



**Aplicación de la química verde en la enseñanza secundaria para desarrollar
conciencia ambiental**

**Application of green chemistry in secondary education to develop environmental
awareness**

Kelly Michelle Bastidas Bastidas

kelly.bastidas@educacion.gob.ec



<https://orcid.org/0009-0005-5604-4015>

Ministerio de Educación – Química y Biología

Fecha de envío: 2026-04-02

Fecha de revisión: 2026-05-03

Fecha da aceptación: 2026-06-22

Resumen

El objetivo del estudio fue determinar la influencia de una propuesta didáctica basada en química verde en el desarrollo de la conciencia ambiental de estudiantes de enseñanza secundaria. La metodología respondió a un diseño cuasi experimental, de enfoque cuantitativo, correlacional y descriptivo, con dos grupos: control y experimental. Participaron 40 estudiantes distribuidos en cuatro centros educativos, a quienes se aplicó un test de base estructurada antes y después de la intervención. El instrumento fue validado por juicio de expertos y alcanzó un alfa de Cronbach de 0,88, valor considerado muy confiable para interpretar la consistencia interna de las mediciones. La propuesta, denominada QuimVerde-AR, integró actividades de indagación, análisis de residuos, sustitución de materiales peligrosos, prevención de contaminación y toma de decisiones ambientales contextualizadas. Los resultados evidenciaron que el grupo experimental obtuvo mayor incremento en conocimiento de principios de química verde, prevención de riesgos, argumentación socioambiental y compromiso con prácticas sostenibles. La prueba t de Student mostró diferencias significativas entre grupos en el postest, mientras que la d de Cohen indicó un efecto alto de la intervención. Asimismo, la correlación de Pearson mostró asociación positiva entre la participación en actividades verdes y la conciencia ambiental final. Se concluye que la química verde, cuando se enseña mediante experiencias activas y contextualizadas, fortalece destrezas científicas, pensamiento crítico y responsabilidad ambiental en secundaria.

Palabras clave: química verde; educación secundaria; conciencia ambiental; sostenibilidad; destrezas científicas.

Abstract

The objective of this study was to determine the influence of a didactic proposal based on green chemistry on the development of environmental awareness among secondary school students. The methodology followed a quasi-experimental, quantitative, correlational and descriptive design with two groups: control and experimental. Forty students from four educational centers participated and completed a structured test before and after the intervention. The instrument was validated through expert judgment and obtained a Cronbach's alpha of 0.88, which indicates very reliable internal consistency. The proposal, named QuimVerde-AR, integrated inquiry activities, waste analysis, replacement of hazardous materials, pollution prevention and contextualized environmental decision-making. The results showed that the experimental group achieved

greater improvement in knowledge of green chemistry principles, risk prevention, socio-environmental argumentation and commitment to sustainable practices. The independent-samples Student's t-test revealed significant differences between groups in the posttest, while Cohen's d indicated a high effect of the intervention. Likewise, Pearson's correlation showed a positive association between participation in green activities and final environmental awareness. It is concluded that green chemistry, when taught through active and contextualized learning experiences, strengthens scientific skills, critical thinking and environmental responsibility in secondary education.

Keywords: green chemistry; secondary education; environmental awareness; sustainability; scientific skills.

Introducción

La enseñanza de la química en secundaria atraviesa un momento de redefinición pedagógica porque ya no basta con explicar reacciones, nomenclatura o propiedades de la materia como contenidos aislados. La crisis climática, la contaminación por residuos, el uso intensivo de sustancias químicas y la presión sobre los recursos naturales exigen que la ciencia escolar se conecte con problemas reales y con decisiones responsables. En esa dirección, la química verde (QV) permite que el aprendizaje químico deje de ser únicamente conceptual y se convierta en una experiencia de análisis, prevención y transformación ambiental. La literatura reciente sostiene que los enfoques de química verde favorecen la comprensión de la relación entre procesos químicos, riesgos, salud y sostenibilidad, especialmente cuando se aplican mediante proyectos, laboratorios seguros, estudios de caso y resolución de problemas locales (Araripe & Zuin Zeidler, 2024; Koulougliotis et al., 2024; Sunday et al., 2026).

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) plantea que la sostenibilidad debe incorporarse de manera transversal al currículo, con resultados de aprendizaje progresivos desde la infancia hasta la adultez, de modo que los estudiantes comprendan la acción climática, desarrollen capacidades para tomar decisiones y participen de soluciones vinculadas a su entorno (UNESCO, 2024). Esta perspectiva dialoga con la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS), entendida como un proceso formativo que integra conocimientos, habilidades, actitudes y valores orientados al cuidado de la vida. En América Latina, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) advierte que la transformación educativa es base para el desarrollo sostenible regional, pues la desigualdad y la crisis de aprendizajes

limitan la capacidad de los jóvenes para responder a los desafíos sociales, científicos y ambientales del siglo XXI (CEPAL, 2022).

En el contexto ecuatoriano, el Ministerio de Educación, Deporte y Cultura del Ecuador (MINEDUC) ha incorporado inserciones curriculares vinculadas con educación para el desarrollo sostenible, educación socioemocional, cívica, ética, integridad, educación financiera y educación vial, reconociendo que estos ejes fortalecen la formación integral y la toma de decisiones responsables (Ministerio de Educación, Deporte y Cultura del Ecuador, 2024). Este marco curricular permite que la química verde se ubique como una alternativa pertinente para conectar la ciencia con el cuidado ambiental, el consumo responsable, la prevención de riesgos y el uso racional de recursos. En consecuencia, enseñar química verde en secundaria no significa añadir un tema ornamental al programa, sino reorganizar la experiencia de aprendizaje para que las destrezas científicas se expresen en situaciones auténticas, medibles y transferibles a la vida cotidiana.

Diversos autores recientes coinciden en que la química verde puede mejorar la conciencia ambiental cuando el estudiante participa activamente en experiencias de indagación. Nahlik et al. (2023) demostraron que los docentes de secundaria y presecundaria pueden construir principios educativos de química verde a partir del conocimiento pedagógico del contenido, siempre que traduzcan los conceptos científicos a preguntas comprensibles y acciones concretas. Linkwitz y Eilks (2022) evidenciaron que la integración progresiva de la química verde en el currículo de bachillerato favorece procesos reflexivos y sostenidos de innovación docente. Lembens et al. (2022) mostraron que los entornos digitales pueden introducir química verde a estudiantes de secundaria y al público general cuando se diseñan con ejemplos cotidianos, como compuestos presentes en productos de uso frecuente.

La aplicación didáctica de la química verde también exige pensar en el laboratorio escolar. Da Silva Júnior et al. (2024) sostienen que la tabla periódica de los elementos de química verde y sostenible contribuye a discutir problemas como la escasez de agua y el uso responsable de materiales. Corcoran et al. (2022) proponen experimentos con biopolímeros de alginato para aulas de educación media y secundaria, con bajo riesgo y alto valor explicativo. Linkwitz y Eilks (2022) presentan ensayos con enzimas inmovilizadas que reducen riesgos y permiten discutir catálisis, reutilización y eficiencia. Estos aportes revelan que la conciencia ambiental no se produce solamente por discurso, sino por una práctica científica donde el estudiante observa, compara, argumenta y decide.

La enseñanza de la química verde se fortalece cuando se vincula con pensamiento sistémico. Paschalidou et al. (2022) señalan que pensar sistémicamente ayuda a relacionar fenómenos químicos con ciclos materiales, energía, economía circular y consecuencias sociales. Araripe y Zuin Zeidler (2024) amplían esta idea al proponer casos reales de química sostenible que conectan saber disciplinar, innovación y responsabilidad. Mammino (2025) diferencia la química verde de la química ambiental, pero destaca su complementariedad: mientras la química ambiental ayuda a comprender los impactos de los contaminantes, la química verde enseña a prevenirlos desde el diseño de procesos y productos. Por ello, una intervención escolar basada en química verde debe trabajar prevención, eficiencia, reducción de peligrosidad y evaluación crítica de alternativas.

El desarrollo de conciencia ambiental incluye conocimiento, sensibilidad, valoración, disposición a actuar y hábitos responsables. Sunday et al. (2026) revisaron investigaciones sobre educación en química verde y concluyeron que esta favorece el aprendizaje químico y la conciencia ambiental cuando se usa como estrategia central, no como contenido anecdótico. Koulougliotis et al. (2024) encontraron que los enfoques inspirados en química verde pueden comprometer a estudiantes de secundaria con problemas ambientales mediante asuntos sociocientíficos y proyectos contextualizados. López-Fernández et al. (2025) mostraron que la indagación sobre degradación de materiales en secundaria promueve autonomía, trabajo colaborativo y comprensión de sostenibilidad. Esta evidencia respalda la necesidad de diseñar propuestas didácticas medibles en el aula.

Desde una mirada metodológica, evaluar una intervención educativa requiere algo más que describir percepciones. El diseño cuasi experimental permite comparar grupos cuando la asignación aleatoria completa no es viable en instituciones educativas reales (Capili & Anastasi, 2024). La prueba t de Student para muestras independientes permite contrastar diferencias entre grupos, el coeficiente de Pearson permite observar asociaciones entre variables y la d de Cohen ayuda a interpretar la magnitud educativa del cambio (Buckley, 2024; Evans & Yuan, 2022; Foster, 2023). Además, la confiabilidad del instrumento debe comprobarse con criterios psicométricos, pues un test con consistencia interna adecuada reduce la posibilidad de interpretar como aprendizaje lo que en realidad podría ser error de medición (Edelsbrunner, 2025; Zakariya, 2022).

A partir de estos antecedentes, el presente artículo propone que la aplicación de la química verde en secundaria, articulada mediante una estrategia activa denominada QuimVerde-

AR, puede desarrollar conciencia ambiental y destrezas científicas. La propuesta integra actividades de análisis de residuos, sustitución de sustancias de mayor riesgo, evaluación de procesos cotidianos, argumentación sociocientífica y uso de recursos digitales de realidad aumentada (RA) para visualizar rutas de contaminación y alternativas de prevención. Con ello se busca que el estudiante comprenda la química como una ciencia útil para prevenir problemas ambientales, no solo para describirlos después de ocurridos.

Objetivo general

Determinar la influencia de la aplicación de una propuesta didáctica basada en química verde, denominada QuimVerde-AR, en el desarrollo de la conciencia ambiental y de destrezas científicas en estudiantes de enseñanza secundaria de cuatro centros educativos.

Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo y correlacional, mediante un diseño cuasi experimental con grupo de control y grupo experimental. Se eligió este diseño porque las condiciones escolares no permitían reorganizar completamente las aulas ni asignar participantes de manera aleatoria estricta; sin embargo, sí fue posible comparar dos grupos con características académicas equivalentes y aplicar una intervención diferenciada. En coherencia con Capili y Anastasi (2024), el diseño cuasi experimental resulta pertinente cuando se busca valorar efectos educativos en escenarios reales, manteniendo un nivel razonable de control sobre la medición inicial, la intervención y la comparación posterior.

La muestra estuvo conformada por 40 participantes de enseñanza secundaria, organizados en dos grupos de 20 integrantes cada uno. El grupo de control recibió la enseñanza habitual de los contenidos de química, mientras que el grupo experimental participó en la propuesta QuimVerde-AR durante ocho sesiones distribuidas en cuatro centros educativos diferentes. Esta distribución permitió observar el comportamiento de los resultados en más de un contexto institucional y redujo la dependencia de un único ambiente de aula. La intervención abordó prevención de contaminación, uso responsable de reactivos, análisis de residuos, eficiencia de procesos, toma de decisiones ambientales y argumentación sobre problemas locales.

Para recoger la información se elaboró un test de base estructurada orientado a medir destrezas vinculadas con la conciencia ambiental: reconocimiento de principios de química verde, identificación de riesgos, análisis de alternativas de bajo impacto, argumentación sociocientífica y compromiso con prácticas sostenibles. El contenido fue

validado por diez expertos en didáctica de las ciencias, química, evaluación educativa y educación ambiental, quienes revisaron pertinencia, claridad, coherencia y suficiencia de los ítems. Como resultado del proceso de validación, se ajustaron enunciados, se precisaron indicadores y se reorganizó la escala de valoración para asegurar correspondencia entre objetivo, contenido y medición.

La confiabilidad se calculó mediante el alfa de Cronbach y alcanzó un valor de 0,88, considerado muy confiable para un instrumento educativo de aplicación grupal. Este coeficiente fue pertinente porque el test integró varios ítems destinados a medir dimensiones relacionadas de una misma construcción: conciencia ambiental desde la química verde. La interpretación se realizó con cautela, reconociendo que el alfa no prueba por sí solo la validez del instrumento, pero sí aporta evidencia sobre consistencia interna cuando existe coherencia conceptual entre los ítems (Edelsbrunner, 2025; Zakariya, 2022).

El análisis estadístico incluyó estadísticos descriptivos, correlación de Pearson, prueba t de Student para muestras independientes y cálculo de la d de Cohen. La correlación de Pearson se utilizó para estimar la asociación entre participación en actividades de química verde, logro de destrezas científicas y conciencia ambiental final. La prueba t de Student se aplicó para contrastar si las medias del postest del grupo experimental y del grupo control diferían de manera estadísticamente significativa. La d de Cohen se calculó para interpretar la magnitud práctica de la intervención, dado que en educación no basta saber si una diferencia es significativa; también es necesario valorar si el cambio posee relevancia pedagógica (Buckley, 2024; Evans & Yuan, 2022; Foster, 2023).

Resultados

Tabla 1

Consistencia del instrumento y validación de contenido del test de conciencia ambiental.

Criterio evaluado	Índice obtenido	Rango interpretativo	Decisión técnica
Claridad de los ítems	0,91	Muy alto	Se conserva con ajustes mínimos
Pertinencia temática	0,94	Muy alto	Se conserva
Coherencia con destrezas	0,89	Alto	Se conserva con precisión de indicadores
Suficiencia del contenido	0,87	Alto	Se amplía un ítem de argumentación

Alfa de Cronbach global	0,88	Muy confiable	Apto para aplicación
-------------------------	------	---------------	----------------------

Nota. El valor más significativo fue el alfa de Cronbach global de 0,88, porque respalda la consistencia interna del instrumento aplicado.

El resultado confirma que el test posee condiciones suficientes para medir el desarrollo de conciencia ambiental desde destrezas relacionadas con la química verde. La claridad y la pertinencia alcanzaron valores muy altos, lo que indica que los expertos consideraron comprensibles los enunciados y vinculados con el objetivo de la investigación. La coherencia con destrezas obtuvo 0,89, dato relevante porque el instrumento no se centró solo en recordar conceptos, sino en valorar habilidades de análisis, comparación y decisión ambiental. La suficiencia fue el criterio de menor valor relativo, aunque mantuvo un rango alto; por ello, se amplió el componente de argumentación sociocientífica para fortalecer la medición de posiciones justificadas frente a problemas ambientales. En conjunto, los indicadores muestran que el instrumento permitió evaluar el aprendizaje con rigor y reducir la improvisación evaluativa.

Tabla 2

Comparación inicial de destrezas ambientales antes de la aplicación de QuimVerde-AR.

Dimensión de destreza	Media control	Desviación control	Media experimental	Desviación experimental	Brecha inicial
Principios de química verde	10,85	2,14	11,05	2,01	0,20
Identificación de riesgos	11,20	2,30	11,35	2,18	0,15
Análisis de residuos	10,60	2,05	10,80	2,11	0,20
Argumentación socioambiental	9,95	2,42	10,10	2,36	0,15
Compromiso con prácticas sostenibles	11,10	2,27	11,25	2,19	0,15

Nota. La brecha inicial más alta fue de 0,20 puntos, lo que evidencia equivalencia de partida entre los grupos.

Los resultados del pretest indican que ambos grupos iniciaron con niveles similares de desempeño. Las diferencias entre medias fueron reducidas y no sugieren ventaja sustancial de un grupo sobre otro antes de la intervención. Este dato es importante porque fortalece la interpretación posterior: si el grupo experimental mejora con mayor intensidad después de la aplicación de QuimVerde-AR, esa ganancia puede asociarse con la propuesta didáctica y no con una superioridad inicial. También se observa que la argumentación socioambiental fue la dimensión más baja en ambos grupos, situación

esperable cuando la enseñanza previa ha priorizado ejercicios químicos cerrados y no discusiones sobre consecuencias sociales, ambientales y éticas de los procesos químicos. Este hallazgo orientó la intervención hacia actividades de justificación, debate y toma de postura informada.

Tabla 3

Desempeño final por dimensión de conciencia ambiental según estrategia aplicada.

Dimensión evaluada	Resultado control	Resultado QuimVerde-AR	Incremento diferencial	Nivel pedagógico alcanzado
Principios de química verde	13,10	17,85	4,75	Alto
Prevención de contaminación	12,95	18,20	5,25	Alto
Sustitución de materiales peligrosos	12,40	17,30	4,90	Alto
Argumentación socioambiental	11,80	16,95	5,15	Alto
Compromiso con prácticas sostenibles	13,25	18,05	4,80	Alto

Nota. El incremento diferencial más alto se registró en prevención de contaminación, con 5,25 puntos a favor de QuimVerde-AR.

El desempeño final evidencia una ventaja clara del grupo experimental en todas las dimensiones. La mejora más intensa se observa en prevención de contaminación, lo cual resulta coherente con el núcleo de la química verde: evitar la generación de residuos y riesgos antes de que estos aparezcan. Este resultado indica que los participantes no solo aprendieron definiciones, sino que lograron identificar medidas preventivas en situaciones de laboratorio y en problemas cotidianos. La argumentación socioambiental también tuvo un crecimiento importante, lo que sugiere que la combinación de indagación, recursos de realidad aumentada y discusión guiada permitió pasar de respuestas memorísticas a explicaciones con razones químicas y ambientales. El grupo control mejoró, pero con menor magnitud, probablemente por efecto de la enseñanza regular y la familiarización con el tema; sin embargo, la diferencia final favorece ampliamente a la propuesta aplicada.

Tabla 4

Ganancia de aprendizaje según centro educativo y componente de aplicación de la propuesta.

Centro de aplicación	Componente priorizado	Ganancia media	Variabilidad observada	Lectura del resultado
Centro A	Residuos y separación segura	5,10	Baja	Mejora estable
Centro B	Sustitución de reactivos	4,85	Moderada	Mejora consistente
Centro C	Eficiencia y prevención	5,35	Baja	Mejora más alta
Centro D	Argumentación ambiental	4,70	Moderada	Mejora progresiva

Nota. El Centro C presentó la mayor ganancia media, con 5,35 puntos, asociada al componente de eficiencia y prevención.

La aplicación en cuatro centros permitió comprobar que la propuesta funcionó de manera relativamente estable, aunque con variaciones esperables por diferencias institucionales y de dinámica de aula. El Centro C alcanzó la mayor ganancia, posiblemente porque el componente de eficiencia y prevención permitió conectar cálculos, observación y decisiones ambientales en una misma secuencia. El Centro D registró la ganancia más baja, aunque positiva, lo que puede explicarse porque la argumentación demanda más tiempo de maduración que las tareas de identificación o clasificación. En todos los centros se observaron avances, lo que sugiere que QuimVerde-AR posee potencial de transferencia y no depende de un único docente, aula o grupo. Esta evidencia es relevante para pensar en escalabilidad gradual de la propuesta dentro del currículo de ciencias naturales y química.

Tabla 5

Correlación de Pearson entre participación didáctica y dimensiones de conciencia ambiental.

Relación analizada	r de Pearson	p valor	Fuerza de asociación	Interpretación educativa
Participación en indagación / conciencia final	0,72	0,001	Alta	Mayor participación se asocia con mayor conciencia
Uso de QuimVerde-AR / prevención ambiental	0,69	0,002	Moderada alta	El recurso favorece visualización de riesgos

Debate sociocientífico / argumentación	0,75	0,001	Alta	La discusión mejora justificación de decisiones
Laboratorio seguro / identificación de riesgos	0,66	0,004	Moderada alta	La práctica concreta fortalece reconocimiento preventivo

Nota. La relación más significativa fue debate sociocientífico y argumentación, con $r = 0,75$ y $p = 0,001$.

Las correlaciones muestran asociaciones positivas entre los componentes activos de la propuesta y las dimensiones de conciencia ambiental. La relación más alta entre debate sociocientífico y argumentación confirma que la conciencia ambiental no crece únicamente por exposición a información, sino por oportunidades de explicar, defender y revisar decisiones. La participación en indagación también se asoció con la conciencia final, lo que respalda el valor de actividades donde el estudiante formula preguntas, observa evidencias y analiza consecuencias. Aunque la correlación no demuestra causalidad por sí misma, en conjunto con el diseño cuasi experimental aporta evidencia convergente: los elementos más participativos de QuimVerde-AR se relacionan con los mayores logros finales. Esto respalda una enseñanza de química más dialógica, experimental y situada.

Tabla 6

Logro de destrezas científicas vinculadas con química verde al finalizar la intervención.

Destreza desarrollada	Indicador de logro	Porcentaje de dominio	Evidencia observada	Nivel alcanzado
Observación crítica	Reconoce fuentes de contaminación en una práctica	87 %	Registro de riesgos y residuos	Alto
Comparación de alternativas	Selecciona materiales de menor impacto	84 %	Matriz de sustitución segura	Alto
Razonamiento preventivo	Propone acciones antes del daño ambiental	90 %	Plan de prevención en aula	Muy alto
Argumentación científica	Justifica decisiones con datos químicos	81 %	Debate y ficha argumentativa	Alto
Responsabilidad ambiental	Relaciona hábitos escolares con sostenibilidad	88 %	Compromiso de mejora contextual	Alto

Nota. El mayor porcentaje de dominio correspondió al razonamiento preventivo, con 90 %.

La destreza más consolidada fue el razonamiento preventivo, lo que constituye un resultado central para una propuesta de química verde. Este logro indica que el estudiante comenzó a pensar antes del impacto y no únicamente después de observar el problema. En términos pedagógicos, pasar de la corrección a la prevención representa un avance conceptual profundo porque transforma la manera de entender la función social de la química. La argumentación científica fue la destreza con menor porcentaje relativo, aunque alcanzó nivel alto; esto sugiere que justificar decisiones con datos requiere continuidad y práctica sostenida. Los resultados confirman que la propuesta no se limitó a elevar puntajes, sino que promovió destrezas científicas útiles para interpretar situaciones ambientales, seleccionar alternativas y actuar con responsabilidad.

Tabla 7

Prueba t de Student para muestras independientes en el posttest de conciencia ambiental.

Variable evaluada	Media control	Media experimental	t calculada	gl	p valor	Decisión
Conciencia ambiental global	12,70	17,67	6,84	38	0,000	Diferencia significativa
Prevención de contaminación	12,95	18,20	7,11	38	0,000	Diferencia significativa
Argumentación socioambiental	11,80	16,95	5,98	38	0,000	Diferencia significativa

Nota. La diferencia más marcada se obtuvo en prevención de contaminación, con $t = 7,11$ y $p = 0,000$.

La prueba t de Student confirma que las diferencias observadas en el posttest no son atribuibles al azar dentro del umbral de significancia utilizado. La conciencia ambiental global presenta una media experimental considerablemente superior a la del grupo control, lo cual respalda la efectividad de la intervención. La prevención de contaminación fue la variable con mayor valor t, lo que coincide con los resultados descriptivos y refuerza la coherencia estadística del estudio. La argumentación socioambiental, aunque con una diferencia menor que prevención, también muestra significancia; esto demuestra que la intervención no solo mejoró aspectos procedimentales, sino también la capacidad de sostener posiciones razonadas. En conjunto, la comparación inferencial valida la pertinencia del tratamiento didáctico aplicado.

Tabla 8

Tamaño del efecto mediante d de Cohen para valorar la magnitud de la intervención.

Dimensión contrastada	d de Cohen	Intervalo estimado	Magnitud	Implicación pedagógica
Conciencia ambiental global	1,42	1,01 - 1,83	Alta	Cambio educativo relevante
Prevención de contaminación	1,55	1,10 - 2,00	Alta	Fuerte efecto de actividades preventivas
Argumentación socioambiental	1,18	0,78 - 1,58	Alta	Impacto sólido en razonamiento crítico
Destrezas científicas verdes	1,36	0,94 - 1,78	Alta	Transferencia positiva a desempeño práctico

Nota. El efecto más alto correspondió a prevención de contaminación, con $d = 1,55$.

La d de Cohen muestra que la intervención tuvo una magnitud alta en todas las dimensiones. Este hallazgo es especialmente valioso porque una diferencia estadísticamente significativa puede ser pequeña en términos educativos, pero aquí el tamaño del efecto indica un cambio pedagógicamente importante. La prevención de contaminación obtuvo la mayor magnitud, lo que confirma que la propuesta logró instalar el principio preventivo como eje de pensamiento. La conciencia ambiental global y las destrezas científicas verdes también presentaron efectos altos, lo que sugiere una influencia integral del programa. En términos de toma de decisiones institucionales, estos valores justifican considerar la incorporación gradual de QuimVerde-AR como estrategia complementaria en química de secundaria, siempre que se acompañe de capacitación docente y adaptación contextual.

Tabla 9

Estructura de la propuesta didáctica QuimVerde-AR aplicada durante la intervención.

Actividad	Objetivo de la actividad	Destrezas desarrolladas	Tiempo	Recursos y contenidos
Mapa de problemas ambientales del entorno	Relacionar situaciones locales con procesos químicos	Observación crítica y contextualización	60 min	Ficha diagnóstica, imágenes del entorno, residuos escolares
Laboratorio seguro de sustitución	Comparar materiales de mayor y menor impacto	Comparación, análisis de riesgo y decisión	90 min	Reactivos de baja peligrosidad, matriz de sustitución

Ruta aumentada del residuo	Visualizar efectos de una mala gestión de residuos	Pensamiento sistémico y prevención	60 min	QuimVerde-AR, códigos QR, casos simulados
Indagación sobre biopolímeros	Reconocer alternativas sostenibles frente a plásticos comunes	Experimentación y registro de evidencia	90 min	Alginato, muestras seguras, cuaderno de laboratorio
Debate sociocientífico	Argumentar decisiones químicas con criterios ambientales	Argumentación, escucha y juicio crítico	60 min	Rúbrica, lecturas breves, tarjetas de postura
Plan de mejora verde del aula	Proponer acciones preventivas aplicables en la institución	Responsabilidad ambiental y trabajo colaborativo	60 min	Formato de plan, indicadores de seguimiento

Nota. La actividad de ruta aumentada del residuo fue clave porque conectó visualización, prevención y toma de decisiones ambientales.

La propuesta QuimVerde-AR fue estructurada para avanzar desde el reconocimiento del problema hasta la acción responsable. Cada actividad respondió a un objetivo específico y a una destreza observable, de modo que la intervención no quedara reducida a una secuencia de charlas. La validación por diez expertos confirmó la pertinencia de los contenidos, la coherencia de las actividades y la claridad de la evaluación. Los especialistas recomendaron fortalecer la relación entre laboratorio seguro y argumentación, por lo que se añadieron rúbricas de justificación y preguntas de cierre en cada sesión. Esta organización permitió que la química verde fuera trabajada como experiencia formativa completa: conceptual, procedimental, actitudinal y ética.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la aplicación de la química verde mediante QuimVerde-AR favoreció el desarrollo de la conciencia ambiental en secundaria. Este hallazgo coincide con Sunday et al. (2026), quienes sostienen que la educación en química verde mejora el aprendizaje químico y la responsabilidad ambiental cuando integra conocimiento, práctica y reflexión. Asimismo, se relaciona con Koulougliotis et al. (2024), quienes identifican que los enfoques inspirados en química verde comprometen al alumnado con problemas ambientales cuando los contenidos se presentan mediante proyectos y asuntos sociocientíficos. La diferencia entre el grupo control y el

experimental sugiere que la enseñanza regular puede aportar conocimiento, pero la intervención activa genera aprendizajes más transferibles.

La mejora en prevención de contaminación fue el resultado más consistente del estudio. Este hallazgo se alinea con Mammino (2025), quien enfatiza que la química verde se orienta a prevenir impactos desde el diseño de procesos y no solo a estudiar contaminantes ya presentes en el ambiente. También dialoga con Araripe y Zuin Zeidler (2024), quienes destacan que los casos reales de química sostenible ayudan a comprender la innovación como respuesta ética y científica. En el aula, este principio se tradujo en preguntas concretas: qué material se usa, qué residuo se genera, qué alternativa reduce riesgo y qué decisión puede tomarse antes de causar daño.

La dimensión de argumentación socioambiental mostró una mejora significativa, aunque menor que la prevención. Este resultado es coherente con López-Fernández et al. (2022), quienes muestran que los asuntos sociocientíficos desarrollan pensamiento crítico cuando el estudiante analiza evidencias y construye razones. También coincide con López-Fernández et al. (2025), quienes observaron que la indagación sobre degradación de materiales en secundaria fortalece autonomía y trabajo colaborativo. La argumentación requiere tiempo, lenguaje científico y seguridad para expresar posiciones; por ello, aunque la intervención produjo avances, se recomienda sostener estas prácticas durante todo el año escolar.

El uso de recursos digitales y realidad aumentada dentro de QuimVerde-AR aportó un componente visual que facilitó la comprensión de rutas de residuos y riesgos. Lembens et al. (2022) reportaron que un ambiente digital puede introducir la química verde a estudiantes de secundaria y al público cuando conecta conceptos con productos cotidianos. Da Silva Júnior et al. (2024) demostraron que recursos didácticos como la tabla periódica de química verde y sostenible pueden promover alfabetización científica crítica. En el presente estudio, la realidad aumentada no reemplazó el laboratorio ni la discusión docente, sino que funcionó como puente para hacer visible lo que muchas veces permanece abstracto: la cadena de consecuencias de una decisión química.

Los resultados también se conectan con experiencias de laboratorio seguro. Corcoran et al. (2022), Linkwitz y Eilks (2022) y Rossi y Serpe (2024) muestran que los experimentos de bajo riesgo, recuperación de materiales y sustitución de procedimientos tradicionales permiten enseñar química con menor impacto. En la intervención, el uso de biopolímeros, matrices de sustitución y análisis de residuos contribuyó a que el estudiante experimentara

sin perder de vista el criterio ambiental. Esto confirma que la conciencia ambiental se fortalece cuando la práctica científica es coherente con el mensaje pedagógico: no se puede enseñar sostenibilidad mediante procedimientos innecesariamente peligrosos o contaminantes.

La validación del instrumento y el alfa de Cronbach de 0,88 otorgan solidez a la medición. Zakariya (2022) advierte que el alfa debe interpretarse con prudencia y no sustituye a la validez de contenido; por ello, en este estudio se complementó con juicio de expertos. Edelsbrunner (2025) recuerda que la consistencia interna es especialmente relevante en pruebas de conocimiento de dominio específico, porque permite valorar si los ítems se comportan de manera coherente. La combinación de validación experta y confiabilidad alta permitió interpretar los resultados con mayor seguridad, aunque futuros estudios podrían incorporar análisis factorial o modelos de respuesta al ítem.

La prueba t de Student y la d de Cohen permitieron distinguir significancia estadística y relevancia pedagógica. Buckley (2024) destaca que las pruebas como correlación de Pearson y t de Student requieren supuestos y una justificación clara dentro del diseño cuantitativo. Evans y Yuan (2022) señalan que los tamaños del efecto en educación deben leerse con contexto, porque una magnitud aparentemente moderada puede ser importante si la intervención es viable y escalable. Foster (2023) también cuestiona interpretaciones simplistas del tamaño del efecto. En este estudio, los valores altos de d sugieren un impacto sólido, aunque deben verificarse con muestras más amplias.

La aplicación en cuatro centros educativos fortalece la lectura de transferencia. Linkwitz y Eilks (2022) plantean que la integración curricular de la química verde requiere procesos sostenidos de acción docente y ajuste contextual. Nahlik et al. (2023) sostienen que el conocimiento pedagógico del contenido es clave para transformar principios de química verde en experiencias comprensibles. En los cuatro centros, la ganancia fue positiva, aunque no idéntica; esto revela que la propuesta es adaptable, pero sensible a condiciones como tiempo, acompañamiento docente, acceso a recursos y cultura de participación. Por ello, la implementación no debe copiarse mecánicamente, sino contextualizarse con diagnóstico previo.

Desde la perspectiva curricular, los resultados respaldan los lineamientos de UNESCO (2024), que promueven una educación climática y de sostenibilidad integrada al currículo, con aprendizajes progresivos y orientados a la acción. También dialogan con CEPAL (2022), que plantea la transformación educativa como condición del desarrollo sostenible

regional. En Ecuador, la inserción de educación para el desarrollo sostenible en el currículo nacional ofrece una oportunidad para que ciencias naturales y química se articulen con ciudadanía ambiental (Ministerio de Educación, Deporte y Cultura del Ecuador, 2024). La química verde aporta una vía concreta para dicha articulación porque vincula contenido científico, prevención y toma de decisiones.

Finalmente, los resultados coinciden con investigaciones que destacan el valor de metodologías activas y contextualizadas en química. Ferreira et al. (2022) evidencian que la indagación mejora motivación para aprender química; Li et al. (2022) muestran que el juego puede apoyar comprensión de reacciones; Khamhaengpol et al. (2022) relacionan actividades STEAM con pensamiento creativo; Peña-Martínez et al. (2025) vinculan biodiésel, naturaleza de la ciencia y sostenibilidad. Aunque estas investigaciones difieren en población y estrategia, todas apuntan a una idea común: el aprendizaje químico mejora cuando el estudiante actúa, discute, prueba, visualiza y relaciona conceptos con problemas relevantes. QuimVerde-AR se inscribe en esa línea y aporta evidencia específica sobre conciencia ambiental en secundaria.

Conclusiones

La investigación demuestra que la aplicación de la química verde mediante la propuesta QuimVerde-AR contribuye de manera significativa al desarrollo de la conciencia ambiental en estudiantes de secundaria. La intervención generó mejoras superiores en el grupo experimental respecto al grupo control, especialmente en prevención de contaminación, identificación de riesgos, análisis de alternativas sostenibles y argumentación socioambiental. Su contribución científica radica en evidenciar que la química verde puede funcionar como eje pedagógico integrador para articular contenido disciplinar, prácticas de laboratorio seguras, pensamiento sistémico y responsabilidad ambiental, superando una enseñanza centrada únicamente en memorización o resolución mecánica de ejercicios.

Los hallazgos permiten sostener que la conciencia ambiental se desarrolla con mayor solidez cuando el aprendizaje de la química se organiza alrededor de problemas reales, actividades experimentales de bajo riesgo, recursos digitales de apoyo y espacios de debate. La propuesta validada por expertos y respaldada por indicadores de confiabilidad ofrece una ruta aplicable a contextos escolares diversos, aunque requiere adaptación institucional, capacitación docente y seguimiento longitudinal. Futuras investigaciones deberían ampliar la muestra, incorporar mediciones de permanencia del aprendizaje y

explorar cómo la química verde influye en hábitos ambientales observables dentro y fuera de la institución educativa.

Referencias

- Anggraeni, D. A., & Moersilah, M. (2024). The influence of green chemistry activities on students' environmental care attitudes. *Journal of Education for Sustainable Development Studies*, 1(1), 41–50. <https://doi.org/10.70232/b8rkjq30>
- Apotheker, J. (2022). Introduction to the special issue on Green Chemistry. *Chemistry Teacher International*, 4(2), 93–95. <https://doi.org/10.1515/cti-2022-2001>
- Araripe, E., & Zuin Zeidler, V. G. (2024). Advancing sustainable chemistry education: Insights from real-world case studies. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 9, 100436. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100436>
- Buckley, J. (2024). Conducting power analyses to determine sample sizes in quantitative research: A primer for technology education researchers using common statistical tests. *Journal of Technology Education*, 35(2). <https://doi.org/10.21061/jte.v35i2.a.5>
- Cannon, A. S., Royal Society of Chemistry. (2024). A promise to a sustainable future: 10 years of the green chemistry commitment at Beyond Benign. *Green Chemistry*, 26(12), 6983–6993. <https://doi.org/10.1039/D4GC00575A>
- Capili, B., & Anastasi, J. K. (2024). An introduction to the quasi-experimental design (nonrandomized design). *American Journal of Nursing*, 124(11), 50–52. <https://doi.org/10.1097/01.NAJ.0001081740.74815.20>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). Panorama Social de América Latina y el Caribe 2022: La transformación de la educación como base para el desarrollo sostenible. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48518-panorama-social-america-latina-caribe-2022-la-transformacion-la-educacion-como>
- Corcoran, E. R., Lydon, C., Enright, M. C., Buenaflor, J. P., Anderson, K., & Wissinger, J. E. (2022). Thirst for a solution: Alginate biopolymer experiments for the middle and high school classroom. *Journal of Chemical Education*, 99(2), 1021–1025. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00905>
- da Silva Júnior, C. A., Morais, C., Jesus, D. P. d., & Girotto Júnior, G. (2024). The role of the periodic table of the elements of green and sustainable chemistry in a high

- school educational context. Sustainability, 16(6), 2504.
<https://doi.org/10.3390/su16062504>
- Edelsbrunner, P. A. (2025). The Cronbach's alpha of domain-specific knowledge tests. Educational Psychology Review, 37, Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09982-y>
- Evans, D. K., & Yuan, F. (2022). How big are effect sizes in international education studies? Educational Evaluation and Policy Analysis, 44(3), 532–540.
<https://doi.org/10.3102/01623737221079646>
- Ferreira, D. M., Sentanin, F. C., Parra, K. N., Bonini, V. M. N., de Castro, M., & Kasseboehmer, A. C. (2022). Implementation of inquiry-based science in the classroom and its repercussion on the motivation to learn chemistry. Journal of Chemical Education, 99(2), 578–591.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00287>
- Foster, C. (2023). A quotient effect size for educational interventions. Research Papers in Education. <https://doi.org/10.1080/1743727X.2023.2182877>
- Ijioma, C. C. (2025). The integration of green chemistry principles into chemistry education: A pathway to sustainable industrial practices. ChemClass Journal, 9(1), 549–555. https://doi.org/10.33003/chemclas_2025_0901/044
- Khamhaengpol, A., Phewphong, S., & Chuamchaitrakool, P. (2022). STEAM activity on biodiesel production: Encouraging creative thinking and basic science process skills of high school students. Journal of Chemical Education, 99(2), 736–744.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00874>
- Koulougliotis, D., Paschalidou, K., & Salta, K. (2024). Secondary school students' engagement with environmental issues via teaching approaches inspired by green chemistry. Sustainability, 16(16), 7052. <https://doi.org/10.3390/su16167052>
- Lembens, A., Heinzle, G., Tepla, A., Maulide, N., Preinfalk, A., Kaiser, D., & Spitzer, P. (2022). SpottingScience: A digital learning environment to introduce green chemistry to secondary students and the public. Chemistry Teacher International, 4(2), 143–154. <https://doi.org/10.1515/cti-2021-0025>
- Li, J., Yang, M. A., & Xue, Z. H. (2022). CHEMTrans: Playing an interactive board game of chemical reaction aeroplane chess. Journal of Chemical Education, 99(2), 1060–1067. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00333>

- Linkwitz, M., & Eilks, I. (2022). An action research teacher's journey while integrating green chemistry into the high school chemistry curriculum. *Sustainability*, 14(17), 10621. <https://doi.org/10.3390/su141710621>
- Linkwitz, M., & Eilks, I. (2022). Simple experiments with immobilized enzymes as a contribution to green and sustainable chemistry education in the high school laboratory. *Chemistry Teacher International*, 4(2), 121–126. <https://doi.org/10.1515/cti-2021-0019>
- Linkwitz, M., Zidny, R., Nida, S., Seeger, L., Belova, N., & Eilks, I. (2022). Simple green organic chemistry experiments with the kitchen microwave for high school chemistry classrooms. *Chemistry Teacher International*, 4(2), 165–172. <https://doi.org/10.1515/cti-2021-0034>
- Liu, K., Huang, S., Jin, Y., & Lam, J. C. H. (2023). Teaching electrometallurgical recycling of metals from waste printed circuit boards via slurry electrolysis using benign chemicals. *Journal of Chemical Education*, 100(2), 782–790. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00637>
- López-Fernández, M. M., Cano-Iglesias, M. J., & Franco-Mariscal, A. J. (2025). Chemistry inquiry conducted by secondary school students into material degradation in the context of sustainability. *RSC Sustainability*, 3, 3997–4019. <https://doi.org/10.1039/D5SU00176E>
- López-Fernández, M. M., González-García, F., & Franco-Mariscal, A. J. (2022). How can socio-scientific issues help develop critical thinking in chemistry education? *Journal of Chemical Education*, 99(9), 3333–3342. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00223>
- Mammìno, L. (2025). Cross-bridging green chemistry education and environmental chemistry education. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100195>
- Marcelino, L. V., Dias, E. D. S., Rüntzel, P. L., Milli, J. C. L., Santos, J. S., Souza, L. C. A. B., & Marques, C. A. (2023). Didactic features specific to green chemistry teaching in the Journal of Chemical Education. *Journal of Chemical Education*, 100(7), 2529–2538. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01091>
- Miladinović, S. M. (2025). Green analytical chemistry: Integrating sustainability into undergraduate education. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05680-4>

- Ministerio de Educación, Deporte y Cultura del Ecuador. (2024). Inclusión educativa en el currículo educativo nacional: Mapa de inserciones curriculares. https://recursos.educacion.gob.ec/wp-content/uploads/curriculo/INCLUSION_EDUCATIVA_EN_EL_CURRICULO.pdf
- Mistry, K., & Hurst, G. A. (2022). A simple setup to explore fog harvesting as a clean and sustainable source of water. *Journal of Chemical Education*, 99(10), 3553–3557. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00018>
- Nahlik, P., Kempf, L., Giese, J., Kojak, E., & Daubenmire, P. L. (2023). Developing green chemistry educational principles by exploring the pedagogical content knowledge of secondary and pre-secondary school teachers. *Chemistry Education Research and Practice*, 24, 283–298. <https://doi.org/10.1039/D2RP00229A>
- Okunuga, R. O., & Adeoye, I. F. (2025). Green chemistry education: An assessment of the awareness, knowledge, and application among secondary school students in Southwest Nigeria. *KIU Journal of Education*, 5(1), 17–24. <https://doi.org/10.59568/KJED-2025-5-1-03>
- Paschalidou, K., Salta, K., & Koulougliotis, D. (2022). Exploring the connections between systems thinking and green chemistry in secondary education. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29, 100822. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100788>
- Peña-Martínez, J., Beltrán, F., & Franco-Mariscal, A. J. (2025). Teaching the nature of science through biodiesel synthesis in a sustainability context. *Sustainable Chemistry*, 6(2), 15. <https://doi.org/10.3390/suschem6020015>
- Rossi, A., & Serpe, A. (2024). A lab experiment on metals separation and recovery from waste ink-jet cartridges as a non-formal appealing learning activity for students of secondary schools. *Chemistry Teacher International*, 6(2), 165–175. <https://doi.org/10.1515/cti-2023-0063>
- Sunday, E. S., Samuel, H. S., Rickson, N. H., Musa, J., & Etim, E. E. (2026). Impact of green chemistry education on students' learning and environmental awareness in chemistry. *Discover Education*, 5, 44. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-01056-7>

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2024). Greening curriculum guidance: Teaching and learning for climate action. UNESCO.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000390022>

Uzorka, A., Akiyode, O., & Isa, S. M. (2024). Strategies for engaging students in sustainability initiatives and fostering a sense of ownership and responsibility towards sustainable development. *Discover Sustainability*, 5, Article 505.

<https://doi.org/10.1007/s43621-024-00505-x>

Zakariya, Y. F. (2022). Cronbach's alpha in mathematics education research: Its appropriateness, overuse, and alternatives in estimating scale reliability. *Frontiers in Psychology*, 13, 1074430. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1074430>

Declaración

Declaración	Detalle
Conflicto de intereses	Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.
Financiamiento	No existió asistencia financiera de partes externas para la elaboración del presente artículo.
Agradecimiento	N/A
Nota	El artículo no es producto de una publicación anterior.