

Tareas Integradoras sustentadas en la inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales

Integrative tasks based on artificial intelligence for the development of environmental skills

Yaleane Martén Ojeda^{1*}, Dionisia de la Caridad Isalgué Álvarez², Luis Mariano Azcuay³

^{1, 2, 3} Carrera de Licenciatura en Educación Química. Facultad de Ciencias Aplicadas. Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz. Camagüey. Cuba.

1 ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6926-7704>

2 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0695-2072>

3 ORCID: <https://orcid.org/0000--00026956-9284>

*Correspondencia: yaleannemartensojeda@gmail.com, teléfono: 56870045

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.7>

Resumen

Evaluar la efectividad de tareas integradoras sustentadas en inteligencia artificial (IA) para desarrollar competencias ambientales en la formación docente es el objetivo de esta investigación. Se partió de la hipótesis de que una intervención pedagógica mediada por IA, bajo un enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad (CTS), mejoraría significativamente el desempeño competencial medido de manera objetiva. El estudio adoptó un diseño cuasi-experimental de medición repetida (pre-test/post-test) con un grupo de 11 estudiantes justificado por su carácter exploratorio y el contexto educativo específico, lo que permitió un análisis cualitativo y detallado. Se implementaron cinco tareas integradoras donde los estudiantes utilizaron herramientas de IA para resolver problemas complejos que vinculan Química, Biología y sostenibilidad. Para obtener evidencia objetiva, se empleó un sistema de evaluación basado en seis criterios de desempeño observable (logrado/no logrado), organizados en tres dimensiones competenciales (cognitiva, procedimental actitudinal). Los resultados mostraron aumentos sustanciales en todos los indicadores (mejoras entre 46 y 64 puntos porcentuales). El dominio de herramientas de IA (indicador procedimental) pasó del 36% al 100% de logro. El indicador sintético de competencia integral (logro en al menos cinco de seis criterios) evidenció un avance del 36% al 91% de los estudiantes. Se concluye que el modelo es una estrategia pedagógica efectiva para el desarrollo holístico de competencias

ambientales. Como implicación práctica, se valida un protocolo replicable que articula dimensiones competenciales, herramientas de IA y evaluación objetiva, reafirmando el rol mediador crítico del docente. Para futuras investigaciones, se destaca la necesidad de ampliar la escala del estudio y profundizar en el desarrollo de herramientas de IA explicables (XAI) específicas para la educación ambiental.

Palabras claves: educación ambiental, inteligencia artificial, tareas integradoras, competencias ambientales, evaluación del desempeño.

Abstract

Integrative tasks supported by artificial intelligence for the development of environmental competencies Evaluating the effectiveness of integrative tasks supported by artificial intelligence (AI) to develop environmental competencies in teacher training is the objective of this research. The hypothesis was that an AI-mediated pedagogical intervention, under a Science-Technology-Society (STS) approach, would significantly improve objectively measured competency performance. The study adopted a quasi-experimental design of repeated measurement (pre-test/post-test) with a group of 11 students justified by its exploratory nature and the specific educational context, which allowed a qualitative and detailed analysis. Five integrative tasks were implemented where students used AI tools to solve complex problems that link Chemistry, Biology and sustainability. To obtain objective evidence, an evaluation system was used based on six observable performance criteria (achieved/not achieved), organized into three competency dimensions (cognitive, attitudinal procedural). The results showed substantial increases in all indicators (improvements between 46 and 64 percentage points). Mastery of AI tools (procedural indicator) went from 36% to 100% achievement. The synthetic indicator of comprehensive competence (achievement in at least five of six criteria) showed progress from 36% to 91% of the students. It is concluded that the model is an effective pedagogical strategy for the holistic development of environmental competencies. As a practical implication, a replicable protocol that articulates competency dimensions, AI tools and objective evaluation is validated, reaffirming the critical mediating role of the teacher. For future research, the need to expand the scale of the study and delve into the development of explainable AI (XAI) tools specific for environmental education is highlighted.

Keywords: environmental education, artificial intelligence, integrative tasks, environmental competencies, performance evaluation.

Introducción

La preocupación por la degradación ambiental ha impulsado en las últimas décadas una renovación en los enfoques educativos, orientada hacia la formación de una conciencia ecológica desde todas las áreas del conocimiento. En América Latina, la educación ambiental se ha incorporado progresivamente en los currículos universitarios, buscando una articulación entre ciencia, tecnología y valores éticos¹. La UNESCO² señala que la educación puede ser una poderosa palanca para transformar nuestra relación con la naturaleza. En la misma línea, Llopiz et al.³ Plantean que la educación ambiental es concebida en la actualidad como una educación para el Desarrollo Sostenible que permite la creación de condiciones materiales, culturales y espirituales, propiciando la elevación de la calidad de vida de la sociedad donde exista una relación armónica entre los procesos naturales y sociales, así como relaciones de equidad y justicia social. Mientras que Musitu et al.⁴ sostienen que la educación ambiental es “un gran recurso para el beneficio óptimo de las relaciones del ser humano con su medio, a través del conocimiento, sensibilización, promoción de estilos de vida saludables y comportamientos proambientales”.

En consecuencia, la enseñanza de la Química debe ir más allá de la transmisión de conceptos teóricos, promoviendo la comprensión de los procesos naturales y los impactos de las actividades humanas sobre el ambiente. Una vía prometedora para lograrlo es la utilización de tareas integradoras que, mediante el uso de recursos tecnológicos como la (IA), impulsen la búsqueda de soluciones para un desarrollo sostenible.

Sin embargo, aún son escasas las investigaciones que integren de forma explícita la inteligencia artificial en el diseño de tareas con enfoque ambiental lo cual revela la necesidad de desarrollar estrategias que combinen el potencial tecnológico de la IA con los objetivos de la educación ambiental, tomando la Química como eje articulador del conocimiento científico y la acción responsable.

En el contexto de la formación de futuros docentes de Biología, se observa que los estudiantes de primer año adquieren conocimientos básicos de Química y Biología, pero presentan una comprensión limitada y fragmentada de los conceptos ambientales y la interrelación entre ciencia y sociedad. A pesar de que la Química ofrece herramientas conceptuales para entender procesos ecológicos y cambios ambientales, su contenido suele abordarse de manera aislada y no aprovecha el potencial pedagógico de la IA para enriquecer el aprendizaje integrado. Lo anterior conduce al siguiente problema científico:

¿Cómo contribuir al desarrollo de competencias ambientales desde la Química en los estudiantes de primer año de la carrera Licenciatura en Educación Biología?

La importancia de la solución del problema radica en que la articulación de tareas integradoras, IA y educación ambiental se presenta como una vía efectiva para consolidar una formación científica con responsabilidad social, orientada al desarrollo sostenible y a la transformación del entorno.

El presente estudio tiene como objetivo general: Evaluar la efectividad de tareas integradoras desde la Química, apoyadas en herramientas de Inteligencia Artificial, como estrategia para fomentar el desarrollo de competencias ambientales en el ámbito universitario. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1-Fundamentar teóricamente la integración de la Inteligencia Artificial en la enseñanza de la Química con enfoque ambiental.

2-Diseñar e implementar tareas integradoras que utilicen herramientas de IA para el aprendizaje significativo.

3-Evaluar el impacto de la intervención en el desarrollo de competencias ambientales, mediante un sistema de criterios objetivos de desempeño.

4-Derivar implicaciones prácticas y orientaciones metodológicas para la implementación de la IA en procesos educativos vinculados con la sostenibilidad.

Al combinar Química con IA en un diseño pedagógico intencional, este estudio, pretende superar las limitaciones del enfoque tradicional como la fragmentación del contenido y la falta de motivación y ofrecer experiencias pedagógicas más dinámicas, personalizadas y contextualizadas. De esta forma, se busca fortalecer la formación integral del futuro docente y su capacidad para transmitir valores ambientales.

Materiales y métodos

Se implementó un diseño cuasi-experimental de medición repetida (pre-post) con un grupo, orientado a evaluar la efectividad de tareas integradoras sustentadas en inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales desde la Química.

Participantes:

La muestra estuvo conformada por 11 estudiantes de la carrera Licenciatura en Educación Biología de la Universidad “Ignacio Agramonte Loynaz”, seleccionados mediante muestreo intencional no probabilístico. El grupo incluyó a ocho estudiantes del curso regular diurno y tres estudiantes del curso por encuentro, todos correspondientes al mismo año académico. Aunque reducido el tamaño muestral, permite un análisis detallado y cualificado del fenómeno en estudio, lo cual es característico de investigaciones exploratorias en contextos educativos específicos.

Intervención: Tareas integradoras con IA:

La intervención consistió en la implementación de cinco tareas integradoras diseñadas bajo un enfoque Ciencia- Tecnología –Sociedad (CTS), donde los estudiantes utilizaron herramientas de inteligencia artificial (ChatGPT, GeoGebra IA, Canva AI, simuladores) para resolver problemas complejos que vinculaban Química, Biología, Sostenibilidad ambiental y Salud pública. Cada tarea tenía una duración aproximada de dos semanas y se implementaron de forma secuencial a lo largo del curso, abarcando desde la Unidad 2 hasta la Unidad 6 del programa de la asignatura de Química para biólogos, lo que permitió una integración longitudinal y progresiva de los contenidos.

Sistema de evaluación:

Consideraciones metodológicas iniciales.

Dada la naturaleza exploratoria del estudio y el tamaño muestral reducido de once estudiantes, si bien inicialmente se consideró el uso de escalas de percepción tipo Likert, se optó por un sistema de evaluación basado en criterios objetivos de desempeño observable para obtener evidencia más directa, objetiva y validable del desarrollo competencial real, superando las limitaciones de la autopercepción.

Para ello se establecieron tres dimensiones competenciales (cognitiva, procedimental, actitudinal) derivadas de los objetivos de aprendizaje de la intervención. Cada dimensión se operacionalizó en indicadores específicos para los cuales se definieron criterios de dominio medibles de manera binaria (logrado/no logrado). Este enfoque permitió determinar de manera precisa si cada estudiante alcanzaba los estándares establecidos en cada aspecto clave. Los instrumentos de medición, diseñados para recoger evidencia tangible del desempeño, incluyeron listas de cotejo, rúbricas analíticas y guías de observación. En la **(Tabla 1)** se detallan las dimensiones, sus indicadores, los criterios de dominio asociados y los instrumentos de medición correspondientes.

Tabla 1. Dimensiones, indicadores y criterios objetivos de evaluación.

Dimensión	Indicador	Criterio Objetivo de Dominio (Logrado/No Logrado)	Instrumento de Medición
Cognitiva	1.1-Comprensión de conceptos químicos aplicados al medio ambiente.	Obtiene $\geq 70\%$ de aciertos en prueba objetiva de 10 ítems sobre conceptos clave.	Prueba escrita de opción múltiple y desarrollo breve.
	1.2-Integración de saberes científicos y ambientales	Elabora un informe que evidencia la conexión Química-Sostenibilidad, alcanzando ≥ 3 puntos en una rúbrica analítica de 4 puntos.	Rúbrica de evaluación de informes.
Procedimental	2.1. Dominio de herramientas de IA para el aprendizaje	Utiliza correctamente ≥ 3 herramientas de IA diferentes (ChatGPT, GeoGebra IA, Canva) para buscar información y resolver problemas, según lista de cotejo	Lista de cotejo observacional + análisis de productos digitales.
	2.2. Procesamiento y comunicación de información ambiental mediante IA	Genera un producto comunicativo original (infografía, gráfico, informe) que transforma información obtenida con IA, alcanzando ≥ 4 puntos en rúbrica de 5 puntos	Rúbrica de evaluación de productos comunicativos.
Actitudinal	3.1. Actitud responsable hacia el medio ambiente	Participa activamente ($\geq 4/5$) en debates, discusiones y acciones propuestas relacionadas con la problemática ambiental.	Registro de observación sistemática del docente.
	3.2. Ética en el uso de la inteligencia artificial	Cita correctamente $\geq 80\%$ de las fuentes de información obtenidas mediante IA y respeta las normas de uso ético en todos sus productos.	Análisis documental de productos y citas.

Para establecer un juicio global sobre el desarrollo de la competencia ambiental integral, se definió que un estudiante la alcanzaría si lograba los criterios de dominio en, al menos, cinco de los seis indicadores evaluados. La aplicación de este sistema de evaluación se realizó de forma longitudinal, al finalizar cada una de las tareas integradoras, permitiendo trazar la evolución del desempeño individual y grupal a lo largo de la intervención.

Instrumentos, procedimiento de aplicación y procesamiento.

La evaluación se realizó bajo un diseño de medición repetida (pre-test/post-test). Los instrumentos detallados en la (Tabla 1) se aplicaron en dos momentos:

- Pre-evaluación: Antes del inicio de la intervención, para establecer una línea base del desempeño competencial.
- Post-evaluación: Tras la finalización de las cinco tareas integradoras, para medir el efecto de la intervención.

El procesamiento de datos se realizó en dos niveles:

- 1- Nivel individual por indicador: Para cada estudiante e indicador, se registró un valor binario (1=Logrado, 0=No logrado) según el cumplimiento del criterio objetivo de dominio.
- 2- Nivel agregado: Los resultados se expresaron como el porcentaje de estudiantes que lograron el criterio en cada uno de los seis indicadores, tanto en el pre-test como en el post-test. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de estudiantes que alcanzó el criterio de competencia integral (logro en ≥ 5 indicadores) en cada momento de la medición.

Análisis de datos.

El análisis se abordó desde una perspectiva mixta, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas:

Análisis cuantitativos: Se procesaron los datos binarios calculando los porcentajes de logro agregados por indicador y por dimensión competencial para las mediciones pre y post. La efectividad de la intervención se analizó comparando estos porcentajes mediante la diferencia en puntos porcentuales y la observación de la tendencia de mejora. El progreso hacia la competencia integral se evaluó de la misma forma.

Análisis cualitativo: Se basó en la triangulación de evidencias entre:

- a) Los resultados cuantitativos del sistema de criterios objetivos,
- b) Las observaciones registradas del docente – investigador durante las sesiones, y
- c) El análisis contenido de los productos finales generados por los estudiantes (informes, modelos, propuestas). Esta triangulación permitió interpretar la profundidad y el significado cualitativo de los cambios cuantitativos observados.

Resultados

El análisis de la literatura revisada evidencia una tendencia creciente hacia la integración de la inteligencia artificial (IA) como herramienta de apoyo en la enseñanza de las ciencias. Daudinot y Robert⁵

plantean que las tareas integradoras se han consolidado como estrategias pedagógicas efectivas para articular saberes de diversas disciplinas y promover aprendizajes significativos vinculados a la realidad social.

Desde una perspectiva didáctica, esta combinación, tareas integradoras potenciadas con IA, favorece el desarrollo de competencias científicas, la reflexión crítica y la formación de valores, al situar a los estudiantes en escenarios de investigación auténticos donde deben analizar, modelar y tomar decisiones informadas.

En cuanto al diseño pedagógico concreto, Rodríguez et al.⁶ determinaron regularidades teóricas fundamentales para el diseño de tareas integradoras. Para los fines de esta investigación, destacamos aquellas particularmente relevantes para integrar herramientas de IA: la selección de problemas auténticos vinculados a la realidad del estudiante; la articulación coherente de contenidos de diversas disciplinas; la promoción de procesos de investigación y pensamiento crítico; y la utilización estratégica de la tecnología como apoyo al aprendizaje. Estas regularidades proporcionan el sustento didáctico para incorporar la IA como una herramienta al servicio de un diseño integrador significativo.

En paralelo, la inteligencia artificial (IA) se ha introducido en la educación como una herramienta con potencial transformador para los procesos de enseñanza y aprendizaje. En este sentido autores como Moreno⁷ sostienen que, con una adecuada adaptación por parte del docente y del sistema, la IA puede convertirse en una herramienta versátil que facilita la labor docente y personaliza los aprendizajes.

Sin embargo, integrar esta innovación tecnológica con el diseño de tareas integradoras plantea desafíos complejos. Como advierte Vera⁸ el avance tecnológico exige una evolución en las competencias que se desarrollan en la enseñanza de las ciencias. Para un uso exitoso, es necesario formar a los estudiantes en nuevas habilidades que les permitan aprovechar la IA para potenciar sus cualidades investigativas y personalizar sus experiencias, optimizando además el seguimiento de su proceso.

No obstante, la literatura no presenta un consenso absoluto sobre los beneficios de esta incorporación. Por un lado, existen advertencias críticas: Portillo et al.⁹ señalan que el uso excesivo o acrítico de tecnologías inteligentes puede generar dependencia y paradójicamente, disminuir el desarrollo del pensamiento crítico si no está mediado por una guía pedagógica sólida. De manera análoga, Sardiñas y Valdés¹⁰ reconocen el potencial motivador de la IA, pero enfatizan que su efectividad está condicionada por la formación docente y del acceso equitativo a recursos digitales, lo que representa un desafío mayor en contextos con brechas tecnológicas.

Por otro lado, se plantean cuestionamientos de fondo, especialmente en el ámbito de la educación ambiental. Algunos investigadores argumentan que la IA difícilmente puede sustituir el componente experiencial y emocional inherente a este campo, el cual se fundamenta en el contacto directo con la naturaleza y en la vivencia comunitaria. Desde esta visión, la IA debe entenderse estrictamente como una herramienta complementaria, útil para modelar, simular, o analizar datos, pero nunca como un reemplazo del trabajo reflexivo, práctico y situado en torno a los problemas ambientales locales.

En síntesis, la literatura consultada revela una diversidad de posturas. Por un lado, autores como Pérez et al.¹¹ destacan que las tareas integradoras constituyen un eje metodológico eficaz para fortalecer la conexión entre la teoría científica y la práctica social facilitando el trabajo interdisciplinario que permite a los estudiantes comprender la ciencia como un fenómeno vivo y contextualizado. Este enfoque es esencial para fomentar la conciencia ambiental, ya que se centra en el desarrollo de competencias críticas y valores éticos, pilares fundamentales de una educación para la sostenibilidad.

Por otro lado, en el ámbito tecnológico, autores como Delgado et al.¹² analizan las posibilidades de la IA para la enseñanza personalizada, argumentando que posibilitan la retroalimentación inmediata, la adaptación de contenidos y el seguimiento analítico del desempeño. Sin embargo, advierte que su efectividad depende de una integración pedagógica significativa, ya que un uso mecánico o superficial puede conducir a una deshumanización del proceso educativo.

Al cruzar ambos ámbitos, surge un consenso matizado. Si bien existe una tendencia clara hacia la integración de la IA como herramienta de apoyo en la enseñanza de las ciencias, especialmente en educación ambiental, esta incorporación no está exenta de tensiones teóricas en desafíos prácticos, como lo evidencian los estudios revisados.

Autores como Cruz et al.¹³ subrayan que la IA tiene un gran potencial para favorecer el aprendizaje interdisciplinario, y se concluye que puede potenciar el aprendizaje autónomo y la creatividad científica si, y solo si, se articula con tareas integradoras significativas y bien diseñadas.

No obstante, algunos autores adoptan una postura crítica y advierten que la excesiva dependencia tecnológica podría reducir la capacidad reflexiva de los estudiantes, desplazando la observación directa del entorno natural, que es esencial en la educación ambiental. Ellos sostienen que el contacto con la naturaleza y la acción comunitaria deben seguir siendo pilares del proceso formativo, complementados, pero no sustituidos por las herramientas digitales.

Así, el éxito de las tareas integradoras apoyadas en IA no parece depender de la tecnología en sí, sino de un diseño pedagógico triplemente fundamentado:

- 1) contextualizado (vinculado a problemáticas reales)
- 2) ético (que evite la dependencia y fomente el pensamiento crítico),
- 3) centrado en el desarrollo de una conciencia ambiental transformadora.

Esta triangulación entre didáctica, tecnología y propósito socio-ambiental representa el principal desafío y, a su vez, la brecha que la presente investigación busca explorar.

En consonancia con esta visión crítica, Ubal et al.¹⁴ enfatizan que la implementación de la IA en la enseñanza enfrenta brechas de acceso y capacitación docente. Según su investigación, el potencial pedagógico de estas tecnologías solo se materializa plenamente a menos que los educadores posean competencias digitales y una comprensión clara de su propósito educativo. Además, plantean que la IA debe emplearse con sentido crítico y ético, de modo que promueva la equidad y no profundice las desigualdades tecnológicas preexistentes.

En conjunto, las obras analizadas muestran una diversidad de enfoques hacia la adopción de la IA en el contexto de la educación ambiental. Mientras algunos autores resaltan sus aportes a la personalización y la interdisciplinariedad del aprendizaje, otros alertan sobre sus limitaciones y riesgos éticos.

De esta revisión se desprende la eficacia de las tareas integradoras apoyadas en IA depende, en última instancia, de tres factores clave:

1. Una mediación pedagógica consciente, que oriente el uso de la tecnología hacia fines formativos y críticos.
2. Una capacitación docente sólida, que garantice la interpretación y aplicación adecuada de los recursos digitales.
3. Una contextualización ambiental auténtica, que asegure que los contenidos y tareas respondan a desafíos ecológicos locales y globales con relevancia para el estudiante.

Por lo tanto, la bibliografía revisada sugiere que el equilibrio dialéctico entre tecnología, pedagogía y ética ambiental será determinante para que la IA trascienda su función instrumental y contribuya de manera genuina a la transformación de la educación hacia la sostenibilidad.

La presente propuesta pedagógica surge de la necesidad de crear puentes explícitos entre la Química para Biólogos y la Biología, asignatura del primer año de la Licenciatura en Educación Biología. Su diseño

se alinea con los objetivos generales de ambas disciplinas, buscando operacionalizarlos a través de una evaluación formativa y significativa.

Por un lado, el programa de Química persigue integrar conocimientos sobre las propiedades y aplicaciones de sustancias inorgánicas y orgánicas mediante la aplicación de leyes y teorías fundamentales, revelando la relación causal entre estructura, propiedades y aplicaciones. Simultáneamente, fomenta el desarrollo de habilidades para la construcción e interpretación de modelos gráficos y datos, así como cualidades profesionales como la sensibilidad, el amor por la naturaleza y la convicción de mejorar la práctica pedagógica.

Por otro lado, el programa de Biología plantea valorar la belleza de la naturaleza biótica y adoptar una postura bioética para la conservación del medio ambiente y un desarrollo sostenible, en apego a la legislación vigente.

Para lograr una sinergia entre los objetivos de ambas disciplinas, se identificaron y vincularon contenidos clave de ambos programas de estudio. Desde la Química, se tomaron los temas relacionados con la Nomenclatura de sustancias inorgánicas, Sistemas dispersos, El comportamiento termodinámico y cinético de las reacciones químicas, Equilibrio químico y Nociones de Química Orgánica. Desde la Biología, se integró el estudio de los virus y la biología celular. Para materializar esta articulación, se diseñó e implementó una intervención basada en tareas integradoras.

Estas son actividades de evaluación complejas que sitúan al estudiante ante un contexto o problema específico, donde debe aplicar y sintetizar los conocimientos y habilidades de ambas asignaturas para proponer soluciones o análisis fundamentados.

Cada tarea integradora seguirá una estructura estandarizada para garantizar claridad en los objetivos y el proceso de trabajo:

1. Tema y Título: Delimita el ámbito conceptual específico.
2. Objetivo: Define el propósito de aprendizaje y la competencia a demostrar.
3. Contexto del Problema: Presenta una situación realista o un escenario que sirve como punto de partida motivador.
4. Actividades a Desarrollar: Describe las acciones concretas que el estudiante debe realizar (investigar, analizar, crear, calcular, proponer).

5. Bibliografía: Lista fuentes recomendadas y obligatorias.

6. Herramientas con Inteligencia Artificial a Utilizar: Indica, de manera guiada y crítica, recursos digitales que pueden emplearse como apoyo en la investigación o el desarrollo de la tarea.

Se implementaron cinco tareas integradoras bajo este modelo. A modo de ejemplo, dos de ellas abordaron los siguientes problemas socio-científicos con un claro nexo ambiental.

- 1- Evaluar el rol, los impactos y la ética del uso del cloruro de sodio (NaCl) como componente de una vacuna frente al COVID-19.
- 2- Analizar la función del Omega -3 en la recuperación del Cikungunya y su relación con la contaminación ambiental que propicia los brotes epidémicos.

(El protocolo detallado de estas tareas; incluyendo sus objetivos, actividades completas y recursos, se presenta en el **Apéndice A**. Las otras tres tareas, siguieron la misma estructura, abordaron problemas análogos vinculando virología, Química y sostenibilidad.

Una vez implementadas las tareas integradoras, se procedió a evaluar su efectividad mediante el sistema de criterios objetivos descrito en la metodología (Tabla1). Los resultados del análisis pre y post intervención, se presentan en la (Tabla 2).

Tabla 2. Logro de dominio pre y post tras intervención con IA, por indicador (n=11)

Dimensión	Indicador	Pre(n)	Pre (%)	Post (n)	Post (%)	Diferencia (p.p.)
Cognitiva	1.1-Comprensión de conceptos químicos aplicados al medio ambiente.	4	36	9	82	+46
	1.2-Integración de saberes científicos y ambientales.	5	45	10	91	+46
Procedimental	2.1-Dominio de herramientas de IA para el aprendizaje.	3	36	11	100	+64

	2.2-Procesamiento y comunicación de información ambiental mediante IA.	3	27	10	91	+64
Actitudinal	3.1-Actitud responsable hacia el medio ambiente.	4	36	9	82	+46
	3.2-Ética en el uso de la inteligencia artificial.	4	36	10	91	+55
Competencia integral	Logro en ≥ 5 de 6 indicadores	4	36	10	91	+55

Como síntesis de los datos, la intervención generó aumentos sustanciales en el logro de los seis indicadores, con mejoras que oscilaron entre los 46 y los 64 puntos porcentuales. Los avances más notorios se concentraron en la dimensión procedimental: el dominio operativo de herramientas de IA (Indicador 2.1) se consolidó en la totalidad del grupo (11 estudiantes, 100%), y la capacidad para procesar y comunicar información ambiental con estas herramientas (Indicador 2.2) mostró la mejora más notable en puntos porcentuales (+64 p.p.), pasando de tres a 10 estudiantes.

En el nivel de síntesis global, el indicador de competencia integral (logro en al menos cinco de los seis indicadores) refleja el impacto holístico de la intervención: el número de estudiantes que alcanzó este estándar pasó de cuatro a 10, lo que representa un incremento de 55 puntos porcentuales (de 36% a 91%).

Discusión

El propósito de este estudio fue evaluar la efectividad de un modelo pedagógico basado en tareas integradoras con IA para el desarrollo de competencias ambientales. Los resultados en la Tabla 2 confirman la viabilidad del modelo, mostrando mejoras significativas en todas las dimensiones evaluadas. Como complemento cuantitativo final, la Tabla 3 sintetiza el logro de dominio por dimensión tras la intervención, ofreciendo una visión clara del estado competencial alcanzado por los 11 estudiantes. A continuación, se discuten estos hallazgos a la luz de la literatura, comenzando por la dimensión donde el cambio fue más transformador.

Tabla 3: Impacto pedagógico y proyecciones por dimensión (n=11)

Dimensión	Impacto Pedagógico (Hallazgo principal)	Fortaleza (Logro cuantitativo)	Área de oportunidad	Recomendación
Cognitiva	La IA facilitó la comprensión profunda de conceptos clave, sentando una base sólida para la integración.	.Comprensión conceptual: 10/11 (máximo logro) .Integración de saberes: 9/11 (logro alto)	La transferencia e integración interdisciplinar puede profundizarse.	Diseñar tareas que expliciten puentes entre conceptos y su aplicación sistémica.
Procedimental	La mediación pedagógica garantizó un dominio técnico universal, transformando la IA en herramienta de creación.	.Dominio técnico de IA: 11/11 (logro total) .Procesamiento y comunicación: 10/11 (logro muy alto)	La aplicación crítica y comunicativa tiene un margen de perfeccionamiento.	Fomentar la revisión por pares y socialización de productos creados con IA.
Actitudinal	La tecnología actuó como catalizador efectivo para la formación ética en el uso de recursos digitales.	.Ética en el uso de IA: 10/11(logro muy alto) .Actitud responsable: 9/11 (logro alto)	La internalización de la responsabilidad para la acción proactiva.	Vincular los aprendizajes a proyectos de impacto ambiental tangible en la comunidad.
Integral	Se valida un modelo pedagógico holísticamente efectivo, donde la orquestación didáctica es clave.	10/11 estudiantes lograron competencia integral (Dominio en ≥ 5 de 6 dimensiones).	Un caso particular requiere análisis diferenciado.	Realizar un estudio de caso cualitativo para personalizar estrategias de apoyo.

Los hallazgos revelan que la intervención generó avances sustanciales en las competencias cognitivas asociadas a la educación ambiental. De los seis indicadores evaluados, cinco registraron incrementos superiores a 50 puntos porcentuales, oscilando entre 46 y 64 PP. Este progreso se reflejó a nivel individual donde, como se observa en la Tabla 3, 10 de los 11 participantes alcanzaron logro integral en la mayoría de los indicadores, corroborando la eficacia del modelo pedagógico durante las ocho semanas de implementación.

El hallazgo más notable reside en la dimensión procedimental, donde la totalidad del grupo (11 estudiantes, 100%) alcanzó el dominio operativo de las herramientas de IA (Indicador 2.1), y que 10 de 11 (91%) demostraron capacidad para procesar y comunicar información ambiental con ellas (Indicador 2.2). Esta mejora de +64 PP trasciende la mera alfabetización digital. Este resultado indica que, bajo una mediación pedagógica intencionada como la establecida en los criterios de las tareas, la inteligencia artificial no genera dependencia pasiva, sino que actúa como un andamiaje procedimental que potencia la capacidad de resolución de problemas. Esto valida y extiende las propuestas de Rodríguez et...al⁶ sobre la apropiación de lo esencial, demostrando que los estudiantes pueden evolucionar de usuarios acrílicos a creadores de contenido informado, utilizando la IA para sustentar propuestas propias y complejas.

Los avances en la dimensión cognitiva son igualmente sustanciales. El incremento de 46 puntos porcentuales tanto en la comprensión conceptual (Indicador 1.1) como en la integración de saberes (Indicador 1.2), alcanzando logros superiores al 80%, sugiere que la IA facilitó más que la retención de información. Según la Tabla 3, nueve de 11 estudiantes dominaron la comprensión conceptual, mientras que 10 de 11 lograron integrar saberes interdisciplinarios. Las tareas de modelado y análisis con IA funcionaron como "microscopios cognitivos", permitiendo visualizar y conectar fenómenos abstractos que vinculan Química, Biología y Sostenibilidad. Esto corrobora el potencial del enfoque CTS para desarrollar pensamiento sistémico, tal como postulan Pérez et al.¹¹ y Cruz et al.¹³, y va más allá de la personalización del aprendizaje al demostrar que la IA puede estructurar andamiajes para la construcción del conocimiento interdisciplinar.

Los resultados actitudinales son cruciales para una educación ambiental con sentido. Las mejoras de 46% y 55% en los indicadores de actitud responsable (3.1) y ética en el uso de la IA (3.2) revelan que la tecnología, lejos de ser neutral, puede ser un catalizador para la reflexión valórica. La experiencia de analizar y proyectar impactos ambientales mediante herramientas de IA generó una conexión emocional y ética con los problemas, complementando, no sustituyendo, el llamado al contacto directo con la

naturaleza Sardiñas y Valdés¹⁰. Además, como muestra la Tabla 3, nueve de 11 estudiantes desarrollaron actitud responsable y 10 de 11 demostraron ética en el uso de IA. El manejo ético documentado (citación, verificación) muestra que es factible y necesario integrar la formación en ciudadanía digital dentro de la educación ambiental, preparando a los futuros docentes para un uso crítico y responsable de la tecnología.

La evidencia más robusta de la efectividad del modelo es el salto en la competencia integral: 10 de los 11 estudiantes (91%) lograron el dominio en al menos cinco de las seis dimensiones tras la intervención, como se ilustra en la siguiente distribución:

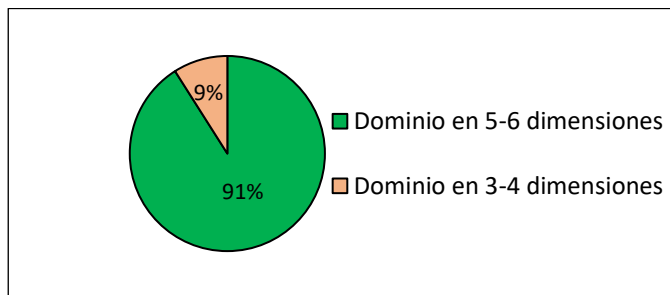


Figura 1: Competencia Integral Post- Intervención (n=11)

Este logro de competencia integral (Figura 1) proporciona una evidencia empírica crucial para el debate teórico identificado en la literatura revisada. Los resultados demuestran que, cuando la IA se orquesta pedagógicamente dentro de un diseño triplemente fundamentado contextualizado, ético y centrado en una conciencia ambiental transformadora, logra trascender su función instrumental. Así, se responde a las advertencias de autores como Sardiñas y Valdés¹⁰ y otras posturas críticas: lejos de generar dependencia pasiva o sustituir la experiencia directa con la naturaleza, la tecnología, bajo esta mediación, actúa como un catalizador que potencia y complementa la reflexión ética, el pensamiento sistémico y la capacidad de acción informada, validando la necesidad del equilibrio dialéctico entre tecnología, pedagogía y ética ambiental.

Conclusiones

Este estudio evaluó la efectividad de un modelo pedagógico basado en tareas integradoras sustentadas en inteligencia artificial (IA) para el desarrollo de competencias ambientales en futuros docentes de Biología. Los resultados permiten concluir que este modelo constituye una estrategia pedagógica efectiva para promover competencias holísticas (cognitivas, procedimentales y actitudinales). Dicha conclusión se respalda en los datos objetivos que muestran mejoras sustanciales en los seis indicadores evaluados y un aumento del 36% al 91% (Tabla 2).

Las principales implicaciones prácticas derivadas son:

- 1- La validación de un modelo replicable que articula de manera explícita dimensiones competenciales, herramientas de IA específicas (generativas y de modelado) y evaluación por criterios objetivos.
- 2- La reafirmación del rol mediador, crítico e insustituible del docente, cuya guía es fundamental para transformar el potencial tecnológico en aprendizaje significativo y ético.

No obstante, es necesario señalar las limitaciones de este estudio exploratorio, principalmente su tamaño muestral reducido (n=11) y el contexto específico de aplicación, lo cual restringe la generalización estadística de los resultados. Además, el éxito observado estuvo condicionado por un acceso uniforme a la tecnología y una guía docente intensiva.

Por ello, para futuras investigaciones se recomienda:

- 1- Ampliar la escala del estudio con muestras más diversas y, de ser posible, grupos de control.
- 2- Profundizar en el desarrollo y evaluación de herramientas de IA de carácter explicable y específico para la educación científica-ambiental.

Se hipotetiza que dotar a los futuros profesores de este instrumental crítico y comprensible potenciará su capacidad para formar ciudadanos capaces de interpretar y actuar con rigor ante los desafíos socio-ambientales contemporáneos.

Referencias

1. Pataca Rodríguez F, Flores E. Desarrollo sostenible desde la educación ambiental en Latinoamérica: Una revisión sistemática. *Cienc Lat Rev Cient Multidiscipl.* 2022; 6(3):1981-2000.
2. Azoulay A. Directora General de la UNESCO. Unesco. 2019. Disponible en: <https://www.unesco.org/es/articles>
3. Llopiz-Guerra K, Ruiz DU, Hernandez RM, Mejia VLV, Nunayalle JDRJ, Sanchez KR. Importance of Environmental. Education in the Context of Natural Sustainability. *Nat Eng Sci.* 2024; 9(1):57-71.
4. Musito Ferrer D, Esteban Ibáñez M, León Moreno C, Callejas Gerónimo E. Fiabilidad y validez de la escala de actitudes hacia el medio ambiente natural para adolescentes (Aman-a). *Rev Humanid.* 2020;(39):247-70.

5. Daudinot AR, Robert RE. Integración desde la tarea docente. EFDeportes.com. 2014; 19(199). Disponible en: <http://www.efdeportes.com/efd199/integracion-desde-latarea->
6. Rodríguez Molina K, Meneses Martin Z, Velazco Martin Y. La tarea integradora una necesidad para potenciar el aprendizaje desarrollador. Revista Edusol volumen 22 número 79. 2022. doi <http://SciELO.sld>
7. Moreno Padilla RD. La llegada de la inteligencia artificial a la educación. Rev Investig Tecnol Inf. 2019; 7 (14):260-70.
8. Vera F. Integración de la Inteligencia Artificial en la Educación superior: Desafíos y oportunidades. Transformar. 2023; 4(1):17–34.
9. Portillo Legarda WO, Olaya Gómez GA, Rojas Barajas YY, Trochez Medina O, Diaz Garcia JD. La inteligencia artificial generativa y el rol del docente en la enseñanza. Cienc Lat Rev Cient Multidiscipl. 2025; 9(6):1623-35.
10. Sardiñas Padilla E, Valdés García K. Incorporación de la inteligencia artificial a la educación cubana. Ventajas y limitaciones. Región Científica. 2025; 4(1):5-0.
11. Pérez Agramonte M, García González MC, Quintana Verdecia E. Tareas docentes integradoras desde el proceso de enseñanza aprendizaje de la disciplina Diagnóstico Integral de Laboratorio. Humanid Méd. 2024; 24(1):e2506.
12. Delgado MA, Sebastián, Delgado Navarrete NB, Chenche Jácome WL, Andrade Zamora F. Inteligencia Artificial en la Educación. Transformando los Entornos Digitales para un Aprendizaje Personalizado. Rev Univ Soc. 2025; 17(2).
13. Cruz Carballosa Y, Neyra Mosqueda R, Noa García M, Cruz Suárez B, Gainza López X. Inteligencia artificial: una herramienta clave en la enseñanza de la investigación científica en Mayarí. Rev Cub Informática Méd. 2025.
14. Ubal M, Tambasco P, Martínez S, García M. El impacto de la Inteligencia Artificial en la educación. Riesgos y potencialidades de la IA en el aula. RiiTE Rev Interuniv Investig Tecnol Educ. 2023; 15:41-57.

APÉNDICE

Contexto de implementación y procedimiento general.

Modalidad: Las tareas se implementaron en el marco de clases prácticas de la asignatura Química para biólogos en la carrera de Licenciatura en Educación Biología de la Universidad de Camagüey.

· Duración y alcance curricular: La intervención tuvo un carácter longitudinal, estructurándose a lo largo de cinco unidades consecutivas del programa de Química para biólogos (Unidades 2 a la 6). Cada tarea integradora se diseñó para corresponderse con los contenidos específicos de una de estas unidades, asegurando una aplicación progresiva y contextualizada de los conocimientos.

· Rol del docente: El docente-investigador actuó como facilitador y mediador crítico. La dinámica para cada tarea consistió en:

- 1- Una fase de investigación individual (primera semana), donde los estudiantes analizaron el problema y consultaron recursos con apoyo de IA.
- 2- Una fase de trabajo colaborativo y retroalimentación (segunda semana), centrada en una sesión presencial para discutir hallazgos, resolver dudas y perfeccionar los productos finales con guía experta.

· Sistema de evaluación: El logro se evaluó mediante el sistema de criterios objetivos detallado en el artículo (Tabla 1: Dimensiones e Indicadores). Se aplicó una rúbrica analítica a cada producto entregable, asignando una valoración binaria (1: Logrado / 0: No Logrado) para cada indicador. Para el análisis global, los resultados binarios de todos los estudiantes se agregaron para calcular el porcentaje del grupo que logró cada indicador en los momentos pre y post intervención, permitiendo así medir la mejora en puntos porcentuales reportada en los resultados.

Ejemplo 1.

Tema 2: Nomenclatura química de las sustancias inorgánicas.

Título: Salud y sostenibilidad: El rol del NaCl en la lucha contra el COVID-19

Objetivo de aprendizaje: Clasificar las sustancias inorgánicas mediante criterios químicos, en un contexto de salud y sostenibilidad, que posibilite la evaluación crítica de las relaciones entre su estructura, propiedades y aplicaciones en vacunas y su impacto ambiental y ético.

Contexto del Problema:

La vacuna Soberana, desarrollada en Cuba para prevenir la enfermedad sintomática causada por el virus COVID 19, incluye la sustancia química (**NaCl**) como uno de sus componentes. Este compuesto químico juega un papel importante tanto en la formulación de la vacuna como en otros aspectos de nuestra vida cotidiana. Explora cómo este simple mineral puede ser crucial para avances médicos significativos mientras mantenemos un equilibrio ambiental sostenible.

Actividades a desarrollar:

1-Nombre la sustancia química en cuestión y clasifíquela según los criterios estudiados.

1.1. ¿Cuál es la función principal del NaCl en la vacuna Soberana?

1.1.2. ¿Cómo se obtiene el NaCl industrialmente y cuáles son sus impactos ambientales asociados?

1.1.3. ¿Qué implicancias éticas tiene el uso masivo de minerales naturales como el NaCl en productos farmacéuticos?

1.1.4. Investigue sobre dos métodos de extracción del NaCl y compáralos desde el punto de vista de su impacto ambiental.

1.1.5. Discuta en grupo acerca de la necesidad de regular el uso de minerales naturales en industrias farmacéuticas.

1.1.6. Crea un informe breve donde expliques cómo podrían mejorarse los procesos actuales de obtención del NaCl para reducir su impacto negativo en el medio ambiente.

1.1.7. Basándote en el informe del 1.1.6, diseña una propuesta concreta (una carta, un guion para un podcast breve, o una presentación de 3 diapositivas) dirigida a una audiencia específica (ejemplo: la dirección de una salina local, el consejo estudiantil de tu facultad) donde expongas una mejora técnica o de gestión para reducir el impacto ambiental de la obtención o el uso de recursos minerales en la industria local de la salud.

1.2. Para contextualizar el componente virológico y las vacunas con su impacto real en salud pública y ambiental, se propone la siguiente indagación:

1.2.1. Localice y consulte el artículo científico que reporta los casos de COVID-19 en Camagüey, abril 2021.

a) A partir de las tablas y gráficos ya presentados en el artículo: identifique y escriba en un párrafo breve los patrones demográficos (municipal) y (edad y sexo) más notable.

b) Basándose en los datos observados y en lo aprendido en los incisos anteriores, redacte una reflexión (Máximo 150 palabras) que argumente: ¿Por qué es importante desde el punto de vista de salud ambiental y comunitaria, el desarrollo de vacunas como la analizada? Relacione los datos del virus con la función biológica del componente de la vacuna que estudió.

Recursos y herramientas:

Bibliografía: Bibliografía básicas y complementarias, Artículos sobre la vacuna “Soberana”

Herramientas de IA y digitales: GeoGebra, Chat GPT, Chat Perplexity.

· GeoGebra: El estudiante debe usar GeoGebra para crear los gráficos de pastel y de barras solicitados. La herramienta permite visualizar de manera clara y precisa la distribución de los casos, facilitando el análisis estadístico y la interpretación de los datos de salud pública, lo que conecta la matemática con un problema real.

· ChatGPT o Chat Perplexity: El estudiante debe usar estos asistentes para investigar y contrastar información. Por ejemplo, para las preguntas 1.1.2, 1.1.3 y 1.1.4, puede solicitar una explicación clara de los métodos de extracción de sal (minería, evaporación solar) y sus impactos ambientales diferenciales. El objetivo no es copiar la respuesta, sino usar la IA para obtener información base, comprender conceptos complejos y luego analizarla críticamente, corroborando con otras fuentes (bibliografía) para proponer mejoras (actividad 1.1.6) desde una perspectiva de sostenibilidad.

Ejemplo 2

Tema 6: Nociones de la Química Orgánica.

Título del Ejercicio: Lípidos, Salud y Entorno: El papel del Omega-3 en la recuperación del Chikungunya en Camagüey

Objetivo: Explicar la importancia biológica de los lípidos basada en su estructura y función en infecciones víricas que sustente la relación entre la preservación ambiental, el acceso a nutrientes esenciales y la salud pública sustentable.

Contexto del Problema:

En la ciudad de Camagüey, el aumento de microvertederos y la acumulación de desechos sólidos en zonas urbanas ha provocado una proliferación del mosquito “*Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*”. Esto ha derivado en un brote de virus Chikungunya. Tras la fase aguda de fiebre, muchos pacientes persisten con inflamación severa en las articulaciones. Para ayudar en la recuperación y reducir la inflamación sin abusar de fármacos sintéticos, los médicos camagüeyanos están recomendando el suplemento de ácidos grasos Omega-3 (específicamente el Ácido Eicosapentaenoico - EPA).

Actividades a desarrollar:

1. El Omega-3 no es una sola sustancia, sino una familia de ácidos grasos poliinsaturados. Uno de los más importantes es el EPA, cuya fórmula global es $C_{20}H_{30}O_2$.

1.1. Apoyado en la IA (ChatGPT), busca qué significa que un lípido sea "poliinsaturado" y por qué se le llama "Omega-3".

1.1.2. Identifica el grupo funcional presente al final de la cadena de esta molécula (típico de los ácidos carboxílicos).

1.1.3. Dibuja una estructura simplificada de una cadena carbonada con insaturaciones (dobles enlaces) y encierra en un círculo el grupo funcional principal.

1.2. Un médico prescribe a un paciente en recuperación una dosis de 1.5 gramos de Omega-3 al día. El suplemento disponible en las farmacias viene en cápsulas de gelatina que contienen 300 mg de EPA cada una.

1.2.1. ¿Cuántas cápsulas debe tomar el paciente al día para cumplir con la dosis de 1.5 g? (Recuerda realizar la conversión de unidades de mg a g).

1.2.2. Si el tratamiento de recuperación dura 20 días, ¿cuántos moles de EPA habrá consumido el paciente al finalizar el tratamiento? (Dato: Masa molar del EPA $C_{20}H_{30}O_2 = 302$ g/mol).

1.3. Investiga: ¿Cuál es la función biológica de los Omega-3 en el cuerpo humano en relación con la inflamación?

1.3.1. ¿Por qué el consumo de estos lípidos ayuda específicamente a los pacientes de Chikungunya?

1.3.2. Los Omega-3 se obtienen principalmente de aceites de pescado y algas. ¿Cómo afectaría la contaminación de los ríos y costas (por vertimiento de basura y químicos) a la producción de estos suplementos necesarios para nuestra salud?

1.4. La basura no solo afecta el entorno, sino que actúa como un sustrato químico y biológico peligroso:

1.4.1. Propón una estrategia comunitaria de gestión de residuos que utilice el reciclaje para eliminar los criaderos de mosquitos.

1.4.2. Argumenta: ¿Cómo el conocimiento de las propiedades químicas de los materiales de compuestos orgánicos nocivos (como la impermeabilidad del plástico y el caucho) ayuda a comprender por qué estos objetos son criaderos tan efectivos para el mosquito?

1.5. Diseña una consigna o eslogan de concienciación en formato Infografía o póster que relacione: Mecanismo de acción del Omega 3- Limpieza urbana- Control de mosquitos- salud articular.

1.6. De la Conciencia a la Incidencia: Tu infografía (1.5) es para crear conciencia. Ahora, diseña un plan de acción comunitario simple (máximo 5 pasos) para implementar la estrategia de gestión de residuos que propusiste en el 1.4.1. Identifica: a) un actor clave que necesites convencer (ejemplo: presidente del CDR, Director de la escuela), b) un primer paso realizable en una semana (ejemplo: recoger y clasificar los plásticos en una zona de tu comunidad), y c) cómo medirías el impacto (ejemplo: número de recipientes eliminados).

Recursos y herramientas:

Bibliografía: Bibliografía básicas y complementarias, Artículos sobre los Lípidos.

Herramientas de IA y digitales: GeoGebra, Chat GPT, Chat Perplexity, Canva.

· ChatGPT y/o Perplexity: El estudiante debe usar estos asistentes como un tutor conceptual para las actividades 1.1, 1.3 y 1.3.1. Puede pedir explicaciones sencillas sobre la bioquímica de los lípidos y su rol antiinflamatorio. Para la actividad 1.3.2 y 1.4, debe usar la IA para investigar la conexión entre contaminación, ecosistemas acuáticos y salud pública, generando ideas para su argumentación. La clave es preguntar de forma crítica y profunda, y no conformarse con la primera respuesta.

· Canva: El estudiante debe usar Canva (que emplea IA para diseño) para crear la infografía de la actividad 1.5. Debe aprovechar las plantillas y sugerencias de la herramienta para comunicar de manera

visual y poderosa el ciclo que vincula la gestión ambiental (limpieza), la salud (control de mosquitos, Omega-3) y el bienestar comunitario, internalizando así el mensaje de interdependencia.

· GeoGebra: Puede ser útil para representar gráficamente los cálculos estequiométricos de la actividad 1.2, relacionando la dosis clínica con conceptos químicos cuantitativos.

Recibido: [10 enero 2026] Aceptado: [20 febrero 2026] Publicado: [15 marzo 2026]

Citation: Martín-Ojeda, Y; Isalgué, D; Azcuy, L. Tareas Integradoras sustentadas en la inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales. Bionatura, 2026. Volumen 11, No 1. <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.7>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)