

La aproximación crítica a las pseudociencias como ejercicio didáctico: homeopatía y diluciones sucesivas

Gonzalo Abellán, Lorena E. Rosaleny, Jesús Carnicer, José J. Baldoví y Alejandro Gaita-Ariño

Resumen: Se proponen tres actividades docentes con distintos grados de sofisticación, apropiadas para su implementación en aulas y laboratorios desde la ESO hasta los primeros cursos de universidad. En todas ellas se trabajan las diluciones sucesivas y al mismo tiempo se repasan los conceptos de cantidad de sustancia, mol y concentración. Transversalmente, se incide en el fraude pseudocientífico de la homeopatía, que en años recientes suscita un interés preocupante. Se concluye que los conocimientos fundamentales de química son suficientes para evitar este tipo de engaños.

Palabras clave: mol, concentración, dilución en serie, homeopatía, aprendizaje basado en problemas.

Abstract: Three teaching activities are proposed. They range in complexity, and thus are adequate for implementation in classrooms and laboratories ranging from secondary education to university level. The *leitmotiv* for all three activities are series dilutions and the concepts of substance quantity, mol and concentration. Transversally, this is used to point out the pseudoscientific fraud of homeopathy, which in recent years is alarmingly popular. An important benefit of a basic understanding of chemical concepts is the ability to detect this kind of hocus-pocus.

Keywords: mol, concentration, serial dilution, homeopathy, problem-based learning.

INTRODUCCIÓN

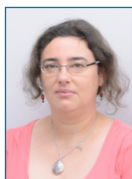
La homeopatía fue concebida a finales del siglo XVIII por el médico alemán Samuel Hahnemann (1755-1843) como una forma de mejorar el espíritu vital del cuerpo. Gozó de popularidad durante varias décadas, algo comprensible si pensamos que competía con prácticas como las sangrías y las purgas, antes de quedar gradualmente desfasada por los avances de la ciencia médica del siglo XX. No obstante, como otras de las llamadas *medicinas alternativas*, la homeopatía es una creencia que ha tenido un inmenso auge en

los últimos veinte años y en la actualidad no es nada extraño encontrarla en la mayoría de farmacias, apareciendo incluso como servicio médico en algunos seguros médicos privados, contando con un gran número de adeptos. En este ámbito abundan los cursos, charlas y publicaciones dedicadas a la formación y la divulgación de esta doctrina pseudocientífica, incrementando la confusión y el engaño cuando la homeopatía es practicada por algunos profesionales de la salud. Debido a esta particular relevancia social, en este artículo se analizan críticamente los principios de esta pseudociencia desde el punto de vista químico. A partir de esto se hace una aproximación didáctica con experimentos sencillos de realizar por alumnos de la Educación Secundaria Obligatoria (ESO), bachillerato e incluso de primeros cursos universitarios. El objetivo es plantear problemas que estén relacionados con las diluciones sucesivas características de la homeopatía, y abordarlos desde una perspectiva metodológica de enseñanza-aprendizaje de las ciencias por investigación. Es decir, se trata de plantear los problemas y construir soluciones a través de las cuales quede al descubierto la falacia del procedimiento homeopático. Concretamente se tratarán los problemas didácticos: ¿cuántas moléculas hay en un grano de azúcar?, ¿queda permanganato cuando el color violeta desaparece tras varias diluciones en serie?, ¿hasta dónde? Y finalmente, ¿cuántas diluciones en serie tenemos que realizar para alcanzar una única nanopartícula de oro? Para resolver estos problemas necesitaremos los conocimientos químicos de cantidad de sustancia, mol y número de Avogadro, así como la realización de experimentos cualitativos y cuantitativos, que según el nivel, precisarán de mayor o menor instrumental de laboratorio, llegando hasta la espectrofotometría.

Como se verá a continuación, pese a carecer de base científica, la homeopatía puede aprovecharse como una excelente excusa para trabajar en clase el procedimiento de las diluciones sucesivas en el laboratorio de ESO o de bachillerato, y repasar asimismo los conceptos de mol y de



G. Abellán^{1,2}



L. E. Rosaleny¹



J. Carnicer^{2,3}



J. J. Baldoví¹



A. Gaita-Ariño¹

¹ Instituto de Ciencia Molecular, Universitat de València. C/ Catedrático José Beltrán, 2, 46980, Paterna (Valencia), España.

² Museo Didáctico e Interactivo de Ciencias de la Vega Baja del Segura de la Comunitat Valenciana. Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Campus de Desamparados de la Universidad Miguel Hernández. Carretera de Beniel Km 3,2, 03312, Orihuela (Alicante), España.

³ IES Thader (Orihuela). C/ Oriolanos Ausentes, 18, 03300 Orihuela (Alicante), España. C-e: alejandro.gaita@uv.es

Recibido: 26/08/2014. Aceptado: 11/09/2014.

cantidad de sustancia, masa molar, masa atómica y masa fórmula, así como ejercitar el cálculo de concentraciones. Además, planteamos un experimento análogo con nanopartículas de oro, que puede ser de interés en primeros cursos universitarios. En este punto, es interesante recordar que los alumnos suelen encontrar problemática la definición de mol como unidad de la magnitud cantidad de sustancia y, por lo general, asocian el concepto de mol con una masa o volumen de moléculas químicas en el ámbito macroscópico.^[1]

La realización de estos experimentos nos lleva a demostrar que la homeopatía fundamentada en el método de diluciones implica meramente tomar pequeñas cantidades de agua o azúcar –dependiendo de si se trata de diluciones o comprimidos– lo cual en general es inocuo. Y aunque su influencia como placebo pueda ser importante, no puede existir una relación dosis-efecto cuando el supuesto “principio activo” está ausente en dichos preparados homeopáticos.

LA HOMEOPATÍA, CONTEXTO Y PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

Los adeptos a la homeopatía creen que la sustancia que causa una dolencia tiene un efecto curativo para esa misma dolencia tras un procedimiento de diluciones en serie, que habitualmente se extiende mucho más allá del punto donde ya sólo queda disolvente. Aunque a partir de cierto número de diluciones el principio activo ha desaparecido completamente de la muestra, en ese ámbito también se cree que cuantas más veces se repita el proceso de dilución, mayor es el efecto beneficioso sobre la dolencia que se pretende curar. Esto es debido, en parte, a una confusión entre el concepto de potencia matemática y la potencia (eficacia) que puede tener un determinado remedio. La evidencia demuestra que a menor concentración ingerida, menor efecto en el organismo. Un caso típico es el *Oscillococtinum*, que comienza como extracto de hígado y corazón de pato, y se lleva a una dilución 200C, esto es, 200 diluciones 1:100 en serie resultando en una parte de preparado en 10^{400} partes de agua. Considerando que en el universo observable se estima que existen 10^{80} átomos, resulta claro que el preparado final no contendrá ninguna molécula del extracto original.

Hay que tener en cuenta que Hahnemann (Figura 1) falleció antes que los trabajos de Semmelweis y Pasteur vieran la luz –es decir, antes del desarrollo de la teoría microbiana de las enfermedades infecciosas– y mucho antes de la primera determinación del número de Avogadro. Esto hace comprensible su confusión en asuntos que hoy en día se dan por evidentes. Desde el punto de vista de la ciencia de los siglos XX y XXI, las bases del pensamiento homeopático no pueden considerarse científicas, sino más bien mágicas. De hecho, James George Frazer dividió las manifestaciones de la llamada “magia simpática” entre las que se corresponden con la ley de la similitud y las que se corresponden con la ley del contacto.^[2] La ley de la similitud equivaldría a utilizar un muñeco fetiche semejante a la persona a la que se quiere hechizar, y respecto a la ley del contacto, al muñeco fetiche se le colocaría un mechón de pelo o una fibra de la ropa del sujeto. La homeopatía

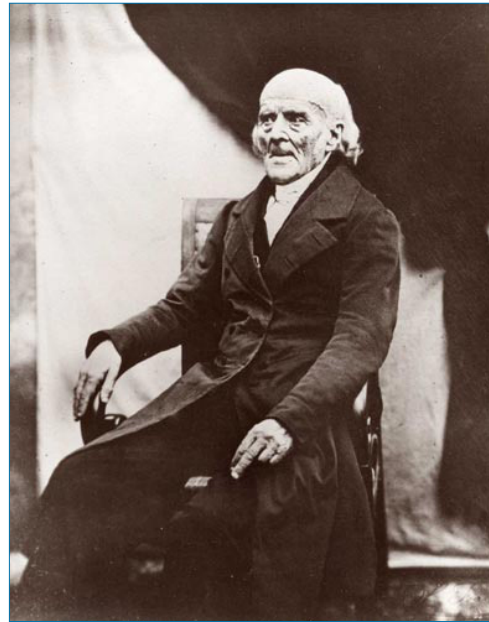


Figura 1. Un daguerrotypy de Christian Friedrich Samuel Hahnemann realizado en 1841

combina ambas, de manera que utiliza el primer tipo de pensamiento mágico para llegar a su lema “lo semejante cura a lo semejante”. Y por otro lado un corolario de la ley del contacto lleva a creer que ciertas “vibraciones” pasan de la sustancia original al agua, y le permiten al agua “recordarla”.

Es conveniente poner estos despropósitos en su contexto legal. La directiva europea de 1992 (92/73/CEE), trasladada a la legislación española en 1994 en una disposición transitoria segunda del Real Decreto 2208/1994, permite la comercialización de preparados homeopáticos siguiendo un procedimiento simplificado de registro que no requiere demostrar su eficacia. La norma española, dicho sea de paso, es mucho menos permisiva que la francesa o alemana, donde la homeopatía goza de una preocupante aceptación social. La normativa, a pesar de que permitía autorizarlos como si fueran medicamentos, contenía una serie de limitaciones que afortunadamente minimizaron su aplicación. En concreto, cuando estos preparados se adhieren a la categoría de medicamentos “sin indicaciones terapéuticas aprobadas”, se prohíbe que se mencione indicación terapéutica alguna en los envases o prospectos si no ha sido probada. Así, los preparados homeopáticos han estado inmersos en un limbo legal mientras las leyes al respecto iban cambiando con los años.^[3] Ello no ha afectado a las firmas homeopáticas, que siguen comercializando sus productos sin registrar. Es notable que sólo a partir del 20 de marzo de 2012 la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) autorizó los primeros doce registros de “medicamentos” homeopáticos en el mercado español: *Lycopodium* de Laboratorios DHU en doce diferentes diluciones, entre 10^{10} y 10^{2000} . Por supuesto, el apartado de indicaciones del prospecto se resuelve con un sucinto “sin indicaciones terapéuticas aprobadas”. En cuanto a la necesidad de monitorizar la seguridad de estos preparados homeopáticos, estos están eximidos de establecer un sistema de farmacovigilancia (R.D. 577/2013), debido a que

según el R.D. 1345/2007 “[un preparado homeopático] no deberá contener más de una parte por 10.000 de la tintura madre original, ni más de la centésima parte de la dosis más baja que eventualmente se emplee en medicina alopática [...]” (el término usado por Hahnemann para referirse a la medicina no-homeopática).

A finales de 2013 se publicó un borrador de una orden ministerial para regular los medicamentos homeopáticos de uso humano.^[4] Esta orden tendrá como objetivo regularizar los medicamentos homeopáticos, “consentidos” desde 1994 mediante el R.D. 2208/1994 y que no pagaron ninguna tasa en ese momento. Cuando esta orden se tramite se oficializarán con una regulación *ad hoc* unos 19.000 preparados tras el pago de las tasas correspondientes “por encima de controversias y rechazo por parte del colectivo científico [...]”. Desgraciadamente, ya existe legislación referente a los medicamentos homeopáticos veterinarios (Reglamento de Ejecución U.E. 354/2014), que recomienda el uso de medicamentos homeopáticos y fitoterapéuticos entre otros, antes que los antibióticos y tratamientos de síntesis química “alopáticos”.

Para hacer una comparativa de los supuestos “medicamentos” homeopáticos con otras sustancias que ejercen su función en concentraciones extremadamente bajas, podemos elegir las toxinas, venenos producidos por organismos vivos. En concreto, la toxina botulínica bloquea la transmisión neuromuscular mediante la disminución de la liberación de acetilcolina y es la neurotoxina más potente que se conoce.^[5] La dosis letal mediana (DL50) intravenosa de esta toxina para una persona de 70 kg se alcanza al inyectar solamente $280 \cdot 10^9$ moléculas, es decir, menos de un picomol.^[6] Aun así, la inyección de una DL50 de toxina botulínica en forma de preparado 5C (el preparado homeopático menos diluido) implicaría inyectar 700 mL de agua en sangre, con lo que, el efecto biológico de la neurotoxina más potente sería comparable al del agua que se usa como excipiente.

Puede ser necesario aclarar que la supuesta “memoria del agua” que se usa para justificar la persistencia de actividad en ausencia de principio activo no tiene ningún tipo de base científica, ya que las investigaciones actuales indican que la red de puentes de hidrógeno en el agua se reorganiza en tiempos del orden de 50 femtosegundos.^[7] Asimismo, el mecanismo de Grotthuss de conductividad del agua implica que las moléculas de agua ni siquiera mantienen su integridad unimolecular, sino que intercambian átomos de hidrógeno entre ellas continuamente.^[8,9] Ante la otra línea de defensa habitual, “*la homeopatía funciona hasta en animales*”, hay que recordar que el efecto placebo también se conoce y estudia en animales, incluso a nivel molecular. Por ejemplo, recientemente se encontró que las ratas presentan efecto placebo analgésico cuando se les inyectaba suero fisiológico en lugar de morfina en una serie de experimentos de dolor térmico facial. En el mismo trabajo, se demostró que ese efecto placebo puede ser bloqueado por la inyección de naloxona, un antagonista de los receptores opioides.^[10]

Sin embargo, todas estas razones no son un obstáculo para que la homeopatía se haya convertido en un éxito de marketing en España y, más aún, en países de nuestro en-

torno. De esta forma, es posible encontrar en las farmacias preparados en base a compuestos naturales en concentraciones terapéuticas (no diluidas) y a los que se les atribuye el calificativo de “homeopático” para introducirlo en un nicho de mercado potencialmente mayor.

DEFINICIONES Y CONCEPTOS

Para poder trabajar en clase problemas relacionados con los llamados principios homeopáticos necesitamos tener claros los conceptos de cantidad de sustancia y su unidad el mol, que se han demostrado muy difíciles de enseñar debido a la falta de distinción en muchos casos entre esta magnitud, la masa molecular y el volumen molar.^[11] Esta confusión se debe a que, en la mayoría de las secuencias de enseñanza propuestas para estos conceptos, se introduce en primer lugar el concepto de mol, necesario para entender las reacciones químicas, sin introducir en profundidad la cantidad de sustancia, magnitud de la cual es unidad, probablemente siguiendo una secuencia histórica de la construcción de estos conocimientos.^[11]

En esta propuesta se van a abordar tres problemas distintos que pueden trabajarse a diferentes niveles de complejidad teórica y experimental según el nivel de los alumnos: ESO, Bachillerato y primeros años de carrera universitaria. El enfoque didáctico empleado se enmarca en la estrategia de enseñanza-aprendizaje por investigación, más conocido por su acrónimo inglés IBSE (Inquiry Based Science Education). Se trata de que los alumnos se enfrenten a los problemas guiados por el profesor, propongan hipótesis como posibles soluciones, diseñen experimentos para comprobar sus hipótesis y analicen los resultados de los experimentos y sus aplicaciones. En otras palabras, se trata de que los alumnos construyan su propio conocimiento científico y opiniones no sólo sobre los aspectos científicos y tecnológicos tratados, sino también sobre los aspectos sociales de los mismos, que en este caso están relacionados con una de las pseudociencias más conocidas, la homeopatía.

Para llevar a cabo este proceso los alumnos realizarán actividades de corta duración propuestas por el profesor, organizados en pequeños grupos. Al trabajo de los pequeños grupos seguirá una puesta en común en la que se llegará a conclusiones que permitan continuar con la tarea. El profesor ayudará y motivará en el trabajo a los pequeños grupos y dirigirá la puesta en común complementando el conocimiento construido por los grupos y proponiendo caminos para encontrar soluciones a los problemas. En todos los casos fomentará las discusiones y las aportaciones de los alumnos.

PRIMER PROBLEMA: ¿CUÁNTAS MOLÉCULAS HAY EN UN GRANO DE AZÚCAR?

Se plantea a la clase el siguiente problema abierto: estima cuántas moléculas de azúcar hay en un grano. Naturalmente, el primer paso es debatir sobre el cuerpo de conocimientos necesarios para resolver el problema, para terminar es-



Figura 2. Fotografía ilustrando el proceso de divisiones sucesivas entre un gramo y unos pocos granos de azúcar

tableciendo que necesitamos conocer la masa de un grano de sacarosa y después las moléculas que hay en una determinada masa de sacarosa. Habitualmente los alumnos siempre recuerdan que en un mol de cualquier sustancia hay un número de Avogadro de moléculas. Necesitamos, por lo tanto, conocer la masa de un mol de sacarosa, que se obtiene a partir de la fórmula molecular de la misma, $C_{12}H_{22}O_{11}$. Con esta información sobre su composición, ya podemos calcular la masa molar de la sacarosa: 342.30 g/mol.

A partir de ahí, y aplicando el concepto de mol, podemos saber que 342,3 g contienen el número de Avogadro en moléculas: $6,023 \cdot 10^{23}$. Pero ¿cuántos granos hay en 342,3 g? El problema es que las balanzas de los laboratorios no tienen la precisión mínima necesaria para obtener unos resultados satisfactorios, que es del orden de la décima de miligramo.

La solución que se propone aquí nos permite introducir la idea de las diluciones en serie en estado sólido, apreciando visualmente la disminución de materia mediante “divisiones en serie” en potencias de 2 (Figura 2). Se trata de la misma reducción logarítmica de la cantidad de sustancia que tiene lugar con las diluciones en serie.

A partir de una cantidad inicial que se pueda pesar con precisión (dependiendo de la balanza, típicamente 1 g o 0.1 g), se efectúan divisiones sucesivas en dos montones aproximadamente iguales, y tras un cierto número de divisiones se cuenta el número de granos de azúcar obtenidos. La masa de un grano de azúcar promedio procedente de una masa total M vendrá dada por la fórmula:

$$m = (M/2^d)/n$$

donde d es el número de divisiones sucesivas y n el número de granos que queda en el montón.

Cada alumno o pareja tendrá un resultado ligeramente distinto, y puede ser interesante para el profesor el representar los valores de toda la clase para obtener una campana de Gauss donde evaluar el promedio y la dispersión. Con el valor obtenido se puede estimar con relativa precisión cuántos granos de azúcar contienen 342,3 g, y aplicando el concepto de mol, cuántas moléculas hay en cada grano.

Esta propuesta experimental se ha llevado a cabo con un grupo de diez estudiantes de secundaria durante el transcurso de las jornadas divulgativas de *Expo-ciencia 2013*, que tuvieron lugar en el Parque Científico de la Universitat de València el día 25 de mayo de 2013. De los experimentos realizados se obtuvo una gran dispersión de valores, pero siempre alrededor del orden de magnitud correcto, esto es *ca.* 0.10 mg para el peso de un sólo grano de azúcar, lo que corresponde aproximadamente a una millonésima de mol, esto es, del orden de 10^{17} moléculas.

Cabe destacar que los alumnos asimilaban de forma clara las magnitudes involucradas, así como el método de cálculo, antes de iniciar el experimento. Los problemas típicos fueron: distracción durante la actividad que ocasionaba el olvidarse de anotar una división, o confusión en el proceso de cálculo una vez llevado a cabo el experimento. Esto se solucionaba pidiéndoles que se parasen a pensar antes de ponerse a procesar números mecánicamente. La práctica finaliza con el cálculo del número de divisiones adicionales que habría que hacer –imaginándonos que trituramos el grano de azúcar– hasta llegar a una molécula aislada. Naturalmente, el número de divisiones depende de la masa estimada para un grano de azúcar, pero en general es algo menor de 60. Es llamativo ver lo bajo que es el número de divisiones necesarias para obtener una única molécula de azúcar. Un punto crítico de los fundamentos de la química es percibir precisamente esa frontera infranqueable de la divisibilidad. Más allá del límite de una sola molécula nunca es posible tener una cantidad menor de ese compuesto: si se rompe la molécula, ya no es la misma sustancia. Como se ha señalado antes, Hahnemann no conocía este límite porque en su época no se había determinado el número de Avogadro. A alumnos mayores se les puede matizar que en el caso particular del azúcar de mesa o sacarosa, la molécula es un dímero, de forma que si se “parte” químicamente se obtienen dos moléculas de otros dos azúcares: glucosa y fructosa.

SEGUNDO PROBLEMA: ¿QUEDA PERMANGANATO CUANDO EL COLOR VIOLETA DESAPARECE? ¿HASTA DÓNDE?

A continuación se reproduce el mismo efecto de reducción de cantidad de sustancia al contexto más familiar de la química, que son las disoluciones acuosas. En el epígrafe anterior hemos observado como a base de divisiones sucesivas en base 2, los alumnos pueden reducir la cantidad de materia en más de 100.000 veces, es decir, de unos 80 g a menos de 1 mg. Con material volumétrico es posible hacer esto de forma mucho más eficiente. En este segundo caso, además de los conceptos anteriormente mencionados, extendemos el enfoque a otro tipo de sustancias. Concretamente trabajaremos con el permanganato de potasio ($KMnO_4$), una sal ampliamente conocida cuya característica más destacada desde un punto de vista educativo es su llamativo y persistente color violáceo que más tarde se convierte en marrón oscuro debido a la reducción del Mn^{7+} al Mn^{4+} formando MnO_2 (sello “indiscutible” cuando se manchan las batas de laboratorio empleadas por estudiantes en prácticas de todo el mundo). Nuestro objetivo es ilustrar con el apoyo de las diluciones sucesivas el concepto de límite de detección de un aparato. De este modo, volveremos a alcanzar valores de dilución disparatados, empleando un espectrofotómetro educativo como equipo de laboratorio.

El procedimiento que se propone sería adecuado para grupos de alumnos de los últimos cursos de secundaria o incluso de primer curso universitario. Como material hemos empleado un espectrofotómetro UV-visible típico de un laboratorio docente de prácticas de química general de la Universitat de València.^[12] Para realizar la práctica

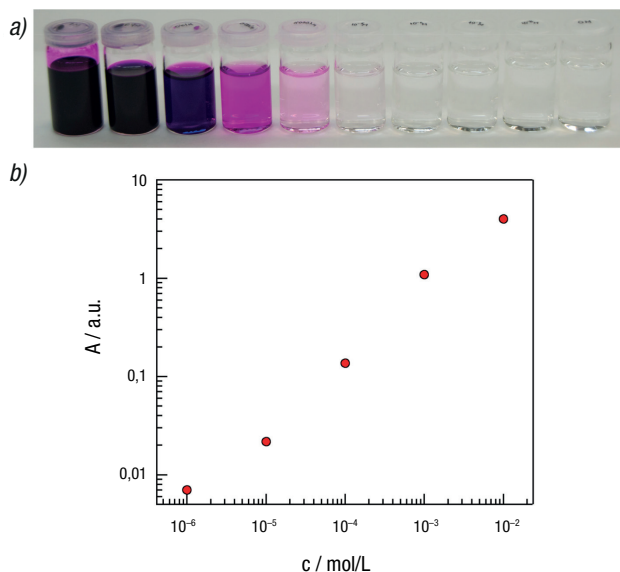


Figura 3. a) Fotografía ilustrando el proceso de diluciones sucesivas 1:10 de permanganato potásico en agua destilada, partiendo de una concentración inicial de 0.1 M. b) Gráfica representando los valores del máximo de absorbancia a una longitud de onda de 525 nm en el rango en el que el ojo humano percibe una variación de intensidad de color. Nótese que por debajo de 10⁻⁶ M el equipo no es capaz de detectar señal alguna

partimos de una concentración 0.01 M, que introducimos en la cubeta de medida satura por completo el aparato a una longitud de onda de 525 nm. A partir de esta concentración inicial comenzamos a realizar diluciones sucesivas de 1 mL de muestra en 9 mL de agua destilada, de modo que al realizar la primera logramos entrar dentro del rango lineal de medida de absorbancias (típicamente 0.3–1.0). Obtendremos así un valor inicial de absorbancia, que irá disminuyendo a medida que registremos el resto de diluciones, así hasta llegar a un valor similar al medido inicialmente para el blanco consistente en agua. Como se puede observar en la Figura 3, las diluciones en serie de factor diez, tienen un efecto destacable tanto a simple vista como midiendo en un espectrofotómetro UV-visible, poniendo de manifiesto que si cada dilución rebaja la concentración en un orden de magnitud, se llega rápidamente al límite de detección de un equipo que se usa en laboratorio de investigación. Este experimento lo hemos llevado a cabo con espectrofotómetros docentes, obteniendo los resultados finales en un período inferior a 10 minutos. La práctica continúa con el cálculo del número de diluciones en serie necesarias para obtener 1 L de disolución que contenga aproximadamente un único anión permanganato. Una vez establecido este valor, puede ser muy útil la comparación gráfica de este dato con varios productos homeopáticos típicos, poniendo de manifiesto las magnitudes que se manejan en la homeopatía (o, en efecto, la magnitud del despropósito). Para esto, basta con extender mentalmente la Figura 3 b) hacia abajo y hacia la izquierda. De esta forma, si en la pantalla (o en el papel) la distancia entre marcas es de 1–1.5 cm, la disolución con una molécula por litro se encontraría aproximadamente a un palmo por debajo y a la izquierda de la gráfica, mientras que el punto correspondiente al ejemplo del *Oscilococcinum* que se mencionaba en la introducción, en esa misma gráfica, estaría nada menos

que dos pisos más abajo. Volviendo a la realidad, es interesante que haya menos *distancia* entre una disolución de un negro impenetrable a un color casi indetectable, que entre esta y la concentración de una molécula por litro. También ha de resultar obvio que cualquier “dilución” más allá de ese punto es irrelevante, pues no se están alterando las propiedades de la muestra: simplemente se está mezclando agua en agua.

TERCER PROBLEMA: ¿CUÁNTAS DILUCIONES TENEMOS QUE REALIZAR PARA ALCANZAR UNA ÚNICA NANOPARTÍCULA DE ORO?

Teniendo en cuenta el auge experimentado por el campo de la Nanociencia y la Nanotecnología, el poder trabajar con alumnos la síntesis y caracterización de nanopartículas de interés en diversos campos se ha revelado como una herramienta muy útil desde el aspecto motivacional. Para ello se incorpora un procedimiento de síntesis sencillo de nanopartículas (NPs) de oro. De hecho, las nanopartículas de oro se pueden relacionar con experiencias en contextos no formales. En concreto, con los colores de algunas vidrieras de catedrales medievales, en las que se dan lugar fenómenos de transmisión y reflexión promovidos por los plasmones superficiales, originando preciosos colores que sólo pueden ser observados desde el interior de las iglesias. En la Figura 4, se puede observar el mismo fenómeno en la famosa Copa de Licurgo (aprox. 300 a.C.) en la que los colores observados por transmisión y reflexión son completamente diferentes y se atribuyen a la presencia de NPs de oro (rojo) y plata (verde), respectivamente. En este contexto, se trata de exponer el problema de las diluciones sucesivas trabajando con una entidad concreta como es un “trozo” muy pequeño de oro del orden de una millonésima de un centímetro, de manera que los estudiantes puedan asimilar las magnitudes nanométricas, y por traslación las diluciones homeopáticas.

El método empleado para sintetizar las nanopartículas es el descrito por el grupo del Dr. Puentes, recientemente publicado y de amplio uso en investigación.^[14,15] La morfología y tamaño de las NPs sintetizadas se puede caracterizar mediante microscopía electrónica de alta resolución (HRTEM). Como puede observarse en la Figura 5, las NPs presentan una forma cuasi-esférica, y un diámetro promedio de 14 nm. En cuanto a la caracterización experimental,

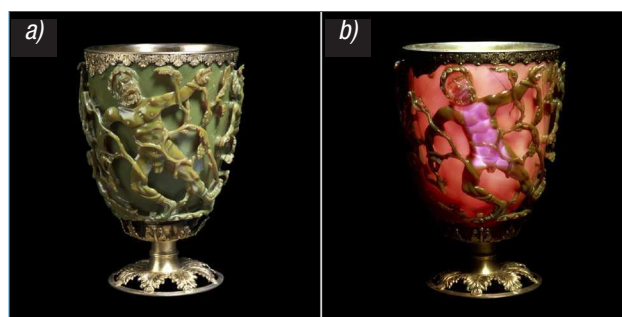


Figura 4. a) Fotografía de la Copa de Licurgo realizada con luz reflejada. En este caso se observa claramente un color verdoso en el vidrio de la copa. b) Cuando la luz es transmitida a través de la copa, se produce un color rojizo fruto de la incorporación de nanopartículas de oro y plata de entre 50 y 100 nm en el vidrio. © Trustees of the British Museum

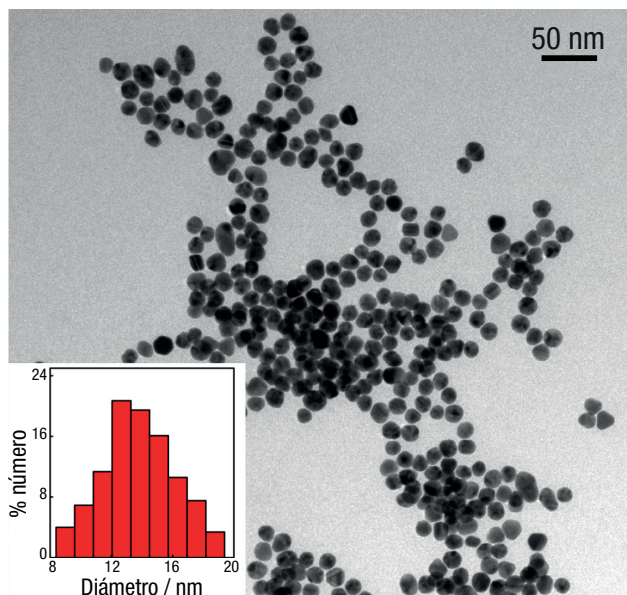


Figura 5. Imagen de HRTEM mostrando la morfología de las nanopartículas de oro sintetizadas. En la gráfica insertada se puede observar un histograma de tamaños realizado a más de 400 nanopartículas, mostrando un valor promedio de ca. 14 nm de diámetro

los experimentos de HRTEM se han realizado en un microscopio *Technai G2 F20* trabajando a 200 kV. Las muestras se prepararon depositando una gota de la suspensión en rejillas de microscopía de cobre recubiertas con *Formvar/carbon*. Las medidas estadísticas de tamaño de partícula se realizaron midiendo al menos 400 NPs, calculando su desviación estándar y el tamaño medio con ayuda de los programas *Image-Jy OriginLab-8*. Los espectros de UV-Vis se han realizado en un espectrofotómetro *Agilent 8453* en el rango de 200 a 900 nm a temperatura ambiente.

Una primera pista del éxito del procedimiento sintético se puede obtener mediante la observación del efecto Faraday-Tyndall^[16] utilizando un puntero láser convencional (Figura 6). El efecto Faraday-Tyndall se produce cuando la luz láser se dispersa al chocar con partículas de un tamaño similar a su longitud de onda, observándose el recorrido del haz a lo largo de la suspensión. La realización de diluciones sucesivas de esta suspensión inicial se puede seguir mediante el registro de sus espectros de absorción UV-Vis. Estos espectros se caracterizan por la presencia de una banda de absorción correspondiente al plasmón superficial de las NPs de oro. En la Figura 6 b) se ilustra la marcada disminución de la absorción de la muestra con las respectivas diluciones, como cabría esperar de la aplicación de la ley de Beer-Lambert.

De acuerdo al trabajo de Puentes *et al.* la concentración aproximada en la muestra de partida sería de $\sim 10^{12}$ NPs/mL. Por lo tanto, para alcanzar una concentración de 1 NP/L se deberían de realizar 15 diluciones 1:10 sucesivas. A modo ilustrativo, cabe resaltar que Hahnemann propuso en 1829 como especialmente efectivas las diluciones de 10^{60} –lo que correspondería a realizar 45 diluciones 1:10 adicionales a las 15 ya efectuadas.

Para alumnos de primer ciclo universitario, aquí puede ser interesante señalar que, a diferencia de los preparados homeopáticos, las NPs sí producen efectos demostrados in-

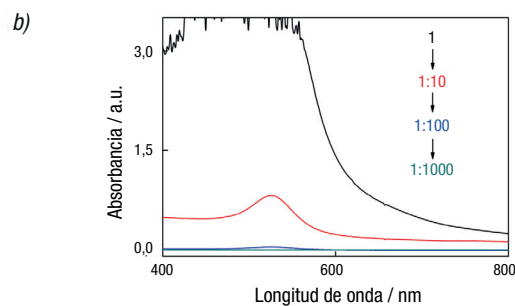
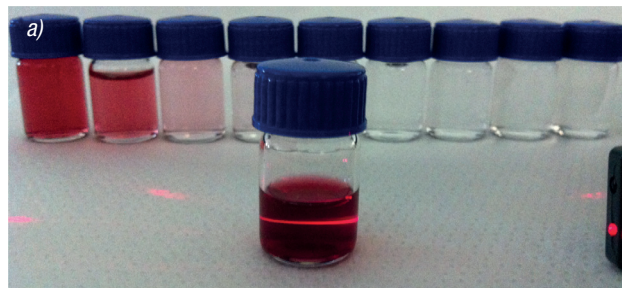


Figura 6. a) Fotografía ilustrando el proceso de diluciones sucesivas de las nanopartículas de oro en agua destilada, destacando el efecto Faraday-Tyndall producido por el haz de un láser convencional. b) Espectros UV-Vis de la suspensión coloidal de nanopartículas inicial, y sus respectivas diluciones hasta llegar al límite de detección del espectrofotómetro empleado. Se puede observar claramente una banda centrada en torno a 525 nm correspondiente al plasmón superficial

cluso a nivel industrial,^[17] y sí son objeto de investigación científica del más alto nivel.^[18] En efecto, las NPs metálicas ya se están empleando en una variedad de utilidades industriales como filtros UV en cremas solares, baterías de litio, y en el campo terapéutico como tratamiento anti-tumoral.

TALLER EN UN MUSEO INTERACTIVO

Por último, cabe destacar la utilidad de estas sencillas propuestas experimentales en contextos educativos no formales. Para ello hemos diseñado un taller de investigación en el marco del MUDIC-VBS-CV (Museo Didáctico e Interactivo de la Vega Baja del Segura de la Comunitat Valenciana), ubicado en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández.^[19,20] Este taller denominado “Taller Cannizaro: buscando moléculas” ha sido diseñado bajo el enfoque de aprendizaje IBSE, planteando los dos primeros problemas descritos en este artículo y realizando las experiencias en pequeños grupos de alumnos guiados por monitores formados a tal efecto. Dada la trascendencia social de la homeopatía, resulta sencillo captar la atención de los estudiantes, confrontando las creencias previas con los problemas lógicos derivados del análisis químico de la praxis homeopática. Este taller de investigación también se ha revelado como una herramienta útil para reforzar los conocimientos básicos de química tratados a lo largo de este trabajo.

CONCLUSIONES

Unos conocimientos básicos de química, unidos a la actitud crítica que se deriva de una educación científica, son

herramientas necesarias y suficientes para resistir a engaños como el de la homeopatía. Pensamos que es responsabilidad de los científicos y docentes no solamente el educar y ofrecer estas herramientas de defensa, sino el combatir activamente a las pseudociencias. Como hemos mostrado en este trabajo, es posible hacerlo mientras se enseñan conceptos básicos en cualquier currículum de química tales como el mol y la concentración de una disolución. Para ello nos hemos apoyado en experimentos sencillos empleando azúcar, diluciones de permanganato potásico, y suspensiones coloidales de nanopartículas de oro.

Por otra parte, creemos importante reconocer el mérito de iniciativas como la campaña internacional que inició en 2010-2011 la Merseyside Skeptics Society del Reino Unido “10²³ Campaign; Homeopathy: there’s nothing in it”.^[21] En el ámbito nacional hay que destacar la iniciativa del Círculo Escéptico en España “La Lista de la Vergüenza”,^[22] que denuncia cursos, adhesiones o respaldos por parte de Universidades, Colegios Oficiales y organismos públicos a diversos disparates y pseudociencias (no solamente la homeopatía) y la serie de televisión “Escépticos” de la televisión pública del País Vasco (ETB).^[23] Del mismo modo que estas iniciativas, este artículo pretende ser una llamada de atención hacia organizaciones e instituciones que deberían ser más responsables. *Caveat emptor*.^[24]

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos encarecidamente su inestimable ayuda durante la elaboración de este trabajo a I. Esteve, E. Nuin, S. Cardona-Serra, J. V. Usagre y B. Gómez. El MUDIC-VBS-CV quiere agradecer al Excmo. Ayuntamiento de Orihuela, la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández de Elche y a la Asociación de Profesores de Ciencias Hypatia de Alejandría por su continuo apoyo. Asimismo, agradecemos los acertados comentarios de los revisores anónimos que han contribuido a la mejora en la redacción del artículo. Los autores quieren agradecer al MINECO por los contratos RyC para A. G. A., y FPU para J. J. B., G. A. agradece a la UE por una Beca Marie-Curie (IEF-627386).

BIBLIOGRAFÍA Y NOTAS

- [1] C. Furió, R. Azcona, J. Guisasola, *Enseñanza de las Ciencias*, **2006**, *24*, 43-58.
- [2] J. G. Frazer, *The Golden Bough: A Study in Magic and Religion*, **1900**, MacMillan & Co., London.
- [3] La directiva europea 2001/83/CE, modificada varias veces por la directiva 2004/27/CE, una nueva Ley de medicamentos en España 29/2006 y un nuevo Reglamento de autorización y registro por el Real Decreto 1345/2007.
- [4] <http://links.uv.es/25h9tZf>, visitada el 12/09/2014.
- [5] C. Montecucco, J. Molgó, *Curr. Opin. Pharmacol.* **2005**, *5*, 274-279.
- [6] S. S. Arnon, R. Schechter, T. V. Inglesby, D. A. Henderson, J. G. Bartlett, M. S. Ascher, E. Eitzen, A. D. Fine, J. Hauer, M. Layton, S. Lillibridge, M. T. Osterholm, T. O’Toole, G. Parker, T. M. Perl, P. K. Russel, D. L. Swerdlow, K. Tonat, *J. Am. Med. Assoc.* **2001**, *285*, 1059-1070.
- [7] M. L. Cowan, B. D. Bruner, N. Huse, J. R. Dwyer, B. Chug, E. T. Nibbering, T. Elsaesse, R. J. Miller, *Nature* **2005**, *434*, 199-202.
- [8] C. J. T. de Grotthuss, *Ann. Chim.* **1806**, *58*, 54-73.
- [9] N. Agmon, *Chem. Phys. Lett.* **1995**, *244*, 456-462.
- [10] T. A. Nolan, D.D. Price, R.M. Caudle, N.P. Murphy, J.K. Neubert, *Pain*, **2012**, *153*(10), 2009-2016.
- [11] L. I. García, *An. Quím.* **2013**, *109*(3), 209-212.
- [12] Págin web oficial del Laboratorio de Química General de la Universitat de València <http://www.uv.es/fqlabo/>
- [13] I. Freestone, N. Meeks, M. Sax, C. Higgitt, *Gold Bull.*, **2007**, *40*(4), 270-277.
- [14] N. G. Bastús, J. Comenge, V. Puentes, *Langmuir*, **2011**, *27*, 11098-11105.
- [15] Una disolución 2.2 mM de citrato trisódico ($\text{Na}_3\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COO})_3$) en 150 mL de agua destilada Milli-Q (en su defecto agua destilada) se calienta con una manta eléctrica en un matraz de fondo redondo de tres bocas de 250 ml durante 15 min con agitación vigorosa. El dispositivo experimental incluye un condensador de reflujo para evitar la evaporación del disolvente y tapones de goma para sellar las bocas libres del matraz. Cuando la mezcla comienza a hervir, se añade con una jeringa 1 mL de ácido tetracloroáurico (HAuCl_4 , 25 mM) a través de una de las bocas del matraz. El color de la disolución cambia de amarillo a un azul grisáceo y posteriormente a rosa en unos 10 min. Las partículas resultantes (ca. 10 nm, ca. $3 \cdot 10^{12}$ NPs/mL) están recubiertas de iones citrato cargados negativamente, por lo que permanecen bien suspendidas en H_2O . En un segundo paso se puede aumentar el tamaño de las nanopartículas de forma controlada, evitando la formación de nuevas semillas de crecimiento. Inmediatamente después de sintetizar las NPs de Au y en el mismo matraz, la reacción se enfría hasta que la temperatura de la disolución alcance 90 °C. Entonces, se inyectan de forma secuencial y con un espacio de tiempo de 2 min, 1 mL de $\text{Na}_3\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COO})_3$ (60 mM) y 1 mL de HAuCl_4 (25 mM). Después de 30 min se obtienen las NPs finales, cuyo tamaño se puede modular repitiendo ésta última adición hasta 14 veces, obteniendo un rango de tamaños que oscila entre ca. 13 nm hasta 180 nm.
- [16] M. Quinten, *Optical properties of nanoparticles systems: Mie and beyond*, **2011**, Wiley-VCH, Weinheim.
- [17] D. L. Fedlheim, C. A. Foss, *Metal nanoparticles: synthesis, characterization, and applications*. **2001**, CRC Press, Boca Raton (Florida).
- [18] L. Dykman, N. Khlebtsov, *Chem Soc. Rev.* **2012**, *41*(6), 2256-2282.
- [19] Págin web oficial del MUDIC-VBS-CV <http://www.mudic.es>
- [20] M. Nieves, G. Abellán, J. Carnicer, *An. Quím.* **2009**, *105*(4), 300-304.
- [21] Págin web oficial de la iniciativa 10²³ <http://www.1023.org.uk>.
- [22] Págin web oficial de la Lista de la Vergüenza <http://www.listadelaverguenza.es>.
- [23] <http://links.uv.es/jnd2Xw4>, visitada el 12/09/2014.
- [24] “*Caveat emptor*” es una frase en latín que significa “cuidado por parte del comprador”.