

Una perspectiva científica de las gemas y su aplicación en el aula

A scientific view on gems and its teaching implementation

M^a CINTA OSÁCAR SORIANO¹ Y MIGUEL ÁNGEL PELLICER GARCÍA²

¹ Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna 12, 50009-Zaragoza. E-mail: cinta@unizar.es

² AGEDA, C/Avda. Valencia 51, 50005-Zaragoza. E-mail: mipelgar@gmail.com

Resumen Las gemas, definidas por su belleza, durabilidad y rareza, han atraído al ser humano desde la Prehistoria hasta la actualidad. Sin embargo, no se suelen relacionar con los conocimientos científicos, a pesar de la gran influencia que ha tenido sobre ellas el reciente desarrollo tanto de nuevos materiales como de técnicas de tratamientos para mejorar las gemas. La belleza de las gemas es una de las cualidades en las que el desarrollo científico y tecnológico tiene mayor influencia, no sólo en relación con la aplicación de conocimientos científicos y técnicos a la talla, sino especialmente por el desarrollo de nuevos materiales gemológicos, tanto los sintéticos como los tratados para su mejora. En este trabajo se presenta una actualización del concepto de gema y de su clasificación. A partir de ahí, y siempre desde un punto de vista científico, se examinan algunas de las propiedades que confieren la belleza a las gemas, así como las técnicas básicas de identificación gemológica, fundamentadas en principios científicos bien conocidos. A partir de ellas se proponen algunas actividades de laboratorio sencillas, en relación con la identificación de materiales, susceptibles de realizarse con un equipamiento de laboratorio limitado, y que puede variarse en función de las disponibilidades materiales y del propósito didáctico concreto. Estas actividades de laboratorio pueden despertar el interés de los estudiantes, por la atracción que, en general, generan las gemas, y así servir para mostrar algunos principios científicos sencillos y adquirir destreza en el laboratorio.

Palabras clave: Práctica de laboratorio, propiedades físicas de las gemas, propiedades ópticas de las gemas, técnicas de identificación de gemas, tratamientos de gemas.

Abstract Gemstones, defined by their main attributes, beauty, durability and rarity, have attracted the attention of Mankind from Prehistory to the present. Nevertheless, they are rarely associated with science, despite the huge impact that the latest generation of new materials has had on the gem world, and the important development of techniques of gem enhancement. It is remarkable the major influence of scientific and technological development on gem beauty, not only concerning the application of scientific and technological knowledge to gem cutting, but mainly because of the development of new gemological materials, both synthetic and treated for enhancement materials. This paper presents an update of the gem concept and their classification. Thereafter, some of the properties that confer beauty to gems are revised from a scientific point of view, as well as the basic techniques of gem identification, based on well-known scientific principles. From these techniques, several lab activities on material identification are derived, which can be carried out with limited equipment, and that can be modified depending on the equipment availability and the educational purpose. Because of the general gem attractiveness, these lab activities can raise interest among the students, and serve to demonstrate some simple scientific principles, as well as to develop lab skills.

Keywords: Lab activity, gem optical properties, gemstone identification techniques, gem enhancement, gem treatment.

INTRODUCCIÓN

El uso de las gemas ha sido común a lo largo de la historia de la Humanidad y con frecuencia los materiales apreciados como gemas han sido, y son, los mismos, por ejemplo, perlas, rubíes, ágata, etc., son

gemas estimadas por todos los pueblos que las han conocido. A pesar de ello es difícil dar una definición de gema, así que, en su lugar, las gemas se caracterizan por sus tres rasgos básicos: belleza, durabilidad y rareza.

Consideradas como un objeto de lujo, sin función práctica aparente, a las gemas se les suele atribuir un carácter frívolo o superficial, y raras veces se contemplan desde un punto de vista científico. Incluso existe una tendencia a atribuirles propiedades sin base científica, incluso de acción sobre el ser humano. Sin embargo, el estudio de las gemas –la Gemología– es una disciplina científica, relacionada con otras disciplinas científicas: Mineralogía, Química, Física, Ciencia de los Materiales, etc.

De hecho las gemas han sido objeto de estudio de la ciencia desde la Antigüedad clásica. Plinio el Viejo dedicó uno de los libros de su *Historia Natural* a las gemas (Bostock, 1893). Sin embargo la Gemología moderna, que tiene mucho de Ciencia de Materiales, surge a finales del siglo XIX, cuando, a excepción de las orgánicas, las gemas eran casi exclusivamente minerales. A partir de la segunda mitad del siglo XX la Gemología experimenta un gran desarrollo, que llega hasta la actualidad, en buena parte debido a la aparición del diseño de nuevos materiales tecnológicos, que, además de la función original para la que se crearon, encuentran aplicaciones gemológicas (Nassau, 1980, Pellicer, 2001).

Paradójicamente, la belleza de las gemas, una cualidad aparentemente subjetiva y la que menos se suele examinar desde un punto científico, depende de fundamentos científicos (ej.: conocimiento de las causas del color) y se puede potenciar también mediante procedimientos tecnológicos, tradicionalmente por la talla y modernamente por medio de los tratamientos de las gemas. La mayoría de las gemas, con la excepción de las perlas, se pulen y tallan para aumentar su belleza (Hurlbut y Kammerling, 1993). Un estudio previo de las características de la gema permite obtener mejores resultados del proceso de talla, por ejemplo, calculando los ángulos adecuados para la reflexión de la luz, en función del índice de refracción de la gema. Si hay una gema que representa mejor que las otras la aplicación de principios científicos a la talla es el diamante. En efecto, en la moderna talla brillante los ángulos están calculados en función del índice de refracción del diamante para que la luz se refleje internamente en el diamante y se maximice el brillo (Bruton, 1983).

Más allá de la talla, la Gemología moderna incluye, no sólo numerosos materiales sintéticos (Nassau, 1980, Renfro *et al.*, 2010), sino que abarca también los tratamientos de las gemas, aplicables tanto a gemas naturales como sintéticas, y que buscan mejorar las cualidades de una gema, especialmente su belleza (McClure, *et al.*, 2010, Nassau, 1984). Estos tratamientos hacen uso de fundamentos científicos que se aprovechan para mejorar el aspecto de las gemas.

La identificación de las gemas se realiza también según fundamentos científicos, relativamente sencillos en el caso de las herramientas básicas del gemólogo (microscopio, espectroscopio, refractómetro, etc.). En el caso de los nuevos materiales gemológicos (gemas sintéticas, gemas tratadas, etc.), la gran diversificación existente se traduce en un reto para el gemólogo que tiene que identificarlos (O'Donoghue, 1997), y es preciso recurrir a técnicas más sofisticadas, especialmente de tipo espectroscópico: espectroscopía UV-Vis-NIR, espectroscopía Raman y de infrarrojos (Breeding *et al.*, 2010).

A pesar de ello, las técnicas gemológicas básicas, basadas en principios científicos sencillos, siguen siendo útiles y permanecen como la primera aproximación para la identificación gemológica. Su simplicidad permite además, que puedan usarse en un contexto docente y por medio de herramientas fácilmente disponibles (Nogués *et al.*, 2008). El interés que suscitan las gemas y lo inusual de la perspectiva científica aplicada a la consecución de la belleza pueden servir de atractivo a los estudiantes para entender la aplicabilidad de los principios científicos. La joyería también puede ser objeto de actividades didácticas en las que se combinan elementos culturales y científicos (Russell y Tripp, 2010).

En este trabajo se hace una revisión actualizada del concepto de gema, desde el punto de vista científico, así como una actualización de su clasificación y nomenclatura actuales. A partir de ahí, se repasan las propiedades físicas que influyen en la belleza de las gemas, incluyendo también los fundamentos de los modernos tratamientos de mejora de las gemas. También se revisan las técnicas de identificación gemológica, en relación con los fundamentos científicos en que se basan, muy similares a los ligados al aspecto de las gemas. Derivadas de las técnicas de identificación, se proponen algunas actividades de laboratorio que pueden realizarse con un equipamiento limitado, disponible en muchos tipos de centros de docentes. Por la carga conceptual que conllevan resultan más adecuadas para estudiantes de Educación Secundaria o Bachillerato, aunque también sería posible adaptarlas a Primaria, al menos parcialmente; el caso de los tratamientos de gemas, por sus requisitos teóricos, sería más adecuado para estudiantes de Bachillerato. Las técnicas básicas de identificación gemológica fueron ya revisadas por Nogués *et al.* (2008), que proponen asimismo un taller basado en ellas. En este trabajo se hace referencia a dicho taller y se proponen algunas opciones alternativas. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que, dado que se manejan objetos reducidos, estas actividades están pensadas para grupos pequeños, de no más de dos o tres alumnos por cada actividad, que deben rotar el puesto, similarmente a lo que se describe en Nogués *et al.* (2008).

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEMOLÓGICOS

El tratamiento científico de un tema requiere acordar una nomenclatura. Sin embargo, una de las peculiaridades del mundo de las gemas es la escasez de normativas reguladoras. De hecho, salvo en lo que concierne al diamante (en este caso debido a la implantación por la ONU del “Proceso Kimberley” referido a los “diamantes de sangre”, Diago Diago, 2009), no existen ni en España, ni en general en los países europeos, definiciones de los materiales gemológicos, a diferencia de los que sí ocurre con otros materiales de uso industrial. En su lugar, para las gemas, existen acuerdos tácitos del tipo de “buenas prácticas”. El organismo que desarrolla las directrices seguidas en España y en la mayoría de países europeos, y en otros del mundo,

es CIBJO (acrónimo de **C**onfédération **I**nternationale de la **B**ijouterie, **J**oaillerie, **O**rfèvrerie, des **D**iamants, **P**erles et **P**ierres, generalmente conocida como Confederación Internacional de Joyería). Los “libros azules” que CIBJO publica recogen el estado del conocimiento sobre los materiales gemológicos y el mejor modo de aplicarlo a la realidad técnica y comercial (<http://www.cibjo.org/introduction-to-the-blue-books/>). Nosotros utilizaremos también, para denominar las gemas, la clasificación de materiales gemológicos de CIBJO (2015), que aparece en la Figura 1. Los materiales gemológicos se dividen en dos grupos: naturales y artificiales, que se subdividen a su vez en diversas categorías.

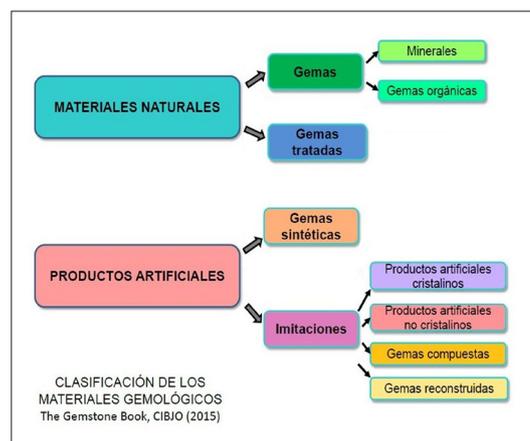


Fig. 1. Clasificación de los materiales gemológicos según *The Gemstone Book* de CIBJO (2015).

Los **materiales naturales** pueden ser minerales (diamante, cuarzo, topacio,...) o materiales de origen biológico, tanto animal (ej. perla, marfil) como vegetal (ej. ámbar, azabache). Además se incluyen cualquiera de los anteriores (mineral, orgánico) modificado para su mejora, es decir, gemas tratadas.

Los **materiales artificiales** son todos ellos fabricados por el hombre. En esta categoría se incluyen las gemas sintéticas, es decir, aquellas fabricadas en el laboratorio pero con las mismas características de las naturales (ej.: zafiro sintético, Fig. 2). El resto de los materiales artificiales se denominan imitaciones y comprenden aquellos materiales sintéticos que no tienen equivalente natural, sean cristalinos (ej. circonita) o no (ej. vidrio). También se incluyen las gemas compuestas de varios fragmentos, sean naturales o artificiales (ej. dobletes, tripletes) o reconstruidas a partir de la fusión (sin posterior cristalización) de fragmentos de gemas naturales (ej. ámbar reconstruido).

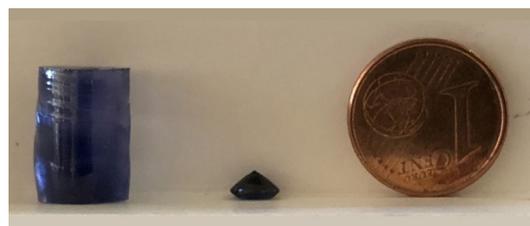


Fig. 2. Zafiro sintético en bruto y tallado.

Salvo la primera categoría (gemas minerales y orgánicas), el resto de los tipos llevan asociada, además de la habitual talla y pulido, la intervención humana, bien sea por **tratamiento** (gemas tratadas) o por **síntesis** (gemas sintéticas y productos artificiales).

Hay que señalar que el término “piedras semi-preciosas”, usado vulgarmente, no tiene cabida en la nomenclatura gemológica puesto que suele recoger una impresión de valor o aprecio por parte del usuario que no son conceptos objetivos en una clasificación.

La síntesis de las gemas comienza principios del siglo XX, con la técnica de fusión a la llama de Verneuil (1902), que permitió fabricar corindón (rubí, zafiro) sintético. Actualmente es posible sintetizar cualquier gema, aunque sólo se fabrican las económicamente rentables (Pellicer, 2001, Renfro *et al.*, 2010).

Los tratamientos para la mejora de las propiedades de las gemas se han aplicado de forma empírica desde hace mucho tiempo. Plinio el Viejo los cita en su *Historia Natural* (Bostock, 1893). Actualmente los tratamientos se realizan con una base científica, desde el conocimiento de la propiedad que se desea modificar. La proliferación de los tratamientos desde finales de siglo XX ha llevado al mercado a una gran cantidad de gemas cuya calidad original no era suficiente. En este trabajo se resumirán algunos de los tratamientos aplicados a las gemas para mejorar su belleza.

ASPECTOS CIENTÍFICOS DE LA BELLEZA DE LAS GEMAS Y TRATAMIENTOS DE MEJORA

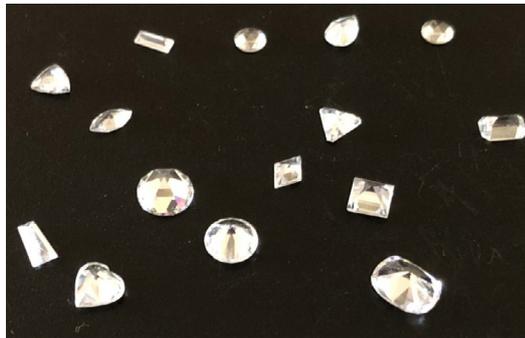
El aspecto de las gemas es dependiente de sus propiedades físicas: brillo, color, transparencia, dispersión y efectos ópticos. La aplicación de principios físicos sencillos permite entender cómo influyen estas propiedades en la belleza de las gemas. A partir de este conocimiento se han desarrollado los tratamientos de mejora de las gemas, de los cuales se explican algunos, los más habituales, a modo de ejemplo.

Brillo

El **brillo** depende de la luz reflejada por la gema. Las gemas suelen tener índices de refracción altos porque van asociados a un mayor brillo. Como ejemplo, se pueden comparar el índice de refracción del diamante (2,42) y del cristal de roca (1,54), mucho menos brillante que aquél. A mayor índice de refracción una mayor proporción de la luz incidente es reflejada en la superficie. Hay que tener en cuenta también que una superficie lisa refleja más que una rugosa; por eso, cuando están “en bruto” las superficies rugosas limitan el brillo natural de la gema. De ahí que el pulido sea la acción más básica a realizar sobre una gema. También hay que tener en cuenta que las gemas son materiales duros que permiten un mejor pulido.

La talla es un proceso más complejo que el pulido, puesto que implica un cambio, no sólo en la superficie, sino también en la forma, de manera que se potencie la belleza de la gema, entre otras cosas

Fig. 3. Distintos tipos de tallas de gemas.



aumentando su brillo (Fig. 3). En 1914 Marcel Tolksowsky calculó las proporciones adecuadas para la talla brillante moderna, en la que los ángulos están calculados en función del índice de refracción del diamante, para que la luz se refleje internamente en él y se maximice el brillo (Bruton, 1983). La diferencia de índices de refracción entre el aire y el diamante ($n=2,42$) obliga a la luz que ha entrado en la piedra a reflejarse (por superar el ángulo límite= $26^{\circ}24'$) en la parte inferior de la gema, en la interfase gema aire, y salir por la faceta superior (la denominada tabla), de manera que sea perceptible al observador. En una talla más aplastada o más gruesa parte de la luz se perdería y el efecto sería de menor brillo (Fig. 4). De forma análoga, el mismo tipo de talla sobre gemas de distinto índice de refracción produce distinto efecto. En la figura 5 se observa como la gema central (YAG, un óxido sintético con estructura granate $Y_3Al_5O_{12}$) presenta menor brillo, debido a su índice de refracción relativamente bajo ($n=1,83$).

Fig. 4. Efecto de las proporciones de la talla brillante en el brillo del diamante. En la talla ideal toda la luz se refleja internamente y sale por la faceta superior (la tabla), maximizando el brillo.



Dispersión

La **dispersión**, es decir, la diferencia entre los índices de refracción de las distintas longitudes de onda de la luz visible, es otra propiedad influyente en el aspecto final de la piedra. La dispersión del diamante es lo suficientemente alta (0,044) para



Fig. 5. Diferencia de brillo entre tres gemas con la misma talla brillante: diamante ($n=2,42$), YAG (sintético, óxido con estructura granate $Y_3Al_5O_{12}$, $n=1,83$) y rutilo ($n=2,61-2,91$). El brillo del YAG es muy inferior al de los otros dos. La imagen muestra la culata de las gemas, por lo que los destellos de color debidos a la dispersión sólo se aprecian en el rutilo (con un tono amarillento), debido a su altísima dispersión (0,330), frente a 0,044 del diamante y 0,028 del YAG.

que, cuando está en talla brillante, se produzca la separación de las longitudes de onda de manera perceptible, y se produzcan unos destellos de colores diversos denominados “fuego” (The Gemology Project – Dispersion). Como este fenómeno es apreciado en el aspecto del diamante tallado, hay que tenerlo en cuenta a la hora de calcular las proporciones y ángulos de la talla (Reinitz *et al.*, 2001). En la figura 5, a pesar de estar tomadas por la culata, se observan destellos de color en el rutilo sintético debido a su altísima dispersión (0,330), frente a 0,044 del diamante y 0,028 del YAG.

Color

El **color** es probablemente el aspecto que llama primeramente la atención de un observador casi en cualquier objeto, y, desde luego, en una gema. Por eso es una de las cualidades más valiosas y se han dedicado esfuerzos a entenderlo para poder mejorarlo. Se sabe que en la antigua Ceilán, en la Edad Media, se calentaban los rubíes para mejorar su color (Sersen, 1995); este tratamiento no tenía otra base que la empírica, mientras que actualmente se puede actuar desde el conocimiento de la causa del color que se desea modificar. El primer estudio sobre las causas del color de los minerales se realizó específicamente sobre gemas (Nassau, 1978). Básicamente el color se explica por la absorción selectiva de algunas longitudes de onda de la luz visible; el color que se aprecia es el de las longitudes de onda no absorbidas. La absorción se produce porque algunos electrones utilizan selectivamente la energía de determinadas longitudes de onda de la luz para aumentar su energía; el resultado es el color. La liberación de esta energía se produce habitualmente fuera del espectro visible, por lo que no se aprecia visualmente. Los modernos tratamientos de mejora del color de las gemas tienen en cuenta estos principios y modifican el color de una gema, bien imitando el fenómeno natural que podía haberlo producido, bien por un proceso totalmente distinto. Los principales tratamientos de las gemas transparentes son los físicos (ej.: térmicos) y los físico-químicos (ej.: irradiación y difusión superficial). Los tratamientos químicos, que incluyen todo tipo de tinciones, recubrimientos e impregnaciones, y que serían los más importantes para las gemas opacas, no se tratarán en este trabajo.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es el principal tipo de tratamiento físico. Los tratamientos térmicos se basan en la aplicación de calor a la gema; la temperatura alcanzada y el tiempo que se mantiene, así como las condiciones en las que se realiza (ej.: atmósfera oxidante o reductora), dependen de la gema y del efecto que se desea producir. Existen muchos tipos, pero examinaremos sólo tres ejemplos correspondientes a cada una de las tres causas del color principales: cationes cromóforos, en los que algunos electrones de este catión son responsables de la absorción selectiva de longitudes de onda; centros de color, que son defectos de la estructura cristalina que implican electrones capaces de absorber algunas longitudes de onda, y transferencia de carga, en el que la absorción selectiva se produce por un

electrón que es transferido de un ion a otro en la estructura. El tratamiento térmico de la aguamarina es uno de los más comunes. La aguamarina es un berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$) en el que el azul se debe a la presencia de Fe^{2+} , como **cation cromóforo**, en posiciones estructurales. Si además existe Fe^{3+} en otra posición estructural del berilo (los canales característicos de esta estructura), el color amarillo que éste proporciona se superpone al azul del Fe^{2+} y le confiere el característico matiz de “agua de mar” (Nassau, 1978). El color concreto en cada caso depende de la proporción de ambos cationes. En una aguamarina excesivamente verdosa, el tratamiento térmico a temperaturas relativamente bajas (250°C - 400°C) reduce este Fe^{3+} a Fe^{2+} , disminuyendo o eliminando por completo el tono amarillento (Nassau, 1984). En la figura 6 se puede observar el matiz ligeramente verdoso de una aguamarina sin tratamiento térmico.

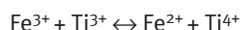


Fig. 6. Cristal prismático de aguamarina en bruto. El tono verdoso indica la presencia de Fe^{3+} en los canales que no ha sido reducido por tratamiento térmico.

El tratamiento térmico aplicado a la amatista (cuarzo, SiO_2 , de color violeta) tiene un fundamento diferente, puesto que el color se debe a **centros de color**, es decir, defectos estructurales. En una posición estructural el Si^{4+} está substituido por Fe^{3+} (defecto estructural de substitución) y, para compensar las valencias, falta un electrón de uno de los oxígenos contiguos. El electrón que queda desapareado en ese oxígeno es el que produce la absorción

de la luz causante del tono violeta de la amatista. El calentamiento (hasta 300 - 500°C) permite que el electrón atrapado vuelva a su posición y elimina el color violeta (Nassau, 1984). Queda entonces patente el color amarillo que proporciona el Fe^{3+} (como ya se ha visto en la aguamarina); esa variedad de cuarzo amarillo se conoce como citrino (Fig. 7A). Esta relación entre ambos colores puede darse en la naturaleza, en la misma piedra, que se denomina ametrino (Fig.7B).

El zafiro azul es un corindón (Al_2O_3) que debe su color a la **transferencia de carga** entre el Fe y el Ti que substituyen al Al^{3+} en algunas posiciones de la estructura cristalina. Tanto Fe como Ti pueden existir en dos estados de valencia, pero la suma de sus valencias ha de compensar la substitución, así que debe realizarse coordinadamente. La transferencia de carga entre ambos estados es la que absorbe luz visible y genera el color:



El calentamiento en condiciones reductoras transforma parte del Fe^{3+} a Fe^{2+} y disminuye la intensidad del color, porque existen menos cationes capaces de producir la transferencia. Por el contrario, un calentamiento en atmósfera oxidante lo intensifica, al generar más cationes Fe^{3+} (Fritsch. and Rossman, 1987).

Tratamiento por irradiación

El tratamiento físico-químico más importante es la irradiación, que actúa sobre la estructura de las gemas. Consiste en la exposición controlada de la gema a una fuente de radiación (electrones, rayos gamma, beta,...) durante un tiempo determinado. A diferencia del tratamiento térmico, la irradiación es técnicamente muy complicada y muchas veces sujeta a secretos industriales, por lo que los detalles, tanto de las fuentes de irradiación como de los efectos de la irradiación sobre las gemas, pueden no ser públicos. En general, la irradiación comunica una energía a las partículas estructurales que permite la formación de defectos (vacancias, intersticiales) que son causa de color. En muchos casos, la irradiación revierte algunos de los efectos de los tratamientos térmicos. Por ejemplo, a la amatista que ha sido calentada para transformarla en citrino se le puede restaurar el color violeta por una irradiación que restablece los centros de color correspondientes.

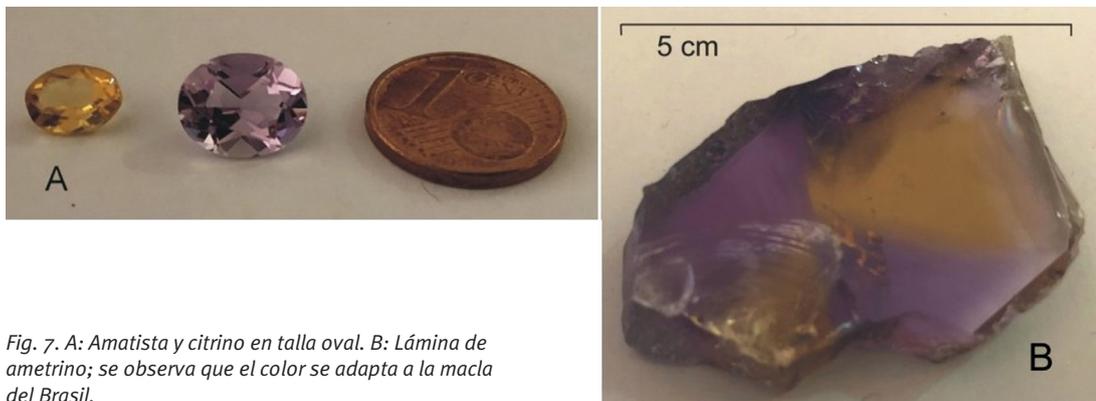


Fig. 7. A: Amatista y citrino en talla oval. B: Lámina de ametrino; se observa que el color se adapta a la macla del Brasil.

El caso más común de irradiación de gemas actualmente es el del topacio ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F}_2)$). El topacio natural puede tener colores muy diversos; gemológicamente el más utilizado fue el de tonos anaranjados, hasta que se desarrolló el tratamiento por irradiación que convertía topacios incoloros o pardos en topacios azules, que son raros en la naturaleza. Las causas del color del topacio son complejas y pueden variar en función de la procedencia de la gema, pero involucran generalmente centros de color, que reaccionan ante la irradiación. Existen diversas técnicas que implican el bombardeo con rayos gamma o con electrones acelerados (Nassau, 1984). Los topacios resultantes suelen tener un matiz verdoso que se elimina con un tratamiento térmico (200-300°C) posterior (Fig. 8) (Nassau, 1985).

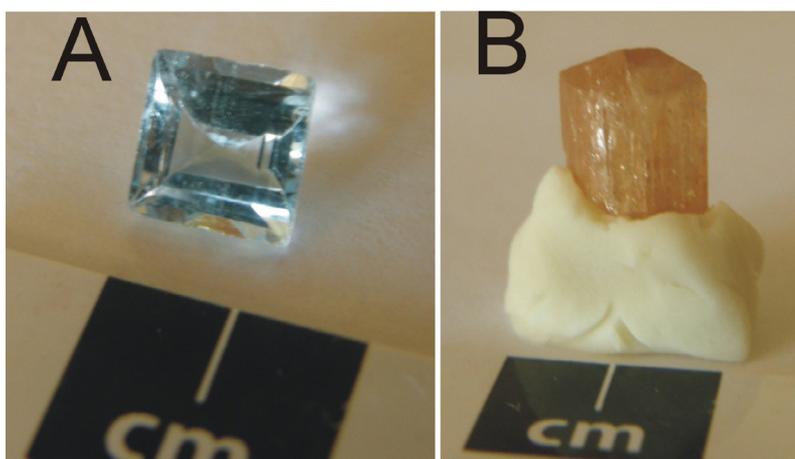


Fig. 8. A: topacio azul tratado. B: topacio en bruto de color "imperial", el color natural más habitual como gema.

Transparencia

La **transparencia** es apreciada en casi todas las gemas, salvo en las que son masivas (turquesa, ópalo,...). Es necesario que la luz atraviese la gema para que se produzca la reflexión total antes mencionada que resulta en un aumento del brillo. En algunos casos puede mejorarse la transparencia, si su disminución se debe a la presencia de fases minerales dispersas en el interior de la gema. En el caso del rubí y el zafiro (corindón: Al_2O_3) es frecuente que haya rutilo (TiO_2) formando agujas pequeñas dispersas que se denominan sedas. Un tratamiento térmico por calentamiento a altas temperaturas, seguido de un enfriamiento rápido, puede llegar a disolver el rutilo, de manera que el Ti pase a ocupar posiciones estructurales y no reduzca la transparencia (McClure and Smith, 2000, Nassau, 1984).

Efectos ópticos

Algunas gemas son apreciadas por presentar efectos ópticos especiales bajo luz visible. Cada efecto tiene una causa diferente, pero en general implican la reflexión de la luz en discontinuidades internas de la gema. Los más llamativos son: a) la adulescencia, característica de la piedra luna, debida a la reflexión en las láminas de exsolución (láminas que concentran alternativamente un catión u otro) del feldespato de Na y K; b) el efecto ojo de gato, que se debe a la reflexión de la luz en inclusiones alargadas orientadas paralelamente dentro del cuerpo de la gema; c) el asterismo, que es similar, pero las inclusiones se orientan según la simetría de

la gema, formando una estrella de 4, 6 u 8 brazos; d) el juego de colores del ópalo noble, que son colores espectrales resultantes de la difracción en las capas de esferas de sílice ordenadas, que forman su estructura (no cristalina) (Hurlbut y Kammerling, 1993).

TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE GEMAS Y ACTIVIDADES DE LABORATORIO

La identificación de la naturaleza de una gema y su caracterización presenta la peculiaridad de requerir técnicas no destructivas. Por ello se recurre a la medida de sus propiedades físicas, especialmente las ópticas (Hurlbut y Kammerling, 1993, The Gemology Project). Otras propiedades como la densidad o la dureza se determinan de forma semicuantitativa o cualitativa. Algunas de estas pruebas se pueden adaptar al contexto didáctico (Nogués *et al.*, 2008). A continuación se describen algunas de estas técnicas y su posible adaptación como actividad de laboratorio. En los casos en los que ha sido posible, la descripción de la actividad se remite a Nogués *et al.* (2008).

Aunque no es esperable que se disponga de un equipo gemológico completo, en muchos laboratorios docentes pueden existir elementos aprovechables para repetir algunas de las determinaciones antes expuestas. Se proponen, por tanto, algunas actividades que utilicen dichos elementos o bien otros fácilmente adquiribles. Igualmente, se pueden utilizar gemas en bruto o minerales existentes en alguna colección, vidrios, incluso plásticos (abalorios), etc. o gemas talladas sin montar procedentes, por ejemplo, de ferias de minerales.

Índices de refracción y birrefringencia: el refractómetro

El índice de refracción (n) es una de las propiedades más importantes desde el punto de vista de la belleza de las gemas, en la medida en la que determina el brillo, y también una de las más útiles en la identificación. Dado que entre los minerales gema hay muchos que son ópticamente anisótropos, se pueden medir al menos dos índices de refracción y obtener el valor de la birrefringencia. El **refractómetro gemológico** se basa en el ángulo límite o ángulo crítico, propiedad que ya se había utilizado en la talla. Como es preciso que la luz viaje de un medio de mayor índice de refracción que la gema que se está identificando, se utiliza un vidrio de plomo de alto índice de refracción en forma de semicilindro. Aún así, algunas gemas tienen índices de refracción mayores y escapan a la medida del refractómetro común. Para la medida se aprovecha la talla de la gema y se apoya la faceta mayor (generalmente la tabla) sobre la superficie del vidrio de alto índice de refracción (Fig. 9A). Entre la gema y el vidrio se pone un líquido de contacto de alto índice de refracción para facilitar la medida. El límite de la medida está en el índice del líquido (1,79 generalmente). La luz atraviesa el vidrio en distintas direcciones y de ahí pasa a la gema. Los rayos que incidan en la gema con ángulos superiores al límite o crítico (AC) se reflejarán en vez de refractarse y producirán oscuridad

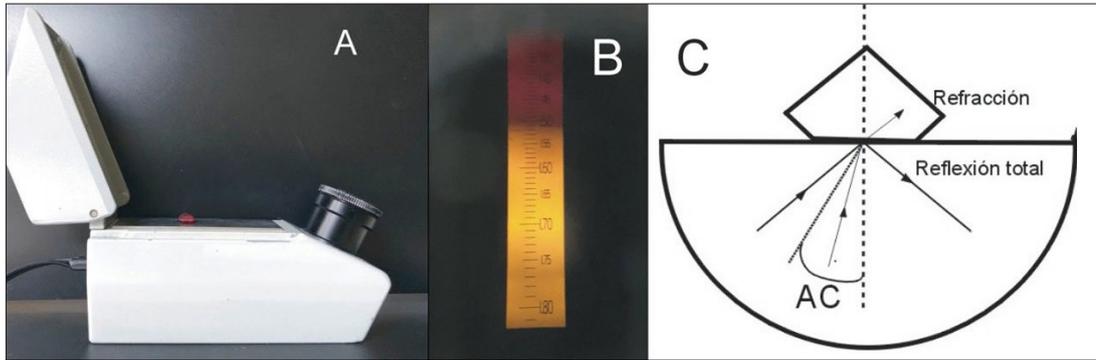


Fig. 9. El refractómetro gemológico. A: imagen del refractómetro con una gema en posición de medida. B: escala de lectura de índices de refracción. C: fundamento del refractómetro: los rayos que inciden con ángulos superiores al ángulo límite o crítico (ac) sufren reflexión total.

al observador (Fig. 9 B y C). El índice de refracción de la gema se puede calcular a partir del ángulo límite o crítico (AC) y el índice de refracción del vidrio:

$$n_{\text{gema}} = \text{sen AC} \times n_{\text{vidrio}}$$

Para facilitar la lectura el constructor incluye una escala en el visor, de manera que no es preciso hacer el cálculo sino que se lee el dato directamente (Fig 9B) (Hurlbut y Kammerling, 1993, The Gemology Project – Refractometer).

Si se trata de un mineral anisótropo la lectura será doble, y la diferencia entre ambos índices, la birrefringencia, es otro dato identificativo. Pero además, en las gemas anisótropas es útil girar la gema sobre el vidrio para obtener los valores límites de la birrefringencia de la gema.

Aplicación de laboratorio 1: Estimación del índice de refracción mediante líquidos densos

El refractómetro no es un aparato habitual en un laboratorio docente no especializado. Sin embargo existe la posibilidad de realizar estimaciones del índice de refracción mediante líquidos densos. El alto índice de refracción de los líquidos densos puede utilizarse para estimar, de una forma aproximada, el índice de refracción de algunas gemas, aunque no de las de mayores índices. El contorno de una gema sumergida en un líquido de índice de refracción diferente (mayor o menor) se observa nítidamente gracias a la refracción que se produce en la interfase gema-líquido. Si el índice de refracción de la gema y el del líquido que la rodea son similares el contorno de la piedra se desdibuja por la ausencia de refracción, por lo que “se pierde” dentro del líquido. Se trata, por tanto, de buscar un líquido de inmersión, de índice de refracción conocido, en la que el contorno de la piedra, al ser sumergida, se vuelva difuso; si los dos índices de refracción fueran idénticos, el contorno sería casi invisible y solo se apreciaría la diferencia de color entre el líquido y la gema (salvo los casos de birrefringencias altas). El problema es encontrar líquidos de índices de refracción comparables a las gemas y que sean de fácil manipulación. Los líquidos más usados son el bromoformo puro, que tiene un índice de refracción de 1,60, el yoduro de metileno puro de 1,74 y diluciones de ambos con tolueno, que pueden dar índices de refracción menores (Hurlbut y Kammerling, 1993). Es preciso calibrar los índices de refracción de las diluciones con piedras de índices de refracción conocidos. Algunas gemas que se pueden utilizar para esta estimación son el cuarzo (1,54-1,55), los berilos (1,56-1,58), topacio (1,62-1,63) o turmalina (1,62-1,64). La espinela natural ($n=1,72$) y la sintética

($n=1,73$) están en el límite superior. Con este método se consigue una aproximación al índice de refracción de la gema, rara vez un valor exacto, y en ningún caso se puede determinar la birrefringencia.

Los líquidos deben guardarse en botes de vidrio con cierre hermético, a salvo de la luz y de cambios fuertes de temperatura. La volatilidad de estos líquidos hace que, por desprendimiento de vapores, las propiedades físicas de la mezcla puedan variar, por lo que es recomendable comprobarlos cuando se vayan a usar.

Birrefringencia: el polariscopio

Para determinar la presencia de anisotropía óptica (birrefringencia) de una gema no es preciso recurrir a la medida de índices, sino que se puede realizar mediante el **polariscopio**. Básicamente consiste en dos láminas polarizadoras (polarización plana) que se sitúan paralelamente, dejando espacio para la gema entre las dos; además, al menos una de las dos láminas se puede rotar. La luz atraviesa sucesivamente el primer polarizador, la gema y el segundo polarizador. Si los dos polarizadores tienen sus direcciones de polarización a 90° no dejarán pasar la luz, a menos que se interponga un material birrefringente (la gema) entre ellos (Nogués *et al.*, 2008). En la Fig. 10 se observa como un rubí (birrefringente) puede verse oscuro o iluminado en el polariscopio en función del ángulo que forme con las dos direcciones de los polarizadores. Por el contrario, si la gema interpuesta fuera monorrefringente se vería oscura en cualquier posición (Hurlbut y Kammerling, 1993, The Gemology Project – Polariscopio) (Fig. 10). El polariscopio tiene la ventaja de que puede utilizarse tanto en gemas con facetas planas como en talla cabujón, o incluso en bruto.

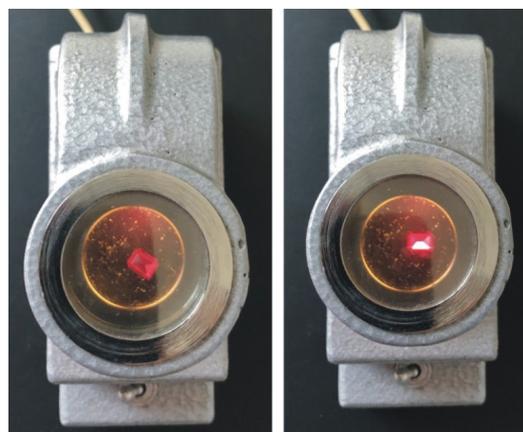


Fig. 10. Polariscopio con un rubí sintético. Izquierda: gema en oscuridad (direcciones de vibración de la luz en la gema paralelas a las del polariscopio). Derecha: gema iluminada (direcciones de vibración de la luz en la gema oblicuas a las del polariscopio).

Aplicación de laboratorio 2: Observación entre polarizadores cruzados

El polariscopio es un instrumento sencillo de imitar mediante dos filtros polarizadores. Nogués *et al.*, (2008) describe que se pueden disponer sobre diversos soportes. En la propuesta que se presenta en este trabajo los polarizadores están sujetos con plastilina y dispuestos en vertical (Fig. 11), en vez de horizontales como en el polariscopio. Únicamente es preciso girar uno de ellos hasta que no pase la luz, para comprobar que están cruzados. La gema debe girarse alrededor del eje perpendicular a los polarizadores. En la figura 11 se observa una gema birrefringente (amatista) entre dos polarizadores cruzados, dispuestos en vertical, y cómo aparece iluminada o no según su orientación, análogamente a lo que se observa en un polariscopio convencional (Fig. 10).



Fig. 11. Observación de una amatista entre polarizadores cruzados; la luz no pasa a través de ellos. A: posición de extinción. B: a 45° de la anterior la gema se ve iluminada (ver Fig.10).

Espectro de absorción de luz visible

La observación del espectro de absorción de la luz blanca, mediante el **espectroscopio**, es una propiedad identificativa que está relacionada con el color como conjunto de longitudes de onda de la luz visible que no han sido absorbidas por la gema. El espectroscopio permite ver en qué porciones del espectro se realiza esa absorción y está relacionado con las causas del color, especialmente los cationes cromóforos (Nassau, 1978). El espectroscopio de prisma, el más sencillo, consiste en un tren de prismas que separan la luz en sus distintos colores (Hurlbut y Kammerling, 1993, The Gemology Project – Spectroscope). La luz se hace pasar por la gema y después por el espectroscopio, de manera que, sobre el espectro de los colores de la luz blanca se observan como bandas o líneas negras los intervalos

del espectro visible que la gema ha absorbido. La descripción del aparato y de los espectros de distintas gemas aparecen en Nogués *et al.* (2008).

Fluorescencia

La **fluorescencia** de las gemas bajo luz ultravioleta es un tipo de luminiscencia, descrita en Nogués *et al.* (2008), que también es interesante para la identificación de gemas, como también ocurre en los minerales en general (Hurlbut y Klein, 1996). Se utiliza una lámpara que emite luz ultravioleta en dos longitudes de onda: corta (253,7 nm) y larga (365,4 nm) (Hurlbut y Kammerling, 1993, The Gemology Project – Luminiscence). La existencia de fluorescencia, su color y su intensidad, así como su posible persistencia (fosforescencia) son caracteres de interés identificativo y que responden a la presencia de determinados elementos (Cr, T.R., U,...) en la estructura cristalina. La explicación del fenómeno aparece en Nogués *et al.* (2008), así como una descripción de cómo realizar las observaciones. En la figura 12 se ve la fluorescencia roja de un rubí sintético bajo luz ultravioleta, frente a un citrino que no presenta fluorescencia.

Aplicación de laboratorio 3: Observación de la fluorescencia

Se puede utilizar una lámpara de ultravioleta para minerales, que dispone de las mismas longitudes de onda que se utilizan en las gemas. En su defecto, existen dispositivos en el mercado que disponen de longitud de onda larga, que además es la que suele dar mejores respuestas. Un ejemplo son los aparatos para comprobar la validez de los billetes de euro. Se pueden utilizar minerales en bruto. Algunos minerales que pueden dar respuesta son la calcita, los feldespatos, el circón y cualquiera que pueda llevar los elementos antes citados. Entre las gemas, rubíes, espinelas rojas y esmeraldas, al ser ricos en Cr, dan una fluorescencia muy patente; los rubíes sintéticos suelen dar mayor intensidad porque contienen mucho Cr. Existen tablas de minerales fluorescentes (The fluorescent mineral tables).

Densidad

La medida de la densidad o del peso específico (densidad relativa) es una propiedad simple de determinar con un equipo disponible en muchos

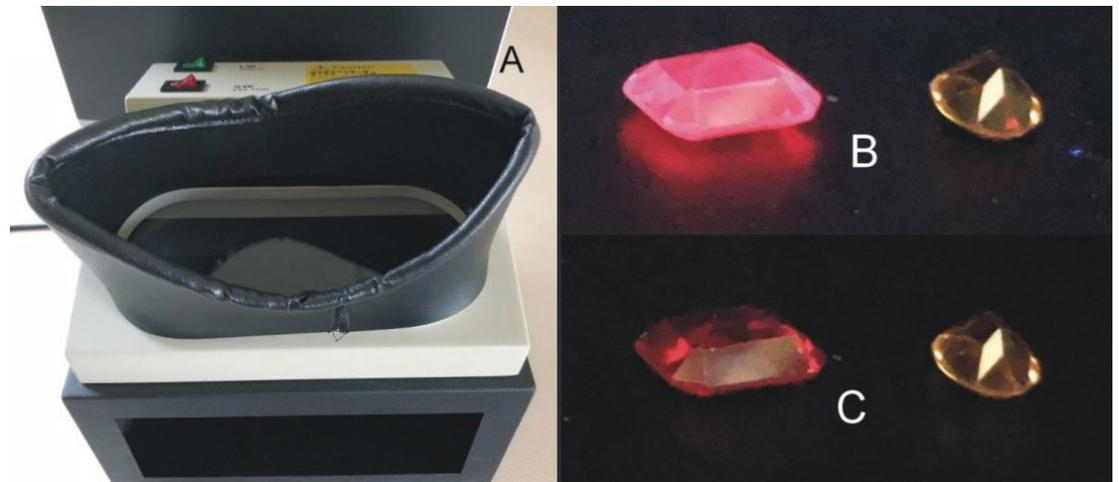


Fig. 12. A: Lámpara de ultravioletas para fluorescencia de gemas. B: rubí sintético mostrando fluorescencia junto a un citrino sin fluorescencia. C: la misma imagen de B con la lámpara apagada.

laboratorios. Los materiales necesarios, el fundamento científico y el procedimiento se describen en Nogués *et al.* (2008). En la práctica gemológica se utiliza también un procedimiento de estimación de la densidad de las gemas de forma semicuantitativa, más simple que el descrito por Nogués *et al.* (2008), y que utiliza líquidos de densidad variable y conocida en los que se sumerge la gema: si la gema se hunde o flota es que tiene peso específico mayor o menor que el líquido; si queda suspendida en él es que tiene un peso específico similar al del líquido. Se utilizan los mismos líquidos que para el índice de refracción: bromoformo (P.e. =2,89) y yoduro de metileno (P.e.=3,33), que se pueden diluir con tolueno (P.e.=0,86) a diversos pesos específicos (Hurlbut y Kammerling, 1993, *The Gemology Project – Heavy Liquids*) (Fig. 13).

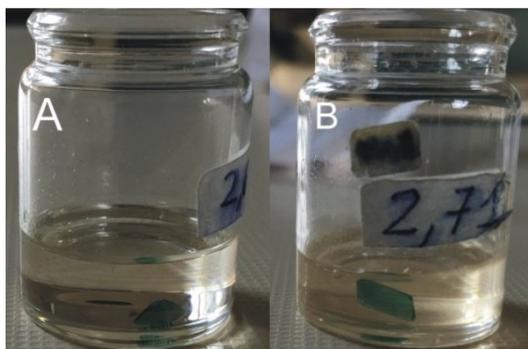


Fig. 13. A: Esmeralda hundida en un líquido de densidad inferior. B: esmeralda flotando entre dos aguas en un líquido de densidad similar.

Aplicación de laboratorio 4: Estimación del peso específico mediante líquidos densos

Se pueden utilizar los líquidos densos antes citados en botes de vidrio. Para fabricar los pesos específicos más habituales se pueden utilizar patrones minerales. Los líquidos más habituales son:

- Bromoformo diluido con tolueno hasta 2,65. El patrón sería un cuarzo cristal de roca. Se añade el tolueno gota a gota y removiendo cada vez; cuando el cuarzo se quede entre dos aguas, tendrá un peso específico similar.
- Bromoformo diluido con tolueno hasta 2,71. Se utiliza un cristal de calcita de patrón.
- Bromoformo puro: 2,89
- Ioduro de metileno diluido con tolueno hasta 3,05. Se utiliza como patrón una turmalina elbaíta verde.
- Ioduro de metileno puro: 3,33.

Otro líquido útil es una solución saturada de sal en agua hasta conseguir un P.e. de 1,10, similar al del ámbar.

La preparación ha de ser cuidadosa, para asegurarse de que el patrón no se hunda ni flote, hay que hacer la observación cuando la adición de diluyente ya se ha incorporado a la mezcla. Respecto a su conservación, hay que tener las precauciones citadas respecto a la estimación de los índices de refracción.

Al realizar la determinación hay que dejar caer la piedra, previamente limpia, con cuidado y despa-

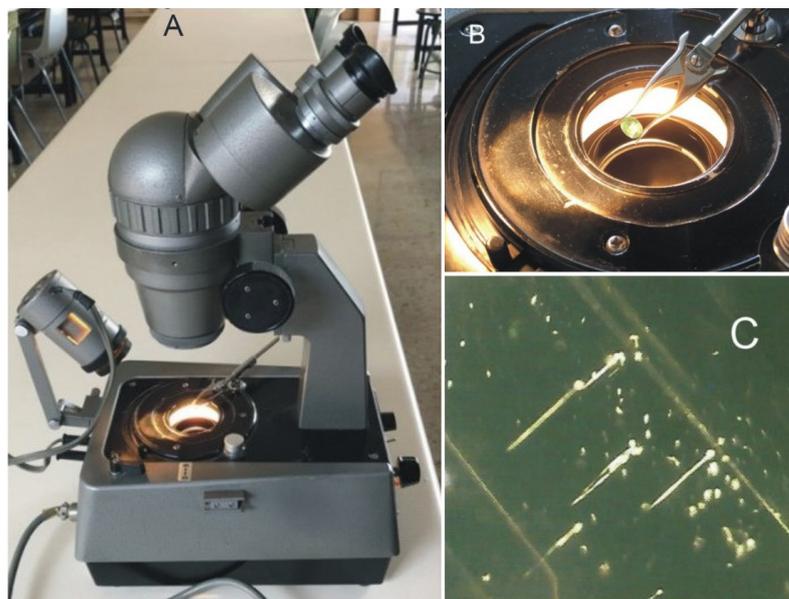
cio, dentro del líquido. Para sacarla hay que recurrir a unas pinzas limpias. Es preciso limpiar la gema y las pinzas con un papel absorbente tras cada operación, para que no queden restos del líquido anterior. Los líquidos densos suelen tener también índices de refracción altos, por lo que es posible que al sumergir la piedra, si su índice es similar al del líquido, su contorno se desdibuje y sea difícil de encontrar, especialmente si es incolora. En cuanto a las gemas cuyo peso específico se vaya a determinar, hay que tener en cuenta que algunas sustancias orgánicas pueden ser atacadas por algunos de estos líquidos, con lo cual se deteriora el material y se altera la densidad del líquido; tampoco es recomendable aplicar este método a gemas masivas, porosas, como la turquesa, que puedan absorber algo del líquido de inmersión.

Existen tablas de pesos específicos de gemas (Specific Gravity Chart) para comprobar las medidas realizadas.

Aspectos morfológicos

El **microscopio** es otra de las herramientas básicas para la identificación de las gemas. Básicamente se utiliza una lupa estereoscópica con aumentos progresivos (zoom) entre 10X y 80X, aunque no se suele pasar de 40X (Fig.14 A). El tipo de iluminación es fundamental y se acomoda al tipo de observaciones que se deseen. La luz incidente (reflejada) permite observar la superficie de las gemas: la talla y sus características, el grado de pulido y la presencia de posibles imperfecciones. Permite además una estimación indirecta de la dureza, ya que la presencia de aristas redondeadas o abrasiones en las facetas son signos de desgaste que sólo se puede producir en gemas relativamente blandas. Se considera que el límite está en el 7 de la escala de Mohs, ya que el polvo de cuarzo es abundante en la atmósfera y raya a todas las sustancias más blandas. A mayor dureza, menor desgaste, aunque es preciso tener en cuenta también el grado de exposición a estas partículas que haya podido sufrir la gema, y que puede estar relacionado con su uso. En el caso del diamante la abrasión y redondeamiento de aristas es nula. La luz

Fig. 14. A: Estereomicroscopio gemológico. B: detalle de gema en iluminación de campo oscuro (luz anular). C: inclusiones de fenaquita en forma de clavo en una esmeralda sintética (Foto: Miguel Ángel Pellicer).



transmitida permite ver el interior de la gema, donde se pueden observar inclusiones de diversos tipos (sólidas, cavidades vacías o con sólidos, líquidos y gases), fracturas o irregularidades de crecimiento, zonados de color, etc. (Nogués *et al.*, 2008) (Fig. 14C). Estos rasgos pueden ser identificativos del tipo de gema: natural o sintética, y en ocasiones, de la procedencia, el tipo de síntesis o los tratamientos sufridos. Las inclusiones como fuente de información de las gemas surgen a partir del trabajo del gemólogo suizo Gübelin en 1957 (A Contribution to the Genealogy of Inclusions, Journal of Gemmology) y en 1986 aparece su primera recopilación de fotografías de inclusiones (Gübelin y Koivula, 1986). Hay que tener en cuenta que la talla de las gemas tiende a hacer que se refleje la mayor cantidad de luz, por lo que es preciso iluminar la gema de la forma más adecuada para que la luz la atraviese. Una de las opciones más usadas es la que se conoce como campo oscuro, en la que la luz no llega directamente a la gema, (Hurlbut y Kammerling, 1993, The Gemology Project – Microscope) sino que se interpone una pantalla entre la fuente de iluminación y la gema, para que la luz llegue de forma oblicua, reflejada lateralmente, de manera que la gema sea iluminada por un anillo lateral de luz (Fig.14B). También puede recurrirse a cerrar más el diafragma, a iluminación indirecta o a producir sombras que impidan la luz directa (The Gemology Project Microscopes). Otra posibilidad es recurrir a la inmersión en un líquido de índice de refracción mayor, para minimizar las reflexiones totales debidas a la talla.

Actividad de laboratorio 5: Observaciones con aumento

Se puede utilizar un microscopio convencional para las observaciones del material en bruto. Las dificultades debidas a las reflexiones totales en las observaciones de gemas talladas con luz transmitida pueden reducirse simplemente recurriendo a la inmersión en agua destilada que, aunque no iguala nunca el índice de refracción de la gema, mejora la observación del interior de la gema significativamente (The Gemology Project – Immersion_cell). Por otra parte, en Nogués *et al.* (2008) se describe cómo adaptar un estereomicroscopio para la observación de inclusiones con iluminación de campo oscuro, así como una descripción de materiales posibles y las inclusiones que se pueden observar. Para la comprobación de las observaciones existen galerías de inclusiones (The Gemology Project – Inclusions)

Además, dos polarizadores, como los utilizados para imitar el polariscopio, pueden servir para las observaciones de fenómenos de birrefringencia. El polarizador inferior debe situarse entre la luz y la gema, y el superior en el camino de la luz que haya atravesado la gema. Es preciso alinear las direcciones de polarización de ambos y que uno de ellos pueda girarse 90° para que estén cruzadas. Puede hacerse una marca cuando estén cruzadas (oscuridad) y a 90° será la posición de alineación de las dos direcciones (ver sección anterior).

Finalmente, en ausencia de microscopio, la lupa de 10 aumentos es una herramienta básica para la identificación de gemas que permite ver muchos rasgos tanto internos como externos (Fig. 15).



Fig. 15. Lupa de 10 aumentos.

CONSIDERACIONES FINALES

El atractivo que suscitan las gemas generalmente despierta la curiosidad y el interés por conocer algo más sobre ellas, desde el punto de vista científico, algo que no suele asociarse a este tipo materiales. Sin embargo, las propiedades que hacen atractivas las gemas, así como las que sirven para identificarlas, se basan en principios científicos sencillos y que son susceptibles de ser observados con un equipamiento limitado.

En este trabajo se revisan el concepto de gema y su clasificación actual, así como los factores que influyen en ella. A partir de ahí, se examinan las propiedades físicas que hacen atractivas a las gemas y también en las que se basan la técnicas de identificación, y se proponen actividades de laboratorio basadas en estas últimas.

Desde el punto de vista teórico, la utilización de las gemas como ejemplo docente está limitada por el conocimiento y manejo que los estudiantes tengan sobre los principios físicos (densidad o peso específico, índice de refracción, dispersión,...) en los que se basan. En cuanto a las actividades de laboratorio, si bien el equipamiento necesario es sencillo, dado que se manejan objetos pequeños, deben realizarse en grupos reducidos, de dos o tres por actividad, y de manera rotatoria, es decir, varios grupos realizan simultáneamente una actividad diferente y se van intercambiando, para que al final de la sesión todos los grupos hayan realizado el total de las actividades. Se facilitan además direcciones web con buena información sobre las propiedades examinadas y que pueden proporcionar imágenes de los fenómenos referidos; también una parte de los trabajos citados en las referencias están disponibles en web y son de acceso abierto.

Desde el punto de vista conceptual, las gemas pueden ser un ejemplo atractivo a los estudiantes; descubrir el fundamento científico de una cualidad aparentemente tan subjetiva como la belleza de las gemas puede ayudar a entender la relevancia de ciertos fenómenos físicos en contextos aplicados. Por su parte, las actividades de laboratorio pueden contribuir a entender la aplicación del método científico a la resolución de problemas prácticos, así como al desarrollo de las destrezas en el laboratorio (observación, precisión, rigurosidad, etc.) y en el trabajo en equipo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a AGEDA (Asociación Gemológica de Aragón) y a la Universidad de Zaragoza por el uso del material gráfico. Asimismo, agradecemos los comentarios de los revisores Joaquim Nogués Carulla y Ángel Cortés.

BIBLIOGRAFÍA

Bostock, J. (1893). *Pliny the Elder, The Natural History*. Disponible en web: <http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus%3Atext%3A1999.02.0137%3Abook%3D37> [consulta 06/07/2018]

Breeding, C.M., Shen, A.H., Eaton-Magaña, S., Rossman, G.R., Shigley, J.E. y Gilbertson, A. (2010). Developments in gemstone analysis techniques and instrumentation during the 2000s. *GEMS & GEMOLOGY*, 46 (3), 241–257. Disponible en web: <https://www.gia.edu/gems-gemology> [consulta 29/08/2018].

Bruton, E. (1983). *Diamantes*. Edicions de la Universitat de Barcelona, 566 p.

CIBJO (2015). *The Gemstone Book* Disponible en web: <http://www.cibjo.org/introduction-to-the-blue-books/> [consulta 02/07/2018]

Diago Diago, M.P. (2009). El comercio internacional de diamantes: sistema de certificación del proceso Kimberley. *Cuadernos de Derecho Transnacional*, 1 (1), 72–91.

Fritsch, E. y Rossman, G. R. (1987). An update on color in gems. Part I: Introduction an colors caused by dispersed metal ions. *Gems & Gemology*, Fall 1987, 126–139. Disponible en web: <https://www.gia.edu/gems-gemology> [consulta 29/08/2018]

Gübelin, E.J. y Koivula, J.I. (1986). *Photoatlas of inclusions in gemstones*. ABC Editions, Suiza, 532 p.

Hurlbut, C.S. y Kammerling, C.R. (1993). *Gemología*. Ed. Omega S.A., 338 p.

Klein, C. y Hurlbut, C.S., (1996). *Manual de Mineralogía*. Ed. Reverté, 679 p.o

McClure, S.F. y Smith, C.P. (2000). Gemstone enhancement and detection in the 1990s. *Gems & Gemology*, Winter, 336–359. Disponible en web: <https://www.gia.edu/gems-gemology> [consulta 29/08/2018]

McClure, S.F., Kane, R.E. y Sturman, N. (2010). Gemstone enhancement and its detection in the 2000s. *Gems & Gemology*, 46 (3), 218–240. Disponible en web: <https://www.gia.edu/gems-gemology/fall-2010-detection-disclosure-heating-mcclure> [consulta 06/07/2018]

Nassau, K. (1978). The origins of color in minerals. *American Mineralogist*, 63 (3–4), 219–229.

Nassau, K. (1980). *Gems made by man*. Ed. Chilton Book Co., 364 p.

Nassau, K. (1984). *Gemstone enhancement*. Ed. Butterworths, 221 p.

Nassau, K. (1985). Altering the color of topaz. *Gems & Gemology* Spring 1985, 26–34 Disponible en web: <https://www.gia.edu/gems-gemology> [consulta 29/08/2018]

Nogués J.M., García, M., Martínez, S. y Àvila, G. (2008). Los minerales gema: una propuesta práctica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.1, 49–56.

O'Donoghue, M. (1997). *Synthetic, imitation and treated gemstones*. Butterworth-Heinemann, 203 p.

O'Donoghue, M. y Joyner, L. (2003). *Identification of Gemstones*. Butterworth-Heinemann, 313 p.

Pellicer, M.A. (2001). *Las otras piedras preciosas*. Ed. M.A. Pellicer, 350 p.

Renfro, N., Koivula, J.I., Wang, W. y Roskin, G. (2010). Synthetic gem materials in the 2000s: a decade in a review. *Gems & Gemology*, 46.4, 260–273. Disponible en web: <https://www.gia.edu/gems-gemology> [consulta 29/08/2018]

Russell, M.L. y Tripp, L.O. (2010). Learning about Minerals through the Art of Jewelry Making: A Multicultural Science Connection. *Science Activities*, 47, 115–124.

Sersen, W.J. (1995) Gem Minerals in Early Arabic Literature. *Mineralogical Record*, 26 43–48.

Specific gravity chart. Gem Select. Disponible en web: <https://www.gemselect.com/gem-info/specific-gravity.php> [consulta 05/07/2018]

The fluorescent mineral tables. Disponible en web: <http://www.galleries.com/minerals/property/fluotabl.htm> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Dispersion. Disponible en web: <https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Dispersion> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Heavy Liquids. Disponible en web: https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Heavy_Liquids [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Immersion_cell. Disponible en web: https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Immersion_cell [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Inclusions. Disponible en web: <https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Images:Inclusions> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Luminiscence. Disponible en web: <https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Luminescence> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Microscope. Disponible en web: <http://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Microscope> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Polariscope. Disponible en web: <https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Polariscope> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Refractometer. Disponible en web: <https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Refractometer> [consulta 05/07/2018]

The Gemology Project – Spectroscope. Disponible en web: <https://gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Spectroscope> [consulta 05/07/2018] ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 2 de mayo y aceptado definitivamente para su publicación el 3 de septiembre de 2018