) o patológica (litiasis).

Los objetivos básicos de la propuesta

Los objetivos mínimos que debería perseguir la aplicación de esta propuesta ya fuese a nivel curricular o para su adaptación a cualquier actividad en el aula o la implementación de alguna unidad didáctica serían:

1) introducir terminología cristalográfica y mineralógica en relación con aspectos anatómico-fisiológicos de los seres humanos;

2) que los alumnos valoren la importancia de abordar la temática de los biominales desde un punto de vista interdisciplinar, para que comprendan que no hay soluciones simples o únicas a realidades científicas complejas como puede ser la de la mineralización en los seres vivos;

3) que aprecien cómo algunos minerales (biominales)

son beneficiosos para la actividad y la propia existencia de un organismo, pero que su alteración, aumento o disminución pueden ser causantes de patologías o incluso la muerte del organismo;

4) que comprendan que hay una interrelación entre factores externos, como la alimentación, factores internos, como la genética, y los procesos de mineralización y patologías asociadas en el cuerpo;

5) que aprecien el estudio de los restos fósiles como llaves para la comprensión de los biominales, y la importancia evolutiva de la propia aparición de partes mineralizadas en los seres vivos;

6) que valoren el trabajo de equipos multidisciplinares (biólogos, médicos, mineralogistas, químicos, paleontólogos, etc.) como la mejor forma de conocer todos los aspectos relativos a los biominales, y la posibilidad de abrir nuevos espacios laborales como la Geología Médica.

Propuesta de contenidos interdisciplinares

La Tabla 1 muestra una propuesta de contenidos relacionados con aquellos recogidos en el currículo oficial y que se po-

Tipo	Mineral	Fórmula cristalográfica	Localización
Fosfatos	Hidroxiapatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ (hexagonal)	En huesos y dientes con ciertas impurezas y en calcificaciones patológicas (renales, biliares, tumorales)
	Fosfato octacálcico	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	En cálculos dentales
	Brushita	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cálculos dentales y renales y en menor medida en huesos
	Whitlockita	$\text{Ca}_{18}\text{Mg}_2\text{H}_2(\text{PO}_4)_{14}$	Cálculos renales, dentales y salivares; lesiones por caries dentales; calcificaciones de pulmones tuberculosos
	Estruvita	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cálculos renales y biliares
Oxalatos	Whewellita	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (monoclínico)	Cálculos renales
	Weddellita	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (tetragonal)	Cálculos renales
	Caoxita	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (triclínico)	Cálculos renales
Carbonatos	Calcita	CaCO_3 (trigonal)	Otolitos, cálculos renales y biliares, glándulas salivales
	Aragonito	CaCO_3 (rómboico)	Cálculos biliares
	Vaterita	CaCO_3	Cálculos renales y biliares
Uratos	Ácido Úrico	$\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$	Sistema urinario
Óxidos	Magnetita	Fe_3O_4	Sistema urinario
	Goethita/Lepidocrocita	FeOOH	Sistema urinario
	Hematites	Fe_2O_3	Sistema urinario

Tabla 2.- Tipos de biominales más comunes en el cuerpo humano con indicación de sus composiciones, sistemas cristalinos más comunes y su localización en el cuerpo (modificado de Elliot, 2002 y Wenk y Bulakh, 2004). Para completar el estudio de los siete sistemas cristalinos que aparecen en la naturaleza se puede ampliar esta información con la estructura cúbica de la halita.

drían incluir en el desarrollo de algunas unidades didácticas interdisciplinares. Además, se señalan nuevos conceptos y aplicaciones prácticas que se podrían integrar en dichas unidades y sus correspondientes criterios de evaluación. En este punto hay que aclarar que tan solo se realiza la propuesta a modo de ejemplo para un conjunto de biominerales funcionales, que son los huesos y dientes, que presentan una mineralogía de fosfatos. El docente puede de forma similar incluir los otolitos que intervienen en el sistema de equilibrio y orientación

de los seres humanos, y que, desde el punto de vista mineralógico, también tienen interés por estar formados por carbonatos, otro de los grandes grupos de (bio)minerales. También son de interés, aunque algo más complejos, los oxalatos típicos de las litiasis y, por lo tanto, de biomineralizaciones patológicas, que a su vez podrían relacionarse con temas de Fisiología vegetal en los que son componentes comunes. Un desarrollo de estos otros biominerales, similar al que se realiza en el próximo apartado, reforzaría algunos contenidos de Cristalografía y Mineralogía, por ejemplo, los conceptos de isomorfismo y polimorfismo, estabilidad mineral, soluciones sólidas o los principales elementos cristalográficos de simetría.

En el próximo apartado se describen las características cristaloquímicas y estructurales de los fosfatos, con el objetivo de que se facilite la labor de los docentes que quieran usar esta propuesta para la preparación de actividades complementarias o de ampliación en sus programaciones de aula. Además, se indican las características anatómicas y fisiológicas más relevantes que se pueden relacionar con los conceptos mineralógicos (ver Tabla 3) y algunas de las patologías más frecuentes que tienen su origen en variaciones cristalográficas o mineralógicas de los biominerales del cuerpo humano. Finalmente, se exponen una serie de puntos de interrelación entre las diferentes ciencias y posibles cuestiones cuyo tratamiento en el aula puede motivar a los alumnos y despertar su curiosidad.

Los fosfatos

Los fosfatos y en especial el grupo del apatito son buenos ejemplos de isomorfismo, sustituciones catiónicas y aniónicas, defectos estructurales como vacancias o impurezas, etc., y suponen el décimo grupo de minerales más abundante de la Tierra. El calcio y el fósforo se encuentran entre los elementos más abundantes del cuerpo humano, solo superados por los cuatro elementos esenciales (C, H, O y N). Así, el hidroxiapatito es el biomineral más abundante e importante en el cuerpo humano, y del resto de vertebrados, ya que forma la estructura de huesos, dientes y algunas calcificaciones patológicas (Tabla 2).

El P^{5+} tiene una carga elevada, un tamaño similar al S^{4+} y forma con el oxígeno grupos aniónicos anisodésimicos,

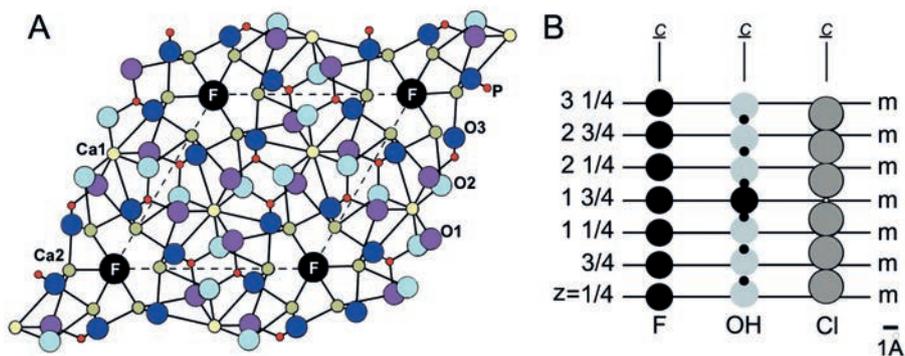


Fig. 1.- Características estructurales del apatito. A. Estructura del fluorapatito proyectada sobre el plano (001), perpendicular al eje c (modificado de Hughes y Rakovan, 2002). B. Columnas según el eje c de aniones adicionales en los tres términos extremos del apatito (modificado de Hughes *et al.*, 1989).

en los que el catión fósforo está más fuertemente atraído por el oxígeno que el resto de cationes. Por estas características los fosfatos no se suelen polimerizar y presentan grupos aniónicos tetraédricos (PO_4^{3-}) aislados (número de coordinación, $NC = 4$), que se unen unos a otros por medio de cationes. Por sus características similares se forman series isomorfas con los compuestos de arsenatos (AsO_4^{3-}) y vanadatos (VO_4^{3-}). Muchos de estos compuestos presentan aniones adicionales (OH, Cl, F) y en ocasiones están hidratados con moléculas de agua (Klein y Hurlburt, 1997).

La estructura del apatito *sensu stricto* (Fig. 1a) está basada en un empaquetado hexagonal simple, en el que los tetraedros (PO_4) se unen lateralmente por medio de cationes calcio (Hughes y Rakovan, 2002). El calcio ocupa dos posiciones estructurales; por un lado en coordinación irregular nueve ($NC = 9$) ocupando el centro de un prisma trigonal y tricapa de oxígenos. El calcio en este poliedro se une a tres oxígenos de la capa inferior y tres de la superior definiendo el prisma trigonal, y además se coordina con otros tres oxígenos de su propio plano que ocupan las caras del prisma. El resto de cationes calcio ocupan poliedros distorsionados de oxígenos y un anión adicional (F, Cl, OH) en coordinación irregular siete ($NC = 7$) (Hughes *et al.*, 1989). El Ca^{2+} puede ser sustituido por multitud de cationes (Mg, Sr, Na, Pb, tierras raras, etc.), principalmente en el segundo tipo de posición poliédrica, constituyendo así una solución sólida catiónica. Los aniones adicionales aparecen en el centro de grupos triangulares ($NC = 3$) de tres calcio y se van situando a lo largo de canales alargados según el eje c . Estos grupos triangulares tienen sentidos opuestos en capas alternas según el eje c . El anión flúor se sitúa en el mismo plano que los calcio, sin embargo, los aniones Cl^- y OH^- son más grandes y están por encima o debajo del plano de los calcio, lo que origina una pérdida de simetría hexagonal a monoclinica, por pérdida de un plano de reflexión. Este problema se soluciona, en la mayoría de los ejemplares, mediante la incorporación de impurezas (otros aniones adicionales) o generación de vacancias, que mantienen una simetría media hexagonal para las estructuras del hidroxiapatito y del cloroapatito, respectivamente (Hughes y Rakovan, 2002; Fig. 1B). Por lo tanto, esta estructura presenta ejes senarios helicoidales, ejes binarios, planos de reflexión

y centros de simetría, entre otros elementos de simetría.

Según el anión adicional se forman tres términos extremos del apatito *sensu stricto*. Además, hay otras sustituciones posibles que dan lugar a los siguientes minerales, más o menos comunes (Pan y Fleet, 2002):

- Apatito *sensu stricto*: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
 - Hidroxiapatito = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$
 - Fluorapatito = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$
 - Cloroapatito = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
 - Hidroxi fluorapatito = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$
 - Carbonato fluorapatito (Francolita) = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{CO}_3\text{OH}$
 - Carbonato-apatito (Dahlita) = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{CO}_3\text{OH}$
- OH. Los grupos $(\text{CO}_3\text{OH})^{3-}$ pueden sustituir parte de los grupos fosfato o unirse a las paredes de los canales formados según el eje *c*, aunque hay controversia al respecto (Fleet *et al.*, 2011).

De todas estas fases descritas el principal biomineral es el hidroxiapatito, aunque no suele ser puro, sino que presenta mayor o menor cantidad de flúor y de carbonato, sustituyendo a los OH y al grupo fosfato, respectivamente (francolita o dahlita). Los pequeños porcentajes de sustituciones iónicas que tienen lugar en los dientes, y también en los huesos, pueden ser los causantes tanto de efectos beneficiosos, como perjudiciales para el mismo. El apatito contenido en el esmalte tiene menos sustituciones que el apatito contenido en la dentina o en el hueso y es más cercano al hidroxiapatito estequiométrico. En la dentina y el hueso, el apatito tiene mayor desorden, numerosas deficiencias y sustituciones de grupos CO_3^{2-} y $(\text{HPO}_4)^{-}$. En el mismo sentido, el aporte de aguas fluoradas (aportan iones F que sustituyen a los OH del hidroxiapatito) o la utilización de dentífricos con flúor pueden ser muy beneficiosos para la protección del diente, ya que el fluorapatito presenta un producto de solubilidad menor que el hidroxiapatito (Patel y Brown, 1975). Además, el fluorapatito resiste sin disolverse hasta pH de 4,5 mientras que el hidroxiapatito se desestabiliza y disuelve a partir de pH de 5,5 (Carretero y Pozo, 2007). Por el contrario, la presencia de $(\text{CO}_3)^{2-}$ en el hidroxiapatito de los dientes aumenta el producto de solubilidad y, por lo tanto, la disolución en ácidos y consecuentemente su debilitamiento (Patel y Brown, 1975). El hecho de que el apatito sea un material inorgánico no significa que sea “inerte”, es decir, que es fundamental en los procesos metabólicos del cuerpo humano. Entre otros se pueden destacar la importancia del calcio en los procesos de contracción muscular (junto con magnesio, actina y miosina, etc.) o del fosfato en la formación del ATP (adenosín trifosfato), de los fosfolípidos, y un largo etcétera. Así mismo el apatito de los huesos es un “almacén” de elementos menores y traza en el cuerpo humano (Pasteris *et al.*, 2008).

De la anterior descripción mineralógica, composicional, estructural-cristalográfica de los fosfatos (principalmente del grupo del apatito) se pueden destacar algunas interrelaciones con la Biología o la Química, y algunas preguntas que pueden ser motivadores para ser tratadas en el aula. Entre otras se pueden destacar:

1) Los fosfatos son los componentes inorgánicos predominantes en los vertebrados. A este respecto se podría preguntar: ¿Por qué son los elementos mayoritarios si no lo son en el medio externo (la Tierra)? o ¿Cómo llegan el calcio o el fósforo a su lugar en los huesos o los dientes? Estas cuestiones permiten enlazar con la nutrición humana y el propio funcionamiento sistémico del cuerpo.

2) Los fosfatos no se suelen polimerizar. En relación con este hecho es interesante hacer notar la diferencia que tienen con la mayoría de los componentes orgánicos (abordados en Bioquímica o Química orgánica), muchos de los cuales estudian los alumnos de 1º de Bachillerato. Así surgen cuestiones como: ¿De qué depende que unos elementos formen grupos fácilmente polimerizables y otros no los formen? o ¿Qué consecuencias tiene este hecho para la vida? Estas cuestiones permiten introducir aspectos relacionados con las condiciones iniciales que posibilitaron la aparición de la vida en la Tierra.

3) El hidroxiapatito presenta gran facilidad para formar soluciones sólidas y dar entrada en su estructura a multitud de elementos. Esta característica cristalográfica permite preguntar: ¿Qué repercusiones puede tener el hecho de que la composición de los huesos o los dientes pueda tener variaciones por entrada de diferentes cationes y aniones? Esta cuestión permite abordar aspectos de problemas médicos y ambientales, como la presencia de determinados contaminantes atmosféricos o del agua que pueden, como en el caso del plomo o el estroncio radiactivo, pasar a los huesos con las consecuencias patológicas que pueden conllevar.

4) El fluorapatito, el hidroxiapatito y carbonato-hidroxiapatito presentan diferente dureza, distinta resistencia a los cambios del pH, y a otras variables químicas, lo que influye en sus productos de solubilidad y, por lo tanto, en su estabilidad. Este aspecto relaciona conceptos de Biología, Química y Mineralogía, permitiendo preguntarnos: ¿Cómo afectan a las características de nuestros huesos o dientes los pequeños cambios producidos en las composiciones del hidroxiapatito? Esta cuestión puede plantearse con el uso de sencillos diagramas de estabilidad mineral, con los que mostrar al alumnado, por ejemplo, el porqué del uso de dentífricos con flúor, que a la larga sustituyen parte de los OH del hidroxiapatito generando cierta cantidad de fluorapatito. Además permite enlazar con los usos de los minerales, ya que el flúor para la producción de dentífricos proviene en gran medida del mineral fluorita.

5) El calcio y el fósforo del apatito son fundamentales en los procesos metabólicos del cuerpo, en procesos como la contracción muscular o la formación de ATP. Este es uno de los puntos con más clara relación con la Fisiología y la Bioquímica, por ejemplo con las cuestiones: ¿Qué ocurre cuándo disminuye el calcio en el cuerpo? o ¿Qué relación hay entre el metabolismo del calcio, la vitamina D y la luz solar?

6) Finalmente, como una aplicación a la Paleontología, el hidroxiapatito de huesos y dientes puede sufrir transformaciones posteriores a su enterramiento (paso de hidroxiapatito a fluorapatito o carbonatoapatito) que permiten que estos restos queden preservados en el registro fósil tras la fosilización y ser estudiados por su interés taxonómico, pa-

leobiológico, evolutivo o paleogeográfico. Por otra parte, como se ha descrito, la estructura del hidroxiapatito permite el intercambio de gran cantidad de elementos traza y de diferentes tipos de isótopos, que quedan retenidos en huesos y dientes, haciendo de estos restos buenos indicadores paleoclimáticos, paleoambientales y paleoecológicos (Kohn y Cerling, 2002; Trueman y Tuross, 2002).

Características anatómicas y fisiológicas de los huesos

Los huesos son tejidos complejos interconectados, que actúan como estructuras de sostén que se remodelan dinámicamente a lo largo de la vida con el fin de mantener su integridad estructural (Glimcher, 2006). El hueso está constituido por un 30% de componente orgánico y un 70% de componente inorgánico. A su vez, el componente inorgánico está constituido por hidroxiapatito (66,5%) y cantidades variables de otros iones (carbonato, citrato, magnesio, potasio, sodio y flúor), y el componente orgánico por matriz ósea (29,4%) y células (0,6%). Finalmente, la matriz ósea se compone de colágeno (28%) y proteínas no colágenas (1,4%) (Carretero y Pozo, 2007).

Las células óseas (osteoblastos, osteoclastos y osteocitos) controlan la formación, la resorción y el volumen del hueso, por lo tanto son muy activos e importantes en el metabolismo del calcio, fosfato y otros iones presentes en el cuerpo (Platzer, 1986). Por ejemplo, cuando hay exceso de Ca^{2+} en la sangre, este se deposita en los huesos, mientras que cuando falta calcio en el organismo los huesos proporcionan la cantidad necesaria para el correcto funcionamiento del metabolismo. Los osteoblastos son las células del hueso que se encargan de la fabricación de la matriz ósea y de iniciar el proceso de mineralización ósea, así como de controlar la mineralización de la matriz proteica del colágeno extracelular (Puzas, 1996). Los osteocitos son células óseas maduras derivadas de los osteoblastos cuando estos se mineralizan y cuya función es la de mantener las actividades celulares del tejido óseo, como el intercambio de nutrientes y productos de desecho. Finalmente, los osteoclastos son las células encargadas de la resorción y remodelación de los huesos.

El hidroxiapatito de los huesos, generalmente, presenta impurezas que le acercan a la fase denominada carbonato-hidroxiapatito. Los cristales de apatito se disponen alineados paralelamente unos a otros, lo cual genera un alto grado de orden (Glimcher, 2006). Durante la infancia el “apatito” de los huesos está menos ordenado y puede ser más amorfo, formando fibras con la materia orgánica. Al ir creciendo los huesos aumenta el orden y el tamaño de los cristales y se pierde materia orgánica lo que se traduce en menor elasticidad y mayor fragilidad de los huesos (Glimcher, 2006).

El rendimiento mecánico general del tejido óseo es bastante notable y se combinan dos propiedades esenciales para su función, la rigidez estructural y la resistencia (dureza o tenacidad) que son adecuadas para prevenir los inicios del agrietamiento y su propagación (Fratzl, 2008). El componente orgánico de los huesos, constituido por proteínas como el colágeno, es resistente (duro) pero no

muy rígido (algo elástico). El componente mineral (hidroxiapatito), por el contrario, es rígido pero no muy resistente (dureza en la escala Mohs de 5). Sin embargo, se puede observar en la Figura 2 que tanto el hueso como la dentina combinan en su justa medida ambas propiedades (Fratzl, 2008). La asociación del “apatito” con fibras colágenas óseas es la responsable de la rigidez y resistencia características del tejido óseo.

Los huesos son tejidos vivientes que están metabólicamente activos durante la vida. A medida que el organismo envejece, un desequilibrio entre el proceso de formación del hueso y la reorganización causa pérdidas en la masa del hueso, produce cambios en su calidad y aumenta la necesidad de restablecer la función del tejido mineralizado que se haya perdido o dañado (Kawasaki *et al.*, 2009). Determinadas enfermedades que afectan a los huesos son causadas por procesos de mineralización deficiente o excesiva, acompañada de pérdida de las propiedades de rigidez y resistencia (ver siguiente apartado). Sin embargo, existen determinados inhibidores moleculares cuya función es retardar la calcificación espontánea de los tejidos internos (Pasteris *et al.*, 2008). Algunas de estas enfermedades se corresponden con anomalías genéticas, pero también pueden ser graduales y depender de factores ambientales como la alimentación, el ejercicio físico, la contaminación ambiental o la exposición al sol (Boskey, 2007).

De nuevo con respecto a esta exposición de la anatomía y fisiología del hueso surgen algunas cuestiones interesantes:

1) Los huesos se remodelan a lo largo de toda la vida ¿Quiere esto decir que los minerales que los forman se transforman, disuelven o crecen? Esta cuestión es de gran interés ya que muchos alumnos, como demuestran estudios recientes, piensan que el cambio o el crecimiento son

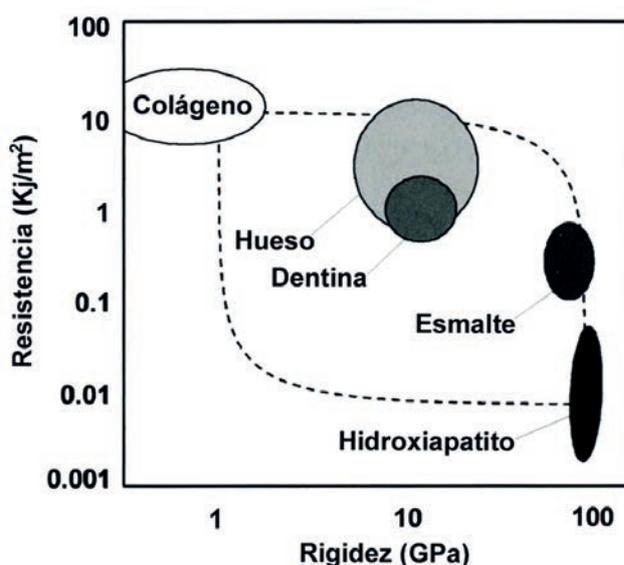


Fig. 2.- Valores típicos de rigidez (módulo de Young) y resistencia (tenacidad o dureza; energía de fracturación) en tejidos mineralizados por hidroxiapatito. Las líneas de puntos indican casos extremos en la mezcla de ambos parámetros (modificado de Fratzl y Gupta, 2007).

aspectos relacionados con la parte orgánica, la vida, pero que los cristales o los minerales no varían (Durán y Puigcerver, 2017). Imágenes de microscopía e incluso vídeos de cambios a nivel nanométrico que se producen en los huesos pueden encontrarse en Internet, lo que unido a prácticas de cristalización podrían ser determinantes a la hora de corregir este error conceptual. Como aplicación a conceptos de Física, es posible explicar la relación entre diversos métodos analíticos como la difracción de rayos X y la caracterización y estudio de los (bio)minerales a través de sus estructuras cristalinas (Reventós *et al.*, 2012) o las características de las lentes de los microscopios o las espectroscopías mediante el uso de imágenes de microscopía óptica o electrónica de muestras de biominales (huesos, dientes, piedras del riñón o la vesícula, etc.).

2) Durante la vida de un individuo varían el tamaño y el grado de orden de los cristales de los huesos: ¿Qué consecuencias tiene esta variación sobre las características mecánicas del hueso? o ¿Cómo puede afectar este hecho a las actividades deportivas que realizamos los seres humanos? En este caso los cambios llevan aparejados pérdida de materia orgánica lo que se traduce en menor elasticidad y mayor fragilidad de los huesos, limitando la actividad física de gran exigencia con la edad, y requiriendo mayor tiempo de curación ante lesiones o fracturas de los huesos; todos estos aspectos relacionados con otras ciencias.

3) Determinadas patologías de los huesos son causadas por procesos de mineralización deficiente o excesiva, aspecto que se desarrolla en el próximo apartado.

Algunas patologías de los huesos relacionadas con su mineralogía

Osteoporosis. En condiciones normales (sin enfermedades), durante el crecimiento hay más osteoblastos (o son más activos) que osteoclastos, mientras que durante la vejez predominan los osteoclastos (o son más activos), por lo que se elimina calcio de los huesos y se puede originar el proceso de osteoporosis (Boskey, 2006). Además de la vejez,

la menopausia es uno de los momentos en los que es mayor el riesgo de padecer esta enfermedad.

La osteoporosis es una enfermedad causada por desórdenes en el esqueleto, como resultado de procesos de pérdida excesiva de masa (incremento de la porosidad) en los huesos y de la ruptura de su microarquitectura (Vilela y Nunes, 2011). Según estos autores la reducción en la tasa de formación de masa ósea es la causa más importante en la osteoporosis. En el hueso osteopóricico las zonas mineralizadas tienen defectos en su estructura normal y presentan un incremento de la porosidad cortical, aunque la relación mineral/colágeno permanece normal (Tabla 3). Suele asociarse a deficiencias en el contenido de flúor, calcio y fosfatos o a problemas metabólicos. La osteoporosis pone en peligro la integridad estructural de los huesos e incrementa su fragilidad y el riesgo de fractura. Hasta el momento no hay una solución para esta enfermedad, aunque hay muchos estudios que muestran como retardar sus efectos perjudiciales mediante dietas (por ejemplo ricas en calcio), ejercicio físico o medicamentos (Skinner, 2005).

Osteomalacia. Es el reblandecimiento de los huesos debido a un problema con la capacidad del cuerpo para absorber calcio y fósforo, y que es propiciado por una severa falta de vitamina D (Tabla 3). En los niños se denomina raquitismo (Faibish *et al.*, 2005). En personas con osteomalacia los huesos son más blandos ya que tienen una relación mineral/colágeno más baja de lo normal (cantidad elevada de colágeno y baja de mineral; Skinner, 2005). Estas deficiencias pueden deberse a problemas metabólicos o a variaciones genéticas (Kawasaki *et al.*, 2009).

Osteopetrosis. Es un extraño desorden congénito que se presenta en los humanos al nacer, en el cual los huesos se vuelven demasiado densos. Esto deriva de un desequilibrio entre la formación del hueso y su resorción, debido al mal funcionamiento de los osteoclastos. Como consecuencia, el modelado y remodelado del hueso no es equitativo y el esqueleto se vuelve frágil a pesar de que se incrementa su

Enfermedad	Descripción	Frecuencia	Contenido mineral	Tamaño del cristal
Osteoporosis*	Incremento de la porosidad con tendencia a la fractura	Alta	Variable	Aumenta
Osteomalacia*	Hueso poco mineralizado con tendencia a la fractura	Alta	Disminuye	Aumenta
Osteopetrosis*	Hueso denso con alta tendencia a la fracturación	Baja	Aumenta	Disminuye
Osteogénesis imperfecta	Hueso flexible debido a una síntesis anormal del colágeno	Baja	Disminuye	Disminuye
Osteonecrosis	Hueso necrótico	Baja	Aumenta	Variable
Amelogénesis imperfecta*	Desequilibrio en la mineralización del esmalte	Alta	Disminuye	Variable

Tabla 3.- Determinadas enfermedades de los huesos y los dientes debidas a procesos de mineralización deficiente o excesiva (modificado de Boskey, 2007). Con un asterisco se indican aquellas que se detallan en el texto.

masa (Tabla 3). Se puede decir que la mineralización aumenta pero la frecuencia con la cual se regeneran los huesos es baja en esta enfermedad (Boskey, 2006).

Características anatómicas y fisiológicas de los dientes

Los dientes forman parte del aparato masticador en el ser humano y se componen de esmalte, dentina, cemento radicular y pulpa. La dentina y el esmalte presentan una serie de diferencias bastante significativas. Por una parte, la dentina, al igual que los huesos, se considera como un “tejido vivo”, mientras que el esmalte es acelular y, por lo tanto, no es un “tejido vivo” (Elliot, 2002). Por otra parte, el colágeno se presenta como el mayor constituyente orgánico de la dentina y el cemento, al igual que de los huesos, pero no aparece en el esmalte (Skinner, 2005). Las diferencias entre la dentina y el esmalte se producen en el proceso embriológico de su formación, siendo la primera de origen mesodérmico (al igual que los huesos) y la última de origen ectodérmico (Elliot, 2002).

El esmalte, formado por la acción de células especializadas (ameloblastos), es un tejido muy mineralizado, constituido por cristales entrecruzados en las tres direcciones del espacio, de composición apatito (96%), y en menor medida por materia orgánica (1,7% de amelogeninas, ameloblastinas y enamelininas) y agua (2,3%) (Kawasaki *et al.*, 2009). Por su extrema mineralización presenta gran dureza que protege la superficie de la corona de los dientes (característica importantísima para su función masticatoria y también para su posterior preservación en el registro fósil).

La dentina, formada por la acción de los odontoblastos, es un tejido duro, con cierta elasticidad (Fig. 2), constituido mayoritariamente por apatito (69,3%) y menores cantidades de materia orgánica (17,5%, principalmente proteínas colágenas) y agua (13,2%) (Leonhardt, 1986). Aunque el colágeno es la proteína que le da flexibilidad a los ligamentos y a los tendones, la adición de apatito a la matriz del colágeno lo convierte en un componente rígido que proporciona tanto a los dientes como a los huesos y otros tejidos su gran capacidad de resistencia (Despopoulos y Silbernagl, 1986).

Finalmente, el cemento radicular, formado por la acción de los cementoblastos, es un tejido duro parecido al hueso que está constituido en su totalidad por apatito, mientras que la pulpa es un tejido blando y fibroso constituido por materia orgánica que da sensibilidad al diente. En la pulpa se forman los odontoblastos responsables de la formación de la dentina, entre otras funciones (Boskey, 2007).

De nuevo, de la descripción de las características de los dientes y sus componentes se pueden destacar algunas interrelaciones, y surgen cuestiones que pueden ser motivadoras para ser tratadas en el aula: ¿Qué consecuencias tiene para su composición, estructura y función el hecho de que la dentina y el esmalte tengan diferentes orígenes embriológicos?, ¿Por qué los dientes son los elementos que mejor fosilizan del cuerpo de los vertebrados?, ¿Qué datos podrían proporcionar estos restos sobre la ecología del pasado de la Tierra? o ¿Tienen relación las patologías de los dientes con su composición mineralógica o con su estructura

microcristalina? Esta última cuestión se desarrolla en el próximo apartado exponiendo algunas de las patologías más típicas de los dientes y sus relaciones con aspectos de nutrición, higiene bucal, procesos bioquímicos que tienen lugar en la boca, etc.

Algunas patologías de los dientes en relación con su mineralogía

Caries dentales. Cuando los dientes se deterioran por una deficiente mineralización, se desarrollan las caries. Actualmente se sabe que el pH (la acidez) es el principal culpable del desarrollo de caries, siendo también nocivos los azúcares. Los carbohidratos son importantes como sustrato donde se desarrollan las bacterias bucales y como materia que por fermentación bacteriana genera ácidos. A pesar de su dureza, el esmalte dental tiene gran microporosidad que facilita los ataques ácidos durante las reacciones químicas generadoras de las caries (Elliot, 2002).

En la boca se produce un ciclo continuo de desmineralización y remineralización de la superficie de los dientes, por lo que podemos considerar la carie como un proceso dinámico (Elliot, 2002). Si la acidez en la superficie de un diente se sitúa por debajo de un pH de 5,5, se producirá una liberación de iones calcio y fosfato, que serán englobados en la saliva (en general ligeramente alcalino, pH = 7-8). Pero estos elementos pueden volver a la estructura del diente si el pH de la saliva sube por encima de 5,5, ya que esta es una solución saturada de estos iones, y así toda lesión que solo afecte al esmalte podrá remineralizarse. Cuando el equilibrio entre remineralización y desmineralización se rompe, debido a periodos prolongados de acidez, se producen las caries (Elliot, 2002; Carretero y Pozo, 2007).

La carie dental es un ejemplo de interacción entre nutrición e infección. Se necesitan muchos nutrientes para un buen desarrollo y la salud de los dientes y las encías (vitaminas A y D, calcio, fósforo y proteínas). Sin embargo, en términos de prevención de caries, el flúor es el elemento más destacable. Una adecuada fluoración de las aguas de consumo (aproximadamente 1-2 ppm de flúor en los suministros de agua urbana; Gómez Santos *et al.*, 2002) puede proteger los dientes contra las caries. Otros medios para reducir las caries dentales son la educación nutricional a padres y niños (dietas cariogénicas y los riesgos asociados, higiene buco-dental, hábitos de cepillado de los dientes, etc.) y las revisiones periódicas de los médicos especialistas (Gómez Santos *et al.*, 2002).

Otra enfermedad relacionada con los dientes es la periodontal (en las encías). Suele producirse en personas mayores y es una causa de pérdida de dientes. Esta enfermedad empieza con el desarrollo de placas de minerales (también denominadas cálculos; Tabla 3) por bacterias que sobreviven en los carbohidratos que se adhieren a los dientes. La placa genera inflamación e infección del ligamento periodontal y conduce a encías retraídas y sangrantes, periodontitis, y eventualmente a pérdida de la base ósea y de los dientes. Esta enfermedad ha sido relacionada con infinidad de otras enfermedades como consecuencia o como factor causante (Arias *et al.*, 2016).

Fluorosis dental. Como ya se ha comentado, el flúor en el agua de ingesta, en la crema dental o aplicado sobre los dientes hace que el esmalte dental sea más resistente a las caries. Sin embargo, un exceso de flúor, puede generar efectos adversos sobre los dientes como la fluorosis dental. La fluorosis es la hipomineralización del esmalte dental por aumento de la porosidad. Generalmente se debe a una excesiva ingesta de flúor durante el desarrollo del esmalte antes de la erupción. El consumo de agua con un contenido superior a 5 ppm de forma continuada dará lugar a una amplia fluorosis dental (Gómez Santos *et al.*, 2002). No solo el consumo excesivo de flúor es condicionante de la fluorosis, también que este consumo coincida con el período de formación de los dientes, que es cuando mayor relevancia estructural tiene el flúor (Driscoll *et al.*, 1983). Durante el período de formación del diente, la incorporación del flúor se hace fundamentalmente a través de la pulpa dentaria, que contiene vasos sanguíneos, donde la célula formadora de esmalte, el ameloblasto, está sintetizando una matriz proteica que posteriormente se calcifica. Si por esta vía se ingieren altas concentraciones de flúor, este interfiere con el metabolismo del ameloblasto y el proceso de calcificación, y forma un esmalte defectuoso dando lugar a la fluorosis dental (Driscoll *et al.*, 1983). Otras enfermedades también pueden estar en el origen o el agravamiento de la fluorosis, como es el caso de la enfermedad celíaca (Giluca *et al.*, 2010). Existe una fluorosis esquelética mucho más peligrosa que la dental, cuyas consecuencias y tratamiento están en estudio por la comunidad científica (Reddy *et al.*, 1998).

Amelogénesis imperfecta. La amelogénesis imperfecta es una enfermedad que representa un grupo heterogéneo de condiciones que afectan al esmalte dental, ocasionalmente en conjunto con otras enfermedades dentales y bucales (Tabla 3). Esta enfermedad afecta la estructura del esmalte de manera similar en la mayoría de los dientes y puede estar asociada con cambios bioquímicos en el cuerpo humano (Robinson *et al.*, 2003). Las propiedades físicas y la función fisiológica del esmalte están directamente relacionadas con la composición, orientación, disposición y morfología de los componentes minerales dentro del tejido (Mahoney *et al.*, 2003). El esmalte dental se presenta en la amelogénesis imperfecta como un tejido altamente mineralizado con más del 95% de su volumen ocupado por grandes, y fuertemente organizados, cristales de hidroxiapatito. La formación de esta estructura altamente organizada parece estar controlada por los ameloblastos a través de la interacción de una serie de moléculas de la matriz orgánica (Crawford *et al.*, 2007). Algunos de los múltiples genes que codifican las proteínas específicas del esmalte han sido indicados como genes promotores de la amelogénesis imperfecta (Kawasaki *et al.*, 2009).

Consideraciones finales

Esta evaluación de algunas materias de ciencias del actual currículo estatal de Bachillerato ha puesto de manifiesto que, a pesar de la constante referencia a la importancia de conocimientos interdisciplinares que se

hace en ella, no hay suficientes contenidos ni criterios de evaluación que muestren esta interdisciplinariedad. En este trabajo hemos presentado una propuesta para introducir en Bachillerato conceptos de Mineralogía, como los sistemas cristalinos o la estabilidad y transformaciones minerales, a partir de las características de los biominales más importantes del cuerpo humano. Esto permite a los alumnos recibir información cristalográfica y mineralógica integrada en un conjunto de saberes que se entrelazan en torno al concepto de biomineralización. Este tipo de aproximaciones a la ciencia que integran diversas especialidades son fundamentales para el adecuado desarrollo de las competencias en Ciencia y Tecnología, ya que derivan de procesos y situaciones interconectadas similares a las que aparecen durante el ejercicio profesional de la Geología o la Biología. Además, este tipo de propuestas tienen un fuerte carácter instrumental, muestran su utilidad futura a los estudiantes y tienen interés social e incluso económico; todas estas características que pueden mostrar al profesorado, alumnado, padres y a la sociedad en su conjunto la relevancia de la Geología. Los aspectos tratados permiten contextualizar la Geología (Cristalografía y Mineralogía) al mostrar sus relaciones explícitas con la vida cotidiana de los estudiantes y sus familias, ya que cualquier estudiante puede conocer a personas con osteoporosis o ha sufrido caries dentales.

La propuesta puede ser usada para discusiones dirigidas en el aula, de forma que se puede destacar cómo determinadas enfermedades (la fluorosis o las litiasis, por ejemplo) son, en parte, consecuencia de aspectos socioeconómicos y cómo esta circunstancia influye en la distribución de estas enfermedades entre la población humana mundial (Dalstra *et al.*, 2005), resaltando la importancia de que las investigaciones científicas y adelantos en salud lleguen a todos los rincones del planeta, como parte de un objetivo transversal de educación para la igualdad. Al mismo tiempo permite hacer partícipes a los alumnos sobre el conocimiento de hábitos saludables (entre otros la práctica de deporte y una correcta alimentación) y buenas prácticas de higiene en un contexto completamente científico.

Finalmente, se pone de manifiesto la importancia del trabajo de los investigadores en Mineralogía (búsqueda de características cristalográficas y mineralógicas que mejoren la comprensión de la estructura y el comportamiento de los biominales ante los procesos bioquímicos del cuerpo humano) en una vertiente directamente relacionada con la salud, siendo este un aspecto poco o nada conocido por el alumno y la sociedad en su conjunto, y que por su potencial funcionalidad sería una forma de motivar al alumnado por su estudio.

Agradecimientos

Los autores agradecemos la concienzuda revisión y las sugerencias de Ismael Coronado y José Antonio Pascual, y de la editora Beatriz Bádenas, que han permitido mejorar y reorientar la propuesta inicial que se presentaba en este trabajo.

Referencias

- Anguita, F., 1994. Geología, Ciencias de la Tierra, Ciencias de la Naturaleza: paisaje de un aprendizaje global. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (1): 15-21.
- Arias, J.R., Becerra, M.S., Díaz, K.R., Mancilla, G.S., Monsalve, J.M., 2016. Efectividad de los tratamientos para la Periodontitis: Revisión sistemática. *Revista Venezolana de Investigación Odontológica IADR*, 4 (2): 298-313.
- Boskey, A.L., 2006. Assessment of bone mineral and matrix using backscatter electron imaging and FTIR imaging. *Current Osteoporosis Reports*, 4: 71-75.
- Boskey, A.L., 2007. Mineralization of bones and teeth. *Elements*, 3: 385-391.
- Calonge, A., 2013. Estado actual de la Enseñanza de la Geología. *Macla*, 17: 11-12.
- Casado, A.I., Fesharaki, O., Pérez-García, A., 2011. Origen de la vida: evolución de las teorías hacia un inicio organizado por minerales. En: *Viajando a mundos pretéritos*, (A. Pérez-García, F. Gascó, J.M Gasulla, F. Escaso, Eds). Ayuntamiento de Morella, Castellón, 75-92.
- Carretero, M.I., Pozo, M., 2007. *Mineralogía Aplicada: Salud y Medio Ambiente*. Thomson Editores Spain, Paraninfo S.A., 406 p.
- Crawford, P.J.M., Aldred, M., Bloch-Zupan, A., 2007. Amelogenesis imperfecta. *Orphanet Journal of Rare Diseases*, 2: 17.
- Dalstra, J.A.A., Kunst, A.E., Borrell, C., Breeze, E., Cambois, E., Costa, G., Geurts, J.J.M., Lahelma, E., Van Oyen, H., Rasmussen, N.K., Regidor, E., Spadea, T., Mackenbach, J.P., 2005. Socioeconomic differences in the prevalence of common chronic diseases: an overview of eight European countries. *International Journal of Epidemiology*, 34: 316-326.
- Del Toro, R., Morcillo, J.G. 2011. Las actividades de campo en educación secundaria. Un estudio comparativo entre Dinamarca y España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19 (1): 39-47.
- Despopoulos, A., Silbernagl, S., 1986. *Color atlas of physiology*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, Alemania, 356 p.
- Dove, P.M., 2010. The rise of skeletal biominerals. *Elements*, 6: 37-42.
- Driscoll, W.S., Horowitz, H.S., Meyers, R.J., Heifetz, S.B., Kingman, A., Zimmerman, E.R., 1983. Prevalence of dental caries and dental fluorosis in areas with optimal and above optimal water fluoride concentration. *Journal of the American Dental Association*, 107: 42-47.
- Durán, H., Puigcerver, M. 2017. Análisis de conceptos de los estudiantes de Magisterio acerca de los minerales y algunas estrategias para mejorar su comprensión. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25 (3): 341-352.
- Elliot, J.C., 2002. Calcium phosphate biominerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48 (1): 427-453.
- Faibish, D., Gomes, A., Boivin, G., Binderman, I., Boskey, A.L., 2005. Infrared imaging of calcified tissue in bone biopsies from adults with osteomalacia. *Bone*, 36: 6-12.
- Fermeli, G., Meléndez, G., Koutsouveli, A., Dermitzakis, M., Calonge, A., Steining, F., D'Arpa, C., Di Patti, C., 2015. Geoscience teaching and student interest in secondary schools-preliminary results from an interest research in Greece, Spain and Italy. *Geoh Heritage*, 7: 13-24.
- Fesharaki, O., 2016. Análisis paleoambiental y paleoclimático de los yacimientos de Somosaguas y Húmera (Mioceno medio, Madrid): sedimentología, petrología, mineralogía y aplicación a divulgación e innovación educativa. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 366 p.
- Fleet, M.E., Liu, X., Liu, X., 2011. Orientation of channel carbonate ions in apatite: Effect of pressure and composition. *American Mineralogist*, 96 (7): 1148-1157.
- Fratzl, P., 2008. Mechanical design of biomineralized tissues. Bone and other hierarchical materials. En: *Metal ions in Life Sciences*, (A. Sigel, H. Sigel, R.K.O. Sigel, Eds). John Wiley & Sons, England, 547-575.
- Fratzl, P., Gupta, H.S., 2007. Nanoscale mechanisms of bone deformation and fracture. En: *Handbook of Mineralization*, (E. Bäuerlein, Ed). Wiley-VCH, Weinheim, 397-414.
- Giluca, M.R., Cei, G., Gigli, F., Gandini, G., 2010. Oral signs in the diagnosis of celiac disease: review of the literature. *Minerva Stomatologica*, 59: 33-43.
- Gimeno Sacristán, J., 2005. *La educación que aún es posible. Ensayos acerca de la cultura para la educación*. Morata, Madrid, 183 p.
- Giné, N., 2009. Como mejorar la docencia universitaria: el punto de vista del estudiantado. *Revista Complutense de Educacion*, 20 (1): 117-134.
- Glimcher, M.J., 2006. Bone: Nature of the calcium phosphate crystals and cellular, structural, and physical chemical mechanisms in their formation. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 64: 223-282.
- Gómez Santos, G., Gómez Santos, D., Martín Delgado, M., 2002. *Fluor y fluorosis dental. Pautas para el consumo de dentífricos y aguas de bebida en Canarias*. Dirección General de Salud Pública, Servicio Canario de la Salud.
- Hughes, J.M., Cameron, M., Crowley, K.D., 1989. Structural variations in natural F, OH and Cl apatites. *American Mineralogist*, 74: 870-876.
- Hughes, J.M., Rakovan, J., 2002. The Crystal Structure of Apatite, Ca₅(PO₄)₃(F,OH,Cl). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48 (1): 1-12.
- Kawasaki, K., Buchanan, A.V., Weiss, K.M., 2009. Biomineralization in humans: making the hard choices in life. *The Annual Review of Genetics*, 43: 119-142.
- Klein, C., Hurlburt, C.S., 1997. *Manual de mineralogía*. Basado en la obra de J.D. Dana. Editorial Reverté, 680 p.
- Kohn, M.J., Cerling, T.E., 2002. Stable isotope compositions of biological apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48 (1): 455-488.
- Leonhardt, H., 1986. *Color atlas and textbook of human anatomy (II): Internal Organs*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, Alemania, 362 p.
- Mahoney, E.K., Rohanizadeh, R., Smail, F.S.M., Kilpatrick, N.M., Swain, M.V., 2003. Mechanical properties and microstructure of hypomineralized enamel of permanent teeth. *Biomaterials*, 25: 5091-5100.
- Niemi, H., Toom, A., Kallioniemi, A., 2016. *Miracle of Education: The principles and practices of teaching and learning in Finnish schools*. Sense Publishers, Rotterdam, Holanda, 292 p.
- Olías, M., Nieto, J.M., 2012. El impacto de la minería en los ríos Tinto y Odiel a lo largo de la historia. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25: 177-192.
- Pan, Y., Fleet, M.E., 2002. Compositions of the apatite-group minerals: substitution mechanisms and controlling factors. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48 (1): 13-49.
- Pascual Trillo, J.A., 1998. Por unas ciencias ambientales y unas ciencias de la Tierra. Reflexiones críticas y propuestas para un debate. *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (2): 341-351.
- Pascual Trillo, J.A., 2017. Necesitamos la Geología también en Bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25 (3): 274-284.

- Pasteris, J.D., Wopenka, B., Valsami-Jones, E., 2008. Bone and tooth mineralization: Why apatite? *Elements*, 4: 97-104.
- Patel, P.R., Brown, W.E., 1975. Thermodynamic solubility product of human tooth enamel powder: powdered sample. *Journal of Dental Research*, 54: 728-736.
- Pedrinaci, E., 2012. Alfabetización en Ciencias de la Tierra, una propuesta necesaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20 (2): 133-140.
- Platzer, W., 1986. *Color atlas and textbook of human anatomy (I): Locomotor system*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, Alemania, 436 p.
- Puzas, J.E., 1996. Osteoblasts cell biology: lineage and functions. En: *Primier of the metabolic bone diseases and disorders of mineral metabolism*, (M.J. Favus, Ed). Lippincott-Raven Press, New York, USA, 1-16.
- Reddy, D.R., Srikanth, R.S., Misra, M., 1998. Fluorosis. *Surgical Neurology*, 49 (6): 635-636.
- Reventós, M.M., Rius, J., Amigó, J.M., 2012. Mineralogy and geology: The role of crystallography since the discovery of X-ray diffraction in 1912. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25: 133-143.
- Robinson, C., Shore, R.C., Wood, S.R., Brookes, S.J., Smith, D.A.M., Wright, J.T., Connell, S., Kirkham, J., 2003. Subunit structures in hydroxyapatite crystal development in enamel: Implications for amelogenesis imperfecta. *Connective Tissue Research*, 44: 65-71.
- Romero-Nieto, D., Fesharaki, O., García Yelo, B.A., 2014a. Películas de trasfondo paleontológico: análisis científico y propuestas didácticas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22 (2): 167-176.
- Romero-Nieto, D., García Yelo, B.A. and Fesharaki, O., 2014b. Paleontología y Enseñanza Obligatoria. Fuentes y grado de conocimiento. *New Insights on Ancient Life*, 211-214.
- Sahai, N., Schoonen, M.A.A., Skinner, H.C.W., 2006. The emergent field of Medical Mineralogy and Geochemistry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 64: 1-4.
- Skinner, H.C.W., 2005. Mineralogy of bone. En: *Medical Geology*, (O. Selenus, Ed). Elsevier, New York, 667-693.
- Sorauf, J.E., 2005. Biomineralization. *Journal of Paleontology*, 79 (2): 408-410.
- Trueman, C.N., Tuross, N., 2002. Trace elements in recent and fossil bone apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48 (1): 489-521.
- Vilela, P., Nunes, T., 2011. Osteoporosis. *Neuroradiology*, 53: 185-189.
- Weiner, S., Dove, P.M., 2003. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54: 1-29.
- Wenk, H-R., Bulakh, A., 2004. Minerals and human health. En: *Minerals: Their constitution and origin*. Cambridge University Press. United Kingdom, 558-569.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 18-7-2018

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 27-2-2019

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 14-3-2019