

Nivel de logro de la competencia de modelización matemática: estudio de intervención interdisciplinaria en ingeniería mecánica

Level of achievement of the mathematical modeling competence: interdisciplinary intervention study in mechanical engineering

Héctor Noriega Fernández¹  <https://orcid.org/0009-0001-5445-7861>

Andrea Cárcamo Bahamonde^{2*}  <https://orcid.org/0000-0001-5782-3479>

Recibido 19 de octubre de 2025, aceptado 22 de diciembre de 2025

Received: October 19, 2025 Accepted: December 22, 2025

RESUMEN

En esta investigación se analiza el nivel de logro de la competencia de modelización matemática en estudiantes de Ingeniería Civil Mecánica en el contexto de una intervención didáctica interdisciplinaria basada en aprendizaje por proyectos (PBL). Se implementó la intervención en el curso “Taller de Ingeniería III” con 26 estudiantes del tercer semestre, quienes trabajaron colaborativamente en ocho grupos heterogéneos durante un semestre académico. La metodología empleó un diseño cualitativo que combinó un diagnóstico individual inicial y análisis de informes grupales finales, evaluando cinco subcompetencias de la competencia de modelización matemática. Se utilizó una rúbrica específica que operacionalizó cada subcompetencia en criterios evaluativos con escala de 0 a 20 puntos. Los resultados muestran que el diagnóstico inicial reveló niveles de logro bajos en simplificación y validación (22,5% cada una), mientras que matematización alcanzó el mejor desempeño inicial (59%). El trabajo colaborativo permitió superar las limitaciones iniciales, con seis de ocho grupos alcanzando niveles satisfactorios en comprensión contextual y validación crítica. Los grupos con mejor desempeño lograron niveles equilibrados en todas las subcompetencias, mientras que persistieron dificultades en matematización e interpretación en grupos con menor logro. Se concluye que el PBL interdisciplinario constituye un marco eficaz para promover la competencia de modelización matemática, especialmente en contextos colaborativos que integran conocimientos matemáticos con problemáticas reales de ingeniería mecánica.

Palabras clave: Modelización matemática, estudiantes de ingeniería, educación interdisciplinaria.

ABSTRACT

This research examines the attainment of mathematical modeling competence among Mechanical Engineering students through an interdisciplinary didactic intervention based on project-based learning (PBL). The intervention was conducted in the “Engineering Workshop III” course with 26 third-semester students, who worked collaboratively in eight heterogeneous groups during one academic semester. The methodology employed a qualitative design, incorporating an initial individual diagnostic assessment and analysis of final group reports to evaluate five sub-competencies of mathematical modeling competence.

¹ Universidad Austral de Chile. Instituto de Ingeniería Mecánica. Valdivia, Chile. E-mail: hnoriega@uach.cl

² Universidad Austral de Chile. Centro de Docencia de Ciencias Básicas para Ingeniería. Valdivia, Chile. E-mail: andrea.carcamo@uach.cl

* Autor de correspondencia: andrea.carcamo@uach.cl

A specific rubric operationalized each sub-competency into evaluative criteria, using a scale from 0 to 20 points. The initial diagnostic revealed low achievement levels in simplification and validation (22.5% each), while mathematization achieved the best initial performance (59%). Collaborative work facilitated overcoming initial limitations, as six out of eight groups attained satisfactory levels in contextual understanding and critical validation. The highest-performing groups demonstrated balanced achievement across all sub-competencies, whereas lower-achieving groups continued to encounter difficulties with mathematization and interpretation. The finding suggest that interdisciplinary PBL provides an effective framework for fostering mathematical modeling competence, particularly in collaborative settings that integrate mathematical knowledge with authentic mechanical engineering problems.

Keywords: Mathematical modeling, engineering students, interdisciplinary education.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, diversas investigaciones han evidenciado la necesidad crítica de fortalecer el desarrollo de competencias fundamentales en la formación de ingenieros, particularmente la competencia de modelización matemática. Esta competencia se define como la capacidad de traducir situaciones reales o tecnológicas en términos matemáticos, resolverlas mediante herramientas analíticas apropiadas, interpretar los resultados obtenidos y validarlos en su contexto original [1]. Su desarrollo resulta esencial para enfrentar problemas complejos del ámbito profesional, especialmente en disciplinas como la ingeniería mecánica, donde se requiere integrar sistemáticamente conocimientos matemáticos con fenómenos físicos, técnicos e industriales [2].

El paradigma contemporáneo de formación por competencias en ingeniería demanda enfoques pedagógicos que articulen efectivamente teoría y práctica, promoviendo el desarrollo de competencias transversales como pensamiento crítico, resolución de problemas complejos y adaptabilidad tecnológica [3]. En el contexto actual de transformación digital acelerada, donde la inteligencia artificial está redefiniendo fundamentalmente los procesos industriales, resulta imperativo que los futuros ingenieros desarrollen competencias sólidas en análisis de datos y modelización matemática para mantener su relevancia profesional [4]. La formación matemática para ingenieros está sujeta a grandes cambios debido al avance vertiginoso sobre las demandas de conocimientos y habilidades para abordar los problemas del siglo XXI, donde se requiere de enfoques multidisciplinarios para abordar los desafíos locales y globales [2].

Sin embargo, investigaciones recientes señalan un bajo nivel de desarrollo de la competencia de modelización matemática en estudiantes de ingeniería. Este déficit se atribuye principalmente a una enseñanza centrada en procesos algorítmicos descontextualizados, caracterizada por una escasa articulación entre los contenidos matemáticos y las problemáticas específicas del campo profesional [5], [6]. Además, las propuestas didácticas convencionales frecuentemente omiten principios de inclusión educativa, limitando las oportunidades de aprendizaje de estudiantes con trayectorias escolares diversas y carencias formativas en áreas fundamentales como matemáticas [7]. En el ámbito educativo, los estudiantes son receptores pasivos de los procesos de aprendizaje, lo que implica una mala preparación para su futuro profesional, acrecentándose aún más cuando los tipos de problemas que se trabajan en clases no los preparan para resolver problemas reales [2].

Esta problemática se intensifica en el contexto universitario chileno post-pandemia, caracterizado por una marcada heterogeneidad en los perfiles de ingreso estudiantil, persistentes desigualdades en el acceso a recursos educativos de calidad, y amplias brechas en los aprendizajes adquiridos en matemáticas durante la enseñanza media [8]. En particular, estudiantes provenientes de contextos socioeconómicos vulnerables o pertenecientes a pueblos originarios enfrentan mayores obstáculos para acceder a experiencias formativas que integren teoría y práctica de manera efectiva [9].

Frente a este escenario, varias investigaciones han propuesto enfoques alternativos para promover eficazmente la competencia de modelización matemática en ingeniería. Entre estos, se destaca el uso de metodologías activas como el aprendizaje

basado en proyectos (PBL) y el método de casos, que permite abordar las brechas formativas identificadas mediante estrategias de aprendizaje contextualizado, fortaleciendo simultáneamente la motivación estudiantil y desarrollando competencias transversales esenciales [10]. Estudios empíricos recientes, han analizado las rutas de modelización realizadas por estudiantes de ingeniería al enfrentar problemas reales [5] y otros, han destacado la efectividad de la modelización matemática como puente interdisciplinario en entornos STEM [2]. La literatura evidencia la importancia de integrar STEM desde los primeros niveles, usando modelización matemática como puente entre las disciplinas, para prepararlos en el estudio de problemas, soluciones y propuestas que respondan a necesidades del medio externo [2].

La integración estratégica de herramientas digitales avanzadas, incluyendo software de simulación, lenguajes de programación y entornos de inteligencia artificial dentro del marco del PBL, alinea la formación académica con las competencias emergentes requeridas para el Ingeniero Civil Mecánico del siglo XXI [11]. Esta integración tecnológica mejora las posibilidades de que el egresado posea tanto la base teórica sólida como la experiencia aplicada necesaria para desempeñarse exitosamente en el ámbito laboral, independientemente de su perfil de ingreso inicial. La resolución de problemas es de suma importancia en la educación en ingeniería, donde la evaluación didáctica de talleres mediante análisis descriptivo con enfoque cualitativo y cuantitativo permite reunir factores de interés que establecen características para un adecuado desarrollo de actividades en el proceso de enseñanza [4].

En este contexto, el presente estudio diseña una intervención didáctica interdisciplinaria implementada en el curso “Taller de Ingeniería III”, correspondiente al tercer semestre de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica. La propuesta innovadora, desarrollada mediante la metodología PBL, articula contenidos matemáticos avanzados con problemáticas específicas del ámbito disciplinar para favorecer el desarrollo de la competencia de modelización matemática en un entorno colaborativo. Su carácter innovador radica en la introducción sistemática del PBL en el ciclo formativo inicial de “Bachillerato” y en la implementación de una colaboración efectiva entre docentes de ciencias básicas e ingeniería, ofreciendo así una vía concreta y

replicable para contextualizar el aprendizaje, reducir brechas formativas preexistentes y cultivar una de las competencias profesionales más esenciales para la ingeniería contemporánea.

El objetivo de esta investigación es analizar el nivel de logro de la competencia de modelización matemática en estudiantes de Ingeniería Civil Mecánica en el contexto de una intervención didáctica interdisciplinaria basada en aprendizaje por proyectos (PBL).

ENFOQUE TEÓRICO

Formación por competencias y modelización matemática en ingeniería

La formación por competencias representa un paradigma educativo centrado en la adquisición de competencias definidas como combinaciones dinámicas de conocimientos, habilidades y actitudes necesarias para el desempeño profesional exitoso [10]. En ingeniería mecánica, este enfoque es relevante debido a la naturaleza aplicada de la profesión, donde los estudiantes deben integrar conocimientos técnicos específicos con habilidades transversales para adaptarse a contextos tecnológicos cambiantes [1].

La competencia de modelización matemática se define como la capacidad de formular, interpretar, analizar y validar modelos matemáticos que representen fenómenos reales, permitiendo tomar decisiones fundamentadas [2]. Esta competencia se descompone en cinco subcompetencias asociadas al ciclo de modelización: 1) simplificación, 2) matematización, 3) trabajo matemático, 4) interpretación y 5) validación [12]. En particular, los estudiantes de ingeniería logran progresos en estas subcompetencias cuando trabajan colaborativamente en tareas contextualizadas. En la Tabla 1 se presentan las subcompetencias de modelización matemática y sus descriptores [12], [13]. Estas subcompetencias forman la base para el desarrollo de una competencia más general de la competencia de modelización matemática [13].

Aplicación del PBL en el desarrollo de la competencia de modelización matemática

El aprendizaje basado en proyectos (PBL) es una metodología educativa que involucra a los

Tabla 1. Subcompetencias de modelización matemática [12], [13].

Subcompetencia	Descriptor
Simplificación. Comprender problemas del mundo real y construir un modelo de la realidad.	• Hace suposiciones sobre el problema y simplifica la situación. • Reconoce las cantidades que influyen en la situación, las nombra e identifica variables clave. • Construye relaciones entre las variables. • Busca información disponible y distingue entre la información relevante y la irrelevante.
Matematización. Crear un modelo matemático a partir de un modelo del mundo real.	• Matematiza cantidades relevantes y sus relaciones. • Simplifica cantidades relevantes y sus relaciones. • Elige notaciones matemáticas apropiadas y representa situaciones en lenguaje matemático.
Trabajo matemático. Resolver problemas matemáticos dentro de un modelo matemático.	• Utiliza estrategias como la división del problema en subproblemas, estableciendo relaciones con problemas similares, reformulando el problema, variando las cantidades o los datos disponibles, etc. • Aplica conocimientos matemáticos para resolver el problema.
Interpretación. Interpretar resultados matemáticos en un modelo del mundo real o en una situación real.	• Interpreta resultados matemáticos en contextos extra matemáticos. • Generaliza soluciones que se desarrollaron para una situación específica. • Identifica soluciones para el problema usando un lenguaje matemático apropiado o comunica las soluciones del problema.
Validación. Cuestionar las soluciones y, si es necesario, efectuar otro proceso de modelización.	• Verifica críticamente y reflexiona sobre las soluciones encontradas. • Revisa algunas partes del modelo o vuelve a pasar por el proceso de modelización si las soluciones no se ajustan a la situación. • Reflexiona sobre otras formas de resolver el problema o si las soluciones pueden desarrollarse de manera diferente. • Generalmente se cuestiona el modelo.

estudiantes en investigaciones relacionadas con situaciones auténticas, promoviendo la adquisición de conocimientos y competencias transversales como pensamiento crítico, colaboración y resolución de problemas complejos [9]. En el contexto de la formación por competencias, el PBL permite abordar brechas formativas mediante aprendizaje contextualizado, fortaleciendo la motivación estudiantil y desarrollando una mentalidad de aprendizaje permanente [13]. El PBL transforma el rol docente desde transmisor de información hacia facilitador del aprendizaje, ofreciendo apoyo y dirección mediante un enfoque interactivo orientado al diálogo y la reflexión [14]. Esta metodología es especialmente efectiva para el desarrollo de la competencia de modelización matemática, ya que permite integrar conocimientos matemáticos con problemáticas específicas de ingeniería en contextos reales.

La implementación del PBL como estrategia para fortalecer la competencia de modelización matemática exige un diseño didáctico que combine principios constructivistas con prácticas pedagógicas orientadas

a la acción profesional. Esta aproximación requiere la selección de problemas auténticos que demanden la aplicación simultánea de conceptos matemáticos y saberes de la ingeniería mecánica, cuya solución exija recorrer explícitamente las fases del proceso de modelización matemática [15].

El trabajo colaborativo en equipos heterogéneos potencia la integración interdisciplinaria y favorece la construcción colectiva del conocimiento. Esta dinámica refuerza las competencias transversales y simula el contexto profesional donde la resolución de problemas complejos requiere integrar perspectivas diversas y complementarias [16]. La asignación de espacios de trabajo exclusivos para cada equipo durante períodos prolongados facilita la consolidación de dinámicas colaborativas efectivas y sostiene la continuidad del proceso de modelización a lo largo del tiempo.

METODOLOGÍA

Esta investigación se inscribe dentro de un enfoque de métodos mixtos con un diseño secuencial

explicativo (Creswell y Plano Clark [22]), que combina procedimientos, datos e interpretaciones cuantitativas y cualitativas con el propósito de obtener una comprensión integral del desarrollo de la competencia de modelización matemática. En la primera fase, de carácter cuantitativo descriptivo, se aplicó un diagnóstico individual inicial para determinar el nivel de logro de las subcompetencias del ciclo de modelización matemática. En la segunda fase, de carácter cualitativo interpretativo, se analizaron los informes finales grupales elaborados durante la intervención, identificando evidencias del desarrollo de las subcompetencias en un contexto colaborativo e interdisciplinario. La integración de ambas fases se realizó en la etapa interpretativa final, donde los resultados cuantitativos fueron contrastados y contextualizados con categorías cualitativas derivadas del análisis de los informes.

El estudio siguió el principio de integridad metodológica propuesto por Creamer [23], garantizando coherencia entre los supuestos epistemológicos del enfoque mixto, las decisiones de diseño y los procedimientos analíticos. De esta forma, la fase cuantitativa permitió describir niveles de logro y su evolución, mientras que la fase cualitativa profundizó en los procesos de razonamiento, colaboración y validación implicados en el desarrollo de la competencia.

Contexto y participantes

La intervención didáctica se realizó en el curso Taller de Ingeniería III durante un semestre académico en una universidad chilena. Participaron 26 estudiantes del tercer semestre de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica, de los cuales tres eran mujeres. Los estudiantes habían aprobado previamente cursos de matemática de Álgebra, Geometría, Cálculo en una variable y Álgebra lineal, lo que constituye sus conocimientos previos para abordar las tareas de modelización propuestas en esta intervención.

Diseño de la intervención didáctica

La intervención didáctica se concibió y ejecutó colaborativamente por dos docentes de Ciencias Básicas de matemáticas y un docente del Instituto de Ingeniería Mecánica, teniendo como eje metodológico el PBL para favorecer el logro de la competencia de modelización matemática. La propuesta interdisciplinaria articula contenidos matemáticos (Álgebra Lineal y Ecuaciones Diferenciales) con

problemáticas propias del ámbito de la ingeniería mecánica.

Los 26 estudiantes se distribuyeron en ocho grupos heterogéneos formados aleatoriamente, lo que potencia la colaboración interdisciplinaria y favorece la construcción colectiva del conocimiento. A lo largo del semestre, cada grupo se enfrentó a seis problemas de origen teórico (PT) y tres problemas de laboratorio (PL), los cuales progresivamente requirieron la aplicación de Álgebra Lineal, Cálculo y Ecuaciones Diferenciales. La Figura 1 sintetiza la organización curricular del curso y la secuencia planificada de problemas teóricos y de laboratorio, articulada con las unidades de aprendizaje. Esta planificación busca promover el desarrollo de las cinco subcompetencias de la competencia de modelización matemática en los estudiantes. Asimismo, la Figura 1 explicita la vinculación entre contenidos matemáticos y problemáticas propias de la ingeniería mecánica, junto con un incremento gradual de la complejidad conceptual, procedimental y contextual a lo largo del semestre.

Para cada problema propuesto, los estudiantes recorrieron explícitamente el ciclo de modelización matemática, avanzando de forma progresiva en complejidad. Al finalizar cada problema, los grupos redactaban una breve reflexión crítica sobre los supuestos adoptados, las limitaciones identificadas y la sensibilidad de sus modelos frente a variaciones paramétricas, lo que fomentó el pensamiento crítico y la revisión iterativa de sus soluciones. El último problema funcionó como actividad integradora, el cual consistió en el estudio experimental del movimiento armónico amortiguado en un sistema masa-resorte. Los grupos desarrollaron el laboratorio para registrar el desplazamiento de la masa en función del tiempo, estimar la constante del resorte y el coeficiente de amortiguamiento y, finalmente, comparar las predicciones del modelo construido usando ecuación diferencial con los datos obtenidos.

Instrumentos de recopilación de datos

Para evaluar el desarrollo de la competencia de modelización matemática durante la intervención, se emplearon dos instrumentos de recogida de datos. En primer lugar, se aplicó un instrumento diagnóstico individual inicial que permitió identificar el nivel de logro de cada subcompetencia de la competencia de modelización matemática antes de la intervención.

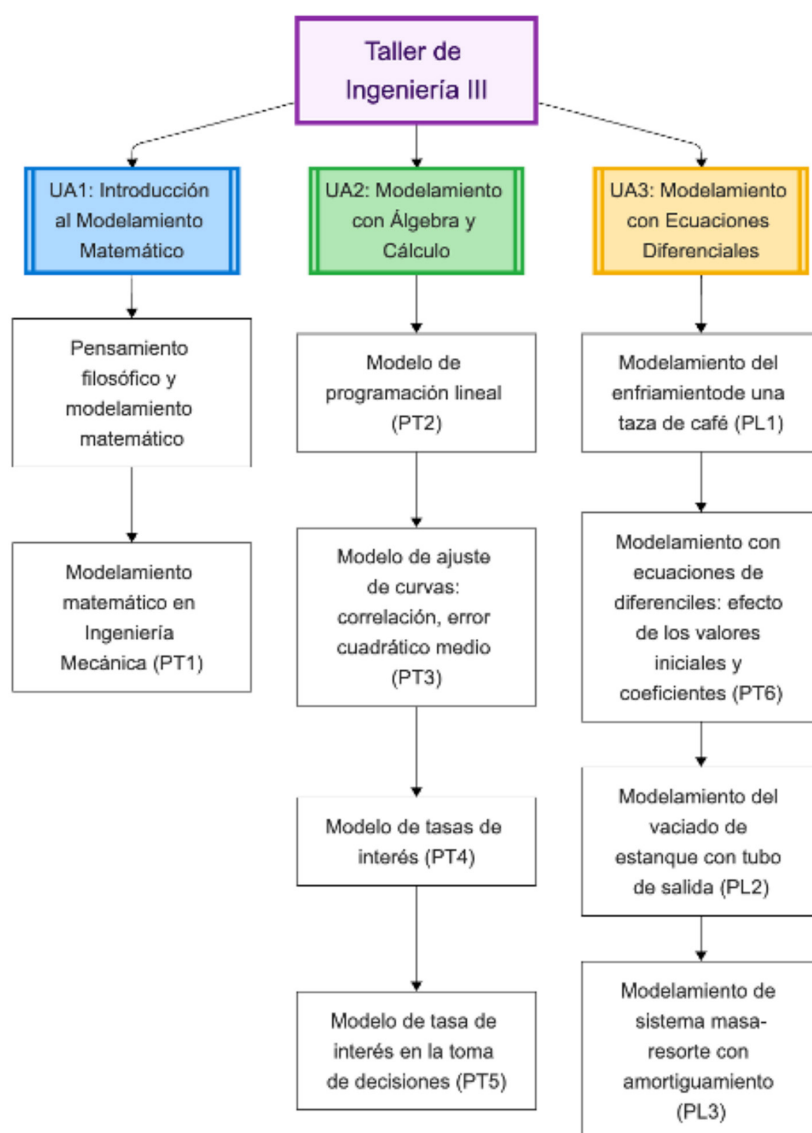


Figura 1. Estructura curricular y secuencia de problemas del curso Taller de Ingeniería III.

Los resultados se expresaron como porcentaje de logro por subcompetencia.

Al finalizar el curso, cada grupo presentó un informe final, en el que se sistematizó el trabajo desarrollado durante toda la intervención. Los ocho informes finales fueron analizados en función del logro de los descriptores de las subcompetencias de modelización matemática (Tabla 1). Para la evaluación de estos informes grupales, se diseñó una rúbrica específica que operacionalizó las cinco subcompetencias del

ciclo de modelización en cinco criterios evaluativos: 1) Simplificación asociada a la comprensión e interpretación del contexto; 2) Matematización, que valora la traducción del problema a un modelo formal, 3) Trabajo matemático que evalúa la coherencia de los procedimientos analíticos o numéricos, 4) Validación referida al contraste de resultados con datos experimentales y al ajuste del modelo, e 5) Interpretación y comunicación que examina la argumentación de conclusiones y la presentación escrita del informe. Cada criterio se calificó en una

escala de 0 a 20 puntos, categorizándose en tres niveles: alto (16-20), medio (11-15) y bajo (0-10).

La rúbrica incluyó descriptores de desempeño e indicadores observables por nivel. A modo de ejemplo, la Tabla 2 presenta la estructura utilizada para el criterio 1), asociado a la subcompetencia Simplificación. Para los demás criterios, se utilizó un formato con indicadores ajustados a las particularidades de cada subcompetencia.

De forma análoga, el criterio 4) Validación valoró la capacidad de contrastar los resultados matemáticos con evidencia empírica. Se consideró desempeño alto cuando los equipos comparaban resultados, analizaban discrepancias y ajustaban parámetros o supuestos; medio cuando el contraste era parcial o sin análisis crítico; y bajo cuando no se evidenciaba contraste explícito o justificación del ajuste del modelo.

Análisis de datos

El análisis de los datos se estructuró en tres niveles articulados, con el propósito de describir el punto de partida del curso, caracterizar el desempeño final evidenciado en los informes y, posteriormente, establecer una comparación descriptiva a nivel de curso entre ambos momentos.

En primer lugar, se realizó un análisis cuantitativo descriptivo de los resultados del diagnóstico individual inicial, calculando el porcentaje de logro del curso para cada subcompetencia de modelización matemática.

Este cálculo permitió caracterizar el nivel inicial del grupo en simplificación, matematización, interpretación, trabajo matemático, y validación (Tabla 2).

En segundo lugar, se desarrolló un análisis cualitativo-interpretativo de los ocho informes finales grupales, la rúbrica específica descrita en la sección anterior, cuyos cinco criterios corresponden a las subcompetencias del ciclo de modelización matemática. Cada informe fue evaluado a partir de evidencias presentes en el documento (indicadores observables), asignando puntajes por criterio en una escala de 0 a 20. Para fortalecer la consistencia del proceso, tres investigadores revisaron los informes de manera independiente y luego consensuaron las puntuaciones y la clasificación por niveles de desempeño (alto, medio y bajo), asegurando coherencia entre los descriptores de la rúbrica y los indicadores observables del trabajo estudiantil. Los informes se ordenaron por nivel de desempeño global, asignando las denominaciones G1 al informe con mayor logro y G8 al de menor puntuación total.

En tercer lugar, con el fin de robustecer cuantitativamente la comparación entre el diagnóstico inicial y la evaluación final se efectuó un análisis comparativo entre ambos momentos. Para ello, los niveles de desempeño obtenidos por los grupos en cada criterio del informe final se transformaron a una escala ordinal de logro (1 = alto, 0,5 = medio, 0 = bajo), y se calculó el promedio por subcompetencia entre los ocho grupos. Este promedio se expresó como porcentaje. Este indicador representa el

Tabla 2. Descriptores de desempeño e indicadores observables de la rúbrica para la subcompetencia de Simplificación.

Desempeño	Descriptor general	Indicadores observables
Alto (16-20 pts)	Identifica con claridad las variables relevantes, establece supuestos explícitos y justificados, y formula una representación (diagrama, dibujo, etc.) que es coherente con el fenómeno y útil para el modelado.	– Selecciona variables pertinentes y justifica su inclusión. – Explicita condiciones o restricciones del fenómeno. – Simplifica el contexto sin perder coherencia con la situación real.
Medio (11-15 pts)	Reconoce parcialmente las variables y relaciones relevantes, pero con supuestos incompletos o simplificaciones poco justificadas.	– Omite o confunde algunas variables secundarias. – Los supuestos son implícitos o poco fundamentados. – El modelo simplificado conserva sentido parcial.
Bajo (0-10 pts)	Presenta dificultades para identificar las variables esenciales o formula supuestos erróneos o incoherentes con la situación.	– Incluye variables irrelevantes o contradicciones. – Carece de justificación de supuestos. – No se logra un modelo simplificado funcional.

nivel promedio de desempeño colectivo por subcompetencia. Dado que el diagnóstico fue aplicado de manera anónima, no fue posible emparejar mediciones individuales con desempeños grupales, por lo que no se aplicaron pruebas inferenciales. En su lugar, se reportaron indicadores descriptivos que permiten observar tendencias globales y complementar la interpretación de los resultados.

RESULTADOS

Los resultados se presentan en tres secciones complementarias que permiten describir y analizar la evolución de la competencia de modelización matemática durante la intervención. En primer lugar, se describe la situación de entrada del curso, a partir del diagnóstico individual aplicado al inicio del semestre. En segundo lugar, se reporta el desempeño evidenciado en el trabajo colaborativo, analizado mediante los informes finales grupales evaluados con la rúbrica presentada en la metodología. Finalmente, se contrasta la medición inicial con la evaluación final grupal, con el fin de identificar tendencias globales de avance y persistencias en el desarrollo de las subcompetencias.

Situación inicial de las subcompetencias de modelización matemática

El diagnóstico individual aplicado al comienzo del semestre permitió establecer la situación inicial de las cinco subcompetencias de modelización matemática en los 26 estudiantes participantes. Los resultados, presentados en la Tabla 3, muestran que la subcompetencia de matematización alcanza el mayor nivel de logro inicial con un 59% de respuestas correctas, indicando que los estudiantes poseen conocimientos matemáticos previos que les permiten traducir parcialmente situaciones problemáticas a lenguaje matemático. Le siguen trabajo matemático (37%) e interpretación (39,7%), alcanzando niveles

de logro intermedios para aplicar procedimientos matemáticos e interpretar resultados en contextos extramatemáticos.

Las subcompetencias de simplificación y validación alcanzan los niveles de logro más bajos (22,5% cada una), evidenciando limitaciones para comprender y delimitar problemas del mundo real, así como para evaluar críticamente la pertinencia y validez de los modelos construidos. Estos resultados establecen que los estudiantes ingresan a la intervención con conocimientos matemáticos formales, aunque con niveles de logro limitados para contextualizar problemas reales y reflexionar críticamente sobre sus soluciones.

Nivel de logro de la competencia en contextos colaborativos

El análisis de los ocho informes finales grupales permitió caracterizar el desempeño alcanzado en las subcompetencias de modelización matemática tras la implementación de la intervención basada en PBL. Como se muestra en la Tabla 4, los niveles de logro son heterogéneos entre los grupos, con desempeños que oscilan desde satisfactorios hasta insuficientes. Los grupos G1, G2 y G3 alcanzan los niveles de logro más altos, con puntuaciones superiores a 16 puntos en la mayoría de los criterios evaluados, mientras que los grupos G7 y G8 presentan los niveles más bajos, con varios criterios por debajo del umbral mínimo aceptable.

El análisis de los informes grupales permitió identificar tres categorías de logro de la competencia de modelización matemática: nivel de logro alto, nivel de logro medio y nivel de logro bajo. Los grupos con nivel de logro alto (G1, G2, G3) alcanzan logros satisfactorios en todas las subcompetencias, demostrando coherencia entre contexto, matematización y resolución, junto

Tabla 3. Nivel de logro por subcompetencia de modelización matemática en el diagnóstico inicial (evaluación individual).

Subcompetencia	Nivel de logro inicial (%)	Categoría de logro
Matematización	59	Intermedio
Interpretación	39,7	Básico-Intermedio
Trabajo matemático	37	Básico-Intermedio
Simplificación	22,5	Básico
Validación	22,5	Básico

Tabla 4. Nivel de logro de la competencia de modelización matemática por equipo (informes grupales).

Grupo	Criterio 1 Simplificación (20 pts)	Criterio 2 Matematización (20 pts)	Criterio 3 Trabajo matemático (20 pts)	Criterio 4 Validación (20 pts)	Criterio 5 Interpretación (20 pts)	Puntaje total
G1	18	19	18	18	18	91
G2	15	18	18	16	16	83
G3	18	12	12	14	16	72
G4	13	12	12	12	12	61
G5	12	12	12	10	12	58
G6	13	10	10	10	10	53
G7	10	10	10	10	10	50
G8	12	8	8	10	12	50

con comunicación técnica sólida. En el criterio de comprensión e interpretación del contexto, destacan por el análisis cualitativo del fenómeno y la explicitación de sus restricciones y supuestos. El grupo G1 ejemplifica este nivel: “Para modelar el sistema masa-resorte amortiguado, identificamos tres variables clave: desplazamiento (x), velocidad (dx/dt) y aceleración (d^2x/dt^2). Nuestros supuestos incluyen amortiguamiento viscoso proporcional a la velocidad y resorte con comportamiento lineal según la ley de Hooke”. En matematización, estos grupos alcanzan formulaciones rigurosas con definición precisa de variables y parámetros. En resolución numérica evidencian desempeño sólido, mientras que en validación e interpretación comparan sistemáticamente resultados del modelo con datos experimentales, cuantifican errores y reflexionan sobre sus causas. Sus informes se caracterizan por estructuras ordenadas, redacción cuidada, figuras de calidad y trazabilidad de procedimientos.

Los grupos con nivel de logro medio (G4, G5, G6) mantienen fortalezas específicas, pero presentan desarrollo fragmentado de la competencia. Se caracterizan por avances en resolución numérica sin matematización suficientemente justificada. Generan soluciones computacionales correctas mediante scripts en Python o Scilab, alcanzando niveles mínimos en trabajo matemático, sin embargo, sus niveles de logro en fundamentación teórica y validación crítica son limitados. Presentan débil vinculación entre datos y predicciones del modelo, con escasa interpretación desde la perspectiva de la ingeniería mecánica y limitada discusión sobre la pertinencia y validez de las conclusiones.

Finalmente, los grupos con nivel de logro bajo (G7, G8) presentan niveles insatisfactorios en varias subcompetencias, evidenciando dificultades transversales en el desarrollo de la competencia de modelización. Se sitúan en el umbral mínimo aceptable en comprensión contextual, con descripciones del contexto poco profundas y justificadas. En matematización, el grupo G8 apenas se aproxima al mínimo, con formulaciones imprecisas y definiciones variables poco claras. Se detectan debilidades asociadas a indicaciones poco informativas a herramientas de inteligencia artificial y revisión insuficiente de las salidas generadas, con atención limitada a la consistencia de unidades. En resolución numérica no superan el umbral mínimo, mientras que en validación e interpretación no logran establecer conexiones efectivas entre modelo teórico y datos experimentales. Sus informes exhiben estructuras desordenadas, ausencia de títulos y separadores, gráficos de baja resolución, conclusiones incompletas y uso poco crítico de capturas de pantalla.

Evolución de las subcompetencias de modelización matemática durante la intervención

La comparación entre los resultados del diagnóstico inicial y la evaluación final grupal (Tabla 5) permite analizar la evolución global del curso en el desarrollo de las subcompetencias de modelización matemática.

En términos del indicador empleado para la comparación, los resultados muestran un incremento global en cuatro de las cinco subcompetencias evaluadas. En particular, la simplificación evidencia el mayor avance, aumentando desde 22,5% en el

Tabla 5. Comparación entre el nivel de logro inicial (diagnóstico individual) y final (evaluación grupal) por subcompetencia de modelización matemática.

Subcompetencia	Situación inicial (%)	Logro final (%)	Δ (p.p.)
Simplificación	22,5	56	33,5
Matematización	59	44	-15,0
Trabajo matemático	37	44	7
Validación	22,5	38	15,5
Interpretación	39,7	56	16,3

Nota: El logro final (%) se estimó transformando los niveles de logro grupales en 1 (alto), 0,5 (medio) y 0 (bajo), promediando entre grupos y expresando el resultado como porcentaje.

diagnóstico inicial a 56% en la evaluación final ($\Delta = +33,5$ p.p.). Este resultado sugiere que el trabajo colaborativo sostenido con problemas contextualizados favoreció la identificación de variables relevantes, la explicitación de supuestos y la delimitación de condiciones del fenómeno, aspectos centrales de la etapa inicial del ciclo de modelización.

Asimismo, se observa una mejora en validación (de 22,5% a 38%; $\Delta = +15,5$ p.p.) y en interpretación (de 39,7% a 56%; $\Delta = +16,3$ p.p.). Estos incrementos son consistentes con el énfasis de la intervención en el contraste entre predicciones del modelo y evidencia empírica, así como en la argumentación de alcances y limitaciones en los informes finales. En trabajo matemático, el avance es más acotado (de 37% a 44%; $\Delta = +7$ p.p.), lo que indica que la resolución numérica y la coherencia procedimental mejoraron, aunque con variabilidad entre equipos.

En contraste, la matematización presenta una disminución respecto del diagnóstico inicial (de 59% a 44%; $\Delta = -15$ p.p.), manteniéndose como la subcompetencia más desafiante. Este resultado puede interpretarse como un indicador de que, si bien los estudiantes muestran un desempeño inicial relativamente mayor en tareas acotadas de traducción a lenguaje matemático, la formalización rigurosa de relaciones, parámetros y supuestos resulta más exigente cuando se aborda una situación auténtica y abierta, integrando simultáneamente restricciones físicas, datos experimentales y decisiones de modelización en un producto colectivo. Además, el diagnóstico y el informe final no evalúan exactamente la misma evidencia, ya que el primero se basa en respuestas individuales a tareas específicas, mientras que el segundo exige coherencia y trazabilidad en

un producto integral. Por tanto, la disminución en matematización no necesariamente refleja un retroceso, sino una exigencia cognitiva y epistémica mayor en la evaluación final, que demanda coherencia entre el modelo, la resolución y la interpretación. Estos resultados dan indicios de que la intervención basada en PBL favoreció especialmente el desarrollo de subcompetencias asociadas a la comprensión del contexto, la interpretación y la validación de modelos en escenarios de ingeniería, mientras que la matematización emerge como un foco prioritario de fortalecimiento didáctico. Estos hallazgos orientan la necesidad de incorporar andamiajes más explícitos para apoyar la transición desde descripciones fenomenológicas hacia formulaciones matemáticas consistentes, especialmente en equipos con desempeño medio y bajo.

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que la matematización constituye la subcompetencia más desafiante dentro del proceso de modelización. Aunque fue la que presentó el mejor nivel de partida (59%), solo los grupos con alto desempeño mantuvieron resultados satisfactorios al finalizar la intervención. Los equipos con menor logro mostraron formulaciones imprecisas, definiciones ambiguas de variables y una dependencia excesiva de herramientas de inteligencia artificial, sin la correspondiente reflexión metacognitiva ni la validación de resultados. Este fenómeno coincide con hallazgos previos [17] que reportan que la matematización constituye una de las dificultades más persistentes en el desarrollo de la competencia de modelización, especialmente cuando los problemas requieren integrar múltiples conceptos matemáticos en contextos complejos.

La colaboración interdisciplinaria entre docentes de ciencias básicas e ingeniería mecánica demostró ser un factor clave para el éxito de la intervención, permitiendo diseñar problemas que integraran auténticamente conocimientos matemáticos con fenómenos físicos y técnicos. Los grupos exitosos lograron establecer conexiones entre las ecuaciones diferenciales estudiadas y los fenómenos de amortiguamiento en sistemas mecánicos, evidenciando transferencia efectiva de aprendizajes entre dominios. Esta articulación superó la fragmentación curricular tradicionalmente reportada en la formación de ingenieros [3] y favoreció especialmente a estudiantes con perfiles de ingreso diversos, contribuyendo potencialmente a reducir las brechas de equidad documentadas en el contexto universitario chileno [8].

Un hallazgo emergente de particular relevancia es el uso acrítico de herramientas de inteligencia artificial por parte de algunos grupos, en concreto, aquellos con menor desempeño. Los informes evidenciaron indicaciones poco informativas a estas herramientas y revisión insuficiente de las salidas generadas, con atención limitada a la consistencia de unidades y validación de resultados. Esta observación es coherente con las preocupaciones planteadas por el Departamento de Educación de Estados Unidos [11] sobre la necesidad de formar a los estudiantes en el uso responsable de la inteligencia artificial en contextos educativos, sugiriendo que la mera disponibilidad de tecnología avanzada no garantiza mejores aprendizajes si no se acompaña de formación específica en interpretación crítica. Al respecto, los principios del *Marco de competencias para docentes en materia de inteligencia artificial* de la UNESCO [20] advierten sobre los riesgos éticos y pedagógicos del uso no reflexivo de herramientas digitales, y subrayan la necesidad de formar tanto a estudiantes como a docentes en el uso responsable y ético de la inteligencia artificial.

En concordancia con estos enfoques, los resultados del presente estudio respaldan la urgencia de desarrollar estrategias curriculares que promuevan una alfabetización crítica en inteligencia artificial, entendida no solo como un dominio instrumental, sino como una capacidad de análisis, validación y uso ético de sus resultados. En particular, se propone integrar módulos formativos sobre el uso ético y pedagógico de la inteligencia artificial en

cursos de ciencias básicas e ingeniería, enfatizando la reflexión sobre los procesos algorítmicos y sus limitaciones [20]; incorporar criterios de evaluación que valoren la argumentación y la validación de los resultados obtenidos con inteligencia artificial, en coherencia con las recomendaciones de Uyar [18], quien destaca el rol de la evaluación formativa para identificar usos no críticos de estas herramientas; fortalecer la capacitación docente en competencias digitales e inteligencia artificial, conforme a las directrices de la UNESCO [20], de modo que el profesorado pueda guiar a los estudiantes en la selección, contraste y justificación de soluciones tecnológicamente mediadas; y fomentar proyectos interdisciplinarios mediados por inteligencia artificial que promuevan la construcción de modelos y el razonamiento compartido, en línea con el enfoque de la inteligencia artificial como *learning partner* propuesto por Shin, Haudek y Krajcik [19].

La inteligencia artificial representa un recurso con alto potencial para enriquecer la enseñanza de la modelización matemática en ingeniería, pero su efectividad depende de la mediación docente y del desarrollo de competencias éticas y críticas en los futuros ingenieros. Tal como plantean Wulff, Mientus, Nowak y Borowski [21], la formación docente en STEM debe ir más allá del dominio técnico de la inteligencia artificial, promoviendo una comprensión crítica de sus implicaciones cognitivas, sociales y pedagógicas en la enseñanza y el aprendizaje. En este sentido, la implementación de un PBL interdisciplinario con enfoque ético en inteligencia artificial se perfila como un camino prometedor para fortalecer simultáneamente la competencia de modelización matemática y la responsabilidad profesional en contextos educativos tecnológicamente avanzados.

CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra que el PBL interdisciplinario constituye un marco eficaz para promover la competencia de modelización matemática en estudiantes de ingeniería civil mecánica con formación matemática inicial limitada. Los resultados evidencian que estudiantes que mostraban niveles de logro bajos en simplificación (22,5%) y validación (22,5%) lograron superar estas limitaciones mediante trabajo colaborativo, alcanzando niveles satisfactorios en seis de ocho

grupos. Este progreso se sustentó principalmente en la integración interdisciplinaria que permitió traducir fenómenos físicos reales al lenguaje matemático formal, desarrollar soluciones numéricas y establecer procesos de validación crítica. Adicionalmente, se identificó como hallazgo emergente el uso acrítico de herramientas de inteligencia artificial por parte de algunos estudiantes, evidenciando la necesidad urgente de incorporar en los procesos de enseñanza estrategias que promuevan la reflexión metacognitiva sobre la validez de los resultados tecnológicos.

La relevancia de estos hallazgos trasciende el ámbito puramente académico, ya que contribuyen a la equidad educativa al beneficiar estudiantes con perfiles de ingreso diversos en contextos universitarios caracterizados por marcada heterogeneidad sociodemográfica. La intervención impactó positivamente en las proyecciones de retención y titulación, aspectos críticos en la formación de ingenieros donde las tasas de deserción constituyen un desafío persistente. Entre las principales ventajas identificadas destaca el fortalecimiento de la comunicación interdisciplinaria entre matemáticos e ingenieros, facilitando la articulación efectiva entre formalidades matemáticas y aplicaciones técnicas. La validación experimental emergió como práctica sistemática que fortaleció la confianza en la pertinencia de los modelos desarrollados. Sin embargo, la investigación presenta limitaciones importantes, particularmente su implementación en un contexto específico (un único curso y cohorte), lo que restringe la generalización de los resultados, y la persistente dificultad de algunos grupos para fundamentar rigurosamente sus procesos de matematización.

Los resultados obtenidos tienen aplicaciones concretas para la mejora de la formación en ingeniería. La rúbrica desarrollada puede incorporarse como instrumento de evaluación formativa en otros espacios curriculares, proporcionando a estudiantes y docentes un referente operativo para monitorear el desarrollo de cada subcompetencia de modelización. Los hallazgos pueden motivar la adopción de metodologías PBL en otras asignaturas y carreras de ingeniería, considerando que esta aproximación no solo potencia competencias técnicas específicas, sino que también desarrolla habilidades transversales como colaboración, pensamiento crítico y autonomía intelectual. La evidencia generada respalda la implementación

de enfoques interdisciplinarios como estrategia para reducir las brechas formativas preexistentes y contextualizar el aprendizaje matemático en problemáticas reales de ingeniería.

Las perspectivas futuras incluyen la ampliación de este tipo de intervención a diferentes carreras de ingeniería y contextos universitarios para validar la transferibilidad de los resultados. Es fundamental diseñar secuencias didácticas que incorporen, desde etapas tempranas de la formación, módulos específicos de alfabetización en inteligencia artificial y uso crítico de software de ingeniería. Esta aproximación permitirá abordar de manera más explícita la transición desde la descripción verbal de fenómenos hasta su formalización matemática rigurosa, fortaleciendo particularmente la subcompetencia de matematización que mostró mayor resistencia al desarrollo. Adicionalmente, se requieren estudios longitudinales que evalúen la permanencia de las competencias desarrolladas y su transferencia a contextos profesionales reales.

La presente investigación confirma que un abordaje pedagógico centrado en proyectos auténticos posibilita el desarrollo de la competencia de modelización matemática, al tiempo que identifica la necesidad de profundizar en estrategias específicas para consolidar todas las subcompetencias de esta competencia y afrontar los desafíos emergentes derivados de la integración de tecnologías avanzadas en la formación de futuros ingenieros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a ANID a través del proyecto FONDECYT Regular N°1241155 y la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Austral de Chile.

REFERENCIAS

- [1] B. Alpers, "The mathematical modelling competencies required for solving engineering statics assignments," in *Mathematical Modelling and Applications. International Perspectives on the Teaching and Learning of Mathematical Modelling*, G. A. Stillman, W. Blum, and G. Kaiser, Eds., Cham, Switzerland : Springer, 2017, pp. 189-199, doi: 10.1007/978-3-319-62968-1_16.

- [2] M. Aravena, D. Díaz, F. Rodríguez y N. Cárcamo, "Estudio de caso y modelado matemático en la formación de ingenieros. Caracterización de habilidades STEM", *Ingeniare*, vol. 30, no. 1, pp. 37-56, 2022, doi: 10.4067/S0718-33052022000100037.
- [3] World Economic Forum, "The Future of Jobs Report 2023," Geneva, Switzerland, May 2023. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2023/>
- [4] L.W. Rodríguez, J. Loyo, M.A. López, E. Ávila y S. M. García, "Didáctica de un taller de modelado y simulación. Experiencia virtual", *Ingeniare*, vol. 30, no. 3, pp. 482-496, 2022, doi: 10.4067/S0718-33052022000300482.
- [5] V. Díaz, "Ability of engineering undergraduates to solve real function limit problems", *Ingeniare*, vol. 30, no. 4, pp. 733-744, 2022, doi: 10.4067/S0718-33052022000400733.
- [6] F. Álvarez-Macea y V. Costa, "Enseñanza del Álgebra Lineal en carreras de ingeniería: un análisis del proceso de la modelización matemática en el marco de la Teoría Antropológica de lo Didáctico", *Eco Matemático*, vol. 10, no. 2, pp. 65-78, 2019, doi: 10.22463/17948231.2594.
- [7] A. Bon y M. Pini, Eds., *Cultura, ciudadanía, participación: Perspectivas de la Educación Inclusiva*, Barcelona, España: Pangea, 2019.
- [8] J. Pérez-Castro, "La pandemia como factor de exclusión de los estudiantes con discapacidad en la educación superior", *Revista Educación Superior y Sociedad*, vol. 33, no. 2, pp. 470-495, 2021, doi: 10.54674/ess.v33i2.420.
- [9] S. Argomedo, "Percepción de los estudiantes sobre el clima de aula: el caso de la clase de Álgebra", Tesis de Magíster, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile, 2023.
- [10] J. Larmer, J. Mergendoller, and S. Boss, *Setting the standard for project-based learning: A proven approach to rigorous classroom instruction*, Danvers, MA, USA: ASCD, 2015.
- [11] U.S. Department of Education, *Office of Educational Technology, Artificial Intelligence and Future of Teaching and Learning: Insights and Recommendations*, Washington, DC, USA: Tech, 2023.
- [12] K. Maaß, "What are modelling competencies?," *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, vol. 38, no. 2, pp. 113-142, 2006, doi: 10.1007/BF02655885.
- [13] W. Blum and G. Kaiser, "Vergleichende empirische Untersuchungen zu mathematischen Anwendungsfähigkeiten von englischen und deutschen Lernenden," in *Mathematische Kompetenzen von Schülern: Empirische Befunde und didaktische Konsequenzen*, S. Henn, W. Blum, and J. Heinze, Eds., Thousand Oaks, CA, USA: Sage Publications, 2017.
- [14] C. Hankeln, C. Adamek, and G. Greefrath, "Assessing sub-competencies of mathematical modelling. Development of a new test instrument," in *Lines of Inquiry in Mathematical Modelling Research in Education*, G.A. Stillman and J.P. Brown, Eds., Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 143-160. doi: 10.1007/978-3-030-14931-4_8.
- [15] J.R. Savery, "Comparative pedagogical models of problem-based learning," in *The Wiley Handbook of Problem-Based Learning*, M. Moallem, W. Hung y N. Dabbagh, Eds., Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell, 2019, pp. 81-104, doi: 10.1002/9781119173243.ch4.
- [16] C.E. Hmelo-Silver, M. Kapur y M. Hamstra, "Learning through problem-solving," in *International Handbook of the Learning Sciences*, F. Fischer, C. E. Hmelo-Silver, S. R. Goldman, Peter Reimann, Eds., New York, USA: Routledge, 2018, pp. 210-220.
- [17] G. Ramírez-Montes, A. Henriques, and S. Carreira, "Undergraduate students' learning of linear algebra through mathematical modelling routes," *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, vol. 21, pp. 357-377, 2021, doi: 10.1007/s42330-021-00149-3.
- [18] A. Uyar, "Effective use of artificial intelligence tools in STEM education: Perspectives of STEM educators," *Journal of Baltic Science Education*, vol. 24, no. 3, pp. 552-566, 2025, doi: 10.33225/jbse/25.24.552.
- [19] N. Shin, K. Haudek, and J. Krajcik, *The Potential of Using AI to Improve Student Learning in STEM: Now and in the Future*, Waltham, MA, USA: Community for Advancing Discovery Research in Education (CADRE), 2025. [Online]. Available: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED672731.pdf>
- [20] UNESCO, *Marco de Competencias para Docentes en Materia de Inteligencia Artificial*, París, Francia: UNESCO, 2025, doi: 10.54675/AQKZ9414.
- [21] P. Wulff, L. Mientus, A. Nowak, and A. Borowski, "AI in STEM teacher education: Inquiry into capabilities of an emerging technology," *International Journal of Technology in*

- 22] *Education and Science*, vol. 9, no. 4, pp. 597-618, 2025, doi: 10.46328/ijtes.5105.
- J. W. Creswell and V. L. Plano Clark, *Designing and Conducting Mixed Methods Research*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: Sage Publications, 2017.
- [23] E. G. Creamer, "Striving for methodological integrity in mixed methods research: The difference between mixed methods and mixed-up methods," *Journal of Engineering Education*, vol. 107, no. 4, pp. 526-530, 2018, doi: 10.1002/jee.20240.