

La educación química en el Antropoceno

Chemical education in the Anthropocene

Amparo Vilches¹ y Daniel Gil Pérez¹

Resumen

Este trabajo pretende analizar, en primer lugar, el significado del concepto de Antropoceno desde la educación química, en la perspectiva de las interacciones ciencia, tecnología, sociedad y ambiente (CTSA), atendiendo a los debates que su introducción ha generado en la comunidad científica y saliendo al paso de las confusiones a las que está dando lugar su presencia en los medios de comunicación. A continuación, se aborda el papel que la actividad química ha jugado y sigue jugando en la creación de la actual crisis global, así como sus principales contribuciones a la ciencia de la sostenibilidad para la superación de dicha crisis y el avance en el logro de los Objetivos de desarrollo sostenible hacia la necesaria transición a la sostenibilidad. La última parte está dedicada a la atención que la educación química ha prestado y debe prestar a esta problemática como un objetivo clave en la formación de la ciudadanía y de los futuros profesionales y educadores.

Palabras clave: antropoceno; educación química; CTSA (ciencia, tecnología, sociedad y ambiente); límites planetarios; ODS (Objetivos de desarrollo sostenible); transición a la sostenibilidad.

Abstract

This paper aims, in the first place, to analyze the meaning of the concept of Anthropocene from the perspective of the interactions of Science, Technology, Society and Environment (STSE), considering the debates that its introduction has generated in the scientific community and addressing the misunderstandings its presence in the media is giving rise to. Next, it addresses the role that chemical industrial activity has played, and continues to play, in the creation of the current planetary emergency, as well as what its main contributions to the new and vigorous sustainability science have been, in order to overcome the global crisis, advance in the attainment of the Sustainable Development Goals for the necessary transition to sustainability. The last part is devoted to the attention that chemical education has paid and should pay to these problems as a key aim in the training of citizens and future scientists and educators.

Keywords: anthropocene; chemistry education; planetary boundaries; STSE (Science, Technology, Society and Environment); SDG (Sustainable Development Goals).

CÓMO CITAR:

Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2024, septiembre). La educación química en el Antropoceno. *Educación Química*, 35(Número especial). <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2024.4.88870e>

¹ Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universitat de València, España.

Introducción

Estudiar el Antropoceno desde la educación química, en la perspectiva de las interacciones ciencia, tecnología, sociedad y ambiente (CTSA), tiene pleno sentido desde diversos puntos de vista que pretendemos abordar en este trabajo.

Conviene recordar que la palabra *Antropoceno* fue introducida por Paul Crutzen, Premio Nobel de Química de 1995 junto con Frank Rowland y Mario Molina. En un número anterior de *Educación Química* (Vilches y Gil Pérez, 2021) se abordó cómo surgió la expresión *Antropoceno* para denominar el actual periodo de la historia geológica de la Tierra, al tomar conciencia de que las acciones humanas son responsables de grandes cambios, tanto en la superficie terrestre como en los océanos y, muy particularmente, en la atmósfera; cambios que han creado una insostenible situación de emergencia planetaria, caracterizada por un conjunto de problemas socioambientales estrechamente vinculados que se potencian mutuamente y que exigen medidas de mitigación y adaptación para hacer posible una urgente transición a sociedades sostenibles (Gil Pérez y Vilches, 2023). Una transición que, como ya señalaron Vitousek et al. (1997), necesita de la implicación de toda la humanidad y, muy concretamente, de todas las áreas de conocimiento.

Las preguntas que nos hemos planteado en este trabajo pueden concretarse en:

- ¿Qué papel que ha jugado y sigue jugando la actividad química en la creación de la actual situación de emergencia planetaria?
- ¿Qué contribuciones de la actividad química son necesarias para la transición a la sostenibilidad?
- ¿Qué atención ha prestado y debe prestar la educación química a esta problemática?

Somos conscientes de la complejidad causal de las transformaciones que han conducido a la introducción del concepto de Antropoceno, lo que impide atribuciones exclusivas de responsabilidad a una determinada área del conocimiento en el origen de los problemas o en las propuestas de solución. Consideramos útil, sin embargo, explicitar aquí la contribución de nuestro campo de estudio y acción, tanto a la creación de la actual situación problemática como a su necesaria solución. Y dedicaremos una especial atención a iniciativas ya en marcha. Pero, previamente, es necesario profundizar en el concepto de Antropoceno, atendiendo a los debates que su introducción ha generado en la comunidad científica e intentando salir al paso de las confusiones a las que está dando lugar su profusa presencia en los medios de comunicación.

1. Acerca del significado del concepto de Antropoceno

Es bastante frecuente encontrar en los medios de comunicación y en la literatura científica actual la referencia al Antropoceno como un periodo muy reciente de la historia del planeta, considerando que las grandes transformaciones producidas por la especie humana tienen su origen en la Revolución Industrial y en las exigencias de crecimiento del sistema socioeconómico vigente, que habría venido a romper el equilibrio que nuestra especie había mantenido, desde sus orígenes, con el resto de la biosfera. Se ha llegado incluso a afirmar que los cambios de comportamiento que han dado lugar a dichas transformaciones son fruto de la Ilustración, de “la modernidad filosófica y tecnocientífica” (Riechmann, 2009).

Es preciso insistir en que, por el contrario, las grandes transformaciones que han conducido a la actual situación de emergencia planetaria son el resultado de la forma habitual de comportarse de los seres humanos a lo largo de la historia de nuestra especie: un comportamiento impuesto por la necesidad de sobrevivir desde sus orígenes cuando, organizados en pequeños grupos, se enfrentaban a otras especies depredadoras y también a otros grupos humanos con los que competían por el acceso a una alimentación escasa. Milenios de vida en esas condiciones extremas explican los comportamientos dirigidos a la búsqueda del beneficio propio (individual y/o grupal) contra "los otros", es decir, contra el resto de los seres vivos, incluidos los demás seres humanos. Así lo señala, por ejemplo, el paleontólogo e investigador de la evolución humana Bermúdez de Castro (2021) en *Dioses y mendigos. La gran odisea humana*, donde afirma que la territorialidad y violencia asociada parecen haber sido una constante a lo largo de nuestra evolución. Y aun cuando nuestros ancestros aprendieron progresivamente a cooperar para superar los obstáculos que la naturaleza les presentaba (escasez de alimentos, falta de agua, peligrosos depredadores...), ello exacerbó la competencia entre sí de los grupos más amplios formados, convirtiéndose en la mayor amenaza mutua, causa de continuos y violentos enfrentamientos (Raihani, 2021).

El inicio del Antropoceno no puede situarse, por tanto, en un periodo concreto de la historia de la humanidad, admitiendo injustificadamente que hasta entonces su comportamiento había sido ambientalmente sostenible. No ha sido así, no ha habido ninguna ruptura con una supuesta "arcadia sostenible". Lo que sí ha tenido lugar ha sido una aceleración de los efectos de un comportamiento depredador *siempre presente*. Una aceleración asociada al crecimiento de la población humana que ha llegado a ser exponencial durante los dos últimos siglos y de su capacidad tecnológica, con consecuencias de creciente gravedad por su impacto global en el clima y en todos los ecosistemas. Este proceso, por supuesto, no ha sido regular, sino que ha tenido claros puntos de inflexión, como los notables cambios que acompañaron a la introducción de las prácticas agrícolas "iniciada hace unos 8000 años" la minería, los procesos de urbanización y, muy particularmente, los producidos por la Revolución Industrial a partir del siglo XVIII.

Resultan lógicas, pues, las discrepancias acerca de dónde situar el paso del Holoceno al Antropoceno, hasta el punto de que algunos autores no han considerado adecuado hablar de una nueva era geológica (Erlandson y Braje, 2013; Gibbard et al., 2022; Voosen, 2024) y la Unión Internacional de Ciencias Geológicas rechazó, en marzo de 2024, aceptar la consideración del Antropoceno como una nueva etapa geológica. Estos debates, sin embargo, no cuestionan el reconocimiento de los cambios geológicos provocados por la humanidad, que han conducido a una grave situación de emergencia planetaria.

Ocuparse del Antropoceno se ha convertido a sí en una forma de entender las alteraciones que los seres humanos han provocado y siguen provocando en los sistemas y procesos terrestres. Así se presenta, por ejemplo, la revista científica *Anthropocene* publicada desde 2013: "Anthropocene is an interdisciplinary peer-reviewed journal answering questions about the nature, scale and extent of interactions between people and Earth processes and systems. The scope of the journal includes the significance of human activities in altering Earth's landscapes, oceans, atmosphere, cryosphere, and ecosystems over a range of time and space scales - from global phenomena over geologic eras to single isolated events - including the linkages, couplings, and feedbacks among physical, chemical, biological, and social dimensions of Earth systems".

Pero no se trata únicamente de analizar las alteraciones producidas, sino de estudiar también cómo restaurar los sistemas alterados. Así lo indica una nueva publicación, *Anthropocene Science*, aparecida en 2022 en su "Aims and scope": "the journal aims to address how human activities influence the resilience of planet Earth and how knowledge-driven scientific and technological innovations and societal transformations based on sustainability principles can restore the Earth's vitality". Importantes en este propósito de restauración son también los boletines informativos (newsletters) *Anthropocene*.

Lo más importante no es, por tanto, establecer si estamos o no en una nueva era y determinar en qué momento se produjo el cambio, sino comprender la necesidad de actuar para evitar la continuidad de los actuales procesos socioeconómicos y tecnocientíficos, cuya aceleración nos puede conducir hacia un grave e irreversible colapso.

Un número creciente de organizaciones no gubernamentales, educadores, responsables políticos, etc., están comprendiendo que debemos promover, con urgencia, un profundo cambio cualitativo y cuantitativo en nuestras actividades individuales y sociales, trabajando decididamente para poner fin a la creciente degradación socioambiental y avanzar hacia el logro de unos Objetivos de desarrollo sostenible (ODS), científicamente fundamentados y aprobados por la Asamblea General de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015). A ello responde el crecimiento en el número de trabajos científicos que se ocupan del Antropoceno (Chin et al., 2016), tanto en nuevas publicaciones (*Anthropocene*, *Anthropocene Science...*) como en muchas de las revistas científicas y educativas ya existentes.

Los numerosos debates en torno al concepto de Antropoceno de los últimos años están favoreciendo sin duda la reflexión sobre los grandes cambios producidos por la especie humana y la necesidad de actuar con urgencia, por lo que constituyen una notable contribución al estudio de las relaciones ciencia-tecnología-sociedad-ambiente (CTSA) y a la comprensión de la necesidad de romper con comportamientos humanos que han conducido a una situación de crisis global que exige comprometernos decididamente en su superación. Se trata, en definitiva, de convertir los riesgos del Antropoceno en oportunidad de progreso para el conjunto de la humanidad. Una idea expuesta ya en un trabajo anterior publicado en *Educación Química* (Vilches y Gil Pérez, 2021) y en la que se intenta profundizar aquí, abordando las preguntas formuladas en la Introducción.

2. ¿Qué papel ha jugado y sigue jugando la actividad química en la creación de la actual situación de emergencia planetaria?

En trabajos precedentes publicados en esta misma revista ya se ha señalado la necesidad de corregir la atribución del origen de muchos de los problemas actuales a los que se enfrenta la humanidad, a la actividad de la química y, más en general, a la de la ciencia y la tecnología (Vilches y Gil Pérez, 2011). Se trata de una simplificación en la que es muy fácil caer, porque la ciencia y la tecnología y en particular la química lo impregnán todo, formando parte de nuestras vidas. Es difícil encontrar algo que se pueda caracterizar como positivo o negativo en lo que no estén jugando un papel. Muchos de los avances que han posibilitado y facilitado nuestro desarrollo como especie y la mejora de nuestra calidad de vida son o están relacionados con procesos químicos que hemos comprendido y desarrollado.

Sabemos que la química se ocupa, entre otras cosas, de la obtención de muchos productos que han contribuido a mejorar nuestras vidas. Pero vinculado a este desarrollo

tiene lugar un aumento del consumo de materiales y recursos energéticos, así como la producción de residuos muchos de ellos contaminantes que resultan perjudiciales tanto para el medioambiente como para los seres vivos que formamos parte de él. Efectos que hemos conocido y comenzado a estudiar hace solo unas décadas, como la destrucción de la capa de ozono, el incremento de los gases de efecto invernadero que está provocando una grave alteración del clima, o la liberación de contaminantes orgánicos persistentes, que pueden comportarse como disruptores endocrinos, etc.

Todo ello tiene mucho que ver con la química y las personas que trabajan en ese campo, pero su elaboración y su uso son responsabilidades que implican a toda la sociedad, a personas del ámbito empresarial, económico, político, etc. Las críticas y las rectificaciones han de extenderse a todas las personas, incluyendo a las consumidoras de los productos nocivos, aunque quienes trabajamos en este campo y muy particularmente los educadores y educadoras tenemos una especial responsabilidad en la crítica fundamentada y en la adopción de medidas correctoras. Porque sabemos que estos procesos y productos juegan un papel esencial en la situación de emergencia a la que se enfrenta la humanidad, es decir, en el conjunto de graves problemas interrelacionados, como la degradación generalizada de los ecosistemas, la crisis climática, el agotamiento y destrucción de recursos, la pérdida de biodiversidad, el incremento de las desigualdades extremas, las enfermedades o los conflictos bélicos, entre otros problemas socioambientales. Problemas que nos acercan peligrosamente a los límites planetarios (Rockström et al., 2009), cuyo conjunto constituye un marco donde la humanidad puede desenvolverse con seguridad (Folke, 2013), habiéndose incluso superado algunos de ellos, como la concentración atmosférica de dióxido de carbono o el ritmo de extinción de especies.

Es necesario prestar la debida atención a dichos límites, que no deben sobrepasarse si se quiere garantizar un entorno compatible con la sostenibilidad de las sociedades humanas. Se han estudiado, entre otros, los siguientes (Rockström et al., 2009): la concentración de CO₂ en la atmósfera; el ritmo de extinción de la biodiversidad; los ciclos de nitrógeno y fósforo para fabricar abonos agrícolas; el agotamiento del ozono estratosférico; la acidificación de los océanos; la utilización de agua dulce, alterando los caudales de los ríos y agotando los depósitos subterráneos acumulados a lo largo de siglos; los cambios en el uso de los suelos, provocados principalmente por la expansión de la agricultura, con la reducción de bosques y selvas; la contaminación atmosférica por aerosoles como polvo, hollín o líquidos pulverizados; los contaminantes orgánicos persistentes, plásticos, metales pesados, residuos radiactivos, etc., que afectan ya a todo el planeta. Estos límites son interdependientes y la superación de uno de ellos favorece que se modifiquen y superen otros, por lo que es necesario evitar la extralimitación de cada uno de ellos.

Entre las actividades que llevan el avance hacia situaciones de riesgo, por acercarnos a dichos límites, podemos ver con claridad el papel jugado por la actividad química que nos ocupa aquí, pero, también, por la desarrollada desde otros ámbitos científicos y tecnológicos interaccionando con los sociales, impulsados por los comportamientos humanos depredadores a los que ya nos hemos referido. La complejidad de la situación y la estrecha vinculación entre los problemas impiden, como ya hemos señalado, atribuir exclusivamente la responsabilidad a una determinada área de conocimiento en el origen de los problemas o en las propuestas de solución.

Es cierto que hasta hace unas décadas no conocíamos su gravedad, pero lo más preocupante es que todavía hoy gran parte de la ciudadanía, incluyendo a docentes y a

personas que trabajan en campos científico-tecnológicos como la química, nos seguimos comportando como si continuásemos sin ser conscientes de esta grave crisis global y de las consecuencias de nuestras acciones, a pesar de los numerosos llamamientos de instituciones mundiales y de los abundantes informes científicos convergentes que vienen alertando desde hace décadas de su gravedad; llamamientos dirigidos muy particularmente a la educación (Comisión Mundial de Medioambiente y Desarrollo, 1988; Leal Filho, 2014; Naciones Unidas, 1992 y 2015; UNESCO, 2014 a y b; Worldwatch Institute, 1984-2017). Se trata de comportamientos fuertemente arraigados relacionados, como ya hemos señalado, con la búsqueda de beneficios particulares a corto plazo, que impulsan a continuar la extracción y uso de los recursos disponibles, sin pensar en su posible agotamiento, ni en las consecuencias contaminantes de los residuos producidos, como los relativos a la grave crisis climática; hábitos que, en un mundo finito, como es nuestro planeta, conducen a la destrucción de los recursos básicos y a la degradación de todos los ecosistemas, entre otros problemas.

La proclamación de 2011 como Año Internacional de la Química es un ejemplo relevante de la importancia de superar tópicos e incomprensiones hacia la química y su enseñanza, de la necesidad de hacer comprender el papel de la química en nuestra sociedad. Bajo el lema “Química, nuestra vida, nuestro futuro”, se pretendía concienciar al público sobre las contribuciones de la química al bienestar de la humanidad. Irina Bokova, directora general de la UNESCO en 2011, insistía en la importancia de sensibilizar a la ciudadanía sobre la importancia de las ciencias químicas, por los desafíos que debe afrontar la sostenibilidad, resaltando que la química desempeña un papel esencial en el desarrollo de fuentes alternativas de energía y en la alimentación de la creciente población mundial. En la misma dirección, el entonces presidente de la IUPAC señalaba que con la celebración de este Año Internacional de la Química se esperaba aumentar la apreciación pública y la comprensión de la química y en particular aumentar el interés de los jóvenes por la ciencia y generar entusiasmo por un futuro de creatividad relacionada con la química.

Más de una década después, continúan siendo objetivos fundamentales, que expresan la necesidad de hacer comprender la relevancia de la ciencia y de la química en particular en nuestras sociedades, lo que ayudará a aumentar el interés de los estudiantes y mejorar sus actitudes hacia su estudio (Cheung, 2009 a y b; Cheung, 2011; Coll, Dalgety y Salter, 2002; Garritz, 2011; Gräber, 2011; Hernández et al., 2022; Kousa, Kavonius y Aksela, 2018; Muñoz, Quintanilla y Manzanilla, 2019; Osborne, Simon y Collins, 2003; Vilches y Gil, 2011). Algo imprescindible ante el desafío al que nos enfrentamos es la construcción de sociedades sostenibles en las que la química y su enseñanza pueden y deben desempeñar un importante papel. Ello nos remite a la segunda cuestión formulada en este trabajo, relativa a las contribuciones de la actividad química a la necesaria transición a la sostenibilidad.

3. Química y sostenibilidad

Los graves problemas interconectados que constituyen la crisis global permiten comprender la insostenibilidad de la actual situación y exigen una profunda y urgente transición a condiciones de vida satisfactorias para el conjunto de los seres humanos, es decir, exigen la universalización de todos los derechos humanos, incluidos el derecho a la paz y a un ambiente saludable. ¿Qué medidas se requieren para hacer posible dicha transición? ¿Qué papel puede y debe jugar la química en ella?

Orígenes de la química para la sostenibilidad

En las últimas décadas se viene desarrollando con fuerza una corriente de química para la sostenibilidad, conocida inicialmente como “química verde” y también como “química sostenible” que estudia, entre otras cosas, cómo prevenir y mitigar la contaminación, cómo contribuir a la eficiencia de los procesos y, en definitiva, cómo proteger nuestra salud y nuestro entorno (Doria, 2009; Garritz, 2009 y 2011; Kümmerer, 2017; Mascarell y Vilches, 2016; Zuin et al., 2021). Basada en los principios enunciados por Anastas y Warner (1998) en su libro *Green Chemistry: Theory and Practice*, la química para la sostenibilidad pretende evitar los problemas antes de que ocurran, estando presente en todo el proceso de fabricación de los productos, desde su diseño hasta su utilización.

Los avances de la química para la sostenibilidad y su desarrollo actual se pueden visualizar en numerosos congresos específicos, en el impulso de centros de investigación y, particularmente, en las numerosas contribuciones a la sostenibilidad que en los diferentes ámbitos de la química están teniendo lugar (UNEP, 2019; Zimmerman et al., 2020). En ellas se constatan las aportaciones y proyectos en marcha y de futuro en campos como las síntesis orgánicas, los métodos analíticos ecológicos, el almacenamiento de energías renovables, la fotocatálisis, las nanotecnologías, el tratamiento y aprovechamiento de residuos, etc. Destaca en particular el desarrollo de los nanomateriales funcionales de carbono, los diseños moleculares de catalizadores, composites o resinas compuestas y, en general, los procesos catalíticos sostenibles (Kümmerer, 2017). Estos desarrollos están abriendo puertas a la síntesis sostenible de productos bioactivos con un enorme potencial para revolucionar industrias clave, como la alimentación, la bioeconomía y la gestión de recursos.

Así mismo, las contribuciones de este ámbito se constatan por el desarrollo de normativas como la *Estrategia sobre la sostenibilidad de las sustancias químicas* (2020) que estableció la Unión Europea a largo plazo para alcanzar un medio ambiente libre de tóxicos, en línea con los objetivos del Pacto Verde Europeo. En ella se reconoce el papel fundamental de las sustancias químicas en el bienestar de la sociedad y su función imprescindible como facilitadoras de una transición verde y digital. Al mismo tiempo, se subraya la necesidad de responder con mayor rapidez y eficiencia a los retos que las sustancias químicas peligrosas plantean para la salud y el medio ambiente.

La publicación *Química verde y sostenible* Manual de referencia del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2020) completa, actualiza y desarrolla los principios de este ámbito de la química. Se trata de un manual en el que han participado decenas de expertos; en él se hace un balance de la evolución y los avances de este campo, incluidas sus dimensiones científicas y sociales, fundamentando la química sostenible como resultado de la evolución de la química verde, con un planteamiento más holístico (Blum et al., 2017; Kümmerer, 2017). Su objetivo central es promover la innovación que supone todo el potencial de la química y contribuir a la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Premios Nobel de Química y sostenibilidad

Una breve revisión de los Premios Nobel de los últimos años ayuda a comprender la influencia creciente, la valorización y el desarrollo de este campo de la química. Así, el Nobel de Química de 2021, concedido a Benjamin List y David MacMillan, premió una

nueva herramienta para construir moléculas, la organocatálisis, que según se indicaba en la concesión es fundamental para la química verde ya que pretende reducir el impacto medioambiental de la producción de combustibles o de fármacos, contribuyendo a hacer una química más ecológica. Con esta técnica, se señala, se logran reacciones químicas que son precisas, baratas, rápidas y respetuosas con el medioambiente.

En 2022 el Premio Nobel se concedió a Carolyn Bertozzi, Morten Meldal y Barry Sharpless por una estrategia para conectar dos fragmentos moleculares sin que se forme ningún subproducto (química click y bioortogonal), minimizando al máximo los residuos (Chamizo, 2023). Con este procedimiento se trata de no desperdiciar materia evitando además etapas de purificación de los compuestos preparados.

En 2023 se otorgó a Moungi Bawendi, Louis Brus y Alexei Ekimov, por el estudio de los puntos cuánticos, tema clave en materia de nanotecnología. Se emplean en la preparación de paneles solares, en sistemas de iluminación de pantallas y televisiones basadas en tecnología QLED y en biomedicina, permitiendo la obtención de imágenes a nivel intracelular, muy útiles en el diagnóstico y en el tratamiento de enfermedades.

Y no hemos de olvidar, por supuesto, importantes precedentes como el Nobel concedido en 1995 a Frank Rowland, Mario Molina y Paul Crutzen, por sus investigaciones sobre el adelgazamiento de la capa de ozono causado por la emisión de gases como los clorofluorocarbonos. Investigaciones que hicieron posible posteriormente la firma del Protocolo de Montreal para su sustitución (Vilches y Gil Pérez, 2021).

Química y transiciones a la sostenibilidad

La necesidad de hacer frente a todos y cada uno de los problemas interconectados, que conforman la situación de emergencia planetaria del Antropoceno, requiere de un planteamiento globalizador que conduzca a concebir la transición a la sostenibilidad como un conjunto de transiciones vinculadas entre sí, todas ellas imprescindibles y fundamentadas en numerosos estudios convergentes, recogidos por una amplia literatura; unas transiciones que ponen de manifiesto el importante papel que la ciencia y la química en particular pueden jugar y que resumimos brevemente a continuación (Gil Pérez y Vilches, 2023; Vilches y Gil Pérez, 2021):

- **Transición a un consumo sostenible y accesible para todas las personas:** Es urgente adoptar estrategias de consumo responsable para reducir el actual ritmo de agotamiento de todo tipo de recursos esenciales. Esto implica, entre otros, la transformación del modelo alimentario de los países desarrollados, caracterizado por una agricultura intensiva que utiliza grandes cantidades de abonos y pesticidas, la refinación de numerosos productos, con pérdida de vitaminas, fibras y minerales y graves consecuencias para la salud, así como un desperdicio de alimentos que coexiste con hambrunas crónicas, etc.
- **Transición a una economía que utilice los residuos como recursos:** Un consumo responsable y sostenible exige una transición en la reducción y el tratamiento de los residuos para evitar que una contaminación pluriforme y sin fronteras continúe envenenando suelos, ríos, mares y aire, contribuyendo a la degradación de todos los ecosistemas. Se trata de tener en cuenta los objetivos de una economía circular, reincorporando los residuos como recursos, a la vez que

se pretende evitar sus efectos sobre la salud de los seres vivos y su contribución a sobrepassar los límites planetarios.

- **Transición energética para hacer frente al cambio climático:** Es urgente combatir el aumento de la concentración de CO₂ (uno de los límites planetarios lamentablemente ya superados), que ha dado lugar a la crisis climática que estamos padeciendo. Ello exige un modelo energético sostenible que conduzca a la descarbonización, sustituyendo el uso de combustibles fósiles por energías limpias y renovables, incrementando la eficiencia de aparatos y procesos y el ahorro energético.
- **Transición urbana y rural:** Los problemas de agotamiento de recursos y producción de residuos citados se han visto potenciados por una urbanización acelerada y desordenada, acompañada del abandono del mundo rural. Se precisa una transición que transforme las ciudades en espacios saludables que contribuyan a la sostenibilidad, evitando su crecimiento acelerado y favoreciendo su conexión con las zonas rurales debidamente protegidas. Cerca de la mitad de la población mundial vive en medios rurales en los que a menudo son conculcados los derechos más básicos, lo que demanda una nueva cultura rural. Ciudades y zonas rurales han de verse libres de productos contaminantes que vulneran gravemente el derecho a un ambiente saludable.
- **Transición demográfica:** Es necesaria una transición demográfica que evite la superación de la capacidad de carga del planeta y sus consecuencias como el agotamiento de muchos recursos esenciales y la producción de residuos a un ritmo superior a la capacidad del planeta para digerirlos. Ello exige facilitar los medios que hagan posible una maternidad y paternidad responsables.
- **Transición desde el antropocentrismo al biocentrismo:** Para la protección de la biodiversidad y evitar la destrucción de los ecosistemas como consecuencia del aumento de población, la contaminación debida en particular a la actividad industrial y la degradación ambiental que generan las actividades depredadoras de nuestra especie se necesita la transición de un antropocentrismo que es perjudicial para el resto de la biosfera, y para nuestra propia especie, a un biocentrismo que reconozca nuestra dependencia de los servicios sistémicos proporcionados por la biodiversidad de la que formamos parte.
- **Transición desde la uniformización cultural a la protección de su diversidad:** Junto a la biodiversidad, también está en peligro la diversidad cultural a causa de una uniformización forzada comercial y políticamente, que se traduce en extinción de lenguas y adquisiciones culturales milenarias con las que las sociedades se han cohesionado y han ido haciendo frente a todo tipo de necesidades, como la obtención de alimentos, la mejora de los procesos de producción, almacenamiento y conservación e incremento de su vida útil, la protección frente a las inclemencias atmosféricas, la respuesta a las enfermedades, etc. Se precisa una transición a la protección de la diversidad cultural, reconociendo que cada cultura es una riqueza no solo para el pueblo que la ha creado sino para toda la humanidad.

- **Transición científico-tecnológica:** Muchas innovaciones y avances han respondido y responden hoy a intereses particulares a corto plazo, perjudicando al resto de la población, a través de la degradación ambiental. Se precisa por tanto una transición científico-tecnológica para favorecer al conjunto de la población presente y futura, buscando que los avances y las innovaciones introducidas sean sostenibles y justas, evitando dejar atrás a quienes trabajaban en tecnologías obsoletas y satisfaciendo los derechos fundamentales de la ciudadanía. Son ejemplos en esta dirección los avances en el desarrollo de las energías renovables, la edificación ecológica, la protección y restauración de los ecosistemas, etc., garantizando el acceso a servicios públicos fundamentales, como la salud y la educación, y a potenciar la producción y difusión cultural, como alternativa al insostenible consumismo de bienes materiales. En muchos de ellos es patente el papel de la actividad química en colaboración con otros campos como la física, la ingeniería, la tecnología, las ciencias sociales, etc.
- **Transición hacia una gobernanza plenamente democrática:** Para hacer frente al conjunto de problemas glocales a los que se enfrenta la humanidad, se precisa una gobernanza, desde el nivel local al planetario, que anteponga la cooperación y la universalización de los derechos humanos a la defensa de intereses particulares a corto plazo. Una transición hacia un modelo productivo basado en el bien común, que anteponga la protección de unos Bienes Comunes Planetarios (Rockström et al., 2024), sin paraísos fiscales, sin transgresión de los límites del planeta, atendiendo a sus repercusiones ambientales y sociales en un planeta de recursos finitos, respetuoso de la diversidad biológica y cultural y de las tres generaciones de derechos humanos, poniendo fin a los desequilibrios insolidarios, apostando por una seguridad compartida que supere la habitual búsqueda de la propia seguridad contra otros, causante de conflictos bélicos destructivos y de carreras armamentísticas con elevados presupuestos detraídos de objetivos esenciales.

Por último, pero igualmente importante, se precisa atender al papel de la educación en este conjunto de transiciones, estrechamente vinculadas entre sí.

- **Transición educativa que impulse la educación para la sostenibilidad:** Junto a las demás transiciones, relacionadas con medidas científico-tecnológicas y políticas, se precisa una transición educativa que impulse una educación para la sostenibilidad (EDS) que haga posible la imprescindible implicación ciudadana en esta profunda transformación del Antropoceno para hacer frente a la actual emergencia planetaria y lograr una transición a sociedades sostenibles. Una transición que no solo precisa de educación formal en los centros educativos en todos los niveles y materias, sino que ha de extenderse a los medios de comunicación, museos, documentales, etc., así como también a nuestras relaciones sociales y familiares, para contribuir a generalizar una percepción holística adecuada de la situación del mundo, sus causas y medidas que se requiere adoptar.

En el próximo apartado nos centraremos en la atención que ha prestado y debe prestar la educación química a esta problemática.

4. Química y educación para la sostenibilidad en el Antropoceno

Es creciente la importancia dada a la química para la sostenibilidad en el campo educativo en las últimas décadas, como puede verse en las numerosas contribuciones que se han venido publicando en revistas de educación científica. Así en 2013, Educación Química publicó un número especial centrado en la química verde, campo al que ya había dedicado varios trabajos en el número 4 del año 2009 y en otros números sucesivos. Se pretendía difundir entre estudiantes y docentes sus principios, así como los avances y los retos, mostrando su importancia y la necesidad de su impulso en el campo de la educación y en particular en la enseñanza de las ciencias.

También es patente el número de cursos y estudios de posgrado ofertados sobre química verde por diferentes universidades (De la Hoz, 2009; Mascarell y Vilches 2016). En ellos se pretende que los estudiantes adquieran los conocimientos básicos de los principios de la química sostenible y de su aplicación en los procesos químicos industriales, que conozcan las herramientas y las áreas generales de trabajo de la química para la sostenibilidad y que puedan comprender y valorar adecuadamente procesos industriales en los que se cumplen sus principios.

Educación química en el marco de la ciencia de la sostenibilidad y los ODS

Son muchos y diversos los campos de conocimiento que están contribuyendo desde hace tiempo al tratamiento de los problemas socioambientales, también desde el ámbito educativo como los centrados en las interacciones CTSA. Nos hemos referido en particular a la química y su papel en el avance a la sostenibilidad, pero las estrechas vinculaciones entre los problemas requieren integrar las aportaciones a la sostenibilidad de las distintas disciplinas científicas, desarrollos tecnológicos, corrientes de pensamiento, movimientos sociales, etc., que habitualmente han abordado separadamente los diversos problemas socioambientales.

Esta es la razón del surgimiento y desarrollo de la ciencia de la sostenibilidad, que integra campos de pensamiento y acción, hasta hace poco inconexos. Una ciencia que constituye un nuevo paradigma, una nueva orientación cuyas características de inter y transdisciplinariedad y planteamientos glocales, en una perspectiva temporal amplia, han de impregnar el trabajo de los diferentes campos de conocimiento, la enseñanza de la química y de las demás disciplinas, para contribuir a poner fin a la actual situación insostenible y avanzar en la transición a la sostenibilidad (Vilches y Gil-Pérez, 2021).

Se trata de unas características que están presentes e impulsan los 17 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS, 2015-2030), a los que ya nos hemos referido, y las 169 Metas asociadas de carácter integrador, así como la Agenda 2030 para su puesta en marcha. Unos objetivos universales que pretenden dar respuesta al conjunto de graves problemas interconectados a los que ha de hacer frente la humanidad, evitando que el olvido de alguno de ellos impida avances reales en el conjunto.

Los ODS están estrechamente relacionados con la educación, no solo a través de la importancia directa del ODS 4 (educación de calidad), sino como un medio y un fin imprescindible para el avance hacia el logro de todos ellos. En particular, la Meta 4.7 (educación para el desarrollo sostenible) se vincula directamente con la necesidad de incorporar la química verde y sostenible en los planes de estudio. Conviene resaltar el papel de la química en los avances y tenerlo en cuenta en su enseñanza, como instrumento

esencial para favorecer la atención a los problemas a los que la humanidad ha de hacer frente y la implicación del alumnado en su logro. Merece la pena mostrar algunos ejemplos de las estrechas vinculaciones entre la química y su enseñanza por un lado y los ODS por otro (UNEP, 2023).

Tal como se señala en el Manual de la UNEP (2023), la gestión racional de los productos químicos y los desechos guarda estrecha relación con los 17 ODS ya que proporciona orientación en convergencia con los objetivos de la química sostenible. Así, por poner algunos ejemplos, las Metas 12.4 (gestión racional de los productos químicos y de los desechos a lo largo de su ciclo de vida, según normativas internacionales y reducción de su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo para minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente) y 3.9 (reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo) tienen importancia directa para una serie de cuestiones relacionadas con la gestión de productos químicos y residuos, lo mismo que la Meta 12.2 (uso sostenible de los recursos naturales), que precisa una buena gestión de los residuos mineros y su reutilización.

Del mismo modo, son relevantes los ODS 8 y 9, que fomentan la construcción de infraestructuras sostenibles, muchas de ellas vinculadas a la actividad química, contribuyendo además a la generación de empleo. Otros ODS se relacionan con temas de seguridad alimentaria y sanitaria, por ejemplo, la Meta 6.3 sobre la mejora de la calidad del agua. La Meta 7a (investigación y tecnología relativas a la energía limpia) impulsa la mejora de tecnologías utilizando materiales sostenibles y eficientes para la descarbonización del sector energético. En la Meta 2.4 (producción sostenible de alimentos), podemos ver oportunidades para la innovación en torno a la gestión integrada de plagas y enfoques agroecológicos, con inclusión del desarrollo de buenas prácticas agrícolas. La Meta 17.3 (recursos financieros de múltiples fuentes) se ve impulsada por el uso de indicadores de química verde como criterios para la inversión.

Como se puede ver en estos ejemplos, muchos ODS y sus Metas tienen una relevancia directa para los sectores que utilizan habitualmente diferentes sustancias químicas, como los relacionados con el acceso a los alimentos, la energía limpia o la vivienda y ciudades sostenibles y seguras. Todos los ODS y sus Metas tienen en común el hecho de que no es posible su consecución sin una gestión racional de los productos químicos y los residuos, y sin innovaciones sostenibles en el ámbito de la química (UNEP, 2019).

La enseñanza de la química debe prestar atención al logro de los ODS, abordando y profundizando en los diferentes niveles educativos en las numerosas ocasiones y oportunidades que ofrece. La química y su enseñanza han de implicarse en estos desafíos, en el marco de la ciencia de la sostenibilidad y los ODS; una necesidad urgente para hacer posible la transición a sociedades más justas y sostenibles evitando la superación de los límites planetarios (Vilches y Gil Pérez, 2021).

Educación química para la sostenibilidad en el Antropoceno

Desde el punto de vista educativo, son muchas las tareas que se pueden desarrollar con el fin de contribuir a la implicación ciudadana en las medidas que se deben y pueden adoptar frente a la grave crisis socioambiental. Una fundamental, en la que se han ido dando pasos positivos en los últimos años, es la incorporación de esta problemática en los currículos de los distintos niveles, incluido el universitario y la formación del profesorado. A este respecto

es importante tener en cuenta los ejemplos de propuestas y de intervenciones educativas que muestren resultados positivos cuando se llevan a cabo en el aula con estudiantes y docentes en formación, con metodologías fundamentadas en la investigación didáctica que contribuyan a la implicación ciudadana (Meinguer y Pérez, 2021; Vilches y Gil Pérez, 2013 y 2021).

En el marco de la ciencia de la sostenibilidad, para el caso de la enseñanza de la química, son muchas las ocasiones en las que se puede, y se considera necesario, abordar los problemas a los que la humanidad ha de hacer frente y a las medidas para contribuir a su superación, vinculándolas a los ODS y sus Metas como hemos visto, mostrando el relevante papel que la química juega y debe jugar en su puesta en marcha.

Podemos referirnos, entre los numerosos ejemplos, a la contaminación sin fronteras que acompaña a las actividades humanas, en sus diferentes formas (debida a gases tóxicos, residuos radiactivos, vertidos industriales y urbanos, metales pesados, plásticos, etc.), y sus consecuencias (lluvia ácida, adelgazamiento de la capa de ozono, la grave crisis climática que ya estamos viviendo, etc.), así como a las medidas que se plantean desde la química para contribuir a su superación. Son problemas y medidas que se pueden abordar al estudiar la química de la atmósfera, las propiedades de las sustancias, el comportamiento de los gases, el papel de la energía en las transformaciones, la teoría cinético molecular, las reacciones químicas (en particular las redox y ácido base), la termoquímica (pilas, baterías...), el equilibrio químico, la industria química, las materias primas, las síntesis orgánicas, los hidrocarburos, las macromoléculas, los nuevos materiales...

Lo mismo sucede con el problema del agotamiento de los recursos, a cuyo tratamiento tanto se presta el currículo de química, así como las medidas que se ofrecen desde la química, cuando se estudian las fuentes fósiles de energía en química orgánica e industrial, o en las síntesis de sustancias de interés y la necesidad de materias primas y otros temas vinculados con el problema de la contaminación ambiental y sus consecuencias. En realidad, es bastante difícil encontrar un capítulo del currículum de química de cualquier nivel educativo que no se preste para estudiar los problemas ligados a la situación del mundo y a las medidas que se deben adoptar.

Por mencionar otros ejemplos, en el tratamiento de las reacciones redox y ácido-base se deben analizar sus repercusiones en diferentes ámbitos (origen y efectos de la acidificación de los océanos, de suelos, lluvia ácida, relación con el agotamiento de recursos, problemas de las ciudades, hiperconsumo, modelo productivo, procesos contaminantes, formación del ozono...). Se deben abordar medidas desde el campo de la química como la reducción de toxicidad mediante procesos redox, reducción hidrolítica en las aguas subterráneas, procesos de obtención y transformación según los principios de la química sostenible, uso de energía renovable, eficiencia, reducción de sustancias auxiliares, tóxicas, etc. Y aprovechar estas ocasiones para mostrar la vinculación con otros problemas, y la necesidad no solo de medidas desde el campo de la química, o de la ciencia y la tecnología en general, sino también desde la política, la economía y la educación.

Al abordar el estudio de los elementos químicos, es de gran ayuda asomarse a la *Tabla periódica de los elementos amenazados* y su evolución (European Chemical Society, 2023). Una tabla que, por ejemplo, debido al comportamiento de la extracción del litio, en 2023 se cambió de amarillo a naranja, porque se prevé que su extracción y uso aumenten drásticamente en los próximos años debido a la producción de baterías de iones de litio, que se utilizarán principalmente en el sector del automóvil. Paralelamente puede ser muy

útil utilizar la *Tabla periódica de los elementos de la química verde y sostenible* elaborada recientemente para facilitar los avances logrados hasta el momento en el ámbito de la química para sostenibilidad (Anastas y Zimmerman, 2019).

El tratamiento de estas cuestiones se hace imprescindible si se pretende lograr un aprendizaje significativo que contribuya, como se ha señalado, a la formación de una ciudadanía responsable y a despertar el interés de los estudiantes hacia la química y su enseñanza. Un tratamiento que, como se ha puesto de manifiesto en trabajos anteriores, no se limite a abordar de manera puntual algunos problemas y las posibles medidas, sino que estudie globalmente dicha problemática, debido a su carácter sistémico, mostrando las estrechas vinculaciones de los problemas y cómo se potencian mutuamente (Vilches y Gil Pérez, 2011 y 2021).

En ese sentido, en trabajos precedentes ya se fundamentaba que la enseñanza de la química es una herramienta privilegiada para adquirir una visión global de los problemas y desafíos a los que nos enfrentamos, refiriéndonos a estrategias puestas en marcha y que han dado excelentes resultados. Es posible, en efecto, abordar con facilidad las estrechas vinculaciones de estos problemas y cómo se potencian mutuamente, así como resaltar el papel que la química juega y debe jugar en las medidas que se precisan, partiendo de preguntas de interés como: ¿Cuáles pueden ser los problemas asociados a la obtención y uso de la energía? o ¿Cuáles pueden ser los problemas asociados a la síntesis de sustancias químicas? (Mascarell y Vilches, 2016; Vilches y Gil Pérez 2011).

Estas preguntas, que surgen fácilmente al estudiar los correspondientes temas de química, se pueden completar incorporando otras que se vienen formulando desde diferentes ámbitos sociales, económicos y científico-tecnológicos, como: ¿Disponemos de suficientes materiales y sustancias que son indispensables para las nuevas tecnologías? ¿Cómo obtenerlos y disponer de ellos de forma justa y sin dañar el medio ambiente?

El coltán, las tierras raras, el cobalto, el níquel y el litio, entre otros, son materiales imprescindibles para la conectividad y avanzar en la denominada revolución verde. Pero no solo es importante conocer sus propiedades y reactividad, sus aplicaciones... ¿qué sabemos acerca de su disponibilidad, de cómo afecta su extracción al medio ambiente o a los habitantes de las zonas de extracción? Son denominados críticos por su escasez y la demanda creciente de los mismos.

En la enseñanza de la química en el Antropoceno, es necesario plantearnos el reto que supone responder a preguntas como estas. Es imprescindible reflexionar con el alumnado en torno a la importancia de vigilar cómo llegan a nuestros aparatos estos materiales. No podemos aceptar que el tántalo de nuestros móviles, el cobalto de nuestras baterías, el neodimio de nuestros aerogeneradores y motores eléctricos, etc., se sigan extrayendo sin los necesarios controles socioambientales, e incluso a menudo con explotación infantil. Se denuncia continuamente que fabricantes de dispositivos y coches eléctricos se aprovechan de las condiciones infrahumanas e incluso violentas de la minería de cobalto en el Congo, por ejemplo, de donde proviene el 75% de este mineral a nivel mundial. Hemos de ser conscientes de que millones de árboles han sido talados y se contamina el agua y la tierra por los residuos tóxicos de las instalaciones de procesamiento. Son consecuencias derivadas del uso de nuestros dispositivos y hemos de reflexionar y responder como ciudadanía activa y responsable para frenar estas prácticas. Hay que impulsar el reciclaje con métodos sostenibles, alargar la vida útil de los aparatos y recurrir a las tecnologías

eólicas y fotovoltaicas y, sobre todo, es necesario el ahorro, el consumo responsable, reducir la demanda y contribuir así a una transición justa y respetuosa con el medioambiente y las personas. Es preciso exigir mayor transparencia y un cambio de modelo del sector minero, hacia la minería sostenible, que permita la extracción de estos recursos cumpliendo estándares de calidad que garanticen la preservación y recuperación de los Bienes Comunes Planetarios (Rockström et al., 2024) y el respeto de todos los derechos humanos. La certificación de la minería verde o sostenible incluye acciones específicas como el uso de energías renovables en todo el proceso productivo, eficiencia en el uso de los recursos hídricos y en la recuperación y el reciclado de pasivos y residuos mineros.

Los avances en las reformas de los planes de estudio y la formación del profesorado son dos vías fundamentales para lograr los cambios que se requieren en la educación y en la enseñanza de la química en particular, porque, como se ha señalado, todas las etapas educativas presentan oportunidades para la educación para la sostenibilidad y las aportaciones de la química sostenible. La EDS y la atención a los ODS se están teniendo en cuenta en numerosos países con su inclusión en la educación básica y secundaria, por lo que se refiere a las competencias, objetivos y contenidos, así como en la universidad, con la incorporación en materias de grados, en los postgrados y máster, en la formación del profesorado, y en general con una mayor sostenibilización de los centros (Calero et al., 2019).

Existen investigaciones centradas en las visiones de estudiantes y docentes sobre química sostenible en las que, sin embargo, se ha detectado un escaso conocimiento de este ámbito de la química; como consecuencia se han llevado adelante propuestas de materiales para trabajar con estudiantes de secundaria en diferentes temas del currículo con resultados muy positivos (Mascarell, 2017). Del mismo modo se han propuesto cursos para el profesorado de secundaria en formación sobre química y EDS con materiales específicos y propuestas de intervención en química para la sostenibilidad, para el aula de secundaria (Mascarell y Vilches, 2016). A nivel internacional, podemos destacar un curso que fue el producto final de un proyecto de la IUPAC diseñado para introducir la química sostenible en la enseñanza superior. Pretende ayudar a docentes de secundaria a promover la alfabetización científica y la concienciación en particular sobre el papel de la química sostenible, con estudios de casos. En los dos primeros años desde su lanzamiento en 2019, unos 3600 docentes habían completado el curso (Zuin et al., 2021).

Hemos mencionado en este apartado algunos ejemplos para la incorporación de la química sostenible en la enseñanza de la química, que pueden contribuir a comprender su importancia mostrando su vinculación en las medidas necesarias y a su vez en la consecución de los diferentes ODS relacionados.

Pasaremos ahora a recapitular las principales conclusiones alcanzadas en esta revisión del papel de la química en la creación de la situación de emergencia planetaria, característica hoy del Antropoceno, y en la contribución de la química y la educación química a su superación para avanzar en la transición a sociedades sostenibles.

5. Algunas conclusiones y perspectivas de continuidad necesaria

Hemos señalado cómo los positivos esfuerzos con los que se ha contribuido, desde la actividad química, a lograr productos y desarrollar procesos diseñados para mejorar nuestras vidas, han ido acompañados, a menudo, de repercusiones negativas, tanto por lo que supone el agotamiento de recursos imprescindibles, pero finitos, como por la creación

de residuos perjudiciales para la biosfera y medioambiente de los que depende nuestra existencia. Ello ha llevado a la comunidad científica, así como a colectivos bien informados (organizaciones no gubernamentales, grupos ecologistas, asociaciones educativas, etc.) a poner en cuestión, fundamentadamente, algunas de las innovaciones puestas en marcha, cuando están orientadas por intereses particulares, obviando el interés general. Un cuestionamiento que debe ser apoyado, evitando caer en injustificados rechazos globales de la actividad química o, más en general, tecnocientífica. El papel de la educación química y de la propia comunidad científica es fundamental en este sentido.

Un ejemplo especialmente relevante de comportamiento en el que convergen coherentemente actividad investigadora, responsabilidad social y educación ciudadana, lo encontramos en la labor de Mario Molina que estudió, junto a Frank Rowland y Paul Crutzen, el grave debilitamiento de la capa de ozono estratosférico provocado por los compuestos cloro-flúor-carbonados (CFC), que estaban siendo ampliamente utilizados, por ejemplo, en sistemas de refrigeración (Vilches y Gil Pérez, 2021). Por esta investigación los tres recibieron el Premio Nobel de Química en 1995, pero su importancia se multiplicó gracias a la actividad educativa y ciudadana para lograr un acuerdo mundial para la sustitución de los CFC por otras sustancias menos dañinas para la capa de ozono que protege la biosfera. Fue necesario para ello una amplia movilización ciudadana fundamentada en estudios científicos y desmontar la resistencia de los fabricantes de los CFC, algunos de los cuales llegaron incluso a pagar estudios amañados para desvalorizar los hallazgos científicos que justificaban su eliminación.

Nos encontramos aquí con un problema reiterado a lo largo de la historia del desarrollo científico-tecnológico, como muestra el negacionismo climático de grandes petroleras como Exxon o Shell que conociendo desde hace décadas las consecuencias del uso de los combustibles fósiles las ocultaron e incluso sembraron dudas acerca de los estudios científicos, en defensa de sus intereses económicos a corto plazo, poniendo en peligro al conjunto de la humanidad (Franta, 2018).

Los investigadores y educadores estamos obligados a dar a conocer hechos como estos y a concitar el mayor apoyo posible de una ciudadanía bien informada para que se adopten cuanto antes las necesarias medidas correctoras, contra el negacionismo y también contra el “retardismo” de quienes, sin atreverse a apoyar el negacionismo, pretenden posponer la adopción de medidas que deberían ser aplicadas con la máxima urgencia. Como aliados de este retardismo, se aduce hoy, entre otros, la prioridad de los conflictos bélicos, pese a que, como fundamentó la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo (1988) y se sigue poniendo de manifiesto, lamentablemente, en la actualidad, las guerras constituyen la actividad humana más contaminante y destructiva de recursos.

En este mundo que se enfrenta a una crisis global se continuarán precisando materiales para los que se utilizan sustancias químicas en cantidades significativas que, debido a una población creciente, no dejarán de aumentar. Para evitar superar los límites planetarios, desde el campo educativo será necesario una mayor atención a las interacciones CTSA y sobre todo a la EDS como objetivo clave en la formación de la ciudadanía y, muy en particular, de los futuros profesionales y educadores. De hecho, el tema de la enseñanza de la química sostenible está cobrando un impulso significativo. En una encuesta internacional realizada por Students Organizing for Sustainability (SOS), el 92% de los entrevistados afirmaron que el desarrollo sostenible debería enseñarse y promoverse universalmente en las universidades (SOS, 2020). El alumnado debe conocer y ser capaz de debatir diferentes

aspectos específicos de la sostenibilidad, en particular de la química sostenible, en el marco de la ciencia de la sostenibilidad y de los ODS. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible constituye un motor importante para movilizar el compromiso que se precisa.

Somos conscientes de que se ha avanzado mucho, pero el agravamiento de la crisis global indica que queda mucho por hacer. Todos los educadores, de cualquier área y nivel, particularmente quienes nos interesamos por las relaciones CTSA, tenemos una especial responsabilidad en contribuir a que el alumnado y toda la sociedad ejerzan una presión positiva para avanzar en el logro de los ODS. Debemos implicarnos plenamente en la formación de una ciudadanía consciente de los problemas a los que ha de hacer frente la humanidad y preparada para la toma de decisiones fundamentadas.

Es preciso integrar en nuestras actividades docentes e investigadoras los ODS, promovidos por la Agenda 2030. Es necesario prestar atención desde el ODS 4 al resto de ODS, en la enseñanza de la química, contribuyendo a la ciencia de la sostenibilidad. Tarea esta que puede ser facilitada, como hemos señalado, por la enseñanza de la química, que ofrece numerosas ocasiones para su tratamiento; un reto que puede y debe contribuir a despertar el interés de los estudiantes hacia la química, mejorando su aprendizaje. En definitiva, es urgente una acción continuada e intensa de la comunidad científica, la educativa, instituciones cívicas, medios de difusión, etc., hasta lograr un clima de implicación ciudadana para la transición a la sostenibilidad que se imponga a intereses particulares a corto plazo. Y en todo ello la química y su enseñanza han de jugar un importante papel.

Las referencias al Antropoceno pueden adquirir así el valor positivo de una plena comprensión de una situación de extrema gravedad y del inicio de un cambio civilizatorio capaz de lograr la transición a sociedades sostenibles en las que se vean potenciados los Bienes Comunes Planetarios (Rockström et al., 2024) y universalizado el conjunto de los derechos humanos, sin discriminaciones ni confrontaciones destructivas.

Referencias

- Anastas, P.T. y Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford Univ. Press.
- Anastas, P.T. y Zimmerman, J.B. (2019). The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/c9gc01293a>.
- Bermúdez de Castro, J.M. (2021). *Dioses y Mendigos: La gran odisea de la evolución humana*. Planeta.
- Blum, C., Bunke, D., Hungsberg, M., Roelofs, E., Joas, A., Joas, R., Blepp, M. y Stolzenberg, H.C. (2017). The concept of sustainable chemistry: key drivers for the transition towards sustainable development. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 5, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.01.001>.
- Calero, M., Mayoral, O., Ull, A. y Vilches, A. (2019). La educación para la sostenibilidad en la formación del profesorado de ciencias experimentales en Secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 37(1), 157-175. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2605>.
- Chamizo, J.A. (2023). Filosofía de la química II. Sobre el estilo de pensamiento de las prácticas químicas, *Educación Química* 34 (4), 16-35. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86592>.

- Cheung, D. (2009a). Developing a scale to measure students' attitudes toward chemistry lessons. *International Journal of Science Education*, 31 (16), 2185-2203. <https://doi.org/10.1080/09500690802189799>.
- Cheung, D. (2009b). Students' attitudes toward chemistry lessons: The interaction effect between grade level and gender. *Research in Science Education*, 39 (1), 75-91. <https://doi.org/10.1007/s11165-007-9075-4>.
- Cheung, D. (2011). Evaluating Student Attitudes toward Chemistry Lessons to Enhance Teaching in the Secondary School, *Educación Química*, 22 (2), 117-122. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30123-X](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30123-X).
- Chin, A., Gillson, L., Quiring, S. M., Nelson, D. R., Taylor, M. P., Vanacker, V. y Lovegrove, D. (2016). An evolving Anthropocene for science and society. *Anthropocene*, 13, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.05.002>.
- CMMAD (Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo) (1988). *Nuestro Futuro Común*. Alianza.
- Coll, R. K., Dalgety, J. y Salter, D. (2002). The development of the chemistry attitudes and experiences questionnaire (CAEQ). *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, 3(1), 19-32. <https://doi.org/10.1039/B1RP90038B>.
- De la Hoz, A. (2009). Los estudios de posgrado en Química Sostenible en España, *Educación Química*, 20, 4, 405-411. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30043-0](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30043-0).
- Doria, M. C. (2009). Química Verde. Un nuevo enfoque para el cuidado del medioambiente, *Educación Química*, 20 (4), 412-420. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30044-2](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30044-2).
- Erlandson, J.M. y Braje, T.J. (2013). Archeology and the Anthropocene, *Anthropocene*, 4, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.05.003>.
- European Chemical Society (2023). *The 90 natural elements that make up everything. How much is there? Is that enough? Is that sustainable?* Consultado en marzo 2024 en la URL <https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/>.
- Folke, C. (2013). Respetar los límites del planeta y recuperar la conexión con la biosfera, en The Worldwatch Institute, La situación del mundo 2013. *¿Es aún posible lograr la Sostenibilidad?* Icaria.
- Franta, B. (2018). Early oil industry knowledge of CO₂ and global warming. *Nature Clim Change* 8, 1024-1025. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0349-9>.
- Garritz, A. (2009). Química Verde y reducción de riesgos. *Educación Química*, 20 (4), 394-397. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30041-7](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30041-7).
- Garritz, A. (2011). Actitudes hacia la enseñanza/aprendizaje de la química. La celebración del Año Internacional de la Química. *Educación Química*, 22 (2), 86-89. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30120-4](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30120-4).
- Gibbard, P., Bauer, A., Edgeworth, M., Ruddiman, W., Gill, J., Merritts, D., Finney, S., Edwards,

- L., Walker, M., Maslin, M. y Ellis, L. (2022). A practical solution: the Anthropocene is a geological event, not a formal epoch, *Episodes Journal of International Geoscience*, 45(4), 349-357. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2021/021029>.
- Gil Pérez, D. y Vilches, A. (2023). Cómo avanzar en la necesaria Transición a la Sostenibilidad, *Ciência & Educação, Bauru*, v. 29, e23027, 2023. <https://doi.org/10.1590/1516-731320230027>.
- Gräber, W. (2011). German High school students' interest in Chemistry. A comparison between 1990 and 2008, *Educación Química*, 22 (2), 134-140. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30125-3](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30125-3).
- Hernández Montes, L. E., Ferreira Campos, R. A., Contreras Sanzana, G. y Rodríguez Rodríguez, M. C. (2022). Actitudes hacia la química de estudiantes chilenos de secundaria: un estudio de métodos mixtos. *Enseñanza de las Ciencias*, 40(2), 89-107. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3497>.
- Kousa, P., Kavonius, R. y Aksela, M. (2018). Low-achieving students' attitudes towards learning chemistry and chemistry teaching methods. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(2), 431-441. <https://doi.org/10.1039/C7RP00226B>.
- Kümmerer, K. (2017). Sustainable chemistry: a future guiding principle. *Angewandte Chemie International Edition* 56(52), 16420-16421. <https://doi.org/10.1002/anie.201709949>
- Leal Filho, W. (2014). The United Nations decade of education for sustainable development: lessons learnt and needs to be met. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 15 (2). <https://doi.org/10.1108/IJSHE-01-2014-0001>.
- Mascarell, L. (2017). *Química Verda i Sostenibilitat en l'Educació Científica*, Programa de Doctorat en Didàctiques Específiques de la UV, Especialitat Ciències Experimentals. Tesi Doctoral.
- Mascarell, L. y Vilches, A. (2016). Química Verde y Sostenibilidad en la Educación en Ciencias en Secundaria, *Enseñanza de las Ciencias*, 34 (2), 25-42. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1688>.
- Meinguer, J. y Pérez, M.C. (2021). Desarrollo y evaluación de elementos de pensamiento crítico sobre la química verde en el bachillerato. *Investigación en la Escuela*, 103, 106-124. <http://dx.doi.org/10.12795/IE.2021.i103.08>.
- Muñoz, D., Quintanilla, M. R. y Manzanilla, M. A. (2019). Construcción y validación preliminar de un instrumento de evaluación de actitudes hacia la clase de química para estudiantes de educación media. *Educación Química*, 30(1), 121-135-135. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.1.65592>.
- Naciones Unidas (1992). *Conference on Environment and Development, Agenda 21 Rio Declaration, Forest Principles*. UNESCO.
- Naciones Unidas (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*. A/69/L85. Consultado marzo 2024 en la URL https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf.

- Osborne, J., Simon, S. y Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25, 1049-1079. <https://doi.org/10.1080/0950069032000032199>.
- Raihani, N. (2021). *The Social Instinct. What Nature can teach us about working together*. Penguin Random House UK.
- Riechmann, J. (2009). *La habitación de Pascal. Ensayos para fundamentar éticas de suficiencia y políticas de autocontención*. Catarata.
- Rockström, J., Kotzé, L., Milutinović, S., Biermann, F., Brovkin, V., Donges, J., Ebbesson, J., French, D., Gupta, J., Kim, R., Lenton, T., Lenzi, D., Nakicenovic, N., Neumann, B., Schuppert, F., Winkelmann, R., Bosselmann, K., Folke1, C., Lucht, W., Schlosberg, D., Richardson, K., y Steffen, W. (2024). The planetary commons: A new paradigm for safeguarding Earth-regulating systems in the Anthropocene, *PNAS*, 121 (5) e2301531121. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2301531121>.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. (2009). A Safe Operating Space for Humanity, *Nature*, 461, 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Students Organizing for Sustainability (2020). *International 2020 survey: "students, sustainability and education"*. Consultado marzo 2024 en <https://sos.earth/survey-2020/>.
- UNESCO (2014a). Shaping the Future, We Want. UN Decade of Education for Sustainable Development (2005-14). Final Report. Consultado marzo 2024 en <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002301/230171e.pdf>.
- UNESCO (2014b). Roadmap for Implementing the Global Action Programme on Education for Sustainable Development. Consultado marzo 2024 en la URL <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002305/230514e.pdf>.
- United Nations Environment Programme (2019). *Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions - Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Consultado marzo 2024 en <https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions>.
- United Nations Environment Programme (2020). *Green and Sustainable Chemistry: Framework Manual*. Marzo 2024 en URL: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34338/GSCF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- United Nations Environment Programme (2023). *Specialized Manual on Green and Sustainable Chemistry Education and Learning*. Advancing Green and Sustainable Chemistry Education and Learning in All Segments of Society. Consultado en marzo 2024 en <https://www.unep.org/resources/report/specialized-manual-green-and-sustainable-chemistry-education-and-learning>.
- Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2011). Papel de la Química y su enseñanza en la construcción de un futuro sostenible, *Educación Química*, 22 (2), 103-11. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30122-8](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30122-8).

Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2013). Creating a Sustainable Future: Some Philosophical and Educational Considerations for Chemistry Teaching, *Science & Education*, 22 (7), 1857-1872. <http://doi.org/10.1007/s11191-011-9404-x>.

Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2021). El Antropoceno. Riesgos y oportunidades para las nuevas generaciones. *Educación Química*, 32. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.4.80342>.

Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J. y Melillo, J. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems, *Science*, 277, 5325, 494-499. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494>.

Voosen, P. (2024). The Anthropocene is dead. Long live the Anthropocene, *Science*, Scienceinsider/Scientific Community, 5 Mar 2024. <http://doi.org/10.1126/science.z3wcw7b>.

Worldwatch Institute (1984-2017). *The State of the World*. W.W. Norton.

Zimmerman, J.B., Anastas, P.T., Erythropel, H.C. y Leitner, W. (2020). Designing for a green chemistry future. *Science* 367(6476), 397-400. <https://doi.org/10.1126/science.aay3060>.

Zuin, V.G., Eilks, I., Elschami, M. y Kümmerer, K. (2021). Education in green chemistry and in sustainable chemistry: perspectives towards sustainability. *Green Chemistry* 23(4), 1594-1608. <https://doi.org/10.1039/d0gc03313h>.