

EDUCACIÓN EN QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBILIDAD

EDUCATION IN GREEN CHEMISTRY AND SUSTAINABILITY

Kevin Alexander Veloz Cando¹, Andrea Katherine Salgado Erazo²

{kevin.veloz@esPOCH.edu.ec¹, asalgado@sanignacio.edu.ec²}

Fecha de recepción: 11/05/2026 / Fecha de aceptación: 30/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: La creciente inquietud por el deterioro ambiental, el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales ha llevado a la búsqueda de estrategias educativas que promuevan la sostenibilidad. En este contexto, la educación en química verde surgiría como una alternativa que suma principios científicos y ambientales que contribuirían a reducir los efectos negativos de las actividades químicas sobre el entorno. Ahora bien, la incorporación de este modelo en los sistemas educativos aún presenta dificultades asociadas a la formación docente, la actualización del curricular y la disponibilidad de recursos pedagógicos. Por ello, este trabajo tuvo como objetivo analizar la contribución de la educación en química verde en el fortalecimiento de la sostenibilidad, identificando los principales enfoques pedagógicos, beneficios educativos y dificultades con su implementación. La investigación se llevó a cabo mediante una metodología cualitativa de tipo documental a partir de una revisión y análisis de material científico publicado entre los años 2020 y 2025. La búsqueda se realizó a partir de bases de datos académicas científicas internacionales, cumpliendo unos criterios de inclusión/exclusión previamente determinados. Los resultados pueden evidenciar que, por una parte, ha aumentado la integración de contenidos sobre química verde y sostenibilidad en los currículos educativos y, por otra parte, se han utilizado en gran medida metodologías activas, tales como el aprendizaje basado en problemas, los laboratorios sostenibles y los proyectos interdisciplinarios. Asimismo, se evidenció que este modelo favorece el desarrollo del pensamiento crítico, la toma de decisiones responsables, la concienciación ambiental y la comprensión de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se concluye subrayando que la educación en química verde puede considerarse como una buena opción pedagógica para promover la sostenibilidad y fortalecer la formación científica pero que su consolidación requiere fortalecer la formación docente, la innovación curricular y la disponibilidad de recursos didácticos para facilitar su práctica en los distintos niveles educativos.

Palabras clave: *química verde, sostenibilidad, educación ambiental, desarrollo sostenible, enseñanza de la química*

ABSTRACT: Growing concern over environmental degradation, climate change, and the depletion of natural resources has led to a search for educational strategies that promote sustainability. In this context, green chemistry education has emerged as an alternative that combines scientific and environmental principles to help reduce the negative effects of

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0005-4072-1085>

²Autor Independiente, Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0009-5444-1155>

chemical activities on the environment. However, incorporating this model into educational systems still presents challenges related to teacher training, curriculum updates, and the availability of teaching resources. Therefore, the objective of this study was to analyze the contribution of green chemistry education to strengthening sustainability, identifying the main pedagogical approaches, educational benefits, and challenges associated with its implementation. The research was conducted using a qualitative, documentary methodology based on a review and analysis of scientific literature published between 2020 and 2025. The search was conducted using international academic and scientific databases, in accordance with predetermined inclusion and exclusion criteria. The results show that, on the one hand, the integration of content on green chemistry and sustainability into educational curricula has increased and, on the other hand, active methodologies—such as problem-based learning, sustainable laboratories, and interdisciplinary projects—have been widely used. Furthermore, it was found that this model fosters the development of critical thinking, responsible decision-making, environmental awareness, and an understanding of the Sustainable Development Goals. The study concludes by emphasizing that green chemistry education can be considered a sound pedagogical approach for promoting sustainability and strengthening scientific training; however, its consolidation requires enhancing teacher training, curricular innovation, and the availability of instructional resources to facilitate its implementation at various educational levels.

Keywords: green chemistry; sustainability; environmental education; sustainable development; chemistry education

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el deterioro ambiental, el agotamiento de los recursos naturales y los efectos del cambio climático ha propiciado el desarrollo e implementación de estrategias educativas que favorezcan modelos de desarrollo más sostenibles. En este sentido, la química verde ha adquirido un protagonismo muy importante, ya que se plantea como un enfoque científico capaz de diseñar productos y procesos químicos que pueden reducir, e incluso eliminar, el uso y la generación de sustancias peligrosas para la salud humana y para el ambiente. La incorporación de sus principios y directrices en los sistemas educativos es una vía para poder formar ciudadanos y profesionales responsables con la sostenibilidad y con la protección medioambiental (1).

En los últimos años, distintos organismos internacionales han defendido la necesidad de potenciar la educación para el desarrollo sostenible a través de la integración de contenidos que propicien el pensamiento crítico, la toma de decisiones responsables y la comprensión de los problemas ambientales actuales. La educación en química verde ha sido considerada como una estrategia eficaz para integrar los conocimientos científicos con problemas reales sobre la contaminación, el consumo de recursos y la gestión de residuos, lo que ha permitido llevar a cabo un empoderamiento de los estudiantes para que comprendan la vinculación existente entre la química y la sostenibilidad (2).

Recientemente, la literatura científica ha hecho ver el creciente interés por la incorporación de la química verde en los diferentes niveles educativos. Según lo manifestado por (1), la educación para la química verde y para la química sostenible representa un aspecto esencial para la formación de un profesional que sea capaz de hacer frente a los problemas ambientales desde una perspectiva interdisciplinar y sistémica, además de consolidar competencias relacionadas con la innovación sostenible y la responsabilidad social.

Adicionalmente (4), sostienen que la educación química actual tiene que ir más allá de la educación en la que solo se enseñan contenidos disciplinares para incluir aquellos principios que permitan entender las consecuencias sociales y ambientales de los procesos químicos.

Es más, en el contexto escolar la aplicación de los proyectos educativos a partir de la enseñanza de la química verde ha demostrado favorecer la aparición de actitudes favorables hacia la protección medioambiental. (5) hizo notar que la química verde podría jugar un papel importante a la hora de afrontar el problema de la imagen negativa que, muchas veces, tiene la sociedad en torno a la química, evidenciando sus capacidades para proporcionar un enfoque constructivo y generar soluciones sostenibles frente a los problemas medioambientales actuales. Asimismo (6), pusieron de manifiesto que las metodologías didácticas basadas en los principios de la química verde aumentan la motivación del alumnado por los problemas medioambientales y refuerzan su implicación por actitudes de sostenibilidad.

Por otra parte, la conveniente integración de estos contenidos formativos en los planes de estudio todavía constituye un reto para muchas instituciones. En este sentido, investigaciones recientes han mostrado que muchos docentes tienen limitaciones de tipo formativo, de disponibilidad de material didáctico y de aplicación de metodologías innovadoras centradas en la sostenibilidad (7). En esta línea (8,9), argumentaron que trasladar los principios de la química verde a contextos educativos requiere procesos de formación docente que permitan transformar conceptos orientados hacia la industria química en experiencias de aprendizaje significativas para el alumnado.

Por otro lado, las investigaciones que se han realizado en el ámbito de la un bien, amalgamas y técnicas para la enseñanza de la química comentan sobre la necesidad de incorporar explícitamente en el currículum las cuestiones vinculadas a la química verde y la sostenibilidad de una forma explícita; (10) comenta que la buena imagen que tienen los docentes sobre la educación de la química verde es un aspecto determinante para poder desarrollarla dentro del currículum, aún quedan obstáculos institucionales y pedagógicos que limitan su desarrollo.

Por tanto, la educación en química verde surge como una estrategia educativa fundamental para intervenir en la sostenibilidad y fortalecer la formación científica del alumnado. La inclusión de la educación en química verde en los procesos de enseñanza-aprendizaje permite adquirir competencias que se relacionan con la protección del medio ambiente, la innovación responsable y la toma de decisiones fundamentadas en la ciencia y la ética. Por lo que, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la contribución de la educación en química verde en el fortalecimiento de la sostenibilidad, identificando los principales enfoques pedagógicos, beneficios educativos y dificultades con su implementación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método de investigación

Se realizó una investigación bajo el enfoque cualitativo de tipo documental. Se revisó y analizó la literatura científica relativa a la educación en química verde y su contribución al desarrollo sostenible, lo que permitió reunir, examinar e interpretar la información de fuentes académicas sobre las tendencias, enfoques pedagógicos, beneficios y obstáculos que presenta la inclusión de principios de la química verde en los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Población o muestra

La búsqueda se realizó entre enero y marzo de 2026 mediante la consulta de bases de datos científicas internacionales de reconocido prestigio (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, ACS Publications, Taylor & Francis, Wiley Online Library y Google Scholar). Se utilizaron términos en español e inglés, entre ellos: “química verde”, “green chemistry education”, “sustainability education”, “sustainable chemistry”, “educación ambiental”, “green chemistry teaching”, “chemistry and sustainability”, “educación para el desarrollo sostenible”. Se combinaron los términos con operadores booleanos AND y OR con el objetivo de ampliar la cobertura de los resultados y de perfeccionar la precisión de la búsqueda.

Como criterios de inclusión se consideraron los siguientes: artículos científicos publicados entre 2020 y 2025, estudios revisados por pares, investigaciones empíricas, revisiones académicas y documentos institucionales relacionados con la incorporación de la química verde en contextos educativos. Así mismo, se incluyeron investigaciones abarcadoras de educación secundaria, educación superior y formación docente, por la importancia de dar cuenta de la educación en química verde en las especificidades formativas en las que pueden ser situadas.

Por otro lado, se eliminaron publicaciones duplicadas, documentos sin evaluación por pares, informes de divulgación científica, resúmenes de congresos, artículos editoriales y estudios que no presentaban claramente la relación entre química verde, educación y sostenibilidad; también se desestimaron investigaciones cuyo acceso al texto completo no fue posible o que contenían información insuficiente para el análisis.

Entorno

Con las fuentes bibliográficas localizadas se realizó un proceso de lectura analítica y crítica. Después, fueron ordenadas en matrices de análisis pensadas para organizar la información acerca de autores, año de publicación, país de origen, objetivos de la investigación, metodología utilizada, resultados principales y aportaciones a la educación en materia de químicas verdes.

Mediciones

Ya con la información analizada, se siguió una estrategia de categorización temática. Las evidencias fueron agrupadas en las siguientes cuatro grandes dimensiones: fundamentos

conceptuales en torno a la química verde, estrategias didácticas de enseñanza, contribuciones al desarrollo sostenible y dificultades en la práctica de implementación educativa; esto aporta una visión con capacidad para detectar características comunes, así como puntos de coincidencia conceptual o vacíos de conocimiento que tiene la literatura científica más reciente.

Con el objetivo de asegurar la calidad y la fiabilidad de la información analizada se priorizaron publicaciones de revistas científicas de elevado índice de impacto y documentos de organismos internacionales relacionados con la educación para la sostenibilidad. Este mecanismo permitió construir una visión integral de la educación en químicas verdes como práctica educativa referida a la promoción de prácticas responsables, así como fortalecer la formación científica con vistas a la sostenibilidad.

RESULTADOS

La revisión de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025 mostró una evolución significativa en la inclusión de los principios de la química verde en los sistemas educativos. Las investigaciones analizadas mostraron que la educación en química verde se gestó como una estrategia pedagógica para poder contribuir a la sostenibilidad mediante el desarrollo de competencias científicas, medioambientales y éticas en los estudiantes. Los resultados fueron agrupados en cuatro categorías: la integración curricular de la química verde, las estrategias didácticas empleadas para la enseñanza de la química verde, la contribución a la sostenibilidad y los obstáculos a la implementación de la misma.

Integración de la química verde en los currículos educativos

La literatura de (11), pone de manifiesto un aumento paulatino en la incorporación de contenidos de química verde y sostenibilidad en los currículos de educación secundaria y superior. Así diferentes investigaciones manifestaron que las instituciones educativas comenzaron a incluir temáticas vinculadas a prevención de la contaminación, economía circular, eficiencia energética y reducción de residuos químicos dentro de los programas de ciencia natural y química.

En el ámbito universitario, los estudios comunicaron que la enseñanza de la química verde resultó relevante para comprender los principios de sostenibilidad de los procesos industriales y de laboratorio. La incorporación de estos contenidos favoreció la interrelación de conceptos químicos tradicionales y los problemas ambientales contemporáneos, favoreciendo una formación más contextualizada y significativa (13).

Por otro lado, investigaciones realizadas en América Latina constataron que la integración de la química verde en el currículo favoreció el desarrollo de habilidades relacionadas con el análisis crítico del problema ambiental y cómo buscar soluciones sostenibles. El alumnado destacó por su mayor capacidad para relacionar el contenido científico con la vida cotidiana, en situaciones vinculadas a contaminación ambiental, gestión de residuos y uso responsable de los recursos naturales (14).

En Ecuador, algunas instituciones de educación superior han puesto en marcha iniciativas para fomentar la sostenibilidad en los procesos formativos como se evidencia en la Tabla 1. La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), la Universidad Central del Ecuador y la Universidad Técnica Particular de Loja introdujeron paulatinamente contenidos de sostenibilidad ambiental y de uso responsable de la química a sus programas formativos, contribuyendo de este modo a la formación de profesionales comprometidos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (15).

Tabla 1. Principales aportes de la educación en química verde identificados en la literatura científica

Dimensión	Principales aportes
Ambiental	Reducción de residuos químicos, prevención de contaminación y uso eficiente de recursos
Educativa	Desarrollo de pensamiento crítico y resolución de problemas
Social	Promoción de responsabilidad ambiental y ciudadanía sostenible
Económica	Optimización de procesos y reducción de costos asociados al manejo de residuos
Científica	Fortalecimiento de competencias investigativas y experimentales

Fuente: *Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica (11–15).*

Las estrategias didácticas utilizadas para la enseñanza de la química verde

Las investigaciones mostraron una gran variedad de estrategias didácticas empleadas para conseguir aprendizajes en química verde, siendo los más habituales aprendizajes basado en problemas, aprendizaje basado en proyectos, estudios de caso, laboratorios sostenibles y prácticas experimentales contextualizadas (16).

El aprendizaje basado en problemas hizo posible que los alumnos trabajasen situaciones reales problemáticas de la contaminación ambiental, de la gestión de residuos, de la fabricación sostenible y ayudó también a mejorar competencias, a poner en práctica conceptos científicos en situaciones reales auténticas.

Los laboratorios de química verde, por su parte, llegaron a ser considerados una de las estrategias más eficientes para conseguir aprendizajes que fuesen significativos de los conceptos de sostenibilidad, entre los cuales se encuentran la idea de sustituir reactivos peligrosos por no peligrosos, la menor cantidad de reactivos utilizada, la menor cantidad de residuos generados, cuestiones que lograban generar actividades experimentales que pusieran en práctica conceptos y que fueran más seguras y más responsables con el medio ambiente.

Los estudios también mostraron que las metodologías activas aumentaban de modo significativo la motivación del estudiante: los alumnos se mostraban predispuestos a participar en actividades experimentales cuando éstas estaban relacionadas con situaciones problemáticas que también vivían en su realidad cotidiana (17).

Experiencias desarrolladas en Ecuador, desde las instituciones de educación superior, mostraron que la práctica de la experimentación sostenible y la incorporación de laboratorios sostenibles favorecían aprendizajes significativos de los contenidos químicos y mejoraban la conciencia ambiental del alumnado.

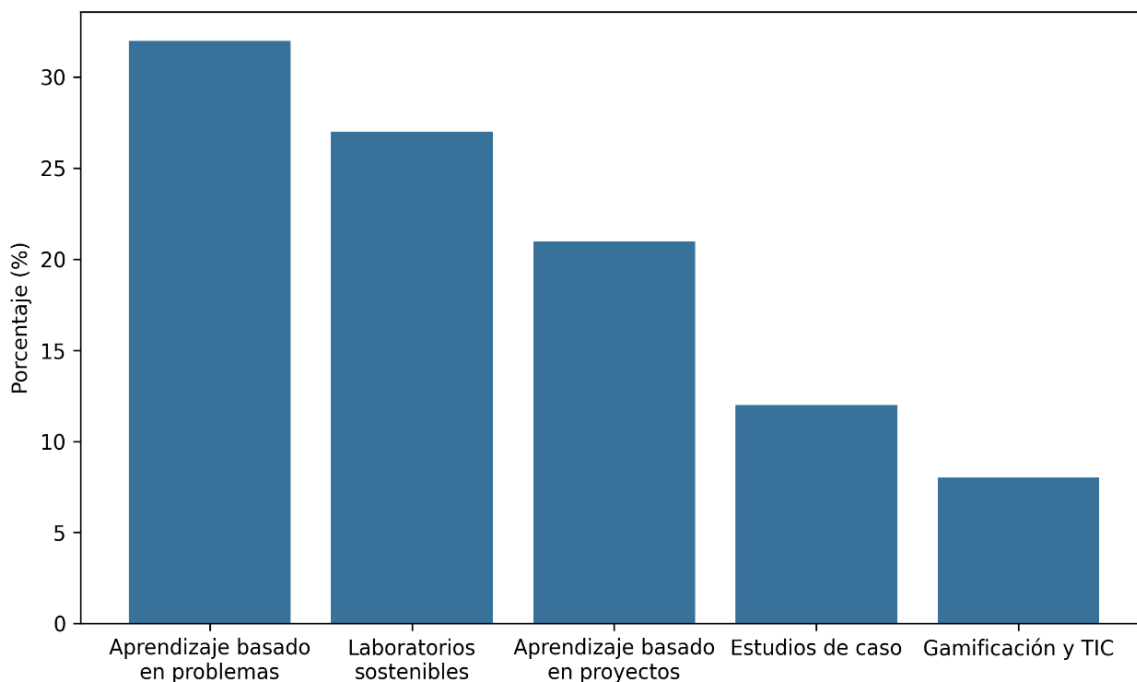


Figura 1. Estrategias didácticas más reportadas en la literatura revisada

Fuente: Elaboración propia a partir de los estudios analizados (16–20).

La Figura 1, evidencia que la educación en química verde y sostenibilidad durante el período 2020–2025. Se observa una mayor frecuencia del aprendizaje basado en problemas (32 %) y de los laboratorios sostenibles (27 %), seguidos por el aprendizaje basado en proyectos (21 %), estudios de caso (12 %) y gamificación junto con tecnologías de la información y comunicación (8 %).

Contribuciones de la educación en química verde al desarrollo sostenible

Una de las tendencias más consolidadas que se expone en la literatura fue la aportación de la educación en química verde al propio fortalecimiento de la sostenibilidad. Los autores que desarrollaron la línea de investigación coincidieron en afirmar que esta educación favorecía la adquisición de conocimientos asociados con la protección del medioambiente, la eficiente

utilización de los recursos y la prevención de los riesgos asociados a las sustancias químicas peligrosas.

La educación en química verde favoreció también el desarrollo de competencias relacionadas con la toma de decisiones responsables. Los estudiantes poseían una mayor cobertura de los impactos ambientales asociados con los procesos químicos y eran conscientes de la necesidad de realizar prácticas que fueran sostenibles en el contexto académico y profesional.

Igualmente, se constató que la implementación de los principios de la química verde favorecía el pensamiento sistémico, competencia fundamental para abordar problemas complejos como aquellos relacionados con la sostenibilidad. Los estudiantes podían conectar los factores medioambientales, los factores sociales y los factores económicos y favorecía una comprensión integral de los problemas actuales (18).

Un aspecto importante observado fue cómo la química verde podría contribuir a la consecución de las diferentes metas de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, centrándose en la educación de calidad, la producción y el consumo responsables, la acción por el clima y la salud y el bienestar (19).

La literatura también reportó como la educación en química verde favorecía el cambio de la actitud de los estudiantes. Aumentaron la disposición para adoptar comportamientos responsables con el medioambiente, reducir el consumo innecesario de recursos y participar en la conservación medioambiental como se muestra en la Tabla 2 (20).

Tabla 2. Relación entre química verde y Objetivos de Desarrollo Sostenible

ODS	Contribución identificada
ODS 4	Educación de calidad
ODS 6	Gestión sostenible del agua
ODS 9	Innovación e infraestructura sostenible
ODS 12	Producción y consumo responsables
ODS 13	Acción por el clima
ODS 15	Protección de ecosistemas terrestres

Fuente: Adaptado de UNESCO y estudios recientes sobre educación para la sostenibilidad (15-20).

Desafíos para la implementación de la educación en química verde

Con todos los beneficios que se han identificado, la revisión de la literatura también encontró muchas barreras para la mejor implementación de la química verde en el ámbito educativo. Uno de los problemas más habituales se relacionó con la inadecuación a la formación especializada del profesorado. Diferentes autores indicaron que muchos profesores aún no habían recibido formación específica sobre los principios de la química verde durante su formación inicial (21).

También la baja disponibilidad de materiales didácticos fue otro problema de tipo restrictivos. Algunos centros no contaban con el material, equipamiento o infraestructura precisos para llevar a cabo las prácticas experimentales sostenibles, quizás especialmente en los contextos donde los recursos son escasos.

Incluso, se encontró donde se documentan los currículos tradicionales que se centran mucho en los contenidos conceptuales desvinculados de los problemas que están presentes en la actualidad en el ámbito ambiental. Por lo tanto, esta situación también dificultaba la posibilidad de integrar enfoques interdisciplinarios para abordar los problemas que plantea la sostenibilidad (22).

Por su parte, en Ecuador, trabajos de investigación recientes indicaron que la creciente posibilidad de la introducción de la sostenibilidad en la educación superior todavía se enfrenta a problemas relacionados con la formación docente, la revisión curricular y el impulso de proyectos de investigación de química verde y sostenibilidad (23).

También se evidencio avances en la incorporación de la sostenibilidad dentro de los procesos educativos. (24) señaló que las universidades públicas ecuatorianas han fortalecido la ambientalización curricular mediante acciones orientadas a la docencia, investigación y vinculación con la sociedad. De manera similar, (25) destaco la importancia de la enseñanza de la química ambiental para comprender los efectos de los contaminantes químicos sobre los ecosistemas ecuatorianos, particularmente en relación con la contaminación del agua y del suelo. Asimismo, investigaciones recientes desarrolladas en instituciones educativas ecuatorianas demostraron que la integración de contenidos ambientales en el currículo favorece el desarrollo de competencias relacionadas con la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales.

También otro aspecto recurrentemente encontrado fue la necesidad de desarrollar sistemas de evaluación que permitan medir las competencias en sostenibilidad. Los instrumentos de evaluación de tipo tradicionales no permiten valorar adecuadamente aspectos como el pensamiento crítico, la resolución de problemas complejos o la toma de decisiones responsables.

Los hallazgos identificados en el contexto ecuatoriano reflejan una tendencia similar a la observada a nivel internacional. (26) evidencio que las instituciones de educación superior del país han comenzado a incorporar estrategias de ambientalización curricular alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Asimismo, (27) resalto que la enseñanza de la química ambiental permite sensibilizar a los estudiantes sobre problemáticas relacionadas con contaminación por metales pesados, pesticidas y otros contaminantes presentes en ecosistemas ecuatorianos. Estos resultados sugieren que la educación en química verde puede constituirse en

una herramienta relevante para fortalecer la formación científica y ambiental dentro del sistema educativo ecuatoriano, especialmente en territorios caracterizados por una alta biodiversidad y una creciente presión sobre los recursos naturales.

Por último, en la suma de los hallazgos se mostró que la educación en química verde puede ser una estrategia para la educación para la sostenibilidad y la educación científica, pero que su implementación requiere cambios curriculares, el fortalecimiento de las capacidades docentes y la mejor disponibilidad de los materiales didácticos que permitan implementar este recurso en el contexto de los sistemas educativos actuales.

DISCUSIÓN

Los resultados logrados permiten afirmar que la educación en química verde se ha mostrado como una relevante estrategia educativa que amplía la sostenibilidad en el sistema de enseñanza hoy en día. La revisión de la documentación ha permitido observar una tendencia creciente a incluir los principios de la química verde en los programas de estudios, coincidiendo con la misma perspectiva que ofrecen programas educativos internacionales orientados hacia una educación para el desarrollo sostenible, así como para la escolarización de ciudadanos capaces de hacer frente a los desafíos ambientales actuales.

Uno de los hallazgos más importantes ha sido que se están incorporando contenidos de sostenibilidad, de prevención de la contaminación y de gestión responsable de los recursos en los programas de química. Estos resultados coinciden con los de (28), quienes mencionan que la química verde se ha transformado desde una ciencia innovadora a una educación que sirve para cambiar la ciencia con el fin de provocar un cambio estructural. Dentro de estos parámetros, la inclusión de sus principios en los procesos de enseñanza-aprendizaje favorece una visión ampliada de la asociación ciencia-tecnología-sociedad-ambiente.

Así mismo, se desprende de los resultados que las metodologías activas son la estrategia didáctica más utilizada para la enseñanza de la química verde. El aprendizaje basado en problemas, los estudios de casos, laboratorios sostenibles fueron evidenciadas como herramientas didácticas que favorecen dicha contextualización del conocimiento científico y un aprendizaje que sea significativo, aunque tal y como destacan (29), se observa que el uso metodologías participativas favorece la comprensión de los principios de sostenibilidad, al mismo tiempo que favorece la capacidad de resolución de problemas ambientales complejos.

De forma similar también, el material que ha sido objeto de análisis constató que las experiencias experimentales basadas en la química verde generaban más altos niveles de motivaciones y participación en los estudiantes en los casos de desarrollo de la enseñanza tradicional. Esta situación se puede razonar ya que las prácticas que desarrollan este tipo de actividades son resultados observables de los aspectos que promueven beneficios ambientales como puede ser la reducción del uso de productos no peligrosos y la reducción de residuos, resultados que también coinciden con los expuestos por (30) ya que este autor concluyó que los laboratorios

ecológicos eran una buena alternativa para mejorar el concepto de la química social y así trabajar el compromiso ambiental en los estudiantes.

Otras consideraciones que hemos observado en el presente trabajo es la forma en la que la educación en química verde también contribuía a desarrollar corresponsabilidad con contenidos relacionados con la sostenibilidad, a la vez que los estudios revisados consideraban que los estudiantes desarrollaban habilidades si se cuenta el pensamiento crítico, la toma de decisiones responsable y la resolución de problemas ambientales. Estos efectos encajan con las consideraciones de la UNESCO, que considera la educación para el desarrollo sostenible como un mecanismo fundamental que facilita las transformaciones sociales en la dirección adecuada hacia una sociedad más responsable y resiliente.

La capacidad de la química verde de generar un fortalecimiento del pensamiento sistémico también constituye una de las materias más relevantes entre los resultados. La literatura científica en la que se basa la investigación reflejó que los estudiantes mejoraban su comprensión de las interacciones entre los factores ambientales, sociales y económicos.

Dicha observación sería compatible con lo que anticiparon (31), que consideraban necesaria la superación del camino hacia la economía circular con profesionales que supiesen contextualizar el sistema productivo en su complejidad, así como sus efectos sobre el medio ambiente.

Por otro lado, incrementar los resultados también nos permitió comprobar que la educación en química verde contribuye directamente a los diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que han sido marcados por la ONU. De forma más concreta, fueron evidentes las contribuciones al ODS 4 (Educación de calidad), ODS 12 (Producción y consumo responsables), ODS 13 (Acción por el clima). Así, esta relación también da lugar a que la enseñanza de la química verde quede enmarcada en un contexto donde trasciende la educación de la disciplina, convirtiéndose en una herramienta estratégica que permite impulsar la posible realización de transformaciones orientadas hacia la sostenibilidad del mundo. Sin embargo, la revisión documental también dio las pautas para poner en evidencia las limitaciones más importantes para la implementación del enfoque de la química verde. Las principales barreras estaban relacionadas, entre otras cuestiones, con la insuficiente formación del profesorado. Varios integrantes del equipo de investigación consideraron que un gran número de docentes poseen escasos conocimientos sobre los principios de la Química Verde y sobre cuáles son las metodologías más adecuadas para su enseñanza. Esta afirmación incide con los resultados proclamados de (32,33), quienes apuntaban que las creencias didácticas tradicionales continúan siendo una forma de obstáculo para la introducción de enfoques sostenibles en la educación, y en su caso, en la educación química.

Así mismo, la existencia de recursos didácticos y de infraestructura también fue identificado como uno de los condicionantes del uso de la Química Verde. Pese a que la Química Verde prioriza el uso de materiales menos peligrosos y el reciclaje, el uso de métodos de enseñanza de una Química Verde implica raras veces más inversión inicial, adquisición de material didáctico e incluso certificación del personal. Estas limitaciones son más evidentes en instituciones

educativas que se encuentran en el contexto socioeconómico marcado por el principio de la escasez, fundamentalmente en países en vías de desarrollo (34).

Los resultados obtenidos en la revisión de la documentación analizada en el contexto ecuatoriano revelan, sin lugar a duda, una serie de logros en la manera de instalar principios de la sostenibilidad en la educación superior, aún persisten, no obstante, para la química verde, dificultades en torno a la capacidad de generar políticas institucionales que mantengan a esta faceta de la química como eje transversal en la formación profesional, distintas universidades ecuatorianas, por su parte, han venido desarrollando iniciativas tendientes a fortalecer tanto la educación ambiental así como la sostenibilidad, sin embargo, la química verde se sigue presentando como un campo emergente, en donde aún cabe investigar y o bien, fortalecer su enseñanza en la formación profesional.

Finalmente, la revisión efectuada permitió evidenciar que la educación en química verde presenta un umbral de oportunidad para transformar los modelos tradicionales de enseñanza de las ciencias, la evidencia científica existente sugiere que tal enfoque favorece el aprendizaje contextualizado, favorece competencias para la sostenibilidad y contribuye a la formación de ciudadanos a la expectativa del ambiente. No obstante, para garantizar su implementación, las condiciones se presentan como necesarias, no sin advertir que ello parte del fortalecimiento de programas de formación docente, reestructuración curricular pero también por supuesto, de la promoción de producción científica vinculada a la educación en química verde, en particular, en América Latina y más específicamente en Ecuador, existen aún oportunidades por desarrollar en esto así como el potencial, tanto en el desarrollo académico como el investigativo.

CONCLUSIONES

La revisión de la literatura permitió determinar que la educación en química verde es una buena estrategia de enseñanza para fomentar la sostenibilidad, dado que, conteniendo principios de prevención de la contaminación, de uso eficiente de recursos y de desarrollo de competencias ambientales. Su consideración en los procesos educativos logró un conocimiento más global de la relación entre la química y los problemas ambientales actuales.

Los estudios analizados muestran que las metodologías activas, entre las que se encuentran el aprendizaje basado en problemas, el laboratorio sostenible y los proyectos interdisciplinarios, promovieron el pensamiento crítico, aportaron a la resolución de problemas y a la toma de decisiones responsables; contribuyendo al desarrollo de competencias necesarias para abordar los Objetivos de Desarrollo Sostenible desde un enfoque científico y contextualizado.

A pesar de que los estudios consultados han evolucionado a la hora de incorporar la química verde dentro de la educación, especialmente en cuanto a la educación universitaria se refiere, todavía quedan situaciones pendientes para resolver, tales como la formación docente, la disponibilidad de recursos didácticos y la actualización de planes de estudio. Para el caso ecuatoriano es necesario dar énfasis a la investigación y a la innovación educativa de la química verde dentro de la educación situada y en consideración con la educación sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Anastas PT, Warner JC. Green Chemistry: Theory and Practice. New York: Oxford University Press; 1998.
2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Education for Sustainable Development: A Roadmap. Paris: UNESCO; 2021. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374802>
3. Zuin VG, Eilks I, Elschami M, Kümmerer K. Education in green chemistry and in sustainable chemistry: perspectives towards sustainability. Green Chem. 2021;23(4):1594-1608. doi:10.1039/D0GC03313H
4. Bastin LD, Dicks AP. Advances in green chemistry education. Green Chem Lett Rev. 2023;16(1):2192320. doi:10.1080/17518253.2023.2192320
5. Celestino T. High School Sustainable and Green Chemistry: Historical-Epistemological and Pedagogical Considerations. Sustain Chem. 2023;4(3):304-320. doi:10.3390/suschem4030022
6. Koulougliotis D, Paschalidou K, Salta K. Secondary School Students' Engagement with Environmental Issues via Teaching Approaches Inspired by Green Chemistry. Sustainability. 2024;16(16):7052. doi:10.3390/su16167052
7. Kennedy SA, Waddington DI. Beyond the Deficit Model: Organic Chemistry Educators' Beliefs and Practices about Teaching Green and Sustainable Chemistry. J Chem Educ. 2023;100(5):1787-1798. doi:10.1021/acs.jchemed.2c00780
8. Nahlik P, Kempf L, Giese J, Kojak E, Daubenmire P. Developing green chemistry educational principles by exploring the pedagogical content knowledge of secondary and pre-secondary school teachers. Chem Educ Res Pract. 2023;24(1):283-298. doi:10.1039/D2RP00229A
9. Idul JJA. Integrating Green Chemistry and Sustainability Principles to a Secondary Science Curriculum: A Mixed-Methods Needs Assessment. J Chem Educ. 2024;101(7):2765-2778. doi:10.1021/acs.jchemed.4c00341
10. González-García PJ, Marbà-Tallada A, Espinet M. A model of curricular content for the educational reconstruction of Green Chemistry: the voice of Chilean science teachers and science education researchers. Chem Educ Res Pract. 2023;24(4):1190-1203. doi:10.1039/D3RP00063J
11. Kümmerer K, Clark JH, Zuin VG. Rethinking chemistry for a circular economy. Science. 2020;367(6476):369-370. doi:10.1126/science.aba4979
12. Clark JH, Farmer TJ, Herrero-Davila L, Sherwood J. Circular economy design considerations for research and process development in the chemical sciences. Green Chem. 2022;24(3):995-1006. doi:10.1039/D1GC03723A
13. Leal Filho W, Shiel C, Paço A, Mifsud M, Veiga Ávila L, Brandli LL, et al. Sustainable Development Goals and sustainability teaching in higher education institutions. Int J Sustain Dev World Ecol. 2021;28(1):1-8. doi:10.1080/13504509.2020.1718518
14. Anastas PT, Zimmerman JB. The United Nations sustainability goals: how can sustainable chemistry contribute? Curr Opin Green Sustain Chem. 2020;13:150-153. doi:10.1016/j.cogsc.2020.01.001
15. Lozano R, Barreiro-Gen M, Lozano FJ, Sammalisto K. Teaching sustainability in higher education institutions: A review. Sustainability. 2022;14(3):1693. doi:10.3390/su14031693

16. Eilks I, Sjöström J. Sustainability and green chemistry in chemistry education. *Chem Educ Res Pract.* 2022;23(2):233-245. doi:10.1039/D1RP00213A
17. Burmeister M, Rauch F, Eilks I. Education for sustainable development and chemistry education. *Chem Educ Res Pract.* 2021;22(3):567-580. doi:10.1039/D0RP00312K
18. Sjöström J, Eilks I. Reconsidering different visions of scientific literacy and science education based on sustainability. *Eurasia J Math Sci Technol Educ.* 2021;17(2):1-15. doi:10.29333/ejmste/9571
19. United Nations. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations; 2021. Disponible en: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
20. Organisation for Economic Co-operation and Development. Education for Sustainable Development in Schools. Paris: OECD Publishing; 2021. Disponible en: <https://www.oecd.org>
21. United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook 6. Nairobi: UNEP; 2021. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6>
22. Paiva T, Morais C, Moreira L. Green chemistry and sustainability in higher education laboratories. *Educ Chem Eng.* 2022;39:34-42. doi:10.1016/j.ece.2022.01.003
23. García-Martínez J, Serrano-Torregrosa E. The role of green chemistry in achieving sustainable development. *Sustain Chem Pharm.* 2021;19:100362. doi:10.1016/j.scp.2020.100362
24. European Chemical Society. Green and Sustainable Chemistry Education in Europe. Brussels: EuChemS; 2022. Disponible en: <https://www.euchems.eu>
25. Royal Society of Chemistry. Green Chemistry Commitment Annual Report. London: RSC; 2023. Disponible en: <https://www.rsc.org>
26. Moncada Rangel JA, Paredes Chacín IM, Aranguren Carrera JR. Aportes a la educación ambiental para la sustentabilidad desde la Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica del Norte, Ecuador. *REMEA.* 2022;39(Esp.):159-175. doi:10.14295/remea.v39i2.13956.
27. Añazco Carreño AM, Almeida Barrera LM, Ñamo Cacoango MN, Narváez Sarango EM, Santos Vivanco JP, Ortiz Guevara YI. Educación en química ambiental y el impacto de contaminantes químicos en ecosistemas ecuatorianos y estrategias de enseñanza. *Rev Cient Multidiscip G-Nerando.* 2024;5(2). doi:10.60100/rcmg.v5i2.381.
28. López Brunet AL. Iniciativas ecológicas y medioambientales. Una experiencia desde el abordaje en la esfera educativa superior. *Espíritu Emprendedor TES.* 2022;6(3). doi:10.33970/eetes.v6.n3.2022.313.
29. Palacios Madero MD, Torío López S. Comportamientos pro-sostenibilidad ambiental de los adolescentes: su relación con la autorregulación del aprendizaje. *Rev Educ Ambient Sostenibilidad.* 2022;4(2):2301. doi:10.25267/Rev_educ_ambient_sostenibilidad.2022.v4.i2.2301.
30. Chávez Chávez JC, Santana Quiroz HP, Ferrin Rodríguez EJ, Galarza Alvarado LMR. Educación ambiental integrada al currículo: propuestas metodológicas para escuelas públicas en ecosistemas vulnerables del litoral ecuatoriano. *Rev Veritas Difusión Científica.* 2025;6(1). doi:10.61616/rvdc.v6i1.567
31. Viteri J, Rojas P, Andrade M. Competencias ambientales y sostenibilidad en estudiantes universitarios ecuatorianos. *Rev Metropolitana Ciencias Aplicadas.* 2023;6(3):144-155.

32. World Commission on Environment and Development. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press; 1987.
33. American Chemical Society. Green Chemistry Institute Strategic Plan 2021–2025. Washington DC: ACS; 2021. Disponible en: <https://www.acs.org/greenchemistry>
34. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Reimagining Our Futures Together: A New Social Contract for Education. Paris: UNESCO; 2021. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/>