

Obtención de cristales en niveles no universitarios

Carmen Reyero Cortiña,^a Manuela Martín Sánchez,^a Juan Gabriel Morcillo Ortega,^a
Eugenia García García^a y M.^a Teresa Martín Sánchez^{b*}

Resumen: Los alumnos de niveles no universitarios, sobre todo de ESO y de Bachillerato, muestran gran interés por los trabajos experimentales en las clases de Química o Geología, siendo la formación de cristales uno de los que más poderosamente llama su atención. En este artículo se proponen distintas formas de obtener cristales, así como ejemplos prácticos acerca de cómo los alumnos pueden comprobar la influencia del medio en la forma de los mismos.

Palabras clave: Enseñanza de la Química, trabajos prácticos, cristalización, estructuras cristalinas, educación secundaria.

Abstract: High School students show a great interest about experimental activities in Chemistry and Geology subjects, being growing crystals one of the most attractive for them. Not only does this paper propose different ways to obtain crystals but also many practical suggestions for students so they can prove by themselves the relationship between the growing environment and the crystals morphology.

Keywords: Teaching Chemistry, practical works, crystallization, crystal structures, secondary education.

Introducción

Uno de los temas de Química que más llama la atención de los alumnos de Secundaria es la comprobación acerca de como se organiza la materia para la formación de cristales. Según hemos comentado en otros trabajos^[1] este interés fue incluso el punto de partida de grandes vocaciones científicas: Dorothy Hodgkin, Premio Nobel de Química 1964, cuenta en sus memorias que su interés por la Química nació cuando, estudiando en la escuela primaria, aprendió a obtener cristales con los productos que le facilitaba un amigo de sus padres.

La investigación acerca de los cristales ha adquirido enorme importancia en estos momentos en los que asistimos a una incesante búsqueda de nuevos materiales, y cuando se ha comprobado que conseguir una determinada forma cristalina puede servir para, por ejemplo, optimizar las propiedades de los medicamentos, como puede ser el caso de una simple aspirina.^[2] La forma de cristalización hace que las propiedades, incluyendo la estabilidad, solubilidad y velocidad de disolución, higroscopicidad y biocompatibilidad, sean diferentes e incluso puede dar lugar a que, en una determinada forma, un medicamento resulte eficaz, mientras que en otra sea un producto perjudicial para la salud.

Nuestra finalidad al abordar este tema ha sido que los alumnos, además de disfrutar con la obtención de cristales, se den cuenta de que la capacidad de autoorganización de la materia se rige por las leyes generales relacionadas con los átomos y las moléculas, y de que esta capacidad forma parte tanto de las estructuras vivas como de las de las inertes. Como hemos podido comprobar existe en algunas ocasiones una convergencia formal entre determinadas estructuras de los seres vivos y de los inertes,^[3] como es el caso de algunos cristales de aspecto arborescente.

A continuación, proponemos una serie de trabajos de tipo experimental que realizamos con alumnos de niveles no universitarios con el objetivo de que conozcan no sólo cuáles son las condiciones de cristalización, sino también cómo puede variar la forma de los cristales obtenidos según el medio en el que se han formado, o incluso según las condiciones.

Estos trabajos también los hemos llevado a cabo con alumnos universitarios de una asignatura de carácter genérico impartida en nuestro departamento, dirigida a alumnos de otras facultades y directamente relacionada con la formación del profesorado de Educación Secundaria. En dicha asignatura ("Didáctica de la Geología"), estos alumnos encuentran extraordinariamente útil conocer y comprender procesos y condiciones de cristalización, necesarios para explicar y razonar adecuadamente, con una base química, cualquier cuestión relacionada con la génesis de minerales y rocas.

Este artículo tiene dos partes:

1. En la primera, se refieren una serie de experimentos relacionados con las diferentes condiciones en las que se puede producir la cristalización.
2. En la segunda parte se hace referencia a otras actividades experimentales relacionadas con otros aspectos relativos a la cristalización:

- Influencia del medio
- Formación de sales dobles
- Jardín cristalino
- La cristalización como fuente de calor
- Observación a través del microscopio del crecimiento de cristales



C. Reyero



M. Martín



J. G. Morcillo



E. García



M. T. Martín

^a Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Facultad de Educación, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

^{b*} IES Fernando de Rojas. Colombia, 46. 37003 Salamanca.

C-e: mtmartin@ono.com

Recibido: 19/09/2007. Aceptado: 21/05/2008.

1. Condiciones de cristalización

Para que la materia pueda reorganizarse formando determinadas estructuras, las moléculas o iones deben estar en movimiento y perder dicha movilidad en unas determinadas condiciones:

- Con tiempo suficiente (lentamente).
- En reposo.
- Disponiendo de espacio suficiente para orientarse.

Los cristales más perfectos se obtienen en las naves espaciales porque, en ausencia de gravedad, sólo actúan las fuerzas entre los iones o moléculas. Este es el motivo por el cual entre los diferentes programas que se desarrollan en cualquier vuelo espacial, siempre alguno o algunos se refieren a la obtención de cristales.

Estas condiciones se pueden conseguir mediante procesos físicos o químicos:

A. Procesos físicos:

1.A.1 Evaporación del disolvente: es el proceso por el que, en la naturaleza, se originan algunas de las rocas sedimentarias de precipitación química, concretamente las llamadas evaporíticas. En el laboratorio la evaporación de una disolución de cualquier sal que no sea higroscópica puede ilustrar este proceso. En nuestro caso, utilizamos una disolución muy concentrada de sulfato de cobre(II) pentahidratado, que se deja en reposo para que el disolvente se vaya evaporando. Cantidades adecuadas son 15,0 g de sulfato de cobre(II) pentahidratado en 50 mL de agua. Tras pulverizar el sulfato de cobre en un mortero se coloca en un vaso de precipitados, se añade el agua y se calienta. A continuación, se vierte la disolución en un cristizador, dejándola en reposo hasta que aparezcan los cristales. Dicha aparición depende de la humedad del ambiente y de la concentración de la disolución, pero suele ocurrir en un período inferior a veinticuatro horas. Los cristales formados pertenecen al sistema triclinico.

1.A.2 Fusión: la cristalización a partir de fundidos, muy común en la naturaleza al ser el proceso por el que se forman las rocas plutónicas y volcánicas, se puede ilustrar fundiendo azufre y dejándolo enfriar lentamente en un recipiente que esté en reposo. El azufre debe ser la variedad conocida en el mercado como "azufre cañón", no debe utilizarse el conocido como "flor de azufre" por su deficiente cristalización. Se pulveriza el azufre cañón en un mortero, después de haberlo troceado previamente a golpe de martillo, y se coloca el polvo en un tubo de ensayo llenándolo hasta las tres cuartas partes. Se calienta hasta fundir lentamente y con cuidado, ya que el azufre sublima con facilidad y un calentamiento rápido provocaría la emisión de vapores que podrían arder produciendo dióxido de azufre. A continuación, se vierte el azufre fundido sobre un papel doblado como un filtro liso, colocado sobre el correspondiente embudo (Figura 1). Tras dejarlo en reposo, se observará atentamente hasta que aparezca una especie de nata en la superficie del fundido. En ese momento, se procederá a retirar el papel cónico del embudo y a abrirlo para que quede plano, separándose la parte fundida de lo ya cristalizado (si se dejara enfriar y cristalizar el fundido en su totalidad en el interior del cono de papel se formaría

una masa en la que no sería posible la observación de cristales individuales). Si se procede tal cual se ha indicado, se apreciará la existencia de cristales aciculares transparentes (Figura 2), que pertenecen al sistema monoclinico, y que se van haciendo opacos a medida que progresa el enfriamiento en su totalidad (pasan a ser rómbicos). El cambio de una variedad alotrópica a la otra^[4] se puede apreciar perfectamente.



Figura 1. Azufre fundido sobre papel de filtro.



Figura 2. Cristales aciculares de azufre.

1.A.3 Sublimación: En las zonas volcánicas la sublimación es un fenómeno relativamente frecuente, por brusco enfriamiento de los gases emitidos en fisuras superficiales. Es sencillo ejemplificar este tipo de cristalización en el laboratorio, a partir del yodo o de la naftalina.

Si se calienta una pequeñísima cantidad de yodo en un vaso sobre el que se haya colocado una cápsula con agua fría el yodo sublima y, al chocar los vapores con la cápsula fría superior, cristaliza formando pequeños cristales en forma de rombos, negro-violáceos y brillantes. La observación de dichos cristales debe realizarse con una lupa binocular, para que puedan apreciarse perfectamente su brillo metálico y su forma.

En el caso de la naftalina, se depositan dos bolas troceadas en un vaso, sobre el que se coloca un cucurucho de papel (Figura 3). Tras colocar el vaso sobre una rejilla en buen estado se calentará lentamente, recogiendo los vapores en el interior del cono. Se deja enfriar, se levanta el cono y, si se ha hecho de forma correcta, estará lleno de unos delicados cristales transparentes de forma arborescente. Los alumnos pueden comparar los cristales de la naftalina, que se rompen fácilmente al tocarlos con el dedo, con los de la sal común, mucho más resistentes, y buscar cuál es la causa de tal diferencia.

La utilización de naftalina resulta imprescindible, no sirviendo los otros tipos de productos que se comercializan como antipolillas. Asimismo, es necesario insistir en la importancia de realizar el proceso de calentamiento lentamente, por seguridad del experimento, y en la utilización de una rejilla limpia y en buen estado, para evitar que pudieran arder los vapores de naftalina en el caso de que salieran al exterior del cono a causa de un calentamiento demasiado brusco (si tal cosa ocurriera, retirar el mechero y cubrir el vaso y el cono de papel con una bayeta que debe tenerse preparada).



Figura 3. Cono de papel para recoger los cristales de naftalina.

B. Procesos químicos

1.B.1 Cristalización por una reacción química muy lenta

Ejemplos de este tipo de cristalización son los llamados árboles metálicos. Estas reacciones ocurren lentamente debido a que uno de los reactivos es sólido, y como consecuencia de la lentitud, el metal producto de la reacción cristaliza. Se pueden lograr introduciendo un metal más activo en una disolución de un metal menos activo, y en el laboratorio se pueden ilustrar diferentes ejemplos:

- Árbol de plata: hilos de cobre en una disolución diluida de nitrato de plata (Figura 4).
- Árbol de plomo: un trocito de cinc en una disolución diluida de nitrato de plomo(II)
- Árbol de cobre: un clavo de hierro en una disolución de sulfato de cobre(II), a la que se le añaden unos cristales de sal común gruesa.

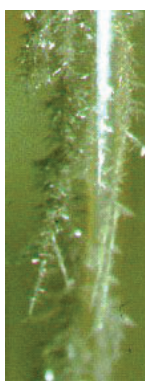


Figura 4. Árbol de plata.

El método de trabajo consiste en depositar la disolución de la sal del metal menos activo en un tubo de ensayo, y dentro de ella introducir un trocito o unos hilos del metal más activo. Esto último se consigue fácilmente colocando una cerilla o un palillo atravesado en la parte superior del tubo, del que cuelgue el metal sujeto por un hilo de la longitud adecuada para que quede inmerso en la disolución (Figura 5). El proceso es lento y se deberá dejar en reposo durante, al menos, un día.

Como se ha mencionado anteriormente, en el caso del árbol de cobre es muy importante añadir unos cristales de sal gruesa para acelerar la reacción, ya que contribuye a que se rompa la capa de óxido que recubre al hierro. También en otros casos similares es una buena técnica para conseguir que un metal reaccione con mayor rapidez.



Figura 5. Formación de un árbol metálico.

1.B.2 Formación de un sólido amorfo por una reacción rápida, disolución del mismo por calentamiento, y posterior cristalización por enfriamiento lento

Los alumnos conocen teóricamente la importancia de la velocidad de la cristalización en la naturaleza y su relación con la formación de rocas cristalinas de mayor o menor tamaño de grano, o la formación de sólidos amorfos en forma de, por ejemplo, vidrios volcánicos. El siguiente experimento reproduce estas circunstancias, aunque evidentemente a otras escalas temporales y espaciales.

Yoduro de plomo(II), lluvia de oro: Si se mezclan dos disoluciones una de yoduro de potasio y otra de nitrato de plomo(II), se forma un precipitado amarillo de yoduro de plomo(II) en forma de polvo mate, típico de una sustancia amorfa. Si, posteriormente, se calienta se disuelve dicho precipitado ya que el yoduro de plomo(II) es soluble en caliente. Cuando esta disolución se deja enfriar, proceso más lento que el calentamiento, se forma de nuevo yoduro de plomo(II) en el seno de la disolución, pero ahora cristalizado en forma de unas escamas de color amarillo brillante, dando la impresión de que llueve oro.

Si la mezcla anterior de disoluciones de yoduro de potasio y nitrato de plomo(II) se realizara lentamente, se obtendrían directamente los cristales de yoduro de plomo(II) para lo cual se procedería de la siguiente manera:

En un extremo de una cápsula Petri con agua se colocan unos cristales de yoduro de potasio y, en el extremo diametralmente opuesto, otros cristales de nitrato de plomo(II). A medida que se van alcanzando los respectivos iones por difusión en el agua, lo que ocurre lentamente, aparece un polvo cristalino, amarillo, brillante de yoduro de plomo(II).

Los alumnos deberán reflexionar acerca de por qué el yoduro de plomo(II) no aparece exactamente ocupando la parte central de la cápsula, fijándose hacia donde está desplazado y buscar explicaciones de por qué la velocidad de difusión de los distintos iones es diferente.

2. Otras actividades experimentales relacionadas con la cristalización

2 A. Influencia del medio

La forma de los cristales de una determinada sustancia puede variar si en el medio existe otra cuyos iones o moléculas influyan en el desplazamiento de los de la primera. De hecho existen numerosas investigaciones para la obtención de cristales en diferentes medios con objeto de mejorar las características de determinadas sustancias.

Los alumnos pueden comprobar fácilmente la influencia del hábitat en la cristalización añadiendo a la disolución de una sal pequeñas cantidades de otra sustancia. Nuestros alumnos han comprobado las diferentes formas de los cristales de NaCl, cuando se obtienen dejando cristalizar una disolución acuosa de cloruro de sodio puro, en relación a los cristales obtenidos cuando se le añaden unas gotas de una disolución diluida de nitrato de plomo(II) o unos mililitros de ácido acético.^[7]

También es posible observar unos curiosos cristales de aspecto filamentosos si a una disolución saturada de cloruro de sodio se le añaden unas gotas de una disolución de polivinilo o polietanol.

La consecución de cristales de cloruro de sodio que carezcan de grandes vértices o aristas resulta de gran importancia bajo el punto de vista industrial. Debido al carácter higroscópico de la sal común, las aristas y vértices contribuyen a que los cristales se peguen unos a otros, lo que constituye un problema para el manejo de la sal en cantidades industriales (todos conocemos cómo la sal se apelmaza en los saleros sobre todo los días húmedos, y las dificultades para manejarla en tal caso en esos recipientes). En la bibliografía se encuentran descritas investigaciones^[5] que muestran la consecución de cristales de cloruro de sodio bastante redondeados, de mucho más fácil manejo, al obtenerse dodecaedros rómbicos en vez de cubos por haberse llevado a cabo la cristalización en presencia de glicina. Según una patente de 1953, se obtienen cristales dendríticos y estrellados en la sal de uso común^[6] añadiendo a la disolución de la sal, antes de dejarla en reposo para cristalizar, una pequeñísima proporción de iones ferrocianuro (5–20 ppm), mejorándose de esta forma las propiedades de solubilidad y evitándose el apelmazamiento. Aunque el ferrocianuro es tóxico, en la proporción mencionada resulta inofensivo.

Berzelius ya hacía alusión a la importancia del medio en la cristalización. En su obra^[8] refiere el procedimiento para conseguir cristales de "nitro" (sin duda, se refiere al nitrato de potasio) muy grandes disolviendo la sustancia en agua de cal hirviendo. Si se disuelven 2 partes de nitro y 3 de sulfato de sodio en agua tibia, se reparte la disolución en dos frascos, y en uno se introduce un cristal de nitro y en el otro de sulfato de sodio, se podrá observar como en el primero empezará a cristalizar el nitro y en el segundo el sulfato de sodio.

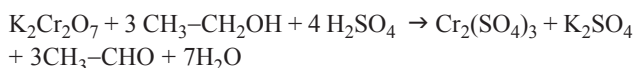
2B. Cristales de sales dobles

Los cristales de sales dobles más fáciles de obtener y más espectaculares son los de los alumbres, sales dobles de un metal trivalente y un metal monovalente, que cristalizan con 12 moléculas de agua ($M^+M^{3+})(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$. Por otra parte,

tienen la particularidad de que un cristal de un alumbre determinado crece en la disolución de otro distinto sin ningún problema, con lo cual se pueden conseguir vistosos cristales con capas de diferentes colores.

Para conseguir los cristales de cualquier alumbre es suficiente con disolver una mezcla equimolecular de un sulfato monovalente y uno trivalente: pueden ser de aluminio y potasio, de cromo y potasio, etc., y posteriormente evaporar al baño maría hasta que se vean residuos sólidos en la parte superior de la disolución, dejando por último enfriar en reposo hasta cristalización.

El alumbre de cromo y potasio se puede obtener también haciendo reaccionar dicromato de potasio con etanol en medio sulfúrico:



Los alumnos pueden ajustar la reacción y realizar los cálculos de los reactivos necesarios (sulfúrico del 98% y densidad 1,84 g/mL y etanol del 80%) para que reaccionen con 15 g de dicromato de potasio. Se disuelve el dicromato en 100 mL de agua, se añade el sulfúrico concentrado y se coloca el recipiente de reacción dentro de un cristizador con hielo. Muy lentamente se va añadiendo el alcohol, de manera que la temperatura sea del orden de 10°C y no se superen los 50°C, porque a temperatura alta se puede formar sulfato de cromo(III) de color verde, no cristalizando entonces el alumbre. El etanol formado en la reacción pasa a la atmósfera. Se deja en reposo hasta que aparezcan los cristales octaédricos de alumbre de cromo y potasio, normalmente muy pequeños y de color violeta. Si se quieren conseguir cristales de mayor tamaño, se aíslan algunos de los ya formados, y el resto se disuelve en la menor cantidad de agua posible (sin sobrepasar los 50°C). A esta disolución se añaden como germen los cristales seleccionados y se deja cristalizar a la temperatura ambiente.

2C. Jardín cristalino

El procedimiento para conseguir lo que se conoce como "jardín cristalino" consiste en lo siguiente: en un recipiente amplio, un cristizador por ejemplo, se deposita una capa de unos 10 cm, formada por una mezcla a partes iguales de silicato de sodio (vidrio soluble) y agua. En dicha disolución se espolvorean, de forma que caigan en diferentes zonas del fondo del recipiente, cristales de sales solubles de distintos colores, como sulfato de cobre(II), sulfato de hierro(II) cloruro de manganeso(II), nitrato de hierro(III), cloruro de cobalto(II), cloruro de magnesio, cloruro de hierro(III), etc. Estos cristales se van disolviendo y, al entrar en contacto con el silicato de sodio, se origina el silicato insoluble del metal correspondiente, en forma de una especie de columna hueca por cuyo interior sigue subiendo la disolución de la sal del cristal correspondiente. Las columnas siguen creciendo a medida que las diferentes disoluciones llegan a la parte superior de cada una de las columnas y se van formando los silicatos insolubles correspondientes. De esta forma crecen columnas de diferentes colores, tamaños, formas y espesores, asemejándose el aspecto de la formación final a un jardín lo cual ha motivado su nombre. Durante muchos años se ha utilizado con fines didácticos, sin embargo en la actualidad se está utilizando como trabajo de investigación tratando, por

una parte, de explicar los fenómenos relacionados con la presión osmótica, gradiente de concentraciones, etc. Incluso se han sustituido los cristales columnares por tubos capilares para hacer llegar la disolución de las sales correspondientes a la disolución de silicato de sodio.^[9]

2D. La cristalización como fuente de calor

Se pueden conseguir disoluciones sobresaturadas de acetato de sodio que, al entrar en contacto con determinados materiales, cristalizan rápidamente desprendiendo calor. Este es el fundamento de determinados dispositivos que se comercializan para calentar bebidas como el café, o para calentar articulaciones (muñeca, rodilla, etc).

En un tubo de ensayo grande se mezclan 20 partes de acetato de sodio trihidratado con 3 partes de agua (medidos en masa), y se cierra con un tapón de goma. Se introduce en un vaso de agua caliente agitándose hasta la total disolución, obteniéndose una disolución sobresaturada de $\text{NaCH}_3\text{COO}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Se deja enfriar sin agitar, ya que al encontrarse la solución sobresaturada en estado metaestable, cualquier agitación provocaría la aparición de cristales. Si una vez frío se agita, de forma que la disolución entre en contacto con el tapón, se produce una rápida cristalización y se libera calor. El acetato de sodio trihidratado se puede sustituir por tiosulfato de sodio pentahidratado.

Esa disolución de acetato de sodio trihidratado también se utiliza para obtener formaciones cristalinas en forma de estalactita. Para ello, se disuelven en un matraz redondo 150 g de acetato de sodio trihidratado en 40 mL de agua destilada calentado lentamente a la llama de un mechero, mientras se agita el matraz circularmente, hasta disolución completa. A continuación se tapa el matraz para evitar que caiga polvo ambiental, lo que provocaría la cristalización. Esta disolución se puede mantener durante meses si se hace correctamente y el matraz está limpio, ya que como se ha indicado la presencia de impurezas o partículas daría como resultado la cristalización. Para la formación de las estalactitas, se colocan unos cristallitos de acetato en una cápsula Petri, y sobre ellos se va vertiendo poco a poco la disolución del matraz, la cual irá cristalizando instantáneamente a medida que va cayendo, formándose una columna de cristales que aumenta de tamaño a medida que se va añadiendo más disolución.

2E. Observación con el microscopio de la formación de cristales

Aunque la formación de cristales en la naturaleza es un proceso lento, es posible contemplar en el laboratorio el crecimiento de los mismos. Para ello, con un cuentagotas o una varilla se deja caer en un portaobjetos una gota de una disolución saturada de nitrato de potasio, pudiéndose observar a continuación a través del microscopio el crecimiento de cristales aciculares. Frankenheim (1801–1869), científico alemán especialista en cristalografía,^[10] mencionaba el hecho de que esas agujas se transforman convirtiéndose en romboedros: "si una aguja se toca con un romboedro se transforma rápidamente en este último", aunque no nos ha sido posible llevar a cabo tal comprobación.

Conclusiones e implicaciones didácticas

Las dificultades de los alumnos a la hora de adquirir el concepto de cristal son de sobra conocidas.^[11] Se trata de un caso claro en el que el significado cotidiano del término choca frontalmente con el concepto científico, de manera que los alumnos asumen el significado coloquial del término "cristal" e identifican como cristal todo aquello que tenga las características macroscópicas de los vidrios, no relacionando materia amorfa y materia cristalina con ausencia o no de ordenación. Por otra parte, la estructura de la materia cristalina resulta uno de los conceptos más difíciles de asimilar por los alumnos que, con frecuencia, sólo memorizan los dibujos de los textos sin llegar a comprenderlos.^[12]

Igualmente se han señalado^[13] los obstáculos que interfieren en la construcción de los conceptos de "vidrio" y "cristal", y como dichos obstáculos dificultan la comprensión de aspectos relacionados con los materiales que forman la Tierra y con los procesos que ocurren en ella. Para los alumnos, el proceso de cristalización equivale a un "secado" (en el caso de formación de rocas evaporíticas) o a un "endurecimiento" (en el caso de cristalización de magmas), y el concepto de "orden" lo asumen en el sentido de "clasificación", y por tanto los cristales no corresponden a una organización precisa de la materia.

Lo anterior nos indica que la puesta en práctica de experiencias como las anteriormente expuestas resulta de enorme importancia desde el punto de vista de la enseñanza-aprendizaje. Si, en palabras de Pozo,^[14] "lo que no se percibe, no se concibe", la realización de este tipo de trabajos prácticos permite que los alumnos observen y reflexionen acerca de procesos con los que no suelen interactuar en la vida cotidiana, y les ofrece la oportunidad de percibir cómo y por qué se producen, lo que repercute en una mejor conceptualización de los mismos.

Bibliografía

- [1] M. Martín Sánchez, J. G. Morcillo, M. T. Martín, *An. Quím.* **2005**, *101(3)*, 44–46.
- [2] A. M. Thayer, *Chem. Eng. News* **2007**, *18*, 17–30.
- [3] M.^a A. García Collantes, M. Martín, M.^a T. Martín, E. Silván, *Quím. Ind.* **1996**, *43*, 459–516.
- [4] M. Martín Sánchez, J. G. Morcillo, C. Reyero, M. T. Martín, *An. Quím.* **2006**, *102(2)*, 42–44.
- [5] A. Ballabh, D. Rivedi, P. Dadistar, P. Ghosh, A. Pramanik, V. G. Kumar *Cryst. Growth Des.* **2006**, *6(7)*, 1591–1594.
- [6] C. F. Davison, M. R. Slabaugh, *J. Chem. Ed.* **2003**, *80(2)*, 155–156.
- [7] J. A. Marks, *Sch. Sci. Review* **1977**, *58(204)*, 480.
- [8] J. J. Berzelius, en *Tratado de Química Mineral y Vegetal* Trad. Rafael Sáez y Palacio, Madrid, Imprenta de José María Alonso 1846–1852, t. II, p. 68.
- [9] M. Gross, *Ed. Chem.* **2003**, July, 88–89.
- [10] C. G. Gillespie, *Dictionary of Scientific Biography*, **1972–1980**, Charles Scribner's Sons, Vol. 5, p.124.
- [11] C. Reyero, *Docencia e Investigación* **1999**, XXIV, 2^a época (9), 129–142.
- [12] H. Durán, G. Gold, *Enseñanza de las Ciencias*, **1987**, n^o extra, 95–96.
- [13] H. Goix, *Aster*, **1995**, *20*, 105–138.
- [14] J. I. Pozo, M. P. Pérez, A. Sanz, M. Limón. *Enseñanza de las Ciencias* **1991**, *9(1)*, 83–94.