

Fundamento científico de los artificios pirotécnicos

Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia

I.E.S. Las Lagunas. Madrid. España. fernando.pradaperez@educa.madrid.org

[Recibido en febrero de 2012, aceptado en octubre de 2012]

Los espectaculares efectos que producen los artículos pirotécnicos (luz, color, sonido y humo) están fundamentados en la ciencia del fuego, por lo que es un atractivo recurso didáctico con el que conseguir aumentar: el interés, la imaginación y la admiración de los estudiantes hacia la química, así como el conocimiento científico de los ciudadanos en eventos científicos divulgativos.

Palabras clave: Artículos pirotécnicos; Química pirotécnica; Ciencia del fuego.

Scientific fundamentals of fireworks

The spectacular effects (light, colour, sound and smoke) produced by pyrotechnic articles are based on the science of the fire, for this reason fireworks are an attractive didactic resource useful to increase: the interest, imagination and admiration of students towards chemistry, as well as the scientific knowledge of citizens in scientific popularizing events.

Keywords: Pyrotechnic products; Pyrotechnic chemistry; Science of fire.

Introducción

Decía Williams Yeats (Premio Nobel de Literatura en 1923) que «Enseñar no es llenar una vasija, sino encender una llama».

Seguramente la aplicación de la química que ha causado más asombro y diversión durante siglos es la relacionada con los artefactos pirotécnicos, conocidos popularmente como fuegos artificiales, que culminan espectáculos y celebraciones en todos los rincones del mundo. En nuestro país su uso está muy extendido en fiestas populares y celebraciones tradicionales (Fallas de Valencia, noche de San Juan, nochevieja, etc.). Actualmente, la pirotecnia (del griego *piros*=fuego y *techné*=técnica) se considera estrechamente ligada a la ciencia, ya que se ocupa de diseñar artefactos capaces de experimentar reacciones químicas exotérmicas que originan luz, color, humo y sonido. Desde el punto de vista didáctico, son las reacciones que atraen más atención del alumnado por su espectacularidad, por lo que son un excelente recurso didáctico para la química (Prada 2006).

Los artículos pirotécnicos están formados básicamente por la mezcla íntima de una sustancia que aporta oxígeno (agente oxidante) y un combustible (agente reductor). Cuando se aplica calor, se produce una reacción de transferencia de electrones (oxido-reducción). Los átomos del combustible ceden electrones a los átomos del oxidante. Como consecuencia, se forman nuevos enlaces entre los átomos de carbono del combustible y los átomos de oxígeno liberados por el oxidante, originando un producto más estable y liberando energía. Los principales efectos se consiguen mediante la adición de determinadas sustancias químicas, como los metales pulverizados (hierro, magnesio, aluminio, titanio) y las sales metálicas (cloruros de litio, potasio, estroncio, bario, etc.).

Clasificación de artificios pirotécnicos

Según el Real Decreto 563/2010, del 7 de mayo de 2010 (BOE 2010), el Consejo de Ministros de España, aprobó el nuevo *Reglamento de Artificios Pirotécnicos*, en la que se garantiza que la

seguridad de los participantes no impida las manifestaciones vinculadas a la cultura del fuego expresada en tradicionales populares, festividades religiosas y culturales. La norma define artículo pirotécnico como todo aquel que contenga materia detonante (con efecto trueno) y/o pirotécnica (sin efecto detonante) destinada a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno, o una combinación de tales efectos, como consecuencia de reacciones químicas exotérmicas autosostenidas. Dentro de esta categoría, define artificio de pirotecnia el utilizado para fines recreativos o de entretenimiento con la categorización siguiente:

- **Categoría 1:** artificios de pirotecnia de muy baja peligrosidad y nivel de ruido insignificante destinados a ser usados en zonas delimitadas o dentro de edificios. La distancia de seguridad deberá ser igual o superior a 1 metro. El nivel sonoro máximo no podrá exceder de los 120 dB. No contendrán truenos de pólvora negra y los truenos de impacto no contendrán más de 2,5 mg de fulminato de plata.
- **Categoría 2:** artificios de pirotecnia de baja peligrosidad y bajo nivel de ruido destinados a ser utilizados al aire libre en zonas delimitadas. La distancia de seguridad deberá ser igual o superior a 8 metros. No obstante, si procede, la distancia de seguridad podría ser inferior. El nivel sonoro máximo no podrá exceder de los 120 dB.
- **Categoría 3:** artificios de pirotecnia de peligrosidad media destinados a ser utilizados al aire libre en zonas de gran superficie y cuyo nivel de ruido no sea perjudicial para la salud humana. La distancia de seguridad deberá ser igual o superior a 15 metros. No obstante, si procede, la distancia de seguridad podrá ser inferior. El nivel sonoro máximo no excederá de los 120 dB.
- **Categoría 4:** artificios de pirotecnia de alta peligrosidad para uso exclusivo de expertos profesionales y cuyo nivel de ruido no sea perjudicial para la salud humana.

Es fácil comprobar que no existe proporcionalidad entre la intensidad física de un sonido que nos llega al oído y la sensación sonora que nos produce. Para medir el nivel sonoro o de ruido se emplea en acústica una magnitud denominada sonoridad o nivel de intensidad (S), que está basada en una escala logarítmica, precisamente debido a que el oído no responde de modo proporcional a los cambios en la intensidad del sonido: $S = 10 \log (I/I_0)$ [en decibelios, dB]; en la expresión anterior I es la intensidad del sonido e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ es la intensidad umbral. De la expresión anterior se deduce que dos focos sonoros idénticos actuando simultáneamente no producen una sensación doble que uno solo. Esto se debe a que la sensación sonora obedece, aproximadamente, a la ley psicofísica de Weber-Fechner (Catalá 1975), que dice: «La sensación es función lineal del logaritmo de la excitación, o en otras palabras, la sensación crece en progresión aritmética, cuando la excitación lo hace en progresión geométrica». De manera que la explosión de dos petardos iguales que producen 120 dB de sonoridad cada uno, no originan 240 dB, sino que la suma de las dos fuentes de igual sonoridad se traduce en un aumento de 3 dB. En el caso de dos petardos de 120 dB obtendríamos una intensidad de 123 dB. Para conseguir un aumento de 20 dB, tendríamos que aumentar 10^2 veces la intensidad del sonido, para aumentar 30 dB, habría que aumentar 10^3 veces su intensidad y así sucesivamente. El decibelio es una unidad relativa, ya que depende de la agudeza auditiva de las personas y de la frecuencia del sonido. Se asigna el valor de 0 dB al umbral mínimo de audición del ser humano (como es variable con la frecuencia, se toma como referencia la mínima intensidad percibida para un sonido patrón de 1000 Hz) y 120 dB al umbral del dolor.

Metodología y sistemas de seguridad

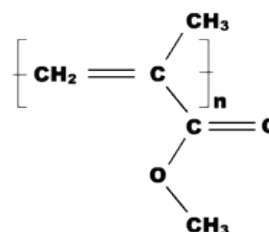
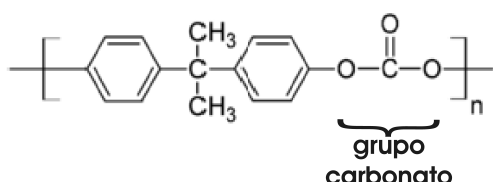
La seguridad es un objetivo prioritario en todas las demostraciones, como dice el proverbio químico «Seguridad es felicidad», por esta razón se siguen las siguientes normas: utilizar pequeñas cantidades de reactivos, usar solo artificios pirotécnicos de categoría 2, emplear

guantes y gafas de seguridad, y tener cerca un extintor de dióxido de carbono u otro agente extintor (Prada 2009a). Con el fin de no superar los niveles de ruido permitidos, los artificios se detonan en el interior de una cúpula de seguridad. El tiempo de retardo, desde que enciende hasta que explota, es suficiente para colocar la cúpula sobre el artificio de pirotecnia antes de que se produzca la detonación, tal como se ilustra en la figura 1.



Figura 1. Cúpula de seguridad de policarbonato empleada en demostraciones de laboratorio.

Las cúpulas de seguridad utilizadas en las demostraciones están fabricadas con metacrilato (PMMA poli metil metacrilato) de alto impacto (resistencia 25 veces mayor a la del vidrio) y de policarbonato (PC), un polímero termoplástico de gran resistencia al impacto y a las altas temperaturas (hasta 230 °C), transparente y estable químicamente, utilizado en cristales antibalas y escudos antidisturbios por los cuerpos de policía. El policarbonato es un poliéster con una estructura repetitiva de moléculas de bisfenol A ligadas juntos a otros grupos carbonatos en una molécula larga. A continuación aparecen desarrolladas las fórmulas del PC (izquierda) y del PMMA (derecha):



Durante la combustión de los artificios de pirotecnia se originan gases como producto de la combustión que quedan confinados en el interior de la cápsula. Para evitar los efectos nocivos de los gases generados, se retiran mediante un sencillo pero eficaz sistema de aspiración. Consiste en una aspiradora corriente que contiene en el interior de la bolsa gránulos de sepiolita (silicato de magnesio hidratado $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_{26}\text{H}_2\text{O}$) mineral de origen sedimentario (filosilicato), muy poroso y microfibroso, de gran capacidad absorbente de humos, gases y olores. El uso de estos sistemas de seguridad, permite confinar la combustión y amortiguar los efectos térmicos, acústicos y contaminantes generados en las experiencias pirotécnicas.

Los petardos y el efecto trueno

El petardo es un artificio pirotécnico que produce un efecto trueno causado por la ignición de la mezcla pirotécnica comprimida. Si doblamos y abrimos el cilindro de cartón que la contiene, encontramos la mezcla de pólvora que se encuentra comprimida entre dos bloques de yeso, a través de uno de los cuales se conecta con la mecha (figura 2). En estas condiciones, sujetamos

el petardo abierto mediante unas pinzas metálicas y encendemos la mecha. Comprobaremos que no se produce detonación, simplemente una pequeña llamarada. Si bien la normativa actual no regula la cantidad de pólvora de los petardos, sino el nivel sonoro máximo permitido, en general los petardos de categoría 2 utilizados en esta demostración, no exceden de 0,5 g, y los de categoría 3, no sobrepasan los 2,7 g. La unión de un conjunto de petardos por medio de un estopín pirotécnico forma las conocidas tracas, que originan una secuencia consecutiva de detonaciones.

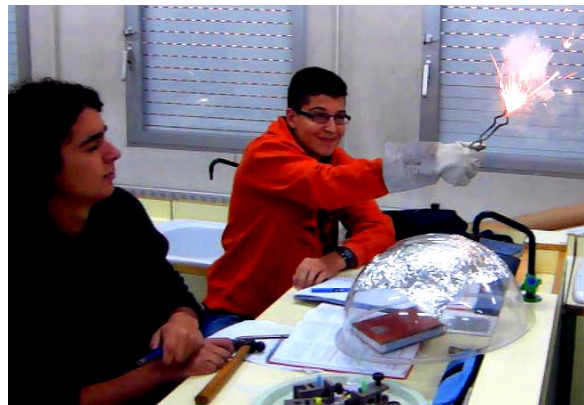
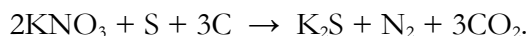


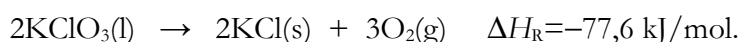
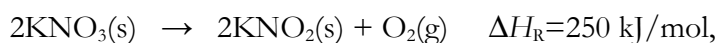
Figura 2. Interior de un petardo americano y combustión del petardo sin explosión.

La pólvora negra es el componente pirotécnicos más antiguos utilizada como explosivo y propulsor. La composición de la mezcla se ha mantenido prácticamente inalterable a lo largo de los siglos. Inventada por los chinos hace más de mil años y reinventada en Europa por el inglés Roger Bacon (monje y alquimista) durante la Edad Media, fue revelada en 1242 durante su defensa contra las acusaciones de brujería: 7 partes de salitre, 5 de carbón y 5 de azufre, que evolucionó en el siglo XVIII a 75% de nitrato de potasio, 15% de carbón vegetal y 10% de azufre, y que prácticamente se mantiene inalterada hasta nuestros días. La velocidad de combustión viene dada por el tamaño de los granos, cuanto más finos sean más rápida será la combustión, fórmula que se ha mantenido prácticamente inalterada a lo largo de los siglos. Está compuesta por productos químicos abundantes, de baja toxicidad y ambientalmente seguros. La mezcla es tan estable, que se puede almacenar durante decenas de años. La pólvora se inflama a la temperatura de 300 °C, ardiendo rápidamente mediante una aportación moderada de energía y al quemarse libera aproximadamente 1300 J, en forma de calor, por cada gramo de reactivo, dependiendo de la composición de la mezcla formada.

La rápida combustión y la temperatura de los gases, y sólidos como ceniza de carbón, liberados (2500 °C-3500 °C) la sitúa en la categoría de las «deflagraciones». Solo explota si se la comprime fuertemente en un recipiente herméticamente cerrado debido a la violenta formación de gases calientes en expansión, según la reacción (Chang 1999):



El salitre, componente principal de la pólvora clásica, está formado básicamente por nitrato de potasio, un fuerte oxidante, que aporta el oxígeno necesario para la combustión y transforma el carbono y el azufre presentes en la mezcla en sus óxidos. Ha sido sustituido por el clorato de potasio al generar más oxígeno durante su descomposición.



El combustible principal utilizado en la pólvora es el carbón vegetal, empleado desde la antigüedad para hacer fuego (figura 3). La mayor parte de los residuos que deja la combustión de la pólvora negra son cenizas de carbón y puede llegar hasta el 50% de la masa inicial de la pólvora:



Si se utiliza como combustible junto al clorato de potasio, la reacción que se produce es:

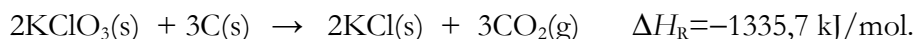


Figura 3. Efecto del carbón vegetal en la pólvora. Demostración realizada en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de Madrid, en 2008.



Figura 4. Combustión y detonación de una mezcla de azufre y clorato de potasio. Experiencia realizada en la Feria de la Ciencia de Madrid, en 2009.

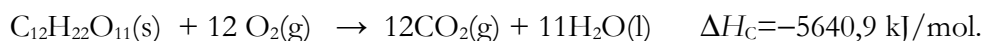
El otro componente de la pólvora, el azufre, es un elemento sólido de color amarillo que tiene como función facilitar la propagación de la combustión, aumentando la velocidad además de mejorar la estabilidad. El azufre funde a 115 °C y tiene una temperatura de ignición baja, sobre 250 °C, al mezclarse con el clorato, forma una mezcla sensible a los golpes y a la fricción, causando una reacción espectacular y explosiva.



Si mezclamos una pizca de azufre y de clorato sobre una superficie resistente (piedra de granito), al acercar una llama, la mezcla arde, pero si la golpeamos con un martillo (figura 4), se produce una ruidosa explosión como consecuencia de la liberación de los mismos gases calientes y energía que al arder pero de forma instantánea (Prada 2009b). Es recomendable utilizar cascos para proteger los oídos y mantener una distancia de seguridad de unos 3 m.

Las bolas de humo y el efecto fumígeno

El efecto de humo se consigue en los artificios pirotécnicos mediante la adición de azúcar (sacarosa) a la mezcla pirotécnica. La sacarosa, utilizada en granadas de humo, balizas de señalización y fuegos artificiales diurnos, entra en combustión según la reacción:



Para reproducir el efecto fumígeno en el laboratorio, se mezcla la sacarosa con nitrato de potasio en una cápsula de porcelana y se calienta suavemente durante varios minutos, removiendo constantemente para que no se caramelize totalmente, hasta conseguir una mezcla

homogénea de color marrón. Después de sacar la mezcla del crisol se forman pequeñas bolas antes de que se endurezca la masa y se enfríe. Para comprobar como se genera una gran cantidad de humo durante la combustión del hidrato de carbono, se calienta la mezcla con la llama de una cerilla en un lugar bien ventilado.

Los cohetes y el efecto propulsión

Los cohetes están fabricados con un cilindro de cartón duro en cuyo interior se diferencian dos zonas principales: la *base*, donde se encuentra la mecha de encendido junto a una varilla de madera fina pegada al cohete sobresaliendo por el extremo inferior y en la misma dirección de la mecha para que no se desvíe de su trayectoria, y el *cuerpo*, que está formado por dos zonas, la inferior, con un orificio a través del cual salen los gases generados en la combustión de la pólvora. La parte superior, contiene una carga comprimida de pólvora que puede acompañarse de otras sustancias que originan diversos efectos además del trueno, tales como las estrellas de luz y color (Ford 1993).



Figura 5. Efecto propulsor de la pólvora sin humo. Experiencia realizada en el *Pati de la Ciència*, de la Universidad de Alicante, en 2011.

un tubo de ensayo, cerrando el extremo con un tapón de corcho que lleva incorporado una varilla. Calentamos el fondo del tubo de ensayo con un mechero utilizando pinzas de madera (figura 5). En unos segundos se produce la combustión, seguida de la propulsión del tapón (Prada y de Luis 2011).

Otros artificios semejantes, los denominados voladores, también utilizan pólvora como agente propulsor, pero en este caso origina un efecto de rotación y/o elevación. A diferencia de los cohetes, no son propulsados directamente hacia arriba porque los gases producidos por la pólvora quemada salen por un lateral del cilindro, de este modo se consigue la rotación.

Las ruedas y el efecto de chispas giratorias

Las ruedas, o *girasoles*, son artificios que realizan círculos de intensa luz con destellos dorados mientras giran rápidamente. Para conseguir este efecto, la pólvora está distribuida en forma de espiral en el interior de un disco, que solo tiene cerrado su extremo posterior, dejando por el lado de la mecha una vía de salida a los gases que se generan durante la combustión para facilitar la rotación del disco (Shimizu 1981).

Para comprobar este efecto en un recinto cerrado, colocamos la pequeña rueda sobre una superficie metálica y colocamos encima una cápsula de seguridad justo después de encender la

Al encender la mecha, el calor que genera enciende una carga de pólvora gruesa, a su vez la energía liberada en la combustión de la pólvora hace que se calienten los gases liberados y se expandan rápidamente, propulsándolo hacia arriba. Cuando el cohete llega a lo más alto de su vuelo, la segunda parte de la mecha prende la pólvora comprimida de la parte superior para producir las explosiones.

Para demostrar este efecto, utilizamos algodón pólvora (trinitrato de celulosa), compuesto que contiene suficiente oxígeno para convertir totalmente los productos de la combustión en gases (CO , CO_2 , H_2O y N_2). Introducimos una pequeña bolita de nitrocelulosa en el fondo de

mecha. De esta forma podemos disfrutar de los destellos luminosos sin ningún peligro. Al finalizar la combustión, se recogen los gases generados mediante el sistema de aspiración. La secuencia del proceso descrito se ilustra en la figura 6.

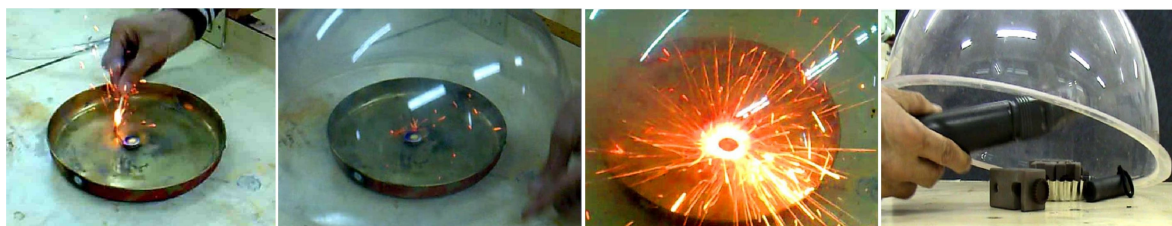


Figura 6. De izquierda a derecha: encendido de la mecha del *girasol*, colocación de la cúpula de seguridad, combustión del *girasol* y aspiración de gases. Demostración realizada en el Museo Cosmocaixa de Madrid, en 2011.

Las chispas doradas incandescentes son producidas por metales finamente pulverizados, como el hierro (Cherrier 1981), y las más luminosas y blancas, por metales como magnesio, aluminio y titanio. La razón de esta diferencia se basa en que las partículas de hierro, al igual que las de carbón vegetal, solo alcanzan temperaturas del orden de 1500 °C, por lo que las chispas que originan son menos brillantes que las producidas por el metal magnesio, que llegan a 3600 °C.

Este efecto se puede comprobar, espolvoreando pequeñas limaduras de hierro (Prada 2005), utilizando un guante de seguridad, sobre la llama de un mechero Bunsen (figura 7). En la combustión del hierro se producen destellos dorados semejantes a los de los fuegos artificiales y bengalas:



Figura 7. Chispas doradas de hierro pulverizado sobre mechero (izq.) y en bengala (der.).

Se puede repetir el procedimiento espolvoreando limaduras de magnesio sobre la llama (Mora 2008), pero en este caso hay que tener mayor precaución debido a la mayor reactividad de este metal (figura 8). La combustión del magnesio produce óxido de magnesio acompañado de un deslumbrante fogonazo, por esta razón actualmente se utiliza en balizas de señalización y como proyectiles luminosos:



El magnesio es más activo que el hierro, comienza a arder a 600 °C y produce una característica llama blanca muy luminosa, utilizada antiguamente como flash fotográfico.



Figura 8. Estrellas luminosas de magnesio en el laboratorio (izq.) y en fuegos artificiales (der.).

Las fuentes y el efecto de brillantes colores

Las fuentes o volcanes, están elaboradas con cilindros de cartón que contienen una mezcla de pólvora y diferentes sustancias según sea el efecto que se desea conseguir: silbidos, chispas luminosas, estrellas de colores, etc. La parte inferior se encuentra cerrada con arcilla o yeso, y la superior abierta para que se produzcan los efectos pirotécnicos a modo de surtidor o volcán. Una mezcla semejante se utiliza en los cohetes denominados palmeras, con la diferencia de que en este caso el artificio no permanece en tierra sino que explota a cierta altura en el aire.

Las demostraciones de este producto no pueden realizarse dentro de las cúpulas de alto impacto, porque el calor generado durante el proceso supera el límite de temperatura que puede soportar, llegando a reblandecer y fundir el polímero constituyente. Por ello deben encenderse en exterior, teniendo en cuenta que además originan gran cantidad de humo.

La gama de colores que acompañan a las mezclas pirotécnicas utilizadas en fuentes, volcanes, cohetes o bengalas, se deben a la combinación de diferentes sales (u óxidos) metálicas (solo el catión origina el color), con los comburentes y combustibles. El efecto se basa en la propiedad que tienen las sustancias de absorber y emitir determinadas radiaciones electromagnéticas, que pueden observarse en el espectro visible. La identificación de iones mediante la radiación que emite cuando sus electrones excitados vuelven a su estado normal de energía es el fundamento del análisis a la llama, inventado por Bunsen en el siglo XIX.



Figura 9. Colores originados por sales metálicas en cápsula (izq.) y en cohete tipo palmera (der.).

En el laboratorio se pueden reproducir los colores que forman los artificios pirotécnicos utilizando sales metálicas pulverizadas disueltas en etanol (Collins 1924), tal como se aprecia en la figura 9. El color rojo lo proporcionan las sales de estroncio o de litio (SrCO_3 , SrCl_2 o LiCl), el amarillo las de sodio (NaCl), el verde las de bario (BaCl_2 o H_3BO_3 –ácido bórico–), el azul las de cobre (CuCl_2 o CuSO_4), el naranja las de calcio (CaCl_2) y el violeta las de potasio (Conkling 1990).

Conclusión

La pirotecnia está rodeada de un halo mágico: atrae la atención, provoca imaginación y genera admiración, por lo que es un excelente recurso didáctico para la enseñanza de la química en todos sus niveles. Difícilmente se pueden encontrar experiencias y demostraciones que asombren más a los estudiantes de cualquier edad, que las relacionadas con el fuego y los efectos pirotécnicos (figura 10). Como decía San Agustín, «El asombro es un método de conocimiento», y también un camino para llegar más fácilmente hasta él, consiguiendo mayor motivación, aumentando las ganas de aprender y generando futuras vocaciones científicas.



Figura 10. Para la Ciencia un experimento es bello si es sencillo, atractivo y constructivo.

Referencias

- BOE (2010) Reglamento de artículos pirotécnicos. BOE nº 113.
- Catalá J. (1975) *Física general*. Valencia. Saber.
- Chang R. (1999) *Química*, 6ª ed. México. McGraw-Hill. p. 820.
- Cherrier F. (1981) *Experimentos de química recreativa*. Valencia. Mas-Ivars Editores.
- Collins F. (1924) *The Boy Chemist*. Lothrop. Boston, USA. Lee & Shepard.
- Conkling J. A. (1990) Pirotecnia. *Investigación y Ciencia* nº 168, 58-65.
- Ford A. (1993) *Chemical Magic*. Nueva York. Dover Publications.
- Mora L. M. (2008) *Química recreativa*. Bogotá. Cooperativa Editorial Magisterio.
- Prada F. (2005) El sodio y el magnesio. *Anales de Química* 101(1), 62-68.
- Prada F. (2006) El fuego: química y espectáculo. *Anales de Química* 102(2), 54-59.
- Prada F. (2009a) Química aplicada a la seguridad. *Anales de Química* 105(3), 213-220.
- Prada F. (2009b) El fuego como luminoso recurso didáctico. *Educació en Química – EduQ* 2, 11-15.
- Prada F., de Luis J. L. (2011) Ciencia, fuego y pirotecnia, en *El Pati de la Ciència*. Universitat d'Alacant. Desde esta dirección web puede descargarse las demostraciones que aparecen en este artículo.
- Shimizu. T. (1981) *Fireworks: The Art, Science and Technique*. Midland (Texas), USA. Pyrotechnica Publications.