



DIDÁCTICA

La dimensión ambiental de la experimentación en la enseñanza de la química: consideraciones sobre el uso de la métrica holística «estrella verde»



Fábio Peres Gonçalves^{a,*}, Santiago Francisco Yunes^a, Renata Isabelle Guaita^a, Carlos Alberto Marques^b, Tânia C.M. Pires^c, J. Ricardo M. Pinto^c y Adélio A.S.C. Machado^c

^a Departamento de Química, Centro de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

^b Departamento de Metodología de la Enseñanza, Centro de Ciencias de la Educación, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

^c Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Porto, Porto, Portugal

Recibido el 17 de agosto de 2016; aceptado el 29 de noviembre de 2016

Disponible en Internet el 9 de enero de 2017

PALABRAS CLAVE

Experimentación;
Métrica holística;
Estrella verde;
Enseñanza de la
química

KEYWORDS

Laboratory
experiments;
Holistic metric;
Green Star;
Chemistry teaching

Resumen Nuevas consideraciones acerca del uso de la métrica holística de análisis del verdor químico designada como «estrella verde» son presentadas sobre la base de un análisis preliminar de libros de texto de química brasileños. Entre otros aspectos, se llama la atención sobre el carácter relativo del verdor químico evaluado por las métricas de verdor, toda vez que dependiendo del contexto de realización de la actividad experimental puede ser alterada, por ejemplo, por la fuente de la cual provienen los reactivos. Se destaca asimismo la necesidad de que la evaluación de la dimensión ambiental de las actividades experimentales se convierta en un contenido explícito de la formación de profesores de química.

© 2016 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

The environmental dimension of experimentation in Chemistry Teaching: Use considerations from the holistic metric «green star»

Abstract Further discussion on the use of the Green Star holistic metric for evaluation of the chemical greenness is presented, based on a preliminary evaluation of chemistry teaching books used in Brazil. The relative nature of the chemistry greenness is discussed, stressing that

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: fabiopgon@hotmail.com (F.P. Gonçalves).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

it depends on the context of the laboratory experiment, for instance, the source of a reagent may alter its level. It is concluded that in the academic training of chemistry teachers explicit attention should be paid to the evaluation of the environmental dimension of the laboratory activities.

© 2016 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

Publicaciones recientes sobre la dimensión ambiental de las actividades experimentales son ejemplos de la necesidad de discutir, de manera más explícita, este tema en la enseñanza de la química (Hartwell, 2012; Galgano, Loffredo, Sato, Reichardt y El Seoud, 2012; Eissen, 2012). De acuerdo con lo que exponen Hofstein y Mamlok-Naaman (2007), al discutir el estado de la cuestión de los trabajos sobre la experimentación en la enseñanza de las ciencias, se puede interpretar que el estudio de la dimensión ambiental en esos trabajos no se ha mostrado relevante en la literatura internacional. Por otro lado, se entiende que trabajos en torno a la dimensión ambiental de las actividades experimentales pueden contribuir a la renovación de las temáticas de las investigaciones relacionadas con la experimentación en la enseñanza de las ciencias, renovación que se considera necesaria por los autores citados.

En la literatura internacional se encuentran publicaciones como la de Hartwell (2012), en la cual se hace una revisión sobre el uso de extractos de plantas como reactivos naturales, que pueden contribuir a lo que el autor denomina la enseñanza de la química analítica verde. Hay otras propuestas en las que se valoriza el tratamiento de cuestiones con potencial para la discusión ambiental por medio de experimentos tales como la determinación de la concentración de etanol (proveniente de la biomasa) en la gasolina utilizada por los automóviles en Brasil (Galgano et al., 2012). La utilización de métricas para evaluar el verdor químico de experimentos es otro tema que ha ocupado espacio en las publicaciones y que apunta a fomentar la planificación de actividades experimentales más favorables desde el punto de vista ambiental (Eissen, 2012)¹.

En relación con las métricas del verdor químico, Costa, Ribeiro y Machado (2009, 2011) examinaron los experimentos propuestos para el programa de química en los años 10.º y 11.º de la educación secundaria portuguesa a la luz de una métrica holística del verdor químico, de naturaleza gráfica y semicuantitativa, diseñada para su uso en laboratorios de enseñanza, denominada estrella verde (EV). Los autores llegaron a la conclusión de que parte de las actividades experimentales eran problemáticas en lo que respecta a la seguridad de los estudiantes y a otros problemas ambientales. La evaluación de la dimensión ambiental

de las actividades experimentales por parte de los docentes, ya sean de la educación básica o de la educación superior, es algo imperativo y precisa constituirse en un contenido explícito de la formación docente en química.

Por lo expuesto, el objetivo de este artículo es presentar, a partir de experimentos de química diseñados para la escuela secundaria, nuevas observaciones relativas a la métrica EV que no fueron consideradas en su propuesta inicial. Son tratados, por ejemplo, problemas en el ámbito de los siguientes temas: reutilización de materiales que no participan directamente en reacciones químicas; utilización de materiales de fácil obtención (de uso cotidiano) en los experimentos; naturaleza de la materia prima utilizada para producir los reactivos, y el estudio de problemas ambientales como objetivo del experimento. Se hace hincapié en que, si bien la discusión se hace en este texto a propósito de la EV, esta concierne de modo general, en mayor o menor medida, a muchas otras métricas de verdor, ya que tiene que ver con la compleja naturaleza de estas y del propio verdor químico, que es una magnitud relativa (Machado, 2014).

La estrella verde

En artículos recientes (Ribeiro, Costa y Machado, 2010a,b; Ribeiro y Machado, 2011) se presentó la métrica EV para evaluar el verdor químico de procesos químicos. Esta métrica mide el verdor según el grado de cumplimiento de cada uno de los 12 principios de la química verde (QV) aplicables a los casos en evaluación, traduciendo gráficamente el resultado global de esta: cuanto más llena sea percibida la EV en la observación visual, mayor es el verdor. Por lo tanto, la EV es una métrica holística y, al ser gráfica, es semicuantitativa. En una primera versión, el criterio para fundamentarla estuvo basado en los símbolos de peligro químico utilizados por el sistema establecido por la Unión Europea (Res. 67/548/EEC)². Entre tanto, un nuevo sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos (GHS, por *the globally harmonized system of classification and labelling of chemicals*) comenzó a utilizarse en las fichas de datos de seguridad de los productos químicos (SDS, por *safety data sheets*) puestas a disposición en la Internet por empresas proveedoras y fabricantes de productos químicos, las mismas que son utilizadas como fuente de información para la aplicación de la métrica. De este modo, una nueva base, basada en el sistema GHS, fue desarrollada recientemente en una versión revisada de la

¹ En esta referencia, el autor presenta una síntesis de publicaciones que exploran métricas en la enseñanza de la química. Es de destacar que el número de estas publicaciones es bastante reducido.

² Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008R1272> [consultado 11 Nov 2016].

métrica (Ribeiro, Yunes y Machado, 2014), que será utilizada en este artículo.

La organización de la EV se efectúa por medio de una hoja de cálculo (por ejemplo, una plantilla Excel)³ que se genera a partir de informaciones sobre las características generales de las condiciones experimentales y de los materiales involucrados. La métrica es construida de acuerdo con criterios de evaluación de cada uno de los 12 principios de la QV pertinentes para la situación en análisis. La determinación del verdor químico comienza por el análisis del procedimiento experimental en busca de informaciones con respecto a: (i) reactivos estequiométricos en exceso —información utilizada para evaluar el cumplimiento del principio 2 (P2) de la QV—; (ii) las condiciones de temperatura y presión del procedimiento (evaluación de P6); (iii) peligros para la salud humana y el medio ambiente (P1, P3, P5 y P9) y potencial peligro de accidente químico (P12) con todas las sustancias comprendidas (materia prima/reactivos, productos, subproductos, disolventes, materiales auxiliares tales como agentes de secado, catalizadores, residuos, etc.); (iv) renovabilidad de la materia prima/reactivos (P7), y degradabilidad de los productos de la reacción o tendencia a convertirse en productos inocuos (P10), y (v) uso de derivatizaciones u operaciones similares (P8). A diferencia de la EV anterior, la actual posee puntas (rayos) numeradas con los 12 principios de la QV, de manera que la visualización de la evaluación del verdor referente a cada principio es independiente de las adyacentes y, por eso, más fácil. Además, el índice de llenado de la estrella (ver definición más abajo) viene a corresponder mejor al verdor químico analizado (Ribeiro et al., 2014). El número de rayos de la EV es igual al número de principios relevantes en cada situación evaluada: 6 puntas en experimentos que no implican síntesis; 10 puntas en experimentos de síntesis, y 12 puntas para situaciones de química industrial.

Para construir la EV referente a una actividad experimental, se comienza por inventariar todas las sustancias/materiales intervinientes: reactivos, productos y subproductos obtenidos, catalizadores, disolventes, agentes de purificación, secadores y residuos resultantes. Para cada una de estas sustancias/materiales, se recogen las informaciones sobre los peligros para la salud humana y el medio ambiente a través de la indicación de peligro (*hazard statements*) de los compuestos adoptados por el GHS, así como informaciones sobre si estas sustancias/materiales constituyen materias primas renovables —o son obtenidas de ellas— y también sobre su degradabilidad. Se pueden conseguir estas informaciones en las SDS disponibles en línea en los sitios web de varios fabricantes y distribuidores de productos químicos. A partir de los códigos de la indicación de peligro y siguiendo criterios bien definidos, a cada sustancia/material se le confiere una puntuación de 1 (peligro mínimo) a 3 (peligro máximo). Se califican también las sustancias/materiales de acuerdo con su degradabilidad y según sean o no materias primas renovables. En el caso de que estas informaciones

no sean encontradas o de que las informaciones recopiladas no sean consistentes con respecto a alguno de los aspectos señalados anteriormente, se utiliza el valor de mayor penalidad por razones de seguridad (se aplica el principio de precaución). La EV se construye mediante la asignación de una puntuación de 1, 2 o 3 (máximo de verdor) a cada uno de los principios de la QV, de acuerdo con los criterios definidos en una tabla que se puede consultar en Ribeiro et al. (2014)⁴.

En ciertos casos, puede ser difícil la mera comparación visual de las estrellas para evaluar la variación del verdor químico; por ejemplo, cuando se comparan protocolos de síntesis. Por ese motivo, se calcula también un valor numérico que expresa el área de la EV en forma relativa, como porcentaje de área verde de la estrella relativo al área de una estrella de verdor químico máximo ($100 \times \text{área verde de la estrella} / \text{área verde de la estrella de verdor químico máximo}$), que ha sido llamado índice de llenado de la estrella (IPE, por *índice de preenchimento da estrela*). Para la estrella de verdor químico máximo, IPE = 100, y para la de mínimo, IPE = 0.

El contexto del trabajo

El presente estudio forma parte de una investigación más amplia en el marco de un acuerdo de cooperación académica internacional entre una universidad brasileña y una universidad portuguesa que, entre otras actividades, busca analizar y comparar, por medio de la EV, propuestas de actividades experimentales en libros de texto de Brasil y de Portugal. Al efectuarse el análisis de las actividades experimentales en libros de texto de Brasil con respecto a los materiales químicos, condiciones de reacción y/o de la infraestructura física para llevar a cabo algunas de las actividades experimentales propuestas, etc., se identificaron aspectos peculiares de las mismas en relación con los parámetros y principios organizadores de la EV (originalmente desarrollada en Portugal). Entre estas peculiaridades de los experimentos brasileños vale la pena destacar la insistente indicación de la utilización de materiales de fácil adquisición (materiales de uso cotidiano) y la posibilidad de reutilización de materiales. La muestra de libros de texto analizados estuvo constituida por 3 volúmenes de cada una de estas colecciones: *Ser protagonista*; *Química cidadã* (Química ciudadana); *Química: meio ambiente, cidadania, tecnologia* (Química: medio ambiente, ciudadanía, tecnología), y *Química-Ensino médio* (Química-Educación secundaria). Estas colecciones fueron aprobadas por el Programa Nacional de Libros de Texto (PNLD)⁵. De las 5 colecciones aprobadas en el PNLD 2012, las 4 mencionadas presentan propuestas de experimentos en el libro para el estudiante y fueron examinadas. El análisis preliminar de propuestas de actividades

⁴ Véase la tabla 5.

⁵ En resumen, es de destacar que este programa del Ministerio de Educación evalúa y aprueba los libros de texto para su distribución en las escuelas públicas brasileñas. Para obtener más información sobre las colecciones analizadas, se puede consultar: <http://www.fn.de.gov.br/programas/livro-didatico/escolha-pnld-2015/guias-antiores/item/2988-guia-pnld-2012-ensino-medio> [consultado 14 Nov 2016].

³ La construcción de la estrella verde se describe con detalles en: <http://educa.fc.up.pt/catalogo/pt/construcao.ev> (versión bilingüe inglés/portugués) [consultado 11 Nov 2016]. En este sitio web se tiene acceso a las versiones de Excel para el cálculo automático apropiado para diferentes casos.

experimentales en estos libros de texto hizo posibles nuevas reflexiones sobre la EV, que aquí son discutidas. Por lo tanto, lo que se presenta a continuación concierne al uso del propio instrumento analítico y su alcance, y no propiamente al análisis de los experimentos.

Nuevas consideraciones sobre la estrella verde

En el análisis preliminar de las propuestas de experimentos de los libros de texto se identificaron casos en que la EV de actividades experimentales mostraba un verdor limitado, mientras que otras ofrecían verdores aceptables⁶. Sin embargo, un análisis más cuidadoso de los experimentos, teniendo en cuenta lo expuesto en su proposición, da indicación de que había actividades experimentales con características bastante favorables desde el punto de vista ambiental, incluso cuando el verdor era relativamente bajo. Serán discutidos, por lo tanto, 3 aspectos a considerar en la evaluación de un experimento sometido a la métrica EV: (i) reutilización de materiales en los experimentos; (ii) el origen de la materia prima utilizada para producir los reactivos, y (iii) el estudio de problemas ambientales como objetivo del experimento.

La reutilización de materiales en los experimentos

Las propuestas de actividades experimentales que aquí se presentan tienen como característica, además de la posibilidad de reutilizar los materiales, el hecho de que no involucran reacciones químicas. Ellas se ocupan de contenidos relativos a calorimetría (calor específico), densidad y cambio de estado físico.

En el libro *Química cidadã* (Santos y Mól, 2010b, p. 50) se propone una actividad experimental sobre calorimetría titulada «¿Se calientan todos los materiales del mismo modo?», refiriéndose a la utilización de los siguientes materiales: una lata de refresco vacía, 2 porta-latas de telgopor (poliestireno expandido), un termómetro, una probeta, y piezas de metal (plomo, cobre, aluminio, etc.) con el mismo valor de masa. El experimento consiste en la construcción de un calorímetro rústico utilizando materiales fácilmente obtenibles. La lata de refresco, después de que su parte superior fue recortada, se coloca en el porta-latas de telgopor que funciona como aislante térmico. Las piezas de metal de la misma masa son calentadas hasta 100 °C en una olla con agua hirviendo. Posteriormente, estos metales son añadidos separadamente al calorímetro con agua con el fin de determinar el calor específico del objeto a través de la medición de la variación de temperatura. En resumen, el hecho de utilizar los metales mencionados para hacer la determinación de los respectivos valores de calor específico tiene implicaciones negativas en la representación gráfica de la EV del experimento (fig. 1), tanto como el calentamiento realizado. Entre los metales considerados para realizar la actividad experimental estaba el Pb, que es señalado en el SDS como tóxico

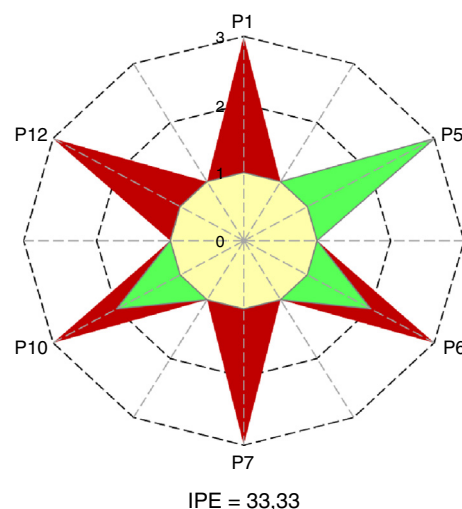


Figura 1 Estrella verde del experimento «¿Se calientan todos los materiales del mismo modo?».

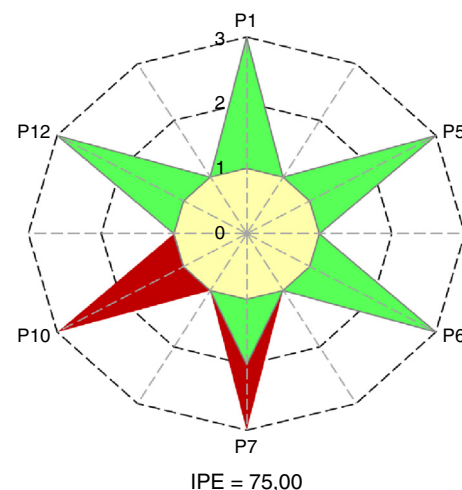


Figura 2 Estrella verde del experimento «¿Por qué los materiales se hunden o flotan?».

para el medio ambiente, con implicaciones en P1, P7 y P12. En cuanto al calentamiento, este influyó en P7.

Sin embargo, los metales usados en el experimento y demás materiales pueden y deben ser reutilizados otras veces en que se repita la actividad. Esta es, inclusive, una recomendación registrada en el propio libro de texto. Este aspecto de la reutilización de materiales que, por cierto, no reaccionan, se deja de lado como criterio en la EV, así como el hecho de que los metales pueden provenir de materiales de fácil obtención tales como restos de alambres eléctricos, latas de refrescos, etc.

Con lo expuesto, no se quiere afirmar que, debido a que la métrica deja de lado la reutilización de materiales (fáciles de obtener o no), el nivel de verdor obtenido por medio de la EV siempre será bajo. Puede haber experimentos similares en los que es posible la reutilización de los materiales debido a que no hay reacción química y el nivel de verdor es alto. Es el caso del experimento titulado «¿Por qué los materiales se hunden o flotan?» (fig. 2), también del libro *Química cidadã* (Santos y Mól, 2010a, p. 24). La actividad experimental en cuestión es sobre densidad e incluye los siguientes

⁶ Costa et al. (2009; 2011) sometieron al análisis de la EV experimentos del programa de química de los años 10.º y 11.º de la escuela secundaria portuguesa obteniendo un IPE inferior al 50% para la mayoría de los experimentos.

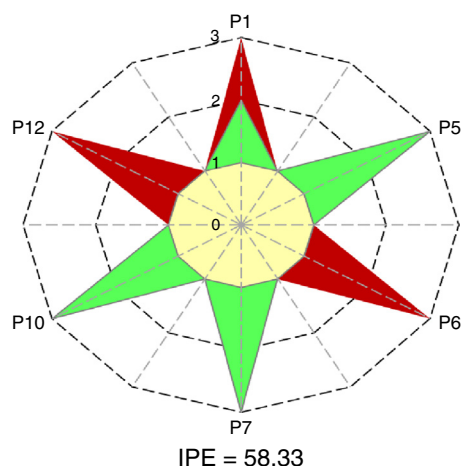


Figura 3 Estrella verde del experimento «Construyendo un modelo para sólidos y líquidos».

materiales: agua, muestra de plástico, jarabe de grosella, metal (clavo), telgopor/corcho, aceite de soja y uva (preferentemente uva italia). La utilización de los materiales plásticos, telgopor y clavo tiene implicaciones negativas en la evaluación de la degradabilidad y capacidad de renovación de los materiales. Con todo, así como en el caso de la actividad experimental anterior, los materiales pueden y deben reutilizarse otras veces en que se repita la actividad, tal como se recomienda en el libro.

De modo que, aun cuando ciertos materiales no son degradables y renovables, el hecho de ser reutilizados —en vista de que no reaccionan, como reiteramos— no es contemplado por el instrumento de análisis, lo que muestra la necesidad de cierta cautela en la interpretación de la EV.

Lo anterior no significa admitir que el hecho de que el experimento explore materiales que no reaccionan y que pueden reutilizarse en otras actividades, lo torne apropiado, aun cuando el verdor sea elevado/razonable. Por ejemplo, en el experimento «Construyendo un modelo para sólidos y líquidos», en el cual se produce el calentamiento del alcanfor hasta la temperatura de fusión (Mortimer y Machado, 2011a, p. 116), no ocurre reacción química y los materiales pueden reutilizarse en otras repeticiones del experimento, al menos por un cierto período. Para el experimento en cuestión se obtuvo la EV expuesta en la figura 3, que muestra un nivel razonable de verdor. Este experimento comprende en parte el uso de materiales fácilmente obtenibles. El alcanfor, por ejemplo, puede ser fácilmente adquirido en farmacias, inclusive de manipulación. El hecho de que la actividad experimental se realice con material de fácil adquisición no lo califica, necesariamente, como adecuado para promoción en la educación básica⁷. La temperatura de ebullición del alcanfor (204 °C) está cerca de la temperatura de fusión (175-177 °C), de modo que en el calentamiento, existe la posibilidad de inhalación de vapores de alcanfor por aquellos que manipulan o están cerca del experimento. Tales

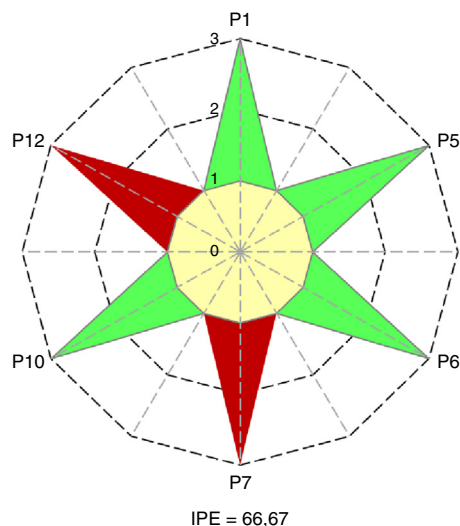


Figura 4 Estrella verde del experimento «Preparación de alcohol desinfectante» en el contexto portugués.

vapores pueden provocar irritación cutánea y ocular, además de ser tóxicos para el sistema respiratorio, e inflamables⁸.

En resumen, resalta que más allá del nivel de verdor evaluado por la EV, otros aspectos pueden tomarse en consideración en la elección del experimento, tal como la reutilización de materiales en otras ocasiones en que se realice la actividad.

Materia prima utilizada para producir los reactivos

Otro aspecto a considerarse en la elaboración de la EV es la materia prima utilizada en la obtención de los reactivos. Por ejemplo, en el contexto brasileño el etanol se produce principalmente a partir de la caña de azúcar, mientras que en otros contextos, como el portugués, proviene sobre todo del petróleo. Este aspecto puede generar diferencias en la representación gráfica de la EV. Las figuras 4 y 5 muestran la EV para un experimento de preparación de alcohol desinfectante, que consiste básicamente en la dilución de etanol en agua (Lisbôa, 2010, p. 195). La figura 4 caracteriza la EV para el experimento llevado a cabo en Portugal, mientras que la figura 5 se refiere a la EV para la actividad experimental realizada en Brasil. La comparación entre las figuras ofrece indicadores de que el resultado de la evaluación de verdor con la métrica EV no es absoluto. En el caso del experimento en discusión, la métrica evalúa las fuentes de la materia prima, ya destacadas anteriormente, lo que acarrea diferentes niveles de verdor. En el ejemplo considerado, el experimento es evaluado como teniendo un nivel de verdor marcadamente superior en el contexto brasileño. Cabe señalar que, en teoría, pueden existir actividades experimentales que sean adecuadas en determinados contextos e inadecuadas en otros, considerando la fuente de materia prima.

⁷ La educación básica en Brasil comprende un total de 12 años, siendo 9 años de educación primaria y 3 años de escuela secundaria.

⁸ Las informaciones sobre el alcanfor están disponibles en: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/148075?lang=pt®ion=PT> [consultado 11 Nov 2016].

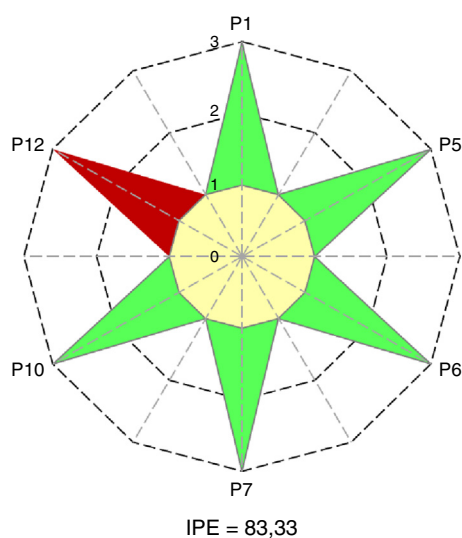


Figura 5 Estrella verde del experimento «Preparación de alcohol desinfectante» en el contexto brasileño.

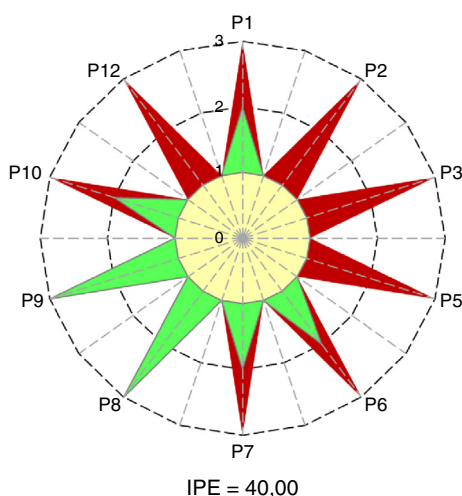


Figura 6 Estrella verde del experimento «Producción de jabón artesanal».

El simple hecho de utilizar reactivos renovables, por otra parte, no garantiza que el experimento sea recomendable para el fin previsto. Tomemos como ejemplo un experimento sobre producción artesanal de jabón (Lisbôa, 2010, p. 367). Este experimento se lleva a cabo básicamente con materiales de fácil adquisición y una parte significativa con reactivos derivados de fuentes renovables (etanol, vinagre, cloruro de sodio y aceite vegetal).

En el experimento en cuestión, a pesar de la utilización intensiva de reactivos derivados de fuentes renovables, la EV conduce a un nivel de verdor relativamente bajo (fig. 6). Contribuye a ello el hecho de usar etanol, que es inflamable, e hidróxido de sodio, que es corrosivo y utilizado en exceso. Es importante señalar que la producción artesanal de jabón puede ser cuestionada positivamente como una práctica ejemplar de reutilización de materiales (aceite vegetal).

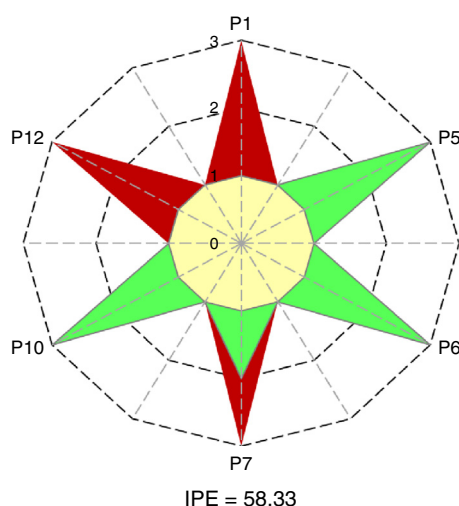


Figura 7 Estrella verde del experimento «Determinación del oxígeno disuelto en una muestra de agua».

Por lo tanto, el simple hecho de utilizar reactivos considerados renovables en un experimento no implica necesariamente que el verdor químico sea elevado.

Estudio de los problemas ambientales como objetivo del experimento

La EV por sí sola puede asimismo dejar de exhibir una característica importante de un experimento como es la propia discusión de los problemas ambientales. En el análisis de una actividad experimental titulada «Determinación del oxígeno disuelto en una muestra de agua» (Mortimer y Machado, 2011b, p. 158), la EV presenta un valor razonable (fig. 7).

El resultado es consecuencia, en parte, de la utilización de un conjunto de sustancias (ácido sulfúrico concentrado, sulfato de manganeso, etc.) y de los residuos, cuya naturaleza limita el verdor. El experimento se inserta en un contexto de discusión de cuestiones ambientales, más específicamente de la contaminación del agua. Aunque la propuesta del experimento represente, en cierta medida, un contrasentido respecto del verdor químico de la actividad experimental, puede ser considerada una opción relevante en el desarrollo de actividades educativas que apunten a dialogar sobre problemas ambientales locales. Por ejemplo, Silva y Mortimer (2012) describen y analizan una experiencia educativa en el marco de un proyecto de iniciación a la docencia en Brasil, en el cual se desarrollaron actividades junto con los estudiantes de secundaria. Entre las actividades promovidas estaba la determinación del oxígeno disuelto en una muestra de agua de una laguna local, la laguna de la Pampulha en la ciudad de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, Brasil. Para los autores, el estudio de la calidad del agua de la laguna en cuestión permitió a los estudiantes enfrentar un problema de contaminación real, al contrario de lo que comúnmente sucede en la escuela, donde se trata de problemas que no se refieren a contextos específicos. En otros términos, se afirma que indagar en la educación básica la sintonía de los experimentos de química con los principios de la QV, no necesariamente es la única manera

de discutir cuestiones ambientales de modo articulado a la experimentación.

Síntesis

En suma, este análisis indica que los experimentos con materiales de fácil adquisición no necesariamente pueden ser apropiados desde el «punto de vista ambiental», aun cuando lo sean desde los puntos de vista económico y didáctico. Por otro lado, la presencia de materiales que son reutilizados en repeticiones de actividades experimentales puede tener implicaciones para la elaboración de la EV. Este es un aspecto no tomado en cuenta en la propuesta original de la EV. En el contexto portugués, en el cual la EV fue concebida, el empleo de materiales fácilmente obtenibles en experimentos es algo, por lo menos, incipiente. Por el contrario, en Brasil hay un fuerte incentivo para la utilización de esos materiales en las actividades experimentales escolares. Por lo tanto, parece necesario asumir el desafío de considerar en el desarrollo de indicadores de verdor químico que se evalúe en los experimentos didácticos aspectos más allá de los relacionados con la QV, cuyos principios fueron orientadores en la construcción de la EV. Por cierto, se considera imprescindible una discusión más crítica en torno a la propia QV. Tal como destacan, por ejemplo, [Marques y Machado \(2014\)](#), hay poca discusión entre los precursores de la QV sobre la idea de alcanzar un equilibrio entre desarrollo y sustentabilidad ambiental a la luz de los determinantes termodinámicos.

Consideraciones finales y perspectivas

Se desprende de lo expuesto que por medio de la EV se puede enfrentar con mayor consistencia la idea de que el hecho de contar con materiales de fácil obtención en el experimento lo torna adecuado para la educación básica. En Brasil la adhesión a la idea de la realización de actividades experimentales con este tipo de materiales es bastante vigorosa, como ha sido señalado por la literatura correspondiente ([Gonçalves y Marques, 2006](#)). Aun cuando esos materiales tengan una importancia reconocida en la promoción de experimentos, es necesario analizarlos con mayor cautela en ciertas situaciones, tales como la del experimento de la producción de jabón.

Valorizar la discusión de la dimensión ambiental de las actividades experimentales en la formación inicial de los profesores de química no implica depreciar estudios que, por cierto, son imprescindibles, sobre los modos de promover la experimentación, como por ejemplo a través de propuestas basadas en la resolución de problemas o en investigación. Si la experimentación se puede entender como una forma de enseñar a los estudiantes contenidos conceptuales y procedimentales, también puede ser aprovechada para enseñar contenidos actitudinales. Corresponde a los profesores seleccionar qué contenidos actitudinales desean enseñar a los estudiantes, siendo preferible la enseñanza de actitudes de respeto al medio ambiente por medio de experimentos que no sean problemáticos. En este sentido, tomar el estudio de métricas ambientales y particularmente de las métricas de la QV, como algo esencial en la formación docente, puede contribuir a la selección de experimentos

más apropiados en la escuela —y en la educación superior—, así como a la enseñanza de actitudes más deseables por medio de la experimentación. La propia exploración de las métricas ambientales en la formación de profesores de química, más allá de una perspectiva puramente tecnicista, puede ser una forma de promover entre los futuros profesores de la educación básica la apropiación de contenidos actitudinales apreciables desde el punto de vista del medio ambiente.

En cuanto a las métricas de verdor químico, se hace hincapié en que esas son meras herramientas para evaluar el nivel de verdor químico con alcance comparativo e incertidumbre intrínseca, que sirven para ayudar a tomar decisiones ([Machado, 2014](#)) —su uso no exime de la profundización en el conocimiento sobre las situaciones objeto de análisis, ya sea respecto de la química, del contexto, etc.—. En general, las métricas, de las que la EV es un caso, se deben utilizar en forma accesoria a esos otros conocimientos y no separadamente, y sin olvidar que el verdor es un concepto relativo. En particular, en su utilización debe prestarse atención al contexto de los problemas en que son utilizados y al papel del verdor en esos problemas. Por otro lado, la elección de métricas para el análisis de cada problema debe prestar atención a la información captada por ellas. Por ejemplo, la EV no capta la información cuantitativa proporcionada por las métricas de masa, por lo que el uso conjunto de estas y de la EV puede proporcionar un panorama más profundo del verdor, aun cuando esos resultados no siempre sean completamente consistentes.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Proyecto 479277-2013-3.

Referencias

- Costa, D. A., Ribeiro, M. G. T. C. y Machado, A. A. S. C. (2009). *Análise da verdura das actividades laboratoriais do 10º ano do ensino secundário*. *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química*, 115, 41–49.
- Costa, D. A., Ribeiro, M. G. T. C. y Machado, A. A. S. C. (2011). *Análise da verdura das actividades laboratoriais do 11º ano do ensino secundário*. *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química*, 123, 63–72.
- Eissen, M. (2012). Sustainable production of chemicals — an educational perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 103–111.
- Galgano, P. D., Loffredo, C., Sato, B. M., Reichardt, C. y El Seoud, O. A. (2012). Introducing education for sustainable development in the undergraduate laboratory: Quantitative analysis of bioethanol fuel and its blends with gasoline by using solvatochromic dyes. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 147–153.
- Gonçalves, F. P. y Marques, C. A. (2006). Contribuições pedagógicas e epistemológicas em texto de experimentação no ensino de química. *Investigações em Ensino de Ciências*, 11(2), 219–238.

- Hartwell, S. K. (2012). Exploring the potential for using inexpensive natural reagents extracted from plants to teach chemical analysis. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 135–146.
- Hofstein, A. y Mamlok-Naaman, R. (2007). The laboratory in science education: The state of the art. *Chemistry Education Research and Practice*, 8, 105–107.
- Lisbôa, J. C. F. (2010). *Química (coleção Ser Protagonista)*. São Paulo: Editora SM., 3
- Machado, A. (2014). *Introdução às métricas da química verde: uma visão sistêmica*. Florianópolis: Ed. UFSC.
- Marques, C. A. y Machado, A. A. S. C. (2014). Environmental sustainability: Implications and limitations to green chemistry. *Foundations of Chemistry*, 16, 125–147.
- Mortimer, E. F. y Machado, A. H. (2011a). *Química-Ensino médio*. São Paulo: Scipione., 1.
- Mortimer, E. F. y Machado, A. H. (2011b). *Química-Ensino médio*. São Paulo: Scipione., 3.
- Ribeiro, M. G. T. C., Costa, D. A. y Machado, A. (2010a). Uma métrica gráfica para avaliação holística de reações laboratoriais Estrela Verde. *Química Nova*, 33(3), 759–764.
- Ribeiro, M. G. T. C., Costa, D. A. y Machado, A. A. S. C. (2010b). Green star: A holistic green chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3(3), 149–159.
- Ribeiro, M. G. T. C. y Machado, A. A. S. C. (2011). Metal acetylacetonates' synthesis experiments: Which is greener? *Journal of Chemical Education*, 88(7), 947–953.
- Ribeiro, M. G. T. C., Yunes, S. F. y Machado, A. A. S. C. (2014). Assessing the greenness of chemical reactions in the laboratory using updated holistic graphic metrics based on the globally harmonized system of classification and labeling of chemicals. *Journal of Chemical Education*, 91(11), 1901–1908.
- Santos, W.L.P. y Mól, G.S. (Org). (2010a). *Química cidadã: materiais, substâncias, constituintes, química ambiental e suas implicações sociais*. 1. São Paulo: Nova Geração.
- Santos, W.L.P. y Mól, G.S. (Org). (2010b). *Química cidadã: reações químicas, seus aspectos dinâmicos e energéticos; água e energia*. 2. São Paulo: Nova Geração.
- Silva, P. S. y Mortimer, E. F. (2012). O projeto água em foco como uma proposta de formação no Pibid. *Química Nova na Escola*, 34(4), 240–247.