



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i4.4133>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Química Verde y su Aplicación en la Industria para la Protección del Medio Ambiente

Green Chemistry and its Application in Industry for Environmental Protection

Química Verde e a sua Aplicação na Indústria para a Proteção Ambiental

Silvia Hipatia Torres-Rodríguez ^I
storres@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7071-3784>

Luis Edison Carrillo-Cando ^{II}
lcarrill@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3805-9617>

Estefanía Nataly Quiroz-Carrión ^{III}
nathyquiroz17@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0328-4382>

Sandra Verónica Mera-Ponce ^{IV}
sandra.mera@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6247-6616>

Correspondencia: storres@unach.edu.ec

***Recibido:** 25 de septiembre de 2024 ***Aceptado:** 24 de octubre de 2024 * **Publicado:** 30 de noviembre de 2024

- I. Doctora en Química, Doctora en Ciencias Ambientales. Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Doctor en Ciencias de la Educación Mención Enseñanza de la Química, Doctor En Ciencias de la Educación Mención Investigación Educativa. Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Master Of Science In Geographical Information Science & Systems. Docente en Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Doctora en Bioquímica y Farmacia. Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

La Química Verde es una estrategia clave para enfrentar los desafíos ambientales globales, como la contaminación y el agotamiento de recursos. Este enfoque busca reducir el impacto ambiental mediante procesos más seguros y eficientes en la industria química. Sin embargo, uno de los problemas identificados en los estudios actuales es la falta de claridad en la aplicación específica de los principios de la Química Verde, lo que limita su efectividad. Por ello, es fundamental profundizar en su implementación. El objetivo principal de este estudio es analizar los principios de la Química Verde y su aplicación en la industria como una estrategia clave para la protección ambiental. Metodológicamente, se adoptó un enfoque cualitativo basado en la revisión de literatura, utilizando un diseño narrativo e inductivo-deductivo. Durante este estudio se analizaron temas clave como el impacto negativo de los procesos industriales tradicionales, la revisión de los 12 principios de la Química Verde y su capacidad para transformar los procesos industriales, y los beneficios de su implementación en la industria, como la reducción de costos y mejora de la seguridad, subrayando así la importancia de aplicar los 12 principios para equilibrar el crecimiento económico con la responsabilidad ambiental, maximizando su impacto positivo en la protección del medio ambiente y en el bienestar del ser humano.

Palabras clave: Impacto ambiental; industria química; medio ambiente; protección ambiental; química verde.

Abstract

Green Chemistry is a key strategy to address global environmental challenges such as pollution and resource depletion. This approach seeks to reduce environmental impact through safer and more efficient processes in the chemical industry. However, one of the problems identified in current studies is the lack of clarity in the specific application of the principles of Green Chemistry, which limits its effectiveness. Therefore, it is essential to delve deeper into its implementation. The main objective of this study is to analyze the principles of Green Chemistry and its application in industry as a key strategy for environmental protection. Methodologically, a qualitative approach based on a literature review was adopted, using a narrative and inductive-deductive design. During this study, key issues were analyzed, such as the negative impact of traditional industrial processes, the review of the 12 principles of Green Chemistry and its capacity to transform industrial processes, and the benefits of its implementation in industry, such as cost reduction and improved safety, thus

highlighting the importance of applying the 12 principles to balance economic growth with environmental responsibility, maximizing their positive impact on environmental protection and human well-being.

Keywords: Environmental impact; chemical industry; environment; environmental protection; green chemistry.

Resumo

A Química Verde é uma estratégia fundamental para enfrentar os desafios ambientais globais, como a poluição e o esgotamento dos recursos. Esta abordagem procura reduzir o impacto ambiental através de processos mais seguros e eficientes na indústria química. Contudo, um dos problemas identificados nos estudos atuais é a falta de clareza na aplicação específica dos princípios da Química Verde, o que limita a sua eficácia. Por isso, é essencial aprofundar a sua implementação. O principal objetivo deste estudo é analisar os princípios da Química Verde e a sua aplicação na indústria como estratégia chave para a proteção ambiental. Metodologicamente, adotou-se uma abordagem qualitativa baseada na revisão de literatura, utilizando um desenho narrativo e indutivo-dedutivo. Durante este estudo foram analisados temas-chave como o impacto negativo dos processos industriais tradicionais, a revisão dos 12 princípios da Química Verde e a sua capacidade de transformar os processos industriais, e os benefícios da sua implementação na indústria, como a redução de custos e melhorar a segurança, sublinhando assim a importância de aplicar os 12 princípios para equilibrar o crescimento económico com a responsabilidade ambiental, maximizando o seu impacto positivo na protecção ambiental e no bem-estar humano.

Palavras-chave: Impacto ambiental; indústria química; ambiente; proteção ambiental; química verde.

Introducción

La Química Verde se ha convertido en una solución crítica para abordar algunos de los desafíos ambientales más urgentes a nivel global. En un mundo donde la contaminación, el agotamiento de recursos y el cambio climático amenazan el equilibrio ecológico, este enfoque ofrece una alternativa sostenible para la industria química. La Química Verde no solo busca reducir el uso de sustancias tóxicas, sino también minimizar el impacto ambiental mediante el diseño de procesos más eficientes y el uso de materiales renovables. Esto tiene implicaciones significativas en sectores como la energía,

Química Verde y su Aplicación en la Industria para la Protección del Medio Ambiente

la fabricación de productos, y la gestión de residuos, promoviendo una producción más limpia y responsable (Zapien-Gómez et al., 2023).

La Química Verde se refiere a la aplicación de principios químicos con el fin de prevenir la contaminación, utilizando procesos más seguros y sostenibles en lugar de los métodos convencionales de la industria, su principal objetivo es evitar la polución desde la raíz, en lugar de enfocarse en su corrección, promoviendo así una mayor conciencia entre la comunidad científica y las industrias sobre la importancia de desarrollar bienes y servicios que respondan de manera sostenible al crecimiento poblacional (Pino, 2020).

Según Murcia y Esquiaqui (2021) la Química Verde es un enfoque centrado en el diseño de procesos y productos químicos más sostenibles, está estrechamente vinculada con la ecoeficiencia. Ambas comparten principios como la prevención de residuos, la optimización económica, la producción de sustancias menos peligrosas, el uso eficiente de la energía, el aprovechamiento de materias primas renovables y la creación de productos que sean fácilmente degradables al final de su vida útil. Además, promueven evitar derivados químicos, prevenir la contaminación y reducir el riesgo de accidentes, todo ello mediante tecnologías más seguras y amigables con el medio ambiente en comparación con los métodos tradicionales.

El reto de la industria química en el siglo XXI es mantener los beneficios alcanzados de manera económicamente viable, pero minimizando los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública, en este contexto, la aplicación de la Química Verde juega un papel fundamental, ya que promueve el desarrollo de procesos más sostenibles y seguros, permitiendo a la industria continuar innovando sin comprometer el bienestar ambiental ni la salud de las personas (Pino, 2020).

Para Ferrer (2019) la aplicación de la Química Verde en la industria implica incorporar sus principios en sectores como la manufactura, energía, productos farmacéuticos y agroindustria, esto conlleva la sustitución de sustancias químicas tóxicas, la adopción de procesos más eficientes que consumen menos energía y generan menos residuos, y la creación de productos biodegradables o reciclables. Al implementar la Química Verde, las industrias no solo minimizan los riesgos para la salud humana y el medio ambiente, sino que también mejoran su competitividad al reducir costos operativos, cumplir con normativas ambientales más estrictas y atraer a consumidores comprometidos con la sostenibilidad, además, promueven el desarrollo de procesos industrialmente viables que favorecen tanto la conservación del entorno natural como la salud pública (Gómez, 2008).

Química Verde y su Aplicación en la Industria para la Protección del Medio Ambiente

Hoy en día, la Química Verde brinda a la industria una solución viable para la gestión y reducción de residuos, enfocándose en aspectos clave como el tratamiento y la recuperación de sustancias químicas, al implementar estos principios, las empresas pueden optimizar sus procesos, minimizar el impacto ambiental y promover prácticas más sostenibles que contribuyan a la conservación del medio ambiente, esta estrategia no solo reduce la generación de residuos, sino que también fomenta una mayor eficiencia en el uso de recursos, mejorando la viabilidad económica de la industria mientras se mitigan los riesgos ecológicos (Rivera et al., 2023).

Malik & Grohmann (2012) referente a la protección del medio ambiente menciona que es un enfoque integral que combina esfuerzos regulatorios, tecnológicos y educativos para abordar desafíos globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la gestión de residuos es un conjunto de acciones y estrategias que buscan minimizar el impacto negativo de las actividades humanas sobre los ecosistemas, esto incluye políticas, tecnologías y prácticas que se enfocan en reducir la contaminación, conservar los recursos naturales y promover la sostenibilidad a largo plazo.

Arellano & Guarachi (2021) indican que la protección del medio ambiente hace referencia a la conservación y cuidado de los recursos naturales y los ecosistemas con el fin de asegurar un entorno saludable y sostenible para las generaciones actuales y futuras, este concepto engloba todas las acciones orientadas a prevenir, reducir o eliminar la contaminación y cualquier forma de degradación ambiental.

Se han realizado varios estudios sobre la Química Verde y su aplicación en la industria para la protección del medio ambiente, como la investigación realizada por Pino (2020) sobre Química verde: enfoque sistémico, en donde se indica que la implementación de los principios de la Química Verde permite diseñar etapas de producción más respetuosas con el entorno y convirtiéndose en una herramienta clave para mejorar la calidad de vida de las personas que vivían cerca de los centros de producción. La secuencia lógica presentada en el estudio ofreció una reflexión sobre la evolución en la toma de decisiones en el diseño de plantas industriales, tanto grandes como pequeñas, sobre las grandes catástrofes que podrían haberse evitado, sobre los impactos de productos y residuos en el ambiente, y sobre los cambios de paradigmas relacionados con los problemas ambientales.

En la misma línea de investigación el estudio realizado por Murcia y Esquiaqui (2021) sobre Química Verde aplicada en los residuos de universidades donde se realizó una revisión bibliográfica sobre la aplicación de la Química Verde en la gestión de residuos químicos en laboratorios universitarios. Para su desarrollo, se realizó una búsqueda en dos bases de datos, en tres idiomas diferentes, seleccionando

Química Verde y su Aplicación en la Industria para la Protección del Medio Ambiente

55 artículos científicos relevantes para el tema de estudio. Los resultados se estructuraron en tres enfoques: estudios prácticos, diagnósticos y teóricos. La mayoría de estos estudios subrayaron la relevancia de incorporar la Química Verde en la educación como una herramienta clave para garantizar un desarrollo sostenible a nivel mundial. Uno de los principios fundamentales de la Química Verde es la reducción de residuos peligrosos, lograda a través del uso de rutas sintéticas más limpias, la optimización de recursos renovables, la implementación de condiciones alternativas de reacción y el diseño de sustancias químicas menos tóxicas y biodegradables.

Además del estudio realizado por Doria (2009) sobre el tema química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente, cuyo objetivo fue revisar los 12 principios de la Química Verde. Se presentaron ejemplos de su aplicación en laboratorios de investigación y en procesos y productos industriales, proporcionando una visión amplia de las nuevas técnicas, metodologías y sustancias orgánicas desarrolladas por la Química Verde. El resultado mostró que esta disciplina ha introducido una nueva filosofía, estableciendo estándares elevados para la investigación y producción de compuestos y procesos químicos. Su enfoque se centra en maximizar los beneficios, a la vez que minimiza los efectos nocivos tanto para los seres humanos como para el medio ambiente. Asimismo, se subraya la relevancia de la ecotoxicología y la biodegradabilidad de los productos, resaltando los retos que esta área deberá afrontar en el futuro.

Aunque la Química Verde ha demostrado ser esencial para reducir el impacto ambiental, los estudios actuales carecen de claridad en su aplicación específica en la industria para proteger el medio ambiente. Varios artículos no explican en detalle los principios de la Química Verde ni cómo implementarlos de manera efectiva. Por ello, es crucial abordar esta temática de manera integral, llenando los vacíos de conocimiento y proporcionando una guía clara sobre cómo las industrias pueden reducir la contaminación, emplear recursos renovables y minimizar la generación de residuos peligrosos.

El propósito de este estudio es analizar los principios de la Química Verde y su aplicación en la industria como una estrategia clave para la protección ambiental. A través de este análisis, se pretende ofrecer una visión completa de cómo las empresas pueden adoptar prácticas sostenibles que no solo cumplan con los estándares medioambientales, sino que también mejoren la salud y el bienestar de las comunidades cercanas a los centros de producción.

Metodología

Para llevar a cabo este estudio sobre la Química Verde y su aplicación en la industria para la protección del medio ambiente, se adoptó un enfoque cualitativo basado en la revisión de literatura relevante, empleando un diseño narrativo y un método inductivo-deductivo. Este enfoque fue seleccionado con el fin de obtener una visión detallada sobre los principios de la Química Verde y su implementación en el sector industrial como estrategia para la protección ambiental, buscando recopilar datos que contribuyan a una comprensión más profunda del tema.

La investigación documental se utilizó como estrategia principal para la recolección de información, abarcando diversas fuentes escritas como artículos científicos, libros académicos e informes técnicos. El objetivo fue profundizar en el entendimiento de cómo los principios de la Química Verde pueden ser aplicados en la industria, centrándose en aspectos clave como la reducción de residuos y el uso de recursos renovables. Para este propósito, se emplearon técnicas de compilación y análisis de contenido. Además, se aprovecharon herramientas digitales, como bases de datos en línea especializadas, lo que permitió acceder a una amplia variedad de fuentes relevantes, facilitando un análisis exhaustivo del tema.

Resultados

Impacto Ambiental de la Industria

Las industrias químicas y la industria en general enfrentan numerosos problemas ambientales que incluyen la emisión de gases contaminantes como el CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), que contribuyen al calentamiento global, la contaminación del aire y al cambio climático, así como la contaminación del agua y del suelo debido a la liberación de residuos tóxicos y peligrosos, además, el uso intensivo de recursos naturales no renovables y de grandes cantidades de energía, generalmente proveniente de combustibles fósiles, incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos (Bravo-Calle et al., 2021).

El desarrollo industrial tiene un impacto significativo en los recursos hídricos, tanto en términos de cantidad como de calidad, las industrias utilizan grandes volúmenes de agua para diversas actividades, como la producción, el enfriamiento de maquinaria, la limpieza de equipos y el procesamiento de materiales, este uso intensivo puede agotar las fuentes locales de agua, afectando el suministro para la agricultura, el consumo humano y los ecosistemas (Pabón et al., 2020). Además, las industrias suelen descargar residuos tóxicos y productos químicos en cuerpos de agua, lo que genera

contaminación. Sustancias como metales pesados, disolventes, aceites y otros contaminantes pueden alterar la calidad del agua, afectando la biodiversidad acuática y poniendo en riesgo la salud de las comunidades que dependen de esas fuentes (Alfárez & Nieves, 2019).

En cuanto al suelo la industrialización ha tenido un impacto significativo, afectando tanto su calidad como su capacidad para sostener ecosistemas saludables, las actividades industriales, como la extracción de recursos, la construcción de infraestructuras y la producción de bienes, suelen provocar la degradación y contaminación de los suelos (Guzmán-Morales et al., 2019). Uno de los principales causas de la contaminación del suelo es la liberación de productos químicos tóxicos, metales pesados, hidrocarburos y otros contaminantes peligrosos, que se infiltran en el suelo y lo hacen inadecuado para la agricultura y otras actividades biológicas, además, la erosión del suelo se intensifica con la deforestación y el uso excesivo de maquinaria pesada en la construcción y en actividades industriales, lo que resulta en la pérdida de la capa superficial fértil del suelo (Ruiz, 2020).

Principios de la Química Verde

La Química Verde (QV) es definida como el diseño, desarrollo e implementación de productos y procesos que minimizan o eliminan el uso y la generación de sustancias peligrosas tanto para la salud humana como para el medio ambiente, su enfoque se centra en prevenir los problemas antes de que surjan, evitando la necesidad de soluciones posteriores. Anastas y Warner (1998) establecieron 12 principios que sirven como guía para la aplicación práctica de la Química Verde en la industria:

1. **Prevención, en lugar de tratamiento:** Es preferible evitar la generación de residuos desde el principio que tener que gestionarlos o eliminarlos después de que se han producido. Esto significa diseñar procesos que minimicen o eliminen la creación de desechos peligrosos o no deseados.
2. **Economía atómica:** Se refiere a maximizar la cantidad de materia prima que se convierte en el producto final. Cuanto más material se incorpore en el producto deseado y menos en residuos, más eficiente es el proceso.
3. **Síntesis de toxicidad reducida:** Las rutas sintéticas deben diseñarse para minimizar la toxicidad de las sustancias utilizadas y producidas. El objetivo es reducir el impacto tanto en la salud humana como en el medio ambiente.
4. **Productos seguros:** Los productos químicos deben diseñarse para mantener su efectividad mientras son lo menos tóxicos posible. De esta manera, se minimizan los riesgos para la salud y el ambiente durante su fabricación, uso y disposición.

5. **Reducción de sustancias auxiliares:** Se debe evitar el uso de disolventes, separadores y otros auxiliares siempre que sea posible. Si es necesario usarlos, deben ser lo más inofensivos posible para el medio ambiente y la salud.
6. **Eficiencia energética:** Los procesos químicos deben diseñarse para minimizar el consumo de energía, dado que la generación de energía tiene un impacto ambiental significativo. Se deben preferir los procesos que puedan ocurrir a temperatura y presión ambiente.
7. **Materias primas renovables:** Siempre que sea posible, las materias primas deben provenir de fuentes renovables, como biomasa o recursos agrícolas, en lugar de recursos no renovables como el petróleo o el gas natural.
8. **Reducción de derivados:** Las modificaciones innecesarias a los compuestos, como la protección o desprotección de grupos funcionales y la generación de subproductos, deben minimizarse porque añaden pasos adicionales que generan residuos.
9. **Potenciación de la catálisis:** Los catalizadores, que aceleran las reacciones químicas sin consumirse, deben preferirse frente a los reactivos estequiométricos, ya que permiten usar menos reactivo y generan menos residuos.
10. **Productos biodegradables:** Los productos deben diseñarse para descomponerse en compuestos inofensivos una vez que hayan cumplido su propósito, evitando así la acumulación de sustancias tóxicas en el medio ambiente.
11. **Monitoreo en tiempo real:** Los avances tecnológicos deben permitir monitorear y controlar los procesos químicos en tiempo real para prevenir la formación de sustancias peligrosas durante el proceso.
12. **Prevención de accidentes:** Los compuestos y los procesos deben diseñarse de manera que minimicen los riesgos de accidentes químicos, como explosiones, incendios o fugas de sustancias peligrosas.

Estos principios guían a la industria y a la comunidad científica en la creación de productos y procesos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Aplicación de la Química Verde en la Industria

La implementación de la Química Verde (QV) en el ámbito industrial se enfoca en disminuir y eliminar sustancias nocivas para el medioambiente y la salud humana, este enfoque busca reducir el riesgo inherente de las sustancias químicas, abarcando todas las fases del ciclo de vida de los

Química Verde y su Aplicación en la Industria para la Protección del Medio Ambiente

productos, desde su fabricación hasta su disposición final (Rivera, 2022). González-García et al. (2016) menciona que la QV trata aspectos como la toxicidad de los productos, la selección de materias primas y el uso eficiente de la energía, subrayando las conexiones entre los procesos de producción, la sociedad y el entorno natural, a continuación, se detallan las características de la aplicación en la industria:

1. **Reducción de sustancias peligrosas:** La QV se enfoca en minimizar o eliminar las sustancias químicas peligrosas para el medioambiente y la salud humana en los procesos industriales.
2. **Enfoque en el ciclo de vida de los productos:** La QV aborda todas las etapas del ciclo de vida de las sustancias, desde su producción hasta su disposición final, evaluando su toxicidad, las materias primas y la energía utilizadas en los procesos.
3. **Diseño de procesos seguros:** Los procesos y sustancias químicas son diseñados para ser inherentemente seguros y menos peligrosos, lo que reduce la necesidad de controles adicionales para mitigar riesgos.
4. **Carácter preventivo:** Se prioriza el diseño de procesos, reacciones químicas y condiciones de reacción, con un énfasis en la prevención de la toxicidad para los seres vivos.
5. **Interrelación con otras disciplinas:** La QV está estrechamente relacionada con áreas como la Ecología, Ciencias Ambientales, Toxicología e Ingeniería, debido a su objetivo de reducir residuos contaminantes.
6. **Vinculación con la sustentabilidad:** La QV tiene un enfoque hacia la sostenibilidad, lo que la conecta con disciplinas de las Ciencias Sociales como la Comunicación y la Psicología Ambiental.

Beneficios de la Química Verde en la Industria

Para Téllez (2020) la implementación de la QV en la industria ofrece numerosos beneficios, tanto a nivel ambiental como económico y social, estos beneficios se derivan de la aplicación de los principios de la Química Verde, que promueven la sostenibilidad, la reducción de riesgos y la eficiencia en los procesos productivos. A continuación, se describen algunos de los principales beneficios:

- **Reducción del impacto ambiental:** La Química Verde ayuda a minimizar la contaminación del aire, agua y suelo al reducir o eliminar el uso de sustancias tóxicas y peligrosas en los procesos industriales; esto no solo disminuye la liberación de residuos y

emisiones contaminantes, sino que también optimiza el uso de recursos naturales, lo que contribuye a la protección de la biodiversidad, previene daños irreparables a los ecosistemas y promueve un equilibrio más sostenible entre las actividades humanas y el entorno natural (Cevallos et al., 2019).

- **Disminución de residuos y subproductos:** Mediante la optimización de los procesos de producción, se genera una menor cantidad de residuos peligrosos, lo que reduce la necesidad de tratamientos posteriores y disminuye la carga sobre vertederos y plantas de tratamiento de residuos, lo que a su vez minimiza el consumo de energía y recursos utilizados en dichos procesos de gestión, esto también contribuye a un menor riesgo de contaminación accidental, ya que la reducción de residuos disminuye la posibilidad de filtraciones o derrames de sustancias peligrosas, lo que protege tanto a las personas como al medio ambiente (Gómez, 2008).
- **Ahorro de energía y recursos:** La QV promueve el uso de procesos más eficientes desde el punto de vista energético, reduciendo la cantidad de energía requerida y favoreciendo el uso de fuentes renovables, como la energía solar, eólica o biomasa, en lugar de fuentes convencionales, esto no solo disminuye la dependencia de combustibles fósiles, sino que también mitiga la emisión de gases de efecto invernadero y, por ende, reduce la huella de carbono de las industrias, al disminuir el uso de energías no renovables, también se fomenta una transición hacia una economía más sostenible y resiliente ante las fluctuaciones del mercado energético global (Soledad, 2018).
- **Mejora de la salud y seguridad:** Al eliminar el uso de productos químicos tóxicos y peligrosos, se mejora la seguridad en el lugar de trabajo y se reducen los riesgos para la salud de los empleados, asimismo, la disminución de emisiones contaminantes contribuye a una mejor calidad del aire y el agua, beneficiando la salud pública y las comunidades cercanas a los centros de producción (Moreno et al., 2020).
- **Cumplimiento regulatorio y ventajas competitivas:** Las industrias que adoptan prácticas de Química Verde están mejor posicionadas para cumplir con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas. Esto no solo evita sanciones, sino que también otorga una ventaja competitiva al mejorar la reputación de la empresa y generar confianza entre consumidores y socios comerciales, quienes valoran cada vez más las prácticas sostenibles (Franco-Moreno & Quintero-Duque, 2022).

- **Innovación y desarrollo de productos sostenibles:** La QV fomenta la innovación en el diseño de productos que son seguros, eficientes y biodegradables, impulsando la creación de materiales y compuestos que minimizan su impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la producción hasta su disposición final, esto puede abrir nuevas oportunidades de mercado para productos más sostenibles que responden a las crecientes demandas de los consumidores conscientes del medio ambiente, quienes valoran cada vez más las alternativas ecológicas permitiendo a las empresas posicionarse como líderes en sostenibilidad, lo que genera ventajas competitivas y fortalece su reputación en un entorno donde las normativas ambientales son cada vez más estrictas (Levy et al., 2017).
- **Reducción de costos:** Al mejorar la eficiencia de los procesos industriales y reducir la generación de residuos, las empresas pueden disminuir sus costos operativos; menos gasto en la gestión de residuos, el tratamiento de emisiones y el uso de materias primas implica una mayor rentabilidad a largo plazo, ya que se optimizan los recursos y se minimizan las pérdidas, además, la reducción de residuos y emisiones también puede evitar multas o sanciones por incumplimiento de normativas ambientales, lo que supone un ahorro adicional (Meinguer & Pérez, 2021).
- **Contribución a la sostenibilidad global:** La adopción de la Química Verde en la industria es un paso fundamental hacia un modelo de desarrollo más sostenible, al reducir el impacto ambiental y fomentar el uso eficiente de los recursos, contribuye a la conservación de los ecosistemas, protegiendo la biodiversidad y preservando los recursos naturales para las futuras generaciones; además, su enfoque en la minimización de residuos y la optimización del consumo de energía no solo ayuda a mitigar los efectos del cambio climático, sino que también fomenta una transición hacia una economía circular, donde los desechos se convierten en recursos y las industrias operan de manera más equilibrada con el entorno (Mascarell & Vilches, 2016).

Conclusiones

Durante este estudio, se ha profundizado en la importancia de la Química Verde y su aplicación en la industria como una estrategia clave para la protección del medio ambiente. En primer lugar, se ha analizado el impacto ambiental de la industria, destacando los efectos negativos de los procesos

Química Verde y su Aplicación en la Industria para la Protección del Medio Ambiente

industriales tradicionales, como la emisión de gases contaminantes, la contaminación del agua y del suelo, y la generación de residuos peligrosos que dañan gravemente los ecosistemas.

A continuación, se han revisado los 12 principios de la QV, que proporcionan una base teórica para transformar los procesos industriales mediante la reducción del uso de sustancias peligrosas, la mejora en la eficiencia energética y la minimización de residuos. La Química Verde no solo busca evitar daños al medio ambiente, sino que también previene riesgos para la salud humana, promoviendo un enfoque preventivo y sostenible.

Posteriormente, se ha examinado la aplicación de la QV en la industria, centrándose en cómo este enfoque permite a las empresas mejorar sus procesos de producción a través de la reducción de sustancias peligrosas y la optimización del ciclo de vida de los productos. También se ha detallado cómo la implementación de procesos más seguros y eficientes puede reducir costos operativos, mejorar la seguridad en el lugar de trabajo y cumplir con regulaciones ambientales cada vez más estrictas.

Por último, se han descrito los beneficios de la QV en la industria, que incluyen la reducción del impacto ambiental, la disminución de residuos y subproductos, el ahorro de energía, la mejora en la salud y seguridad de los empleados, y la contribución a la sostenibilidad global. Además, se ha resaltado la capacidad de la Química Verde para fomentar la innovación en el diseño de productos sostenibles y biodegradables, lo que no solo responde a las crecientes demandas de los consumidores conscientes del medio ambiente, sino que también posiciona a las empresas como líderes en sostenibilidad, otorgándoles una ventaja competitiva en el mercado.

En conclusión, la QV se presenta como una herramienta indispensable para las industrias que buscan un equilibrio entre el crecimiento económico y la responsabilidad ambiental. Al adoptar sus principios, las empresas no solo contribuyen a la protección del medio ambiente y la salud humana, sino que también logran mejorar su eficiencia operativa y fortalecer su posición en mercados cada vez más orientados hacia la sostenibilidad. Es necesario profundizar en su aplicación concreta para maximizar los beneficios de sostenibilidad y mejorar su impacto en la protección ambiental y la salud humana.

Referencias

1. Alférez, L., & Nieves, N. (2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. *Caribeña de Ciencias Sociales*.

- <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html/hdl.handle.net/20.500.11763/caribe1906tratamiento-aguas-residuales>
- Anastas, P., & Warner, J. (1998). *Green chemistry, theory and practice*. Oxford University Press. <https://search.worldcat.org/es/title/Green-chemistry-:-theory-and-practice/oclc/39523207>
 - Arellano, G., & Guarachi, F. (2021). Protección del medio ambiente en el contexto de una nueva constitución: recomendaciones en base a la experiencia comparada. *Estudios constitucionales*, 19(1), 66-110. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-52002021000100066>
 - Bravo-Calle, O., Osorio-Rivera, M., & Loor-Lalvay, X. (2021). La calidad del desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(9), 153-166. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8094540>
 - Cevallos, A., Muñoz, J., & Freund, K. (2019). Los aspectos y principios básicos de la química verde, la ingeniería sostenible, la sostenibilidad y la economía circular. The basic aspects and principles of green chemistry, sustainable engineering, sustainability and circular economy. *Revista Carácter*, 7(1). <https://acortar.link/XecrRl>
 - Doria, M. (2009). *Green Chemistry: a new approach for environmental care*. *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)
 - Ferrer, A. (2019). Química Sostenible y Sostenibilidad: un cambio de mentalidad. *ENCUENTRO CON LA QUÍMICA*, 5(3), 30. <https://n9.cl/qibrg>
 - Franco-Moreno, R., & Quintero-Duque, L. (2022). La química verde: entre libros, fronteras y educación. *PPDQ Boletín*, (65), 3-5. <https://revistas.upn.edu.co/index.php/PPDQ/article/view/17214>
 - Gómez, J. (2008). Ingeniería Verde: Doce principios para la sostenibilidad. *Ingeniería química*, (458), 168-175. <https://www.researchgate.net/publication/282329942>
 - González-García, P., Pérez-Méndez, C., & Figueroa-Duarte, S. (2016). La enseñanza de la química desde la perspectiva de la química verde. *Revista científica*, 24(1), 24-40. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a3>
 - Guzmán-Morales, A., Cruz-La Paz, O., & Valdés-Carmenate, R. (2019). Efectos de la contaminación por metales pesados en un suelo con uso agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542019000100004&script=sci_arttext&tlng=en

12. Levy, I., Bastin, L., Dicks, A., Mehta, A., Trovitch, R., & Wissinger, J. (2017). A Guide to Green Chemistry Experiments for Undergraduate Organic Chemistry Labs. *beyondbenign green chemistry education*.
https://www.mygreenlab.org/uploads/2/1/9/4/21945752/a_guide_to_green_chemistry_experiments_for_undergraduate_organic_chemistry_labs_march_2018_v2.pdf
13. Malik, A., & Grohmann, E. (2012). Environmental protection strategies for sustainable development (Vol. 520). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2>
14. Mascarell, L., & Vilches, A. (2016). Química Verde y Sostenibilidad en la educación en ciencias en secundaria. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 34(2), 25-42. <https://www.raco.cat/index.php/ensenanza/article/view/309278>
15. Meinguer, J., & Pérez, M. (2021). Desarrollo y evaluación de elementos de pensamiento crítico sobre la química verde en bachillerato. *Investigación en la Escuela*, 103. 106-124
<http://dx.doi.org/10.12795/IE.2021.i103.08>
16. Moreno, R., Hernández, J., & Toro, C. (2020). Concepciones sobre química verde en profesores de química en formación inicial: Green chemistry concepts in chemistry teachers in initial training. *Noria Investigación Educativa*, 1(5), 94-108.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/NoriaIE/article/view/16507>
17. Murcia, J., & Esquiaqui, L. (2021). Química verde aplicada en los residuos de universidades. *Educación química*, 32(2), 154-167. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.2.76534>
18. Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-83672020000100009&script=sci_arttext
19. Pino, A. (2020). Química verde: enfoque sistémico. Ediciones UNL.
<https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/5630>
20. Rivera, L. (2022). La química verde como herramienta para la gestión ambiental en los procesos de análisis de matrices ambientales [Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia].
<https://hdl.handle.net/10495/32034>
21. Rivera, L., Molina, F., & Ramos, C. (2023). La química verde como herramienta para la gestión ambiental en laboratorios de ensayo: aplicación en la determinación de mercurio en

- aguas por espectrofotometría de absorción atómica de vapor frío. *Revista EIA*, 20(39), 3916-pp. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8721233>
22. Ruiz, M. (2020). Estado actual de la contaminación ambiental presente en la Mixteca Oaxaqueña. *Journal of Negative and No Positive Results*, 5(5), 535-553. <https://dx.doi.org/10.19230/jonnpr.3257>
23. Soledad, B. (2018). Enseñanza de la química sostenible en las carreras de ingeniería. *Revista de Química*, 32(1), 12-17. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/19578>
24. Téllez, J. (2020). Enseñanza del Cambio Químico en Grado Octavo. Una Estrategia Didáctica desde la Química Verde y los Trabajos Prácticos de Laboratorio [Tesis de Maestría, Universidad Pedagógica Nacional]. Repositorio Institucional UPN. <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/12371>
25. Zapien-Gómez, J., Vásquez-Reyez, E., Pozuelo-Rivera, M., Zorrilla-Romo, A., Flores-Bastida, E., Guzmán-García, O. & Vázquez-Núñez, E. (2023). Principios de química verde aplicados a la síntesis de materiales carbonosos para su uso en remediación ambiental. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1-8. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4125>