

## **Una visión sobre propuestas de enseñanza de la Química Verde**

**Carlos Alberto Marques<sup>1</sup> e Adélio A. S. C. Machado<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Metodologia de Ensino, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), Brasil. E-mail: [carlos.marques@ufsc.br](mailto:carlos.marques@ufsc.br).

<sup>2</sup> Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. E-mail: [amanchado@fc.up.pt](mailto:amanchado@fc.up.pt)

**Resumen:** La presente investigación analiza propuestas, informes sobre experiencias didácticas y fundamentaciones teóricas situadas en el ámbito de la enseñanza de la Química Verde (QV) en producciones científicas internacionales elaboradas por la comunidad epistemológica en QV, que podrían contribuir al diseño de un marco teórico general encaminado a la inserción de la QV en el currículo. A partir del análisis, se identificaron tres vertientes: La primera y más fuerte es la que no caracteriza la QV como disciplina específica, pero propone la inserción de "injertos" puntuales de contenidos teóricos y/o actividades experimentales/prácticas dentro de las disciplinas clásicas de la química; la segunda, minoritaria, es la que propone la QV en la forma de una "disciplina" o un curso especial de carácter introductorio; y la tercera vertiente, que congrega varias proposiciones, concibe la presencia y estrategias para la enseñanza de la QV de modo transversal en el currículo, atravesando disciplinas y actividades.

**Palabras clave:** Química Verde, enseñanza de la química, publicaciones educativas.

**Title:** A vision of teaching proposals of Green Chemistry.

**Abstract:** This research reviews proposals, discussions on theoretical foundations and reports of didactics experiments in the field of Green Chemistry (GC) education in international scientific publications, produced by the GC epistemic community; and aims to contribute to the design of a general theoretical framework for insertion of GC in the chemistry curriculum. From the analysis, three lines of action have been identified: the first, and strongest, does not characterize GC as a specific discipline and proposes the insertion of patches of GC theoretical contents and/or experimental activities/practices within the classical disciplines of chemistry; the second, in minority, defends GC as a "discipline" and proposes the introduction of special courses in the field; and the third, bringing together several propositions, conceives the presence of, and discusses strategies for, transverse modes for teaching of GC, passing through other disciplines and activities.

**Keywords:** Green Chemistry, chemistry teaching, educational publications.

## Introducción

En sus más de 20 años, la Química Verde (QV) se tornó muy conocida por sus doce principios (Anastas y Warner, 1998), que han funcionado como una especie de clave conceptual en la configuración y desarrollo de productos y procesos de síntesis de laboratorio e industriales, orientados a la prevención de problemas ambientales (Tabla 1).

1. Prevención
2. Economía atómica
3. Usar metodologías que generen productos con toxicidad reducida
4. Generar productos eficaces, pero no tóxicos
5. Reducir el uso de sustancias auxiliares
6. Disminuir el consumo energético
7. Utilizar materias primas renovables
8. Evitar la derivatización innecesaria
9. Enfatizar en el uso de catálisis
10. Generar productos biodegradables
11. Desarrollar metodologías analíticas para la monitorización en tiempo real
12. Minimizar el potencial de accidentes químicos

Tabla 1.- Doce principios de la Química Verde (Anastas y Warner, 1998)

Surgida en el contexto histórico norteamericano, tras el desarrollo del ambientalismo moderno - en los años que siguieron al libro "Primavera silenciosa" de la bióloga Rachel Carson (1962) -, otros eventos también contribuyeron al reconocimiento de la importancia de la QV en la química. Un ejemplo mayor de ello son las diversas conferencias sobre medio ambiente promovidas por la ONU, en particular la que produjo el Informe Brundtland (WCED, 1987), que imprimió la idea fuerza contenida en el concepto de desarrollo sostenible (DS). En este contexto crece la divulgación de producciones autodenominadas QV en una diversidad de revistas y eventos internacionales que incluyen debates sobre una enorme variedad de contenidos, aunque en número todavía pequeño en lo que concierne a propuestas dirigidas a su integración en los currículos de Química.

Este crecimiento de la QV, que también muestra la constitución y consolidación de la comunidad epistemológica QV (Epicoco, Oltra y Saint-Jean, 2014), puede ser percibido en la encuesta realizada por Sousa-Aguiar et al. (2014), que señala que desde 1990 hasta 2013 cerca de dos mil artículos fueron publicados en las treinta y dos revistas con más publicaciones acerca de la química verde. Zuin y Marques (2015) a su vez, al analizar las producciones de la QV en Brasil percibieron que estas publicaciones estuvieron asociadas a otros aspectos además de los doce principios, al vincular por ejemplo la promoción de la QV a los esfuerzos del DS y de la sostenibilidad ambiental (SA). Costa, Ribeiro y Machado (2008) examinando la eventual índole educativa de trabajos sobre QV en el Journal of Chemical Education (JCEd), de 1995 a 2007, identificaron setenta y siete artículos.

A pesar de esa expansión, todavía está pendiente una mejor comprensión de las áreas de la QV, despejando dudas sobre la mejor forma de su presencia, así como sobre la organización dentro de la Química y,

consecuentemente, también dentro de los currículos. Por ejemplo, hay todavía una dificultad en reconocerla como un nuevo campo interdisciplinario (Anastas y Kirchoff, 2002) en investigaciones e innovaciones orientadas a la prevención ambiental. Estos son aspectos que de alguna manera contribuyen a retrasar el ofrecimiento de un nuevo tipo de educación química, con más atención a ella. Por eso, el reconocimiento más profundo de la diversificación y el aumento de temas de interés de la QV, puede ayudar a individualizar y comprender mejor la formulación de propuestas sobre su enseñanza.

Considerando estos aspectos que nuestra investigación trata de buscar en producciones científicas internacionales informes de experiencias y fundamentaciones teóricas situadas en el ámbito de la enseñanza de la QV, procurando identificar y analizar propuestas, contenidos, estrategias pedagógicas y modelos para su consideración. Con este estudio queremos señalar vertientes que pueden contribuir al diseño de un marco teórico general orientado a la enseñanza de la QV, así como aportar una lista de propuestas o sugerencias específicas.

Para cumplir este objetivo, organizamos este artículo en cuatro secciones, además de esta introducción. La siguiente sección discute brevemente aspectos de la constitución e identidad de la así llamada comunidad de investigadores QV, a la luz de los temas que de modo recurrente o emergente se presentan en sus producciones académicas, la caracterizan y justifican su adopción en el ámbito de toda la química. En la tercera sección se presenta la investigación llevada a cabo en publicaciones que han divulgado trabajos sobre la enseñanza de la QV, a fin de identificarlos y clasificarlos. En la cuarta sección conducimos un análisis y debate sobre "lo que dicen las publicaciones dedicadas a la enseñanza de la QV", y en la quinta sección presentamos nuestras consideraciones finales.

## **2. La comunidad Química Verde y la importancia de enseñarla**

La búsqueda de los químicos de prácticas de prevención de los impactos ambientales de la química parece expresar un "nuevo" campo de interés que, para Epicoco, Oltra y Saint-Jean (2014), puede estar constituyendo una "comunidad epistemológica QV". Como tal, esta comunidad busca orientarse y compartir principios, objetivos y métodos, que expresan – en cierto grado y medida – su identidad, dominios y estándares normativos, y entre estos, temas y propuestas para la formación de profesionales del área. Por lo tanto, envuelve también aspectos de la enseñanza de la QV. Uno de los pasos clave para estos fines fue el lanzamiento de un vehículo propio para el debate, la circulación de ideas y producciones científicas, como es la revista *Green Chemistry* (<http://www.rsc.org/publishing/journals/gc>).

Con el objetivo de estimular el debate en torno a temas de un interés más centrado en la enseñanza de la QV, partimos de dos preguntas: Q1, *¿qué es lo que los autores autodenominados QV han transmitido a la literatura internacional sobre la enseñanza de la QV?* Y Q2, *¿cómo proponen que estos aspectos sean transformados en contenidos de la enseñanza de la QV?* Al tratar de responder a la primera pregunta, comenzamos destacando temas presentes en la literatura QV que iban más allá de la ejemplificación

de la eficacia de sus doce principios, y se refieren también a la formación profesional y a la enseñanza de la química (verde).

Para el proceso de consolidación de la QV en el plano teórico, conceptual y práctico, la divulgación y la medición de la eficacia en la aplicación de los doce principios es algo reconocidamente importante, pero esto puede no ser suficiente, pues para "instaurar" y extender (Fleck, 2010) ese nuevo modo químico de pensar y actuar en relación con el medio ambiente, en la perspectiva de la prevención, es esencial preparar a las nuevas generaciones de químicos a través de la enseñanza. Pero, ¿cuál es la mejor forma de enseñar la QV y de insertarla en el currículo? ¿Qué contenidos y características han tenido las propuestas orientadas a la enseñanza de la QV? Son estas dudas las que refuerzan la importancia de la segunda cuestión (Q2) sobre los contenidos de la enseñanza. Para avanzar en conseguir una respuesta a la misma, preparamos también una síntesis de los aspectos que consideramos importantes y que deberían estar presentes en los distintos tipos de propuestas relativas a la enseñanza de la QV, tal como se muestra en la Figura 1, los cuales nos podrían ayudar en el análisis de estudios disponibles en la literatura.

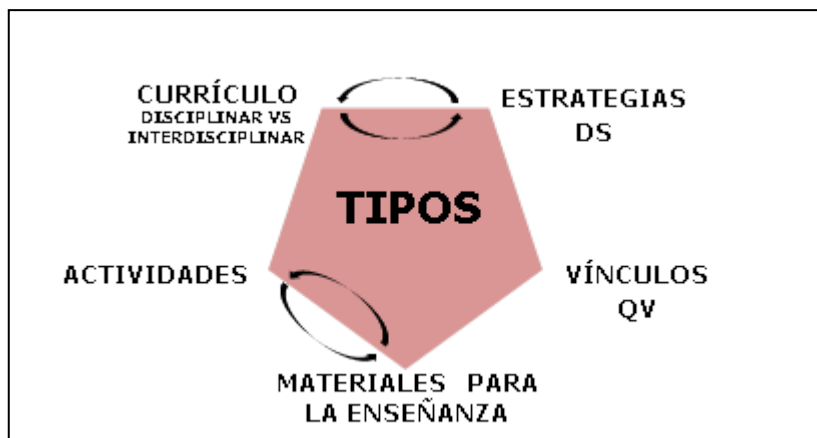


Figura 1 –Tipología de propuestas dirigidas a la enseñanza de la Química Verde.

La IUPAC considera a la QV como un subcomité de una división e no un nuevo campo de la Química, por lo que ella también no se diferencia del conjunto las disciplinas tradicionales que componen la misma (<http://www.iupac.org/nc/home/about/members-and-committees/db/division-committee.html>). De manera que nosotros entendemos que su conformación e inserción en el currículo reivindicaría algo diferente, hasta el momento todavía poco claro en la literatura. Sin embargo, en este escenario se debe considerar la fuerte tradición de la práctica disciplinaria en los currículos de química, que puede estar influyendo en las eventuales propuestas para la inclusión de la QV en la enseñanza, organizando ésta por medio de una disciplina específica o, alternativamente, insertando ejemplos ilustrativos en el tratamiento de contenidos de las disciplinas ya existentes.

Anastas y Warner (1998, p. 30) afirmaron que la QV no es un campo especializado de la química, puesto que sólo amplía los desafíos a su forma de pensar y hacer a través de nuevos factores y elementos teórico-

conceptuales. Visto de este modo, sus vínculos con las dimensiones sociales, económicas y ambientales apuntan a una perspectiva de educación científica situada en los estudios denominados de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) (Aikenhead, 1994).

También en el ámbito de la identidad (no) disciplinar de la QV, Mestres (2013) no la considera como una disciplina científica – desde un punto de vista del sentido común - pero sí un meta-disciplina, que cubre la mayor parte de la Química y la Ingeniería Química. Sería un área multidisciplinaria más amplia y abarcadora denominada Química y Medio Ambiente, en el que la Química concentraría su atención en los vínculos existentes entre la actividad antropogénica y la contaminación del medio ambiente por los productos químicos.

La comprensión sobre la naturaleza no disciplinar de la QV debe estar ligada a una adecuada formación científica, cuya base filosófica y cultural permita comprender la intrincada relación entre la Química y el medio ambiente, a menudo simplificada en los debates y las aspiraciones del DS y de la SA. Este tipo de formación en el que la QV es vista, desde la perspectiva del DS, como expresión de cuidados químicos con el medio ambiente, está muy presente en la literatura. Kirchhoff (2010), en el editorial del JCEd, resalta este vínculo. Ya Belford y Bastin (2013) afirman que, para una educación con respecto a la sostenibilidad, la QV es muy importante porque aun cuando los estudiantes tengan consciencia de los problemas ambientales, no tienen conocimiento sobre sus fuentes y este debe ser el foco central de la formación, con la "esperanza de que [...] los químicos [vengan a] incorporar sostenibilidad en los distintos niveles del currículo". Este propósito es también reafirmado por Frank et al. (2011), para quien la "ética, Química y educación para el medio ambiente" deben ser llevadas a las salas de aula de ciencias con el fin de lograr la sostenibilidad.

Un vínculo más claro entre educación y DS es manifestado en la conocida propuesta denominada "educación para el desarrollo sostenible" (EDS), cuyo principal objetivo es tornar a los jóvenes ciudadanos participantes y responsables (UNCED, 1992). Burmeister, Rauch y Eilks (2012), al adoptar este enfoque en la enseñanza de la QV, sugieren cuatro modelos posibles, sumariamente caracterizados como:

- Modelo 1 - Principios de la QV aplicado a la experimentación;
- Modelo 2 - Adición de estrategias de sostenibilidad a la enseñanza de la Química;
- Modelo 3 - Uso de temas polémicos del DS en el enfoque CTS;
- Modelo 4 - Educación en Química como parte de un proyecto escolar para el DS.

El Modelo 1 tiene sentido si los estudiantes reconocen y comparan los cambios introducidos en los procedimientos de las actividades experimentales y su importancia ambiental, pero tiene como punto flaco que no garantiza a los estudiantes la capacidad de contribuir a la toma de decisiones sobre el desarrollo tecnológico sostenible, sin alcanzar así el propósito de una visión sistémica expresado en la EDS además de ser

superficial desde el punto de vista del CTS. La ventaja del Modelo 2 es que facilita el aprendizaje de contenido de química a través de ejemplos de productos y procesos actuales; su inconveniente parece ser que no ofrece suficiente apoyo cognitivo al estudiante para construir una comprensión compleja, incluyendo impactos económicos, sociales y ecológicos, los mismos que están detrás de la aplicación tecnológica de un contenido químico. En el modelo 3 el aprendizaje es de química, mas también *sobre* la química, sobre la forma en que ella es evaluada y discutida en el medio social, orientándose el enfoque al desarrollo de capacidades y competencias para la participación activa de los estudiantes en los debates socio-científicos democráticos, incluso si no pueden tener un gran impacto en la sociedad. Por último, en el Modelo 4, el objetivo es que los estudiantes adquieran experiencia en la búsqueda del DS a través de acciones y toma de decisiones que pueden cambiar sus vidas y su entorno. Los autores afirman que "todos los cuatro modelos pueden contribuir al aprendizaje *sobre* o *para* el DS" (Burmeister et al., 2012, p. 65). Sin embargo, de modo autocrítico, afirman que un enfoque QV basado puramente *sobre* el DS (modelo 1 y 2) no constituye por sí mismo el tipo de educación esperado por la EDS. Es necesario complementarlo con el enfoque *para* el DS, ya que el enfoque *sobre* se ocupa solamente de la divulgación y discusiones teóricas de la QV y del DS, mientras que el enfoque *para* utiliza la educación como herramienta para lograr la sostenibilidad.

Hill, Kumar y Verma (2013), al investigar cómo la industria química se está moviendo hacia una actitud y pensamiento sostenibles, hace hincapié en el papel de la educación química sostenible, acercándose al concepto del DS formulado en Brundtland (WCDE, 1987), al mismo tiempo que destaca la polisemia del término "sostenible". Pero lo interesante de este trabajo es que se destaca el papel de las métricas y de la termodinámica como puntos importantes para la enseñanza de la química desde la perspectiva de la SA. Según los autores, las métricas ayudan a abordar la intrincada "estequiometría económica", atribuyendo valor a los productos colaterales y residuos a través del reciclaje o reutilización (en caso de que sean económicamente viables). La termodinámica, a su vez, es fundamental para evaluar la eficiencia energética y la espontaneidad de los procesos. Además, se defiende una educación química multidisciplinar que cumpla con el carácter multidisciplinario de la Sostenibilidad, con la QV impregnando toda la química.

Algunos trabajos enfatizan que la QV, en tanto vinculada a la SA, también debe relacionarse a la Educación Ambiental (EA), haciendo hincapié en su papel de "ciencia facilitadora del DS y de la concientización ambiental (Hjersesen, Schutt y Boese, 2000). Zandonai, Saqueto, Abreu, Lopes y Zuin (2014) reportan una experiencia didáctica que involucra la QV más allá del laboratorio de enseñanza con enfoque CTS, concluyendo que la QV es a la vez una nueva frontera interdisciplinaria de la química y una de las herramientas de la EA para la sostenibilidad.

En el contexto más general de instituciones universitarias y científicas internacionales, discusiones y relatos de experiencias que involucran aspectos relacionados con la enseñanza de la QV en currículos de cursos de graduación en Química evidencian preocupaciones con esta dimensión. A inicios de los años 2000, varias instituciones de la comunidad científica

internacional, como la Sociedad Americana de Química (ACS), o el Instituto de Química Verde (GCI) y la IUPAC, desarrollaron materiales didácticos, cursos, talleres, conferencias y sitios web para difundir y promover la educación en la QV para estudiantes universitarios, de secundaria y público en general (Hjersesen, et al., 2000). Pero un editorial del JCEd (Kirchhoff, 2001) reconoció la limitada disponibilidad y la dispersión de esos recursos y materiales didácticos, defendiendo ya sea la introducción en el currículo de lo que llamó "Tópicos en QV, ya sea la naturaleza interdisciplinaria de la misma, con interrelaciones con la ingeniería, biología, economía y ética. Unos años más tarde, Kirchhoff (2010) presentó en el simposio de la reunión nacional de la American Chemical Society (ACS), los resultados de trabajos de inserción de la QV en el currículo de graduación, haciendo público ejemplos de nuevos materiales y métodos desarrollados por veinte seis educadores de todo el mundo. Sin embargo, la mitad de las presentaciones del Simposio trataron sobre el "enverdecimiento" de la química orgánica por medio de actividades de laboratorio, con nuevas actividades experimentales que eliminan o reducen el uso de disolventes orgánicos, utilizan reactivos más benignos y mejoran la eficiencia de la reacción.

La Universidad de Scranton ha puesto a disposición (<http://www.scranton.edu/faculty/cannm/green-chemistry/english/drefusmodules.shtml>) un conjunto de ejemplos – que pueden ser considerados como actividades en una perspectiva interdisciplinaria - sobre cómo enverdecer el currículo de la química y de la ingeniería química, en un conjunto de nueve módulos educativos para la incorporación de los principios de la QV desde la química general hasta la bioquímica industrial. También proporciona una base de datos de materiales para una educación más verde (*greener education materials*) y destaca el uso de métricas como un medio para ayudar a los estudiantes a caracterizar un proceso químico complejo.

Karpudewan, Ismail y Mohamed (2009) analizan la eficacia de la integración de experimentos QV con conceptos del DS en los currículos de graduación en Malasia, comparándolos con los conceptos ambientales tradicionales (p. 118). En la sección de "Química Verde", presentan experimentos de "química tradicional" y otros de QV, que permiten el entrenamiento de químicos en temas ecológicos y medioambientales, discutiendo algunos conceptos clave del DS, tales como: la biodiversidad, la equidad intergeneracional, entre otros. Además, en la sección "Formación de profesores y educación para el DS" relatan que la EA no está muy presente en los cursos de formación para profesores y que los conocimientos previos de los estudiantes de graduación son, en realidad, adquiridos en la educación primaria y secundaria.

Prado (2003) comenta los retos de la química, especialmente en Brasil, señalando que, aunque muchos cursos de química ya tienen la Química Ambiental en sus planes de estudio, pocos incluyen conceptos de laboratorio sobre la prevención. Según este autor, el interés en materiales educativos para la QV está creciendo, junto con un aumento de la conciencia académica sobre metodologías científicas verdes.

Esta primera discusión permitió sustentar la idea de aspectos importantes que creemos que deben constar en los artículos de carácter educacional de la QV. Para ello se utilizan algunos trabajos de autores que describen actividades que impliquen prácticas QV, por ejemplo, que realzan la importancia del tema del DS/SA como condición para la enseñanza de la QV, cuando se busca estudiar y lograr cambios en la relación entre la química y el medio ambiente desde la perspectiva de la prevención. Temas como este apuntan a la importancia de la formación de una cultura ecológica previa, constituida, situada y desarrollada no sólo en la escuela sino también en los distintos espacios sociales, para que los jóvenes puedan adquirir conocimientos actitudinales, conductuales y procedimentales de cuidado con el medio ambiente. Una base formativa que permitiría a los alumnos de química que ingresan en las universidades una mejor comprensión sobre, por ejemplo, la importancia de los estudios relativos a la seguridad personal y ambiental de los productos químicos. Ello funcionaría como un fermento para que los aprendices comprendan la dimensión científica de algunos principios, como los de la incertidumbre científica y de la precaución científica, asimismo de los principios y valores de la QV, en dónde esta se inserta y qué objetivos se propone alcanzar.

### **Nuestra investigación**

Para recabar propuestas y experiencias de enseñanza de la QV fueron seleccionados y analizados artículos de las siguientes revistas internacionales: *Green Chemistry* (GC) (*Royal Society of Chemistry, England*); *Journal of Chemical Education* (JCEd) (*American Chemical Society, USA*); *Educación Química* (EdQ) (*Universidad Nacional Autónoma de México, México*). La primera revista (GC), por ser un vehículo específico de difusión de la QV. La segunda (JCEd) es uno de los vehículos más importantes y renombrados para la divulgación de trabajos de química internacional, incluyendo numerosos artículos sobre la enseñanza de la QV, habiendo publicado en edición especial (2013, N° 4), un conjunto de artículos relativos a una conferencia en línea sobre el tema (Belford y Bastin, 2013). La revista EdQ fue elegida por ser en español y por estar bien establecida en el campo educativo, además de haber publicado dos números especiales sobre la QV (2009, Vol. XXII, 4, 2013, Vol. XXIV, 1-extra).

Antes de empezar la búsqueda directa de publicaciones en estas revistas, tomamos como referencia dos trabajos de investigación relativos a la enseñanza de la QV divulgados en la literatura: un artículo de Costa, Ribeiro y Machado (2008), que hizo una encuesta en las revistas JCEd y GC buscando diferenciar las propuestas cuya índole es la enseñanza de la QV de aquellas otras que no están directamente orientadas a la enseñanza; y una tesis doctoral (Costa, 2012, capítulo 2) en la que se actualizó esa encuesta, ampliando el análisis hasta el año 2011. En estos trabajos, los autores trataron de hacer un retrato histórico de las publicaciones sobre la QV y los dividieron en nueve categorías (ver Tabla 2). En esa tesis, se dio especial importancia al área experimental, pretendiendo dirigirla a la práctica de laboratorio de la QV en la educación secundaria, y buscando evaluar el grado de penetración de la nueva actitud de la química propuesta por la QV en la enseñanza de esta ciencia. Sin embargo, la categorización



de los trabajos se fijó heurísticamente sin mucha profundización teórica previa. La gran mayoría de los artículos encontrados se refería a trabajos de laboratorio (Tabla 2). La clase "métricas" fue introducida por ser esta clase el tema central de la tesis (Costa, 2012), ya que es importante medir cuantitativamente las ganancias (o pérdidas) de la eficacia global de la química verde a lo largo de todo el ciclo de vida, cuando se adoptan nuevas propuestas de reacciones de síntesis, operaciones complementarias, etc., dirigidas a la QV.

Año	D	E	ED	LA	LG	LI	LO	M	R
1995 2011*	10	15	2	3	9	7	74	10	4
1995 2011**	—	33	—	—	—	—	—	—	—

Tabla 2. - Artículos pedagógicos relacionados a la Enseñanza de la Química Verde en el período 1995-2011 en la encuesta anterior (Costa, et al., 2008; Costa, 2012) y complementados en este trabajo. D (Divulgación), E (Educación), ED (Experimentos de demostración). Propuestas de experimentos de laboratorio de Química Analítica (LA), General (LG), Inorgánica (LI) y Orgánica (LO). M (Métricas) y R (Reseña de libros).

En este trabajo, hemos llevado a cabo una actualización, ya sea para completar la encuesta, suprimiendo eventuales fallas, particularmente en cuanto a la *revista* EdQ, ya sea porque se buscó efectuar un nuevo análisis dirigido a refinar las categorías de análisis de trabajos previos, especialmente la de enseñanza (E). El siguiente paso fue ampliar esta encuesta hasta el final del año 2014, utilizando en la búsqueda las siguientes palabras clave y sus composiciones: "*green chemistry teaching*", "*green chemistry education*", "educación en química verde" y "enseñanza de química verde". La búsqueda se realizó en la base de datos Web of Science (<http://www.webofknowledge.com>), además de recurrir a las bases de datos de sus propias revistas y sus propios motores de búsqueda.

Teniendo a disposición esta encuesta, los contenidos de las producciones fueron analizados considerando: el título, abstract, palabras clave y contenido del texto. La primera y más importante categorización fue relativa a la enseñanza, es decir, si se trataba o no de una propuesta o relato de experiencia que implique efectivamente la enseñanza de la QV. A partir de esta nueva base, ahora refinada, comenzó la categorización general de los trabajos, observando incluso algunas subcategorías, como en el caso de propuestas de actividades de experimentación/laboratorios. En esta categorización, a diferencia de los trabajos en la Tabla 2, fue excluida la clase "reseña" por parecer menos relevante a los efectos de este estudio. Los resultados de esta revisión y categorización constan en el Anexo 1, donde los números se refieren al grado de énfasis con el que cada categoría se expresa en el artículo analizado, siendo en esa escala el número 1 el de primer orden o más importante.

Como se puede ver en el Anexo 1, la mayoría de los artículos – 41 de 71 – enfatizan más de un aspecto de la educación. Las propuestas educativas que involucran actividades de laboratorio constituyen la mayoría, apareciendo en 33 artículos (Orgánica, largamente predominante, con 21

artículos, seguida por Inorgánica con 5, Físico-Química con 2 y Analítica con 1 solo). Siguen 18 artículos que hacen hincapié en el currículo, 18 en la divulgación, 14 en la didáctica y 7 en la fundamentación teórica. El tema del DS merece atención en 8 artículos y el de las métricas de la química verde, en 10. De manera que, en la escala de primer orden, 26 artículos se refieren a aspectos curriculares, didácticos y de la fundamentación teórica de la enseñanza / educación de la QV. Por lo tanto, más de la mitad de las publicaciones señalaron algún tipo de análisis, discusión, propuestas y / o informes de experiencias didácticas, con mayor amplitud que ejemplos puntuales para la inserción de la QV en la enseñanza de la química, como en el caso de los artículos que se refieren a los laboratorios de las diferentes áreas de la química.

## **Resultados**

### *Qué dicen las publicaciones sobre la enseñanza de la Química Verde*

En comparación con las encuestas realizadas por Costa, Ribeiro y Machado (2008) y sobre todo por Costa (2012), que constataron que "casi el 82% de los artículos (95 artículos) proponen la realización de demostraciones y actividades experimentales en la QV (clases ED, LA, LG, LI y LO)" (p. 20) – refiriéndose en la gran mayoría a trabajos prácticos de Química Orgánica - en el presente estudio encontramos una distribución diferente. Observamos que sólo 32 trabajos (46%) tienen carácter de divulgación / propuestas de actividades experimentales. Esta diferencia sugiere una maduración de la postura de la comunidad de la QV en cuanto al análisis de su naturaleza e implicaciones en la educación.

Para un análisis más profundo del análisis de los contenidos de los artículos se consideraron varios aspectos, ejemplificados en la Tabla 3, aunque no fue posible llevar a cabo un análisis sistemático basado en ellos, porque algunos aspectos son más realizados y / o más explicitados que otros por los autores. Del mismo modo, en el análisis general que se ofrece a continuación, a veces estos aspectos aparecen de modo mucho más combinado y articulado que aisladamente, por lo cual en los comentarios analíticos no seguimos exactamente la secuencia de elementos que se enumeran en la Tabla 3.

### *Aspectos de naturaleza curricular*

En cuanto a la naturaleza de proposiciones y argumentos curriculares, la mayoría de los artículos desarrolló sólo ideas puntuales, sin atenerse al campo general y teórico del currículo. Tales discusiones estaban relacionadas con la conformación disciplinar o no disciplinar de la QV, con predominio de propuestas destinadas a cursos de graduación y postgrado. También hubo propuestas para la creación de disciplina o, excepcionalmente, de un curso especial (Manchanayakage, 2013), injertos de actividades en disciplinas clásicas ya existentes en los currículos de Química, sobre todo por medio de ejemplos de aplicación de la QV en actividades teóricas y prácticas, envolviendo síntesis, catálisis, etc., que forman la mayoría.

En el ámbito de las propuestas que consideran que la QV no es una disciplina y que, por lo tanto, su enseñanza excedería el ordenamiento curricular habitual, sirven de muestra las ideas de Summerton, Hunt y Clark (2013), y de Braun (2006). Para los autores del primer artículo, la QV es un

campo multidisciplinario, que implica "una actitud que requiere químicos que piensen críticamente acerca de sus reacciones y que lleven en cuenta otros parámetros", tales como los subproductos de la reacción y no sólo los productos deseados; que piensen la elección del disolvente y consideren la renovabilidad de los recursos y la toxicidad del producto, incorporando la comprensión del uso de métricas de QV, a fin de calcular el impacto ambiental de los procesos químicos; así como acrecentar la conciencia dirigida a los aspectos legislativos, financieros y sociales. Lo cual aproxima esta visión a un enfoque CTS de ciencia y de currículo. Para Braun et al., (2006), la QV no debe ser enseñada separadamente, debiendo incorporar conceptos clave en el currículo sobre cómo hacer química inherentemente verde para producir materiales de clase verde. Por lo tanto, requiere una conciencia interdisciplinaria y un enfoque multidisciplinario desde el principio. Al reafirmar el papel de los doce principios, propone conceptos y estrategias para su implementación en la enseñanza de graduación y postgrado, considerando a la QV como un medio para llevar a cabo la ciencia de una manera responsable, donde los requisitos de lo que es sostenible y ambientalmente benigno deben ser parte de los conocimientos esenciales de los profesionales que diseñan procesos y reacciones, siendo la seguridad química también fundamental. Si bien se trataba de un artículo de carácter no educacional, en el que buscaba proporcionar una estructura o esquema para algunos de los conceptos y cuestiones relacionados con la QV, también Mestres (2013) señaló que ella debe ser vista como una meta-disciplina, que nació para ser un "enfoque y una herramienta conceptual para la protección ambiental ante la contaminación originada por la industria química" (p. 103).

<i>Tipología/características del problema que originó el trabajo</i>
Sólo mejoría técnica (sustitución de reactivo, catalizador, etc.) para alcanzar, por ej., la sostenibilidad o el DS
Algo nuevo y jamás investigado (aspectos educacionales, uso de principios QV, etc.)
<i>Finalidades de la propuesta</i>
Sólo ejemplos y/o complementación
Resolución de cuestiones técnico-científicas, sociales, educacionales y ambientales, etc., inéditas o sólo proponiendo recomendación y revisión
<i>Cobertura de la solución</i>
Puntual (tema)
En el ámbito de la QV (áreas o principios de la QV, etc.)
Amplia (toda la Química y su enseñanza)
<i>Naturaleza del conocimiento implicado</i>
Racionalidad técnica
Socio-ambiental
Educacional
<i>Naturaleza de la argumentación</i>
Didáctico-metodológica y curricular
Técnica (eco-eficiencia)
Problematización de la (In)certidumbre científica

Tabla 3.- Aspectos a tener en cuenta en el análisis de los contenidos de los artículos sobre Química Verde.

El artículo de Belford y Bastin (2013) se incluye también en este ámbito que asume la naturaleza no-disciplinar de la QV, vinculándola a la perspectiva de una educación para la sostenibilidad, debiendo ser ésta el foco principal en varios niveles del currículo para que los químicos desarrollen e incorporen una mentalidad sostenible en experimentos y en el diseño de síntesis.

En el ámbito de propuestas o informes de experiencia didácticas como módulos y contenidos dentro de disciplinas ya existentes en el currículo de Química, Marteel-Parrish (2007) presenta temas especiales para un curso de graduación en QV, sin laboratorio y especialmente diseñado para estudiantes con formación en química general y orgánica. El uso de ejemplos del mundo real mostró cómo el pensamiento creativo y la resolución de problemas pueden traer beneficios sustanciales para la academia y la industria, incentivando a los estudiantes a considerar el DS. Además de mejorar sus habilidades de escritura, comunicación y debate, mientras trabajaban en un tema QV, los estudiantes adquirirían capacidad de evaluar críticamente las decisiones políticas de una manera ambientalmente consciente, utilizando la QV como foco. En una reciente revisión del curso, (Marteel-Parrish, 2014), se aumenta la atención a los aspectos cuantitativos, se incluye métricas y se concluye transcribiendo la siguiente declaración de un estudiante (traducción libre): "La QV exige que pensemos fuera de la norma habitual. Tenemos que pensar antes de hacer." Grant Freer, Winfield, Gray y Len (2005) presenta a su vez ejemplos de un módulo de enseñanza interactiva para explorar términos y conceptos de la QV (uso de métricas de economía atómica) para el segundo año de graduación, como "un esfuerzo para entusiasmar a nuestros estudiantes", exponiéndolos a "una serie de temas ambientales que los químicos encuentran típicamente fuera de la universidad" (p. 121), basados en el concepto de problemas de aprendizaje. Mientras Dick y Batey (2013) informan de cambios en un curso de Química del tercer año, donde introdujeron actividades experimentales relacionadas con la QV a través de la catálisis orgánica. Vista como tal, la QV también es sugerida, por ejemplo por Doria-Serrano (2009), dentro de las disciplinas de Química Orgánica o Ambiental, sustentada por la idea de que ella está estrechamente vinculada a nuevos procesos de síntesis orgánica y al cuidado del medio ambiente. La autora utiliza ejemplos desarrollados en laboratorios de investigación y en procesos industriales para difundir de manera ilustrativa los doce principios de la QV, expresando el entendimiento de que ésta es una disciplina todavía en su fase inicial.

En cuanto a la QV vista como una disciplina introductoria o curso especial, observamos lo descrito por Manchanayakage (2013) para un currículo de artes liberales ya existente en la Universidad de Susquehanna (Pensilvania, EE.UU.), ofrecido para dos tipos de cursos: uno para estudiantes de cursos en campos distintos de la ciencia y otro a un nivel más elevado, en estilo de taller, para futuros científicos. Estos cursos se dirigen a ayudar a los estudiantes a tomar decisiones inteligentes en el futuro y explorar soluciones con base en los principios de la QV, lo cual, según la autora, "finalmente servirá a una comunidad mayor, apoyando así la misión de las artes liberales" (p. 1167). Esta experiencia curricular está orientada a ser interdisciplinaria, dada la naturaleza de los cursos, la tipología de las actividades (colaborativas y de resolución de problemas locales) y los

objetivos que se quiere alcanzar con la enseñanza de la QV, que son los de integrarla en el conjunto de las ciencias disciplinarias - química, biología, ecología y ciencias de la tierra y del medio ambiente.

En los ejemplos anteriores, es evidente que la QV es vista como siendo más que un área o disciplina, situándose en el ámbito de una "idea-fuerza", similar a la contenida en los conceptos de DS y de SA. Lo cual, por un lado, la fortalece en cuanto nuevo paradigma químico; mientras que, por otro lado, limita el consenso sobre cómo insertarla en el currículo y abordar el conocimiento que de ella deriva.

*Diferentes visiones en las estrategias didáctico-metodológico para la enseñanza de la Química Verde*

Al divulgar experiencias de enseñanza de la QV, algunos artículos informan y defienden la adopción tanto de estrategias más generales orientadas a su inclusión - o la de algunos de sus contenidos - en disciplinas, cuanto de métodos más específicos para su tratamiento, los cuales tienen influencia en la organización y en mudanzas curriculares, pero no únicamente allí.

Por ejemplo, Goes, Leal, Corio y Fernandez (2013) comentan la inserción y los propósitos de la enseñanza de la QV por parte de los profesores de los Cursos de Química, en particular en Química Ambiental, de la Universidad de São Paulo, Brasil (USP). El estudio se basa en gran parte en los trabajos de Shulman (1986), en relación a los dominios de los conocimientos de base de los profesores - en particular el llamado "conocimiento didáctico del contenido" (Pedagogical Content Knowledge, PCK siglas en Inglés) - como en los tres modelos de Grossmann (1990) en relación a los propósitos de enseñanza de la QV, que se describen como tradicional, contextual y socio-científico. Sin embargo, en la investigación, los autores sólo analizan aspectos de uno de estos dominios definidos por Shulman, el de la coherencia didáctica de los profesores cuando éstos trabajan los componentes: estrategias de enseñanza, objetivos de enseñanza y conocimiento curricular. Los autores, al sostener que la QV favorece la posibilidad de que los estudiantes relacionen la química con la realidad de la vida cotidiana y participen en el

*Modelo 1: Incorporación de los principios de la QV en procedimientos experimentales*

Modelo tradicional centrado en el conocimiento químico sin enfoque controvertidos

*Modelo 2: Incorporación de estrategias sostenibles como contenidos del currículo*

Contenidos mas específicos y contextualizados, cuyo estudio apunta a contribuir al DS

*Modelo 3: Enfoque de cuestiones de sostenibilidad asociadas a aspectos socio-científicos controvertidos*

Propone comprender las relaciones de la química con la sociedad, la economía y el ambiente

Tabla 4.- Modelos de Goes et al. (2013), a partir de Burmeister et al. (2012), para la enseñanza de la Química Verde.

desarrollo de la sociedad, en términos de desarrollo sostenible, siguen utilizando los estudios – anteriormente comentados – de Burmeister, Rauch y Eilks (2012). Sin embargo, los autores adoptan sólo tres de los cuatro modelos descritos (ver Tabla 4), que contiene sintéticamente los modelos básicos para la aplicación de los aspectos relacionados con el DS en la enseñanza de la química / QV).

Cuando se analizaron las experiencias con la enseñanza de la QV, descritas por los profesores en los cursos de la USP, los autores señalaron una mayor importancia dada al enfoque de la QV en los cursos de Química Ambiental e Industrial, en relación con los cursos de grado y bachillerato. Anclado en los modelos de Groszmann (1990) y Burmeister, Rauch y Eilks (2012), afirman que tal importancia y tipo de enfoque de la QV se caracterizó con más fuerza por medio del modelo socio-científico (Modelo 1, más tradicional, sin enfoques polémicos), justificándose por la importancia en la formación del investigador y profesor. Pero, según los autores, los profesores de Química Orgánica mostraron, por ejemplo, mayores elementos de coherencia entre los referidos tres componentes del PCK, así como con el modelo 3, que envuelve las relaciones de la química con sus implicaciones socioeconómicas y ambientales; por lo tanto, presentaron un PCK más desarrollado, lo que estaría reflejando el conocido hecho de la mayor proximidad de la QV con los contenidos de la Química Orgánica. En cuanto a los profesores de Físico-Química y Química Analítica, mostraron una correlación de coherencia solamente entre los componentes *estrategias de enseñanza y conocimiento curricular*, ubicándose aun en el Modelo 1, más tradicional. Sin embargo, hubo por parte de estos últimos una inclinación diferenciada en cuanto a los *objetivos de enseñanza*, colocándolos sólo en este componente dentro del Modelo 3 (socio-científico). Un modelo básico prevaleció entre los docentes encuestados: la enseñanza de la Química (QV incluida) asociada al DS. Aparte de la obvia dependencia entre el PCK y el conocimiento de contenido en cuanto a los propósitos para la enseñanza de la QV y de las estrategias utilizadas. Este es un hecho observado sobre todo entre los profesores que no se sienten cómodos con un determinado contenido específico y terminan recurriendo a los enfoques tradicionales. En cuanto al Modelo 2, más contextualizado y con conexiones con la industria química, implicaciones tecnológicas y ambientales, los autores señalaron una mayor consideración de los docentes en términos de objetivos de enseñanza en los cursos de Química Ambiental e Industrial que en los cursos de licenciatura y Bachillerato.

En la investigación llevada a cabo con estudiantes de los mismos Cursos de Química de la USP, sobre el estatuto que atribuían a los conocimientos de la Química Ambiental y de la QV en el conjunto de las cinco áreas tradicionales, Maximiano, Corio, Porto y Fernandez (2009) observaron la dificultad de estos alumnos para expresar concepciones más inclusivas e integradoras entre ambas. Esto demuestra la fuerte influencia de la estructura curricular disciplinar y de los correspondientes libros de texto utilizados en los cursos, situación que dificulta las estrategias de inserción y tratamiento de las cuestiones ambientales y de la QV en ellos.

Braun et al. (2006), a su vez, identifica una serie de conceptos y estrategias para la enseñanza de la QV, afirmando que los estudiantes necesitan desarrollar una comprensión sobre los peligros de los productos

químicos, de modo que la adopción de los principios de la QV posibilitaría tornar los ambientes de trabajo más seguros y eficientes, tanto en el laboratorio cuanto a escala industrial. En la Química, afirma, "las reacciones no deben ser evaluadas únicamente sobre la base de la conversión y la selectividad, sino también en relación con la eficiencia, la sostenibilidad, el reciclaje, la degradación y la eliminación o reducción de riesgos" (p. 1126). Y debe quedar claro para los estudiantes la conexión entre la estructura química y la actividad del compuesto, así como los aspectos de la funcionalidad química (estérica, electrónica, hidrofóbica/hidrofílica y la toxicidad), proporcionando ambas una comprensión básica sobre cómo los productos químicos impactan en el medio ambiente. Según el autor, para la evaluación global de sustancias químicas, es esencial una mejor comprensión de la ecotoxicidad, del destino y del transporte de productos químicos liberados para el medio ambiente. De modo que también este autor apela a la interdisciplinariedad.

Prescott (2013) desarrolló un curso de Química General con base en la QV en un formato de lecciones interactivas y discusiones, incluyendo un blog, con una postura de aprendizaje activo basado en la resolución de problemas, con producción de materiales por los alumnos y con resultados obtenidos para su divulgación en la web. Informes de autoevaluación sobre la adquisición de conocimientos y un cuestionario de evaluación permitieron verificar ganancias de aprendizaje en las áreas de Química General y la QV, de la capacidad de distinguir y relacionar conceptos adquiridos, así como de la capacidad para hacer frente a los problemas del mundo real. Aunque los niveles de concretización de los objetivos de aprendizaje en los distintos ámbitos resultaron de alguna manera dispares, especialmente en relación con la QV.

#### *Métricas de la eficacia de la química verde*

En cuanto a la medición de prácticas de la QV con respecto a la evaluación (semi) cuantitativa del alcance de la eficacia, algunos estudios mostraron métricas de QV, principalmente métricas de masa [en especial, la economía atómica (EA) y el factor-E] como un importante y amplio instrumento que todos los químicos deben practicar con miras a la ampliación de las métricas clásicas de masa y selectividad.

Trabajos como el de Grant et al. (2005) – ya destacado encima - exponen el uso de la métrica EA a través de ejercicios integrados con seis secciones que componen una unidad didáctica sobre la síntesis del ibuprofeno para introducir la QV en curso de graduación. Cann y Dickneider (2004) es un autor citado por varios otros que presentan y defienden el uso de métricas para evaluar el grado de cumplimiento de los principios de la QV. Para el autor, la QV puede ser incluida en los semestres tradicionales en los que se enseña química orgánica en el laboratorio, agregándose un poco de material suplementario en los cursos (en este caso, efectuado vía módulo-web de Introducción a la QV), para desarrollar el concepto de economía de átomos (EA) durante las discusiones de los cuatro tipos principales de reacciones orgánicas (sustitución, eliminación, adición y reordenamiento). También Ávila-Zágarra, Cano y Gavilán-García (2010) sostiene que se debe conocer la métrica EA como parte de la aplicación de los principios de la QV, pues para obtener la máxima eficacia de una transformación "se debe evaluar la

ruta que genera menos residuos y con mayor porcentaje de transformación" (p.186). Ejemplifica el uso de la EA en la deshidratación de alcoholes para la obtención de alquenos con diferentes catalizadores, que se utiliza ampliamente como ejemplo en la enseñanza. Según Mercer, Andraos y Jessop (2012), la capacidad de identificar correctamente síntesis que son más verdes es algo particularmente útil para los jóvenes químicos que entraron en la creciente economía verde. Consideran que las clásicas métricas unidimensionales EA y factor-E proporcionan información suficiente para la correcta selección de una ruta de síntesis verde y el uso de la materia, pero las métricas multi-dimensionales utilizadas en la evaluación del ciclo de vida, son esenciales para determinar los impactos ambientales. Así, informan sobre un ejercicio que implica nueve métricas de impacto ambiental, donde la tarea es seleccionar la síntesis más verde a partir de un conjunto de procedimientos de la literatura. El objetivo es cuantificar el impacto ambiental global de todos los materiales que intervienen en cada síntesis y no sólo la cantidad genérica de residuos producidos, medida por el factor-E. Sin embargo, tales métricas son más utilizadas en ingeniería química porque están más estrechamente relacionados con los impactos del proceso químico y, en cambio, poco con la química de laboratorio. Y su uso en cursos iniciales de formación de químicos sólo podría tener como objetivo el contacto con estas métricas en la enseñanza.

El estudio realizado por Morales-Galicia et al. (2011) presenta una metodología para evaluar si de hecho enfoques verdes son alcanzados en las actividades experimentales que las pretenden, haciendo hincapié en que no se ha establecido un número mínimo de principios de la QV que deben ser cubiertos para que un proceso, producto o reacción sea considerado verde. Sin mencionar las métricas, los autores proponen diez pasos y una escala para llevar a cabo la evaluación, ilustrándola con dos prácticas experimentales de obtención de aspirina (ácido acetilsalicílico), siendo la diferencia entre ambas destacada por el uso de un catalizador (arcilla bentonita) alternativo al ácido sulfúrico, en condiciones libres de disolvente y utilizando infrarrojos como fuente de energía de activación. Estas características alternativas introducen un carácter más verde en la nueva ruta de síntesis, acrecentada de una EA = 75%. Sin embargo, la exigencia de un número mínimo de principios cumplidos no parece ser, por sí misma, un criterio adecuado para medir el logro de una química más verde.

Por otro lado, lo que se percibe de los trabajos que se refieren a la métrica de masas es una cierta variabilidad en sus respectivas definiciones y designaciones. Por ejemplo, Stacey, Dicks, Goodwin, Rush y Nigam (2013) se refiere a una economía atómica *experimental* en paralelo a una economía atómica *intrínseca*, la cual se conoce más comúnmente como Eficiencia de Masa de Reacción (EMR), siendo la métrica EA intrínseca comúnmente conocida solamente como EA. Discrepancias de este tipo en las definiciones y nomenclatura de las métricas pueden causar confusiones (Machado, 2014a; 2014b).

En cambio, otros tipos de métricas - las llamadas métricas holísticas - como la estrella verde, el círculo verde y la matriz verde (Machado, 2014a, 2015), que se dirigen más directamente a la enseñanza de la QV, tienen por objeto evaluar globalmente los componentes materiales y los impactos



ambientales de la química en experiencias de laboratorio, con base en el grado de cumplimiento de los doce principios de la QV.

Sin embargo, a pesar de estos variados esfuerzos por incorporar en la enseñanza de la QV la evaluación de los avances obtenidos en la eficacia práctica del alcance de la química verde, se comprueba que la mayoría de los artículos relacionados con actividades experimentales no incluye el uso de métricas de ningún tipo, quedando las evaluaciones en el nivel parcial y subjetivo.

#### *Niveles de cobertura educacional*

En la cobertura relativa a los niveles de enseñanza, hubo gran predominio de informes y propuestas dirigidas a la graduación universitaria, pero algunos autores informaron sobre la inserción de la QV en la post-graduación, como en los trabajos de Braun et al. (2006) antes mencionados y de Hoz-Ayuso (2009), que comenta la presencia de la QV en la post-graduación, especialmente en el caso de la Red Española de Química Sostenible (REDQS). Por otro lado, no aparecieron propuestas o informes de experiencias de QV dirigidas a la educación básica. Sin embargo, hay estudios que apuntan a este nivel de enseñanza en forma promisoria, siguiendo el ejemplo de los que defienden la ambientalización curricular (Zuin, 2011); que expone una cultura ecológica escolar como base para aspectos medioambientales de la química (Zuin y Marques, 2015); que reportan experiencias en escuelas secundarias en Indonesia (Karpudewan et al., 2009; 2012) y experiencias con la enseñanza de la QV en escuelas italianas (Marques, 2012) y portuguesas, estas últimas a través del proyecto "Introducción de la Enseñanza de la Química Verde como Soporte de Sostenibilidad en la Educación Secundaria" ([http://educa.fc.up.pt/projeto\\_pagina.php?id\\_projeto=18](http://educa.fc.up.pt/projeto_pagina.php?id_projeto=18)).

#### **Conclusiones e implicaciones**

A partir del análisis que llevamos a cabo, una característica notable de las propuestas destinadas a la enseñanza de la QV es que éstas consideran sus doce principios como la idea fuerza y una herramienta conceptual para el enfoque ambiental, buscando una nueva forma de pensar y hacer la Química y, por lo tanto, un punto de partida para la enseñanza de la QV. También se reveló que existe un vínculo de propósito con la idea del DS y con el alcance de la SA, aunque con diferentes interpretaciones sobre lo que esto significa.

A pesar de la omnipresencia de los doce principios en los diversos esfuerzos para llevar a la enseñanza - e incluso a la práctica de la química - el aumento de la eficacia de la química verde requerido cuando se reconvierte la química a la QV, se comprueba que la mayoría de los artículos adopta un enfoque poco sistemático en cuanto a la participación de los mismos. En las actividades experimentales encaminadas a este objetivo, la evaluación de los progresos en la eficacia de la química verde ha contemplado a menudo sólo algunos de los principios, a veces unos pocos, por lo general los relacionados con las mejoras más previsibles, mientras que los otros son ignorados o incluso olvidados, haciendo que la referida evaluación acabe por ser bastante subjetiva. Por ejemplo, los principios 6

(eficiencia energética), 7 (materias primas renovables) y 10 (planificación de la degradación) aparecen muy poco en las discusiones de la comunidad QV y en las propuestas de enseñanza QV. Algo que puede ser señal de algún tipo de límite en el cambio de formato de la química a la QV (según el ejemplo de los aspectos termodinámicos) y / o determinado bajo interés en el desarrollo de la investigación concerniente a estos principios, que involucran temas no tradicionales de la química.

En cuanto a las ideas y propuestas sobre modos de insertar la QV en el currículo de la Química y de desarrollar su enseñanza, fue posible identificar tres tipos de propuestas, a las cuales denominaremos vertientes.

La primera y más fuerte vertiente es aquella que no caracteriza la QV como una disciplina específica, aun cuando proponga su inclusión en la forma de "injertos" puntuales de contenidos teóricos (para formar mentalidades verdes, sostenibles o limpias) y/o actividades experimentales/prácticas dentro de las disciplinas clásicas de la química. En esta vertiente se presentan artículos cuyos puntos de vista caracterizan la QV como interdisciplinar, multidisciplinar o meta-disciplinar.

La segunda vertiente, aunque sea minoritaria, es la que propone la QV en la forma de una "disciplina" o de un curso especial, específico, de carácter introductorio, para los químicos y no químicos, con el fin de crear un espíritu crítico cuando estudian en algún nivel de química (Doria-Serrano, 2009; Manchanayakage, 2013).

En la tercera vertiente está la visión curricular más elaborada, presentada en varios trabajos, que reúne una síntesis de varias proposiciones. En resumen, concibe la presencia y las estrategias para la enseñanza de la QV de modo transversal en el currículo, atravesando disciplinas y actividades. Esta vertiente está mejor expresada en Goes *et al.* (2013), que se basa en las ideas de los cuatro modelos propuestos por Burmeister, Rauch y Eilks (2012) y en el concepto de "conocimiento didáctico del contenido" (PCK) de Shulman (1986). Aun cuando se haya destacado poco los PCK de la QV y la correlación reivindicada entre sus elementos/componentes. En esta vertiente se resalta que la presencia y la enseñanza de la QV pueden acontecer en el modelo tradicional, donde principios de la QV son aplicados a las actividades experimentales; a través del modelo contextualizado, con la incorporación de estrategias de sostenibilidad en la enseñanza de la química; o por medio de los temas polémicos, basados en el enfoque CTS, es decir, en los aspectos socio-científicos de amplitud "interdisciplinaria".

Las propuestas y los informes de experiencias didácticas muestran, por otro lado, el esfuerzo de la comunidad epistemológica QV en la profundización de estudios e investigaciones que envuelven la aplicación de la QV, incluyendo los que la distinguen de la química tradicional ("no verde"). Algo que, si de un lado muestra su vitalidad, del otro muestra que dichas propuestas aún requieren mayor consenso y ser mejor conocidas. Sin embargo, las tres vertientes arriba caracterizadas, que recogen la variedad de ideas identificadas por nosotros en la literatura sobre la enseñanza de la QV, pueden servir para iluminar posibilidades y opciones para la adopción de perspectivas multidisciplinarias y la integración de la QV en cuanto al tema del alcance de la SA, además de la observación impostergable acerca

de los límites que los postulados termodinámicos imponen a las transformaciones químicas.

A pesar de esto, en el ámbito curricular todavía prevalece cierta duda sobre cómo desarrollar la naturaleza interdisciplinaria de la QV; algo que no le es peculiar, teniendo en cuenta la falta de experiencias similares incluso en Cursos de Química, estructurados de forma predominantemente disciplinar. Por lo tanto, las discusiones curriculares se sitúan sobre todo en propuestas de "injertos" de contenidos en los laboratorios de las disciplinas clásicas/tradicionales de la química, que están poco contextualizados y con escasa confrontación entre contenidos de diferentes campos y áreas, por ejemplo, el socioeconómico. Cuando hay algún tipo de consenso entre los químicos verdes en torno a que la QV es una respuesta de la química al DS y la SA, cabría esperar que se sintiese la necesidad de problematizar aspectos relacionados con incertidumbres científicas, la necesidad de un nuevo paradigma ambiental y/o aspectos socio-ambientales contemporáneos en su enseñanza. En este sentido, hay una ausencia del campo de la EA (Zuin y Marques, 2014) y del trabajo con problemas socio-científicos que podrían servir como herramientas pedagógicas para el estudio de las cuestiones de SA dentro del ámbito de la (eficiencia técnica de la) Química. De esta forma se abre espacio para estudios de los límites impuestos por los postulados termodinámicos a la producción de bienes y al consumo (Marques y Machado, 2014); de los problemas de reciclaje, reutilización y de la reversibilidad de la materia y la energía. En fin, un conjunto de cuestiones/problemas tanto de carácter teórico como práctico que, en cuanto son requeridos para lograr una nueva forma de pensar y de hacer la química, justifican la propia QV.

El esfuerzo por enseñar QV como una perspectiva que va mucho más allá de sólo "una forma más de hacer química" que añade algunos cuidados del medio ambiente – aun cuanto esto ya representa avances - es algo apreciable. A esta nueva perspectiva denominamos Educación Química Verde (EQV), la cual se reforzaría si estuviese arraigada en la formación de una cultura ecológica desde la escuela primaria, en diálogo con la EA y con los estudios de QV en una perspectiva crítica. Esto es, que al mismo tiempo que reconoce los límites impuestos por los postulados termodinámicos, también lo haga con respecto a la actual crisis de producción y reproducción de la vida, que han exigido un reposicionamiento de todos los campos científicos, un tratamiento interdisciplinario y una visión crítica de la ciencia actual - no reduccionista, contextualizada e integrada a las dimensiones social, histórica y política.

### **Agradecimientos**

A la *Capex Foundation* - Brasil y al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)-Brasil, por el apoyo financiero a la investigación.

### **Referencias**

Anastas, P. T. y Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry – Theory and Practice*, Oxford: Oxford Press.

Anastas, P. T. y Kirchhoff, M. M. (2002). *Origins, current status, and*

future challenges of Green Chemistry. *Accounts of Chemical Research*, 35, 686–694.

Aikenhead, G. (1994). What Is STS Science Teaching? In: Solomon, J., y Aikenhead, G. (Eds), *STS Education - International Perspectives on Reform*. (pp. 47-59). Teachers College Press: New York.

Ávila-Zágarra, J. G., Cano, S. y Gavilán-Gracia, I. (2010). Obtención de alquenos aplicando los principios de la química verde. *Educación Química*, 21, 183-189.

Belford, R. E. y Bastin, L. D. (2013). ConfChem Conference on Educating the Next Generation: Green and Sustainable Chemistry - An Online Conference. *Journal of Chemical Education*, 90, 508-509.

Braun, B., Charney, R., Clarens, A., Farrugia, J., Kitchens, C., Lisowski, C., Naistat, D. y O'Neil, A. (2006). Completing Our Education. *Journal of Chemical Education*, 83, 1126-1129.

Burmeister, M., Rauch, F. y Eilks, I. (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chemical Education Research and Practice*, 13, 59-68.

Cann, M. C. y Dickneider, T. (2004). A. Infusing the Chemistry Curriculum with Green Chemistry Using Real-World Examples, Web Modules, and Atom Economy in Organic Chemistry Courses. *Journal of Chemical Education*, 81(7), 977-980.

Carson, R. L. (1962). *Silent Spring*. USA: Houghton Mifflin.

Costa, D. A., Ribeiro, M. G. T. C. y Machado, A. A. S. C. (2008). Uma Revisão da Bibliografia sobre o Ensino da Química Verde. *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química*, 109, 47-51.

Costa, D. A. (2012). Métricas de Avaliação da Química Verde – Aplicação no Ensino Secundário. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências do Porto, 2012. Recuperado de:

<http://educa.fc.up.pt/ficheiros/investigacao/61/VER%20TESE%20%20de%20%20Dominique%20A.%20Costa%20.pdf>.

Dick, A. P. y Batey, R. A. (2013). ConfChem Conference on Educating the Next Generation: Green and Sustainable Chemistry - Greening the Organic Curriculum: Development of an Undergraduate Catalytic Chemistry Course. *Journal of Chemical Education*, 90, 519-520.

Dória-Serrano, M. C. (2009). Química Verde: um nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química*, 20, 412-420.

Epicoco, M., Oltra, V. y Saint-Jean, M. (2014). Knowledge dynamics and sources of eco-innovation: Mapping the Green Chemistry community. *Technological Forecasting & Social Change*, 81, 388–402.

Fleck, L. (2010). *Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico*. Tradução de Georg Otte e Mariana C. de Oliveira. Belo Horizonte: Fabrefactum.

Frank, H., Campanella, L., Dondi, F., Mehlich, J., Leitner, E., Rossi, G., Ioset, N. y Bringmann, G. (2011). Ethics, Chemistry, and Education for

Sustainability. *Angewandte Chemie International Edition*, 50, 8482-8490.

Goes, L. F., Leal, S. H., Corio, P. y Fernandez, C. (2013). Aspectos do conhecimento pedagógico do conteúdo de química verde em professores universitários de química. *Educación Química*, 24, 113-123.

Grant, S., Freer, A. A., Winfield, J.M., Gray, C. y Len, D. (2005). Introducing undergraduates to Green Chemistry: an interactive teaching exercise. *Journal of Chemical Education*, 7, 121-128.

Grossman, P. L. (1990). *The making of a teacher: Teacher knowledge and teacher education*. New York, USA: Teachers College Press.

Hill, J., Kumar, D. D. y Verma, R. K. (2013). Challenges for Chemical Education: Engaging with Green Chemistry and Environmental Sustainability. *The Chemist*, 86(1), 24-31.

Hjersesen, L. Schutt, D. L. y Boese, J. M. (2000). Green Chemistry and Education. *Journal of Chemical Education*, 77(12), 1543-1547.

Hoz-Ayuso, A. (2009). Los Estudios de Posgrado em Química Sostenible en España. *Educación Química*, 20, 405-411.

Kirchhoff, M. M. (2001). Topics in Green Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 78(12), 1577.

Kirchhoff, M. M. (2010). Education for a Sustainable Future. *Journal of Chemical Education*, 87(2), 121.

Karpudewan, M., Ismail, Z. H. y Mohamed, N. (2009). The integration of green chemistry experiments with sustainable development concepts in pre-service teachers' curriculum: experiences from Malaysia. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 10(2), 118-135.

Karpudewan, M., Ismail, Z. H. y Roth, W-M. (2012). The efficacy of a green chemistry laboratory-based pedagogy: changes in environmental values of Malaysia pre-service teachers. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 10, 497-529.

Machado, A. A. S. C. (2014a). *Introdução às Métricas da Química Verde – Uma Visão Sistêmica*. Florianópolis: EDUFSC.

Machado, A. A. S. C. (2014b). Bateria de Métricas para avaliação da verdura material de reações de síntese. *Química Nova*, 37(6), 1058-1062.

Machado, A. A. S. C. (2015). Holistic Green Chemistry metrics for use in teaching laboratories, In: V. Zuin, V. G. and Mammino, L. (org). *Worldwide Trends in Green Chemistry*, (pp. 27-44). England: RSC.

Manchanayakage, R. (2013). Designing and Incorporating Green Chemistry Courses at a Liberal Arts College to Increase Students' Awareness and Interdisciplinary Collaborative Work. *Journal of Chemical Education*, 90, 1167-1171.

Marques, C. A. (2012). Estilos de Pensamento de Professores Italianos sobre a Química Verde na Educação Química Escolar. *Revista Eletrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), 316-340.

Marques, C. A. y Machado, A. A. S. C. (2014). Environmental sustainability: implications and limitations to green chemistry. *Foundation of*

*Chemistry*, 16, 125-147.

Marteel-Parrish, A. E. (2007). Toward the Greening of Our Minds: a new special topics course. *Journal of Chemical Education*, 84, 245-247.

Marteel-Parrish, A. E. (2014). Teaching Green and Sustainable Chemistry: A Revised One-Semester Course Based on Inspirations and Challenges. *Journal of Chemical Education*, 91, 1084-1086.

Maximiano, F. A., Corio, P., Porto, P. P. y Fernandez, C. (2009). Química Ambiental e Química Verde no conjunto do conhecimento químico: concepções de alunos de graduação em Química da Universidade de São Paulo. *Educación Química*, 20, 398-404.

Mercer, S., Andraos, J. y Jessop P. G. (2012). Choosing the Greenest Synthesis: A Multivariate Metric Green Chemistry Exercise. *Journal of Chemical Education*, 89, 215-230.

Mestres, R. (2004). A brief structured view of green chemistry issues, *Green Chemistry*, F, G10–G12.

Mestres, R. (2013). Química Sostenible: naturaleza, fines e âmbito, *Educación Química*, 24, 103.

Morales-Galicia, M. L., Martínez, J. O., Reyes-Sánchez, L. B., Hernández, O. M., Razo, G. A. A., Valdivia, A. O. y Ruvalcaba, R. M. (2011). ¿Qué tan verde es un experimento? *Educación Química*, 22, 240- 248.

Prado, A. G. (2003). Química Verde, os desafios da Química do novo milênio. *Química Nova*, 26, 738-743.

Prescott, S. (2013). Green Goggles: Designing and Teaching a General Chemistry Course to Nonmajors Using a Green Chemistry Approach. *Journal of Chemical Education*, 90, 423-428.

Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15, 4-14.

Stacey, J. M., Dicks, A. P.; Goodwin, A. A., Rush, B. M. y Nigam, M. (2013). Green Carbonyl Condensation Reactions Demonstrating Solvent and Organocatalyst Recyclability. *Journal of Chemical Education*, 90, 1067-1070.

Summerton, L., Hunt, A. J. y Clark, J. H. (2013). Green Chemistry for Postgraduates. *Educación Química*, 24, 150-155.

Souza-Aguiar, E. F., Almeida, J. M. A. R., Romano, P. N., Fernandes, R. P. y Carvalho, Y. (2014). Química Verde: A Evolução de um Conceito. *Química Nova*, 37, 1257-1261.

UNCED. (1992). *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - AGENDA 21*. Rio de Janeiro.

WCED (1987). *World Commission on Environmental and Development - Our common future*. Oxford University Press, Oxford.

Zandonai, D. P., Saqueto, K. C., Abreu, S. C. S. R., Lopes, A. P. y Zuin, V. G. (2014). Química Verde e Formação de Profissionais do Campo da Química: Relato de uma Experiência Didática para Além do Laboratório de Ensino. *Revista Virtual de Química*, 6, 73–84.

Zuin, V. G. y Marques C. A. (2015). Green Chemistry in Brazil: Contemporary Tendencies and Challenges and its Reflections on High School Level. In: V. G. Zuin y Mammino, L. (org). *Worldwide Trends in Green Chemistry*. (pp.27-44). England: RSC.

Zuin, V. G. (2011) *A inserção da dimensão ambiental na formação de professores em Química*. Campinas, SP: Editora Átomo.

Zuin, V. G. y Marques, C. A. (2014). Sustainable development, Green Chemistry and Environmental Education in Brazil. In: Ingo Eilks (Org.). *Science Education Research and Education for Sustainable Development (ESD)*. (pp. 21-41). Aachen: Shaker.

**Anexo 1.-** Clasificación de artículos publicados como enseñanza de la química verde (1995-2014) en JCEd, GC y EdQ, se indica el primer autor (PA) y revista con volumen, página y año (REV). C (Currículo), D (Divulgación), I (didáctico), F (Fundamentación Teórica), D (Desarrollos Sostenible/ Sostenibilidad Ambiental), E (Energía), A (Aplicaciones), laboratorio de Química Orgánica (O), Química Física (F), Química Inorgánica (I), Química Analítica (A), Química General (G), y M (Métricas).

PA	REV	C	D	I	F	D	O	F	I	A	G	E	A	M
Hjeresen	JCEd, 77, 1543 (2000)		1		2									
Song	JCEd, 81, 691 (2004)			1										
Santos	JCEd, 81, 232 (2004)			2			1							
Cann	JCEd, 81, 977 (2004)	1					2							3
Goodwin	JCEd, 81, 1187 (2004)						1							
Haack	JCEd, 82, 974 (2005)		1											
van Arnum	JCEd, 82, 1689 (2005)	1					2							3
Braun	JCEd, 83, 1126 (2006)				1									
Cacciatori	JCEd, 83, 1039 (2006)									1				
Marteel-Parrish	JCEd, 84, 245 (2007)	1		2										
Kneas	JCEd, 86, 212 (2009)			1									2	
Pietro	JCEd, 86, 579 (2009)										1			
Ribeiro	JCEd, 88, 947 (2011)			3	2				4					1
Chan	JCEd, 88, 751 (2011)		1											
Geiger	JCEd, 89, 1572 (2012)						1							2
Mercier	JCEd, 89, 215 (2012)	1												2
Dintzner	JCEd 89, 262 (2012)						1							
Dintzner	JCEd, 89, 265 (2012)						1							
Ison	JCEd, 89, 1575 (2012)						1							
Sharma	JCEd, 89, 1316 (2012)							1						
Gross	JCEd, 90, 429 (2013)	1					2							
Haack	JCEd, 90, 515 (2013)	1					2							
Buckley	JCEd, 90, 771 (2013)									1				
Henrie	JCEd, 90, 521 (2013)	1									2			
Cummings	JCEd, 90, 523 (2013)						1					2		
Manchanayakage	JCEd, 90, 1167 (2013)	1												
Ribeiro	JCEd, 90, 432 (2013)			2					3					1
Prescott	JCEd, 90, 423 (2013)			1										
Belford	JCEd, 90, 508 (2013)		1				2							
Young	JCEd, 90, 513 (2013)		1											
Kovacs	JCEd, 90, 517 (2013)	1											2	
Dicks	JCEd, 90, 519 (2013)	1					2							
Stacey	JCEd, 90, 1067 (2013)						1							
Morsch	JCEd, 91, 611 (2014)						1							
Marteel-Parrish	JCEd, 91, 1084 (2014)	1		2										
Lee	JCEd, 91, 1001 (2014)	2					1							
Edgar	JCEd, 91, 1040 (2014)						1							
Cannon	JCEd, 91, 1486 (2014)						1	2						
Ribeiro	JCEd, 91, 1901 (2014)			2					3					1
Graham	JCEd, 91, 1985 (2014)						1							
Matlack	GC, 1, G19 (1999)		1											
Lennon	GC, 4, 181 (2002)												1	
Taverner	GC, 5, G46 (2003)			1										
Houri	GC, 5, G49 (2003)			2						1				
Collins	GC,5, G51 (2003)				1	2								
Grant	GC, 6, 25 (2004)					2							1	



McKenzie	GC, 6, 355 (2004)					1								
Leitner	GC, 6, 351 (2004)		1											
Grant	GC, 7, 121 (2005)	1		2										3
Tang	GC, 7, 761 (2005)		1											
Szafran	EdQ, 11, 172 (2000)							1						
Mendez-Vivar	EdQ, 16, 192 (2005)		1											2
Garriz-Ruiz	EdQ, 20, 394 (2009)				1									
Maximiano	EdQ, 20, 398 (2009)	1												
Hoz-Ayuso	EdQ, 20, 405 (2009)	1	2											
Doria-Serrano	EdQ, 20, 412 (2009)		1											
Miranda	EdQ, 20, 421 (2009)		1			2								
Succaw	EdQ, 20, 433 (2009)			2		1								
Léon-Cedeño	EdQ, 20, 441 (2009)		2			1								
Ávila-Zágarra	EdQ, 21, 183 (2010)					1								2
Morales-Galicia	EdQ, 22, 240 (2011)													1
Reyes-Sánchez	EdQ, 23, 222 (2012)				2	1								
Arroyo-Carmona	EdQ, 23, s1, 127 (2012)							1						
Doria-Serrano	EdQ, 24, s1, 94 (2013)		1											
Mestres	EdQ, 24, s1, 103 (2013)		1		2									
Goes	EdQ, 24, s1, 113 (2013)			1		2								
Spanevello	EdQ, 24, s1, 124 (2013)		1											
Altava	EdQ, 24, s1, 132 (2013)	1	2											
Summerton	EdQ, 24, s1, 150 (2013)	1	2											
Mansilla	EdQ, 25, s1, 56 (2014)	1					2							