COVER PAGE IN ENGLISH
(solo para artículos en español)

Environmental Bioassays through a STEAM Approach to Strengthen Scientific Competencies and Research Vocations among Female University Students

No se garantiza la revisión por pares doble ciego de los autores si aparecen los autores.
Después de la aceptación, se carga la versión final con los autores y sus afiliaciones.
First Author[1]; Second Author[2]; Third Author[3]
[1,3]First and Third Author's University, Country, *first.author@email.edu, third.author@gmail.com*
[2]Second Author's University, Country, *second.author@email.com*

Abstract

Research training for female university students in scientific and environmental fields requires educational strategies that integrate disciplinary knowledge, experimentation, real-world problem solving, and the development of scientific competencies. This study aimed to analyze the integration of environmental bioassays through a STEAM approach as a strategy to strengthen scientific competencies and promote research vocations among female university students. A descriptive and analytical systematization of research training experiences was conducted based on two environmental bioassays: the use of Allium cepa as an experimental model for assessing phytotoxic, cytotoxic, and genotoxic responses, and the use of Eichhornia crassipes to evaluate phytoremediation processes in wastewater generated by gold mining activities. The experiences integrated science through the study of biological and environmental processes; technology through microscopy, laboratory equipment, and data-processing tools; engineering through experimental design, protocol adaptation, and problem solving; arts through visual representation and scientific communication; and mathematics through measurement, statistical analysis, and data interpretation. The findings show that environmental bioassays provide interdisciplinary learning environments that engage female students in different stages of the research process, including problem identification, experimental design, laboratory procedures, data analysis, interpretation of results, and scientific communication. The integration of environmental bioassays through a STEAM approach represents a relevant strategy for university research training by connecting scientific learning with real-world environmental challenges and creating opportunities for young women to actively participate in environmental research.

Keywords: environmental bioassays; STEAM education; research training; scientific competencies; women in science; higher education

Integración de bioensayos ambientales con enfoque STEAM para fortalecer competencias científicas y vocaciones investigativas en estudiantes universitarias

No se garantiza la revisión por pares doble ciego de los autores si aparecen los autores.
Después de la aceptación, se carga la versión final con los autores y sus afiliaciones.
~~First Author, Highest Degree[1], Second Author, Highest Degree[2], and Third Author, Highest Degree[3]~~
~~[1,3]First and Third Author's University, Country, *first.author@email.edu, third.author@gmail.com*~~
~~[2]Second Author's University, Country, *second.author@email.com*~~

Resumen–La formación investigativa de mujeres universitarias en áreas científicas y ambientales requiere estrategias pedagógicas que articulen el conocimiento disciplinar con la experimentación, el análisis de problemas reales y el desarrollo de competencias para la investigación. El objetivo de este trabajo fue analizar la integración de bioensayos ambientales con enfoque STEAM como estrategia para fortalecer competencias científicas y promover vocaciones investigativas en estudiantes universitarias. Se realizó una sistematización descriptiva y analítica de experiencias de formación investigativa desarrolladas a partir de dos tipos de bioensayos ambientales: el uso de Allium cepa como modelo experimental para el estudio de respuestas fitotóxicas, citotóxicas y genotóxicas, y la utilización de Eichhornia crassipes en la evaluación de procesos de fitorremediación de aguas residuales provenientes de actividades de minería aurífera. Las experiencias permitieron articular componentes de ciencia, mediante el estudio de procesos biológicos y ambientales; tecnología, a través del uso de microscopía, equipos y herramientas para el procesamiento de información; ingeniería, mediante el diseño, adaptación y estandarización de protocolos experimentales; artes, a través de la representación visual y comunicación de resultados científicos; y matemáticas, mediante la medición, organización, análisis estadístico e interpretación de datos. Los resultados evidencian que los bioensayos ambientales constituyen escenarios interdisciplinarios de aprendizaje que acercan a las estudiantes a diferentes etapas del proceso investigativo, desde la formulación de problemas y el diseño experimental hasta el análisis y la comunicación científica. Se concluye que su integración desde una perspectiva STEAM representa una alternativa pertinente para la formación investigativa universitaria y para generar escenarios de participación de mujeres jóvenes en la investigación orientada a la comprensión y solución de problemáticas ambientales.

Palabras clave– Bioensayos ambientales; educación STEAM; formación investigativa; competencias científicas; mujeres en ciencia; educación superior

I. Introducción

La formación investigativa en el ámbito universitario requiere generar espacios en los que los estudiantes puedan relacionar los conocimientos adquiridos durante su formación con situaciones y problemas presentes en su entorno. En las ciencias ambientales, esta relación resulta especialmente importante, ya que el estudio de fenómenos como la contaminación y sus efectos sobre los organismos demanda capacidades para observar, experimentar, analizar información, interpretar resultados y plantear alternativas frente a problemas

reales. El desarrollo de estas competencias constituye uno de los retos actuales de la educación superior y requiere estrategias que favorezcan una participación activa de los estudiantes en los procesos de investigación [1].

El enfoque STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics) ofrece una posibilidad para integrar diferentes áreas del conocimiento alrededor de la experimentación y la resolución de problemas [2]. Esta perspectiva puede resultar particularmente pertinente en la formación de mujeres universitarias, considerando que todavía persisten desigualdades en su participación y trayectoria en determinados campos científicos y tecnológicos [3]. Por esta razón, es importante visibilizar experiencias en las que las estudiantes se vinculen directamente con la investigación y participen en las diferentes etapas de construcción del conocimiento científico [4].

Los bioensayos ambientales representan una alternativa para desarrollar este tipo de experiencias formativas. Además de su utilidad para estudiar los efectos de contaminantes o evaluar posibles alternativas de recuperación ambiental, su desarrollo exige formular preguntas, establecer diseños experimentales, adaptar metodologías, realizar mediciones, analizar datos y comunicar resultados.

Una de las experiencias consideradas en este estudio utilizó *Allium cepa* como modelo experimental para el análisis de respuestas fitotóxicas, citotóxicas y genotóxicas, integrando actividades de experimentación, observación microscópica y análisis de respuestas celulares. La segunda experiencia evaluó el uso de *Eichhornia crassipes* en procesos de fitorremediación de aguas contaminadas con mercurio provenientes de actividades de minería aurífera, involucrando diseño experimental, seguimiento de parámetros fisicoquímicos, procesamiento estadístico e interpretación de resultados.

Aunque estas experiencias fueron desarrolladas inicialmente con objetivos de investigación ambiental, su análisis permite identificar elementos relacionados con las diferentes dimensiones STEAM y con el desarrollo de competencias científicas. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el potencial formativo de dos experiencias de bioensayos ambientales desarrolladas con participación de estudiantes universitarias, identificando su articulación con las dimensiones STEAM, las competencias científicas movilizadas y las dimensiones de identidad científica competencia, desempeño y reconocimiento, a partir de la sistematización de experiencias desarrolladas con *Allium cepa* y *Eichhornia crassipes*.

Para alcanzar este propósito se establecieron tres objetivos específicos: i) caracterizar las experiencias de formación investigativa desarrolladas mediante bioensayos ambientales con *Allium cepa* y *Eichhornia crassipes*; ii) identificar la integración de las dimensiones de ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas (STEAM) en las actividades desarrolladas; y iii) analizar las competencias científicas movilizadas y las evidencias documentales relacionadas con las dimensiones de competencia, desempeño y reconocimiento de la identidad científica de las estudiantes.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño del estudio

Se realizó un estudio cualitativo de alcance descriptivo e interpretativo, basado en la sistematización retrospectiva de experiencias y el análisis documental. La sistematización se asumió como un proceso de reconstrucción, organización e interpretación crítica de experiencias previamente desarrolladas, orientado a identificar aprendizajes, relaciones y elementos relevantes derivados de la práctica [5].

Se seleccionaron intencionalmente dos experiencias de formación investigativa universitaria vinculadas con bioensayos ambientales: i) el uso de *Allium cepa* como modelo experimental para el estudio de respuestas fitotóxicas, citotóxicas y genotóxicas; y ii) la utilización de *Eichhornia crassipes* para evaluar procesos de fitorremediación de aguas residuales contaminadas con mercurio provenientes de actividades de minería aurífera. La selección respondió a tres criterios: participación de estudiantes universitarias, desarrollo de procesos experimentales y disponibilidad de evidencias documentales relacionadas con las diferentes etapas de investigación. Las experiencias seleccionadas incluyeron procedimientos de experimentación, observación, medición, análisis e interpretación de resultados.

B. Caracterización de las experiencias de formación investigativa

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico, se realizó un análisis documental siguiendo los principios metodológicos propuestos por Bowen [6]. El corpus documental estuvo conformado por artículos científicos, informes de investigación, protocolos experimentales, registros de resultados, tablas, figuras y productos académicos derivados de las experiencias seleccionadas.

La información fue organizada mediante una matriz de caracterización que incluyó las categorías: problema ambiental abordado, modelo biológico utilizado, participantes, objetivo de la investigación, etapas del proceso investigativo, diseño experimental, técnicas y herramientas empleadas, procedimientos de análisis de datos, resultados obtenidos y productos científicos derivados.

C. Identificación de las dimensiones STEAM

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico, se realizó un análisis cualitativo de contenido dirigido o deductivo, siguiendo el procedimiento descrito por Hsieh y Shannon [7]. Las categorías fueron establecidas previamente a partir de las cinco dimensiones del enfoque STEAM: ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas.

Las actividades identificadas en las experiencias fueron clasificadas de acuerdo con indicadores previamente definidos. La dimensión ciencia incluyó la comprensión de fenómenos biológicos y ambientales y la aplicación del método científico; tecnología, el uso de microscopía, equipos de laboratorio, software y herramientas para el procesamiento de información; ingeniería, el diseño experimental, la adaptación de protocolos y la resolución de problemas metodológicos; artes, la observación, representación visual y comunicación del conocimiento científico; y matemáticas, la medición de variables, organización y procesamiento de información, análisis estadístico e interpretación cuantitativa de los resultados.

D. Análisis de competencias científicas y participación investigativa

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, se realizó una codificación deductiva de las evidencias documentales. Las competencias científicas fueron analizadas tomando como referencia el marco de competencias científicas de PISA [8], adaptado al contexto de la formación investigativa universitaria.

Se establecieron como categorías de análisis la explicación científica de fenómenos, el diseño y evaluación de investigaciones y la interpretación de datos y evidencias científicas. De manera complementaria, se analizaron competencias relacionadas con la formulación de problemas, observación, manejo de procedimientos experimentales, resolución de problemas, pensamiento crítico, trabajo colaborativo y comunicación de resultados.

El análisis de la participación y aproximación de las estudiantes a la investigación científica tomó como referencia el modelo de identidad científica propuesto por Carlone y Johnson, particularmente las dimensiones de competencia, desempeño y reconocimiento. La incorporación de una perspectiva de género en el análisis de experiencias de formación científica requiere trascender la descripción de la participación numérica de las mujeres y examinar las oportunidades que estas experiencias generan para que las estudiantes se relacionen activamente con las prácticas de producción del conocimiento. Desde esta perspectiva, resulta pertinente el concepto de identidad científica desarrollado por Carlone y Johnson [9], originalmente construido a partir del estudio de las experiencias de mujeres en ciencia. Este marco propone que la identidad científica se configura mediante dimensiones interrelacionadas de competencia, desempeño y reconocimiento. La competencia se refiere al conocimiento y comprensión del contenido científico; el desempeño comprende la capacidad de poner en práctica y comunicar dicho conocimiento mediante prácticas científicas relevantes; y el reconocimiento se relaciona con ser reconocida por sí misma y por otros como una persona vinculada legítimamente con la ciencia. En consecuencia, analizar experiencias investigativas protagonizadas por estudiantes universitarias desde estas dimensiones permite examinar no solamente las habilidades científicas involucradas, sino también las oportunidades de participación que pueden contribuir a su posicionamiento como productoras de conocimiento científico [9].

La dimensión de reconocimiento fue analizada únicamente cuando existieron evidencias documentales verificables de participación o autoría en productos y procesos científicos. Debido a la naturaleza retrospectiva de las fuentes, no se evaluó el autorreconocimiento de las participantes como científicas ni la percepción de reconocimiento por parte de pares, docentes u otros actores. En su lugar, se analizaron evidencias documentales relacionadas con la participación de las estudiantes en las diferentes etapas del proceso investigativo, la adquisición de responsabilidades experimentales, la aplicación de procedimientos científicos, el análisis e interpretación de resultados, la comunicación del conocimiento y la elaboración de productos académicos y científicos.

Las evidencias identificadas fueron registradas en una matriz analítica que relacionó las actividades desarrolladas, las dimensiones STEAM, las competencias científicas movilizadas, los indicadores de participación investigativa y los productos verificables generados en cada experiencia.

E. Integración y análisis de la información

Finalmente, la información obtenida fue integrada mediante una matriz de análisis cruzado de casos. Para cada experiencia se relacionaron el problema ambiental estudiado, las actividades investigativas desarrolladas, las dimensiones STEAM identificadas, las competencias científicas movilizadas, las evidencias de participación investigativa y los productos académicos y científicos derivados (Tabla I).

La comparación entre los casos permitió identificar convergencias, diferencias y posibilidades de integración de los bioensayos ambientales como escenarios interdisciplinarios de formación investigativa universitaria. Para fortalecer la credibilidad del análisis se realizó triangulación entre diferentes fuentes documentales y tipos de evidencia [10].

TABLA I
MATRIZ DE COHERENCIA METODOLÓGICA DEL ESTUDIO

Objetivo específico	Método	Instrumento de análisis	Resultado esperado
Caracterizar las experiencias con bioensayos	Análisis documental	Matriz de caracterización	Descripción sistemática de los dos casos
Identificar las dimensiones STEAM	Análisis de contenido deductivo	Matriz de categorías STEAM	Articulación de las cinco dimensiones
Analizar competencias y participación investigativa	Codificación deductiva y análisis interpretativo	Matriz integrada de competencias, participación y evidencias	Identificación de competencias movilizadas y evidencias de aproximación a la investigación

III: RESULTADOS

A. Caracterización de las experiencias de formación investigativa

El análisis documental permitió caracterizar dos experiencias universitarias desarrolladas mediante bioensayos ambientales con modelos vegetales. La primera utilizó *Allium cepa* para el estudio de respuestas fitotóxicas, citotóxicas y genotóxicas asociadas a la exposición a glifosato. La segunda evaluó *Eichhornia crassipes* como alternativa de fitorremediación de aguas residuales contaminadas con mercurio provenientes de actividades de minería aurífera.

Se puede evidenciar en la Tabla II. que aunque ambas experiencias tuvieron propósitos ambientales diferentes, el análisis evidenció una estructura investigativa común que comprendió la identificación de un problema ambiental, fundamentación científica, formulación de objetivos, selección del modelo biológico, diseño experimental, desarrollo de procedimientos, obtención y análisis de información e interpretación y comunicación de resultados.

TABLA II
CARACTERIZACIÓN DE EXPERIENCIAS

Categoría	*Allium cepa*	*Eichhornia crassipes*
Problema ambiental	Exposición a glifosato	Contaminación de aguas por mercurio
Modelo biológico	*Allium cepa*	*Eichhornia crassipes*
Campo científico	Toxicología y biología cellular	Fitorremediación y ciencias ambientales
Propósito	Evaluación de respuestas fitotóxicas, citotóxicas y genotóxicas	Evaluación de la capacidad de fitorremediación
Procesos	Exposición experimental, observación y análisis celular	Diseño experimental, tratamientos, monitoreo y análisis estadístico
Herramientas	*Allium test* y microscopía	Acuarios, medición fisicoquímica y análisis instrumental
Análisis	Interpretación de respuestas biológicas y celulares	Estadística descriptiva e inferencial
Producto	Manuscrito científico	Artículo científico sometido

Los resultados muestran que los bioensayos permitieron abordar problemas ambientales en diferentes niveles de organización biológica. El estudio con *A. cepa* se orientó al análisis de respuestas celulares frente a un contaminante, mientras que la experiencia con *E. crassipes* evaluó experimentalmente una alternativa de fitorremediación frente a una problemática ambiental regional.

Estos resultados coinciden con la perspectiva de la educación STEAM como un enfoque que busca superar la fragmentación disciplinar mediante la integración de conocimientos y metodologías alrededor de problemas complejos y contextualizados [11]. En este sentido, los problemas ambientales pueden constituirse en escenarios particularmente apropiados para desarrollar experiencias STEAM, debido a que su comprensión requiere la articulación de conocimientos científicos, herramientas tecnológicas, diseño de soluciones y análisis cuantitativo.

B. Integración de las dimensiones STEAM

El análisis cualitativo de contenido permitió identificar actividades relacionadas con las cinco dimensiones STEAM en las experiencias estudiadas (Tabla III). La dimensión científica estuvo presente en la comprensión de los procesos biológicos, toxicológicos y ambientales, así como en la formulación de problemas y la interpretación de los fenómenos observados.

La dimensión tecnológica se relacionó con la utilización de instrumentos y herramientas para la obtención y procesamiento de información. En la experiencia con A. cepa, estuvo representada por el uso de microscopía para la observación de respuestas celulares. En el bioensayo con E. crassipes, incluyó la medición de parámetros fisicoquímicos, métodos analíticos para la determinación de mercurio y utilización de herramientas informáticas para el procesamiento estadístico de los datos.

La ingeniería se identificó principalmente en el diseño, adaptación y ejecución de los sistemas experimentales. Esta dimensión fue especialmente evidente en la experiencia con E. crassipes, en la que se estableció un sistema experimental constituido por acuarios, bloques, diferentes concentraciones del efluente y tiempos de exposición. El bioensayo empleó tres acuarios divididos en cuatro bloques, con tratamientos distribuidos aleatoriamente y seguimiento de variables ambientales durante 168 horas.

Las matemáticas estuvieron presentes en la definición de concentraciones, medición de variables, cálculo de porcentajes de remoción, organización de datos y aplicación de procedimientos estadísticos. Finalmente, la dimensión artística

se identificó en la observación, representación visual y comunicación del conocimiento mediante imágenes microscópicas, tablas, figuras, gráficos y productos científicos.

TABLA III.
INTEGRACIÓN DE LAS DIMENSIONES STEAM

Dimensión	***Allium cepa***	***Eichhornia crassipes***	**Evidencia formativa**
Science	Biología celular, toxicología y genotoxicidad	Ecología, contaminación y fitorremediación	Comprensión de fenómenos ambientales
Technology	Microscopía y observación celular	Equipos, métodos analíticos, Excel y SPSS	Obtención y procesamiento de información
Engineering	Diseño y adaptación del bioensayo	Acuarios, tratamientos y protocolos	Diseño experimental y resolución de problemas
Arts	Imágenes y representación celular	Figuras, gráficos y comunicación visual	Representación del conocimiento
Mathematics	Análisis cuantitativo de respuestas biológicas	Concentraciones, porcentajes y estadística	Medición, análisis e interpretación

La matriz muestra que las dimensiones STEAM no operaron de manera independiente, sino que se integraron durante el desarrollo de las investigaciones. Este resultado es coherente con la literatura que concibe STEAM como una perspectiva interdisciplinaria en la que los estudiantes movilizan conocimientos, habilidades y formas de pensamiento provenientes de diferentes disciplinas para comprender y resolver problemas [11], [12].

La incorporación de problemas reales constituye, además, un componente relevante para el aprendizaje STEAM. La literatura reciente señala que las pedagogías STEAM pueden favorecer experiencias centradas en el estudiante, el aprendizaje basado en investigación y la resolución de problemas contextualizados, aunque su implementación y evaluación continúan presentando desafíos metodológicos [12]. En las experiencias analizadas, la contaminación por agroquímicos y mercurio permitió vincular los procedimientos experimentales con problemas ambientales presentes en los contextos territoriales.

C. Competencias científicas y participación investigativa

La codificación deductiva permitió identificar competencias relacionadas con la explicación científica de fenómenos, el diseño y evaluación de investigaciones y la interpretación de datos y evidencias científicas. Estas categorías coinciden con las competencias propuestas en el marco de evaluación científica de PISA [8].

En la experiencia con *A. cepa*, la formulación del problema requirió relacionar la exposición a un herbicida con posibles respuestas en células meristemáticas. El desarrollo del bioensayo involucró la comprensión de los fundamentos biológicos del modelo experimental y la interpretación de respuestas relacionadas con fitotoxicidad, citotoxicidad y genotoxicidad (Figura 1).

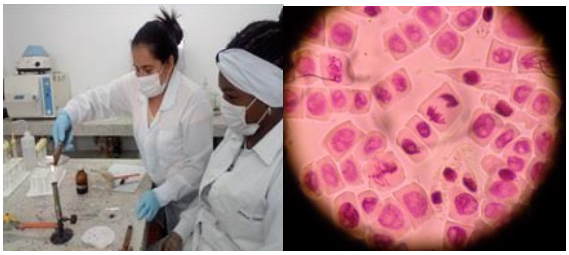


Fig. 1 Desarrollo del bioensayo con *Allium cepa*.

La experiencia con *E. crassipes* presentó evidencias documentales de participación en diferentes etapas del proceso científico. El estudio partió de una problemática ambiental relacionada con las aguas residuales provenientes de la minería aurífera en Suárez, Cauca, y avanzó hacia el diseño y ejecución de un bioensayo para evaluar una alternativa de fitorremediación (Figura 2). La experiencia incluyó seguimiento de los organismos, medición de parámetros fisicoquímicos, análisis de concentraciones de mercurio, procesamiento estadístico e interpretación y publicación de los resultados.



Fig. 2 Desarrollo del bioensayo con *Eichhornia crassipes*.

Los resultados evidencian que las competencias no se limitaron a la ejecución de procedimientos de laboratorio, las experiencias involucraron actividades relacionadas con diferentes etapas del proceso científico, desde la comprensión del problema hasta la comunicación de los resultados.

Esta observación resulta relevante desde la perspectiva de la formación investigativa, debido a que la participación en prácticas científicas auténticas puede favorecer el desarrollo de conocimientos, habilidades y formas de actuación relacionadas con la investigación. Desde el modelo de identidad científica de Carlone y Johnson, la construcción de una relación con la ciencia puede analizarse mediante tres dimensiones interrelacionadas: competencia, desempeño y reconocimiento [9].

En las experiencias estudiadas se identificaron evidencias principalmente asociadas con las dimensiones de competencia y desempeño (Tabla IV). Las estudiantes participaron en procedimientos experimentales, análisis de información, interpretación y comunicación de resultados. En la experiencia con *E. crassipes*, el proceso culminó con el sometimiento de un manuscrito científico, lo cual constituye una evidencia verificable de participación en la generación y comunicación del conocimiento. El estudio reportó porcentajes de remoción de mercurio de aproximadamente 43 % para la concentración alta, 42 % para la media y 22 % para la baja después de 168 horas de exposición.

Estos resultados deben analizarse considerando el carácter retrospectivo del estudio y las características de las evidencias disponibles. Si bien no se aplicaron instrumentos específicos para evaluar cambios en las vocaciones investigativas, el análisis permitió identificar experiencias de participación, desempeño y aproximación de las estudiantes a diferentes prácticas científicas. En este sentido, los hallazgos aportan elementos para comprender el potencial formativo de los bioensayos ambientales desde una perspectiva STEAM, reconociendo los desafíos metodológicos que aún existen para evaluar sus efectos sobre las trayectorias e intereses investigativos de los estudiantes [12].

TABLA IV.
EVIDENCIAS DOCUMENTALES RELACIONADAS CON LAS DIMENSIONES DE IDENTIDAD CIENTÍFICA

Dimensión	***Allium cepa***	***Eichhornia crassipes***	**Interpretación**
Competencia	Comprensión de fitotoxicidad, citotoxicidad y genotoxicidad; interpretación microscópica	Comprensión de contaminación por Hg y fitorremediación; interpretación fisicoquímica	Evidencias de movilización de conocimientos científicos y metodológicos
Desempeño	Preparación y ejecución del bioensayo, microscopía, registro e interpretación	Diseño experimental, monitoreo, análisis instrumental y estadístico	Participación activa en prácticas auténticas de investigación
Reconocimiento	Participación documentada en actividades y productos académicos	Participación en investigación y elaboración/sometimiento de manuscrito	Evidencias documentales de participación en producción científica; no permiten inferir autorreconocimiento como científica

IV. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que los bioensayos ambientales analizados constituyen escenarios de formación investigativa en los que convergen conocimientos científicos, procedimientos experimentales, herramientas tecnológicas, análisis cuantitativo y estrategias de comunicación. Aunque las experiencias con *Allium cepa* y *Eichhornia crassipes* fueron desarrolladas inicialmente con propósitos de investigación ambiental y no como intervenciones educativas diseñadas explícitamente bajo el enfoque STEAM, el análisis retrospectivo permitió identificar la articulación de sus cinco dimensiones y diferentes competencias asociadas con la práctica científica.

Este hallazgo coincide con la concepción contemporánea del enfoque STEAM como una perspectiva interdisciplinaria orientada a superar la fragmentación del conocimiento mediante la integración de diferentes disciplinas alrededor de problemas contextualizados [11], [12]. Sánchez Milara y Cortés Orduña [12] destacan que las pedagogías STEAM adquieren especial relevancia cuando se articulan con la investigación, el desarrollo de proyectos y la resolución de problemas reales, aunque persisten desafíos para lograr una integración auténtica de sus diferentes componentes.

En las experiencias analizadas, la integración STEAM se produjo alrededor de problemáticas ambientales concretas. El estudio con A. cepa vinculó conocimientos de biología celular, toxicología y ciencias ambientales con diseño experimental, microscopía y análisis cuantitativo. Por su parte, el bioensayo con E. crassipes articuló conocimientos sobre contaminación y fitorremediación con diseño experimental, monitoreo de parámetros fisicoquímicos, determinación de concentraciones de mercurio y análisis estadístico. Esta articulación coincide con estudios recientes que destacan la necesidad de desarrollar competencias científicas y de sostenibilidad mediante experiencias vinculadas con problemas del contexto real [13].

Los resultados también mostraron diferencias en la representación de las dimensiones STEAM. Ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas tuvieron una presencia explícita en los procedimientos documentados, mientras que la dimensión artística estuvo principalmente asociada con la representación visual y la comunicación científica mediante imágenes microscópicas, figuras, tablas y gráficos. Este resultado resulta relevante, dado que la literatura señala que las artes no deberían limitarse a la representación estética de los resultados, sino contribuir al desarrollo de la creatividad, el pensamiento crítico y nuevas formas de aproximación a problemas complejos [12]. En este sentido, futuras experiencias con bioensayos podrían fortalecer esta dimensión mediante estrategias de visualización científica, divulgación y apropiación social del conocimiento.

Otro hallazgo relevante fue la identificación de competencias científicas asociadas con diferentes etapas del proceso investigativo. Las experiencias trascendieron la ejecución de procedimientos de laboratorio e involucraron la comprensión de problemas ambientales, el diseño de investigaciones, el uso de tecnologías, la obtención de evidencias, el análisis cuantitativo y la interpretación y comunicación de resultados. Estos hallazgos son coherentes con los marcos actuales de competencia científica, que enfatizan la capacidad para explicar fenómenos, evaluar diseños de investigación e interpretar críticamente datos y evidencias [8].

La articulación entre experimentación y problemas ambientales reales constituye una fortaleza de las experiencias analizadas. Valdes-Ramirez et al. [13] destacan que la educación superior STEM enfrenta el desafío de integrar competencias científicas y de sostenibilidad que permitan comprender la complejidad de los problemas contemporáneos. Desde esta perspectiva, los bioensayos ofrecen escenarios formativos pertinentes al situar a las estudiantes frente a problemas relacionados con la contaminación por agroquímicos, los efectos de los contaminantes sobre organismos vivos y la búsqueda de alternativas para la recuperación ambiental.

La comparación de las experiencias permitió identificar diferentes niveles de participación en las prácticas científicas. El estudio con *A. cepa* evidenció competencias relacionadas con la experimentación, la observación microscópica, la comprensión de procesos celulares y el análisis de respuestas biológicas. En contraste, la experiencia con *E. crassipes* documentó una trayectoria investigativa más amplia, desde la identificación de un problema ambiental regional hasta el diseño experimental, la obtención y análisis de datos y la publicación de los resultados. Estas diferencias permiten considerar los bioensayos como escenarios con distintos niveles de complejidad, cuyo potencial formativo depende de las oportunidades que ofrecen para participar en la toma de decisiones, resolución de problemas metodológicos, interpretación de evidencias y comunicación del conocimiento.

Desde la perspectiva de la identidad científica, estos resultados pueden analizarse mediante las dimensiones de competencia, desempeño y reconocimiento propuestas por Carlone y Johnson [9]. Las evidencias documentales se relacionaron principalmente con la competencia y el desempeño, expresados en la aplicación de conocimientos y habilidades científicas y en la participación en procedimientos experimentales, análisis de información y comunicación de resultados. En la experiencia con *E. crassipes*, el sometimiento de un manuscrito científico constituye una vez publicado una evidencia verificable de participación en procesos de producción y comunicación del conocimiento.

Este aspecto adquiere especial relevancia en la formación investigativa de mujeres universitarias, considerando que todavía persisten diferencias de género en la participación y las trayectorias educativas y profesionales en determinados campos STEM [14]. En este contexto, la generación de experiencias que permitan a las estudiantes participar directamente en procesos de investigación puede ampliar sus oportunidades de acercamiento a las prácticas científicas. Estudios recientes destacan la importancia de promover espacios de formación, acompañamiento y participación que fortalezcan las capacidades y favorezcan el desarrollo académico y profesional de las mujeres en STEM [15].

En conjunto, los hallazgos permiten considerar que los bioensayos ambientales poseen un potencial formativo que trasciende su función como herramientas para evaluar respuestas biológicas frente a contaminantes. Su desarrollo favorece escenarios interdisciplinarios en los que las estudiantes pueden participar en diferentes etapas de la investigación y articular conocimientos científicos, tecnologías, diseño experimental, análisis matemático y comunicación del conocimiento. La principal contribución del estudio radica, por tanto, en la reinterpretación de experiencias de investigación ambiental desde una perspectiva STEAM, mostrando las posibilidades de los bioensayos para vincular la formación universitaria, la investigación y el análisis de problemas ambientales contextualizados, al tiempo que generan oportunidades de participación de estudiantes mujeres en prácticas de producción y comunicación científica.

V. CONCLUSIONES

Los hallazgos no permiten establecer que la participación en los bioensayos haya producido cambios en las vocaciones investigativas o en la identidad científica de las estudiantes. Sin embargo, evidencian que estas experiencias generaron oportunidades para movilizar competencias científicas y participar activamente en prácticas relacionadas con las

dimensiones de competencia y desempeño de la identidad científica. La dimensión de reconocimiento fue identificable únicamente a partir de evidencias documentales de participación en procesos y productos científicos. En este sentido, los bioensayos ambientales presentan un potencial formativo para articular educación STEAM, investigación ambiental y participación de mujeres universitarias en prácticas científicas auténticas. Estudios posteriores, mediante diseños prospectivos, entrevistas, escalas de identidad científica o mediciones pre y post, permitirán determinar si estas experiencias producen cambios en la identidad, el interés y las trayectorias investigativas de las participantes.

AGRADECIMIENTOS

Al semillero de investigación SIGAM, al grupo de investigación GITA y a la escuela de ingenierías y desarrollo sostenible de la Uniautonoma del Cauca.

REFERENCIAS

[1] D. Valdes-Ramirez, L. de Armas Jacomino, R. Monroy, and G. Zavala, "Assessing sustainability competencies in contemporary STEM higher education: A data-driven analysis at Tecnologico de Monterrey," *Frontiers in Education*, vol. 9, Art. no. 1415755, 2024, doi: 10.3389/feduc.2024.1415755.

[2] I. Sánchez Milara and M. Cortés Orduña, "Possibilities and challenges of STEAM pedagogies," *arXiv preprint arXiv:2408.15282*, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2408.15282.

[3] OECD, *Gender Differences in Education, Skills and STEM Careers in Latin America and the Caribbean*. Paris, France: OECD Publishing, 2025.

[4] C. J. Pacheco Figueroa *et al*., "Mentoring women in STEM: Empowering through social technologies," *Frontiers in Education*, vol. 10, 2025, doi: 10.3389/feduc.2025.1512143.

[5] O. Jara Holliday, *La sistematización de experiencias: práctica y teoría para otros mundos posibles*. Bogotá, Colombia: CINDE, 2018. **[6]** G. A. Bowen, "Document analysis as a qualitative research method," *Qualitative Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 27–40, 2009, doi: 10.3316/QRJ0902027.

[7] H.-F. Hsieh and S. E. Shannon, "Three approaches to qualitative content analysis," *Qualitative Health Research*, vol. 15, no. 9, pp. 1277–1288, 2005, doi: 10.1177/1049732305276687.

[8] OECD, *PISA 2025 Science Framework*. Paris, France: OECD Publishing, 2025.

[9] H. B. Carlone and A. Johnson, "Understanding the science experiences of successful women of color: Science identity as an analytic lens," *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 44, no. 8, pp. 1187–1218, 2007, doi: 10.1002/tea.20237.

[10] N. K. Denzin, *The Research Act: A Theoretical Introduction to Sociological Methods*. New York, NY, USA: Routledge, 2017.

[11] G. Yakman and H. Lee, "Exploring the exemplary STEAM education in the U.S. as a practical educational framework for Korea," *Journal of the Korean Association for Science Education*, vol. 32, no. 6, pp. 1072–1086, 2012, doi: 10.14697/jkase.2012.32.6.1072.

[12] I. Sánchez Milara, K. Pitkänen, J. Laru, M. Iwata, M. Cortés Orduña, and J. Riekki, "STEAM in Oulu: Scaffolding the development of a community of practice for local educators around STEAM and digital fabrication," *International Journal of Child-Computer Interaction*, vol. 26, Art. no. 100197, 2020.

[13] D. Valdes-Ramirez, G. Zavala, R. Monroy, and L. de Armas Jacomino, "Development of sustainability competencies in higher education through interdisciplinary and challenge-based learning experiences," 2024.

[14] OECD, *Education at a Glance 2025: OECD Indicators*. Paris, France: OECD Publishing, 2025.

[15] C. J. Pacheco Figueroa *et al*., "Women in STEM and social technologies: Educational strategies for participation, mentoring, and professional development," 2025.