

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN EDUCACIÓN”

TEMA:

SIMULACIONES COMO COMPLEMENTO A PRÁCTICAS DE
LABORATORIO PARA MEJORAR EL MODELO MENTAL DE
GIRÓSCOPO EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA

AUTOR:

KATHERINE MICHELLE CAMACHO SELLÁN

Guayaquil - Ecuador

2025

RESUMEN

Enseñar fenómenos físicos que desafían la intuición, como la precesión giroscópica, sigue siendo uno de los desafíos persistentes en la formación de ingenieros. La práctica de laboratorio tradicional no es suficiente para que los estudiantes reorganicen sus ideas y construyan modelos mentales coherentes. Este estudio examinó el efecto que tiene la incorporación de una prepráctica basada en simulación sobre la ganancia de aprendizaje y la evolución conceptual. La investigación se llevó a cabo con un diseño cuasiexperimental en el que participaron 159 estudiantes de ingeniería, distribuidos en dos grupos. El grupo de control siguió el laboratorio tradicional y el experimental interactuó con un simulador de libre acceso, a través de una guía didáctica previo a realizar la práctica. Ambos grupos respondieron el mismo cuestionario de dos niveles (respuesta y justificación) antes y después de la intervención. Los resultados indicaron una diferencia estadísticamente significativa entre la ganancia de aprendizaje normalizada del grupo experimental (0.51) en comparación con la del grupo control (0.04). Además, se notó un avance significativo en la coherencia a nivel conceptual y una transición exitosa desde modelos superficiales o erróneos hacia modelos robustos. Se concluyó que la incorporación de simulaciones con andamiaje cognitivo antes de realizar la experimentación es una estrategia pedagógica eficaz para reforzar la comprensión de fenómenos físicos complejos.

Palabras clave: Aprendizaje basado en simulación, Modelos mentales, Laboratorio de física, Precesión giroscópica

ABSTRACT

Teaching physical phenomena that challenge intuition, such as gyroscopic precession, remains one of the persistent challenges in engineering training. Traditional laboratory practice is not enough for students to reorganize their ideas and build coherent mental models. This study examined the effect of incorporating a simulation-based pre-practice on learning gain and conceptual evolution. The research was carried out with a quasi-experimental design in which 159 engineering students participated, distributed in two groups. The control group followed the traditional laboratory and the experimental group interacted with a freely accessible simulator, through a didactic guide prior to carrying out the practice. Both groups answered the same two-level questionnaire (answer and justification) before and after the intervention. The results indicated a statistically significant difference between the normalized learning gain of the experimental group (0.51) compared to that of the control group (0.04). In addition, a significant advance in conceptual coherence and a successful transition from superficial or erroneous models to robust models was noted. It is established that the incorporation of simulations with cognitive scaffolding before carrying out the experimentation is an effective pedagogical strategy to reinforce the understanding of complex physical phenomena.

Keywords: Simulation-based learning, Mental models, Physics laboratory, Gyroscopic precession

DEDICATORIA

A Dios, todo es por Él y para Él. A mi familia, porque todo esfuerzo tiene sentido al tenerlos a mi lado. A los jóvenes de mi país, sigo creyendo en una generación íntegra, competente y solidaria.

AGRADECIMIENTO

A mi Padre Celestial, cuya fidelidad me sostuvo en cada etapa de este proyecto. A mi familia, porque su apoyo, paciencia e inspiración están representados en cada página de este documento.

A mi tutor de tesis, Manuel Álvarez, y mis profesores por su guía y enseñanza. A mi colega Jonathan Vela, por sus cuestionamientos y su valioso apoyo en la implementación de la estrategia. A Josué Mosquera, por su colaboración en la revisión y estructuración de los recursos pedagógicos. Extiendo también mi gratitud a mis colegas del laboratorio de física mecánica, quienes facilitaron la puesta en marcha de esta investigación.

Finalmente, agradezco a mi iglesia por comprender mis ausencias, asumir mis responsabilidades y sostenerme con sus oraciones durante todo este proceso.

Declaración Expresa

Yo Katherine Michelle Camacho Sellán acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 5 de septiembre del 2025.

Autor

EVALUADORES

TUTOR

EVALUADOR

PRESIDENTE

ABREVIATURAS O SIGLAS

ABP	Aprendizaje Basado en Proyectos (Project-Based Learning)
ABS	Aprendizaje Basado en Simulación (Simulation-Based Learning)
ANOVA	Análisis de Varianza (Analysis of Variance)
df	Grados de Libertad (Degrees of Freedom)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GPT	Transformador Generativo Pre-entrenado (Generative Pre-trained Transformer)
IC 95%	Intervalo de Confianza al 95% (95% Confidence Interval)
KR-20	Fórmula 20 de Kuder-Richardson (Kuder-Richardson Formula 20)
N1	Nivel 1: Selección de respuesta (Level 1: Answer Selection)
N2	Nivel 2: Justificación de respuesta (Level 2: Answer Justification)
OR	Razón de Momios (Odds Ratio)
OTRI	Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación
p-value	Valor p, Nivel de significancia (p-value, Probability value)

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema	3
1.2.1. Limitaciones de la enseñanza tradicional	3
1.2.2. Potencial y limitaciones de las estrategias basadas en laboratorio y simulación	4
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	6
1.5. Pregunta de investigación	7
1.6. Hipótesis	7
1.7. Alcance	7
CAPÍTULO 2	9
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Aporte de las prácticas de laboratorio en el aprendizaje de física	9
2.2. Modelos mentales en la comprensión conceptual de física	12
2.3. Estrategias pedagógicas para mejorar los modelos mentales	16
2.4. Estrategias de evaluación de modelos mentales	18
2.5. Herramientas para el aprendizaje basado en simulación	22
2.6. Dimensiones e indicadores de la mejora en el modelo mental del giróscopo	25
CAPÍTULO 3	30
3. METODOLOGÍA	30
3.1. Enfoque y tipo de investigación	30

3.2.	Contexto y población de estudio	31
3.3.	Equivalencia inicial de grupos.....	31
3.4.	Descripción de la intervención	32
3.4.1.	Desarrollo de la práctica en los grupos.....	32
3.4.2.	Diseño de la guía de simulación	33
3.5.	Instrumentos de recolección de datos	35
3.6.	Métodos de análisis de datos	37
3.6.1.	Fiabilidad y calidad del instrumento.....	38
3.6.2.	Análisis descriptivo y de equivalencia inicial.....	39
3.6.3.	Evaluación del efecto de la intervención.....	40
3.6.4.	Análisis de la transformación de modelos mentales	41
3.7.	Consideraciones éticas.....	46
3.8.	Limitaciones del estudio.....	47
CAPÍTULO 4		49
4.	RESULTADOS	49
4.1.	Fiabilidad y calidad del instrumento de medición.....	49
4.2.	Análisis descriptivo de la muestra.....	51
4.2.1.	Características de la muestra	51
4.2.2.	Rendimiento previo y equivalencia inicial de conocimientos	51
4.3.	Análisis del efecto de la intervención	53
4.3.1.	Ganancia de aprendizaje	53
4.3.2.	Tamaño del efecto de la intervención	55
4.3.3.	Efecto de variables académicas sobre la ganancia de aprendizaje	55
4.3.4.	Análisis gráfico del efecto de la intervención por dimensión conceptual.....	56
4.4.	Transformación conceptual en los modelos mentales	58

4.4.1.	Análisis de coherencia general de las respuestas	58
4.4.2.	Análisis de índice individual de coherencia	60
4.4.3.	Análisis de transición y patrones de concentración	62
4.4.3.1.	Transición de modelo superficial a robusto	63
4.4.3.2.	Transición de modelo incorrecto a robusto	65
4.4.4.	Análisis de transición por pregunta	66
4.5.	Análisis de modelos mentales	68
4.5.1.	Índice de concentración por pregunta.....	68
4.5.2.	Análisis de distractores.....	70
4.5.3.	Evolución individual de los modelos mentales a partir de entrevistas semiestructuradas	76
4.6.	Percepción estudiantil sobre la intervención pedagógica	79
4.6.1.	Interés generado por las actividades introductorias.....	79
4.6.2.	Percepción sobre la comprensión y capacidad de predicción ganado debido a la intervención	80
4.6.3.	Componente pedagógico más útil para el estudiante	82
4.6.4.	Aspectos que demandaron mayor esfuerzo cognitivo	82
4.6.5.	Valoración global de la guía de simulación.....	84
CAPÍTULO 5		85
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
5.1.	Principales hallazgos del estudio.....	85
5.2.	Aportes e implicaciones pedagógicas.....	89
5.3.	Recomendaciones	90
5.4.	Futuras investigaciones	92
6.	REFERENCIAS.	95
7.	APÉNDICES Y ANEXOS.....	99
Apéndice A:	Guía Didáctica de la Simulación.....	100

Apéndice B:	Cuestionario de dos niveles.....	109
Apéndice C:	Guía de entrevistas semiestructurada	112
Apéndice D:	Encuesta de percepción estudiantil	115
Apéndice E:	Código de R para el análisis de resultados (Prueba de dos niveles)	118
Apéndice F:	Código de R para el análisis de la encuesta de percepción estudiantil	141
Apéndice G:	Tablas complementarias de Resultados Estadísticos	149

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1 Beneficios de las prácticas de laboratorio en el aprendizaje de la física	11
Figura 2.2 Proceso de construcción y refinamiento de un modelo mental	13
Figura 2.3 Tres estrategias pedagógicas para mejorar los modelos mentales	16
Figura 2.4 Estrategia combinada para la evaluación de modelos mentales en este estudio.....	21
Figura 2.5 Dimensiones de mejora de un modelo mental sobre la precesión giroscópica.....	28
Figura 3.1 Esquema del procedimiento aplicado a los grupos	33
Figura 3.2 Fragmento de la guía de simulación con estructura de actividades.....	34
Figura 3.3 Estudiantes desarrollando la prepráctica con simulación en parejas ...	35
Figura 3.4 Extracto del cuestionario de dos niveles aplicado en el pre-test y post-test.....	36
Figura 3.5 Ruta metodológica para el análisis de resultados	38
Figura 3.6 Diagrama de concentración de Bao adaptado	43
Figura 4.1 Evolución de la calidad de las preguntas (Nivel 1).....	50
Figura 4.2: Histograma de la nota de primer parcial en grupo de control y experimental.....	52
Figura 4.3: Comparativo de ganancia de Hake del nivel 1 (respuestas)	54
Figura 4.4: Comparativo de ganancia de Hake del nivel 2 (justificación).....	54
Figura 4.5: Interacciones sobre la ganancia de Hake	56
Figura 4.6: Odds Ratios del efecto de la intervención por dimensión conceptual.....	57
Figura 4.7: Probabilidad de éxito predicha según grupo y dimensión conceptual.....	57
Figura 4.8: Proporción de justificaciones correctas para respuestas acertadas	59
Figura 4.9 Distribución acumulada por percentiles del índice de coherencia individual	61
Figura 4.10: Diagrama de concentración por estudiante (Pre-Test).....	62
Figura 4.11: Diagrama de concentración por estudiante (Post-Test).....	63
Figura 4.12: Transición desde modelo superficial a robusto	64
Figura 4.13 Ejemplo de transición superficial a robusto	64

Figura 4.14: Transición desde modelo incorrecto a robusto	65
Figura 4.15 Ejemplo de transición incorrecto a robusto	66
Figura 4.16: Distribución del nivel de comprensión	66
Figura 4.17: Concentración de Bao para el grupo de control	68
Figura 4.18: Concentración de Bao para el grupo experimental	69
Figura 4.19: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 1 del grupo experimental.....	71
Figura 4.20: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 2 del grupo experimental.....	72
Figura 4.21: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 3 del grupo experimental.....	72
Figura 4.22: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 4 del grupo experimental.....	73
Figura 4.23: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 5 del grupo experimental.....	74
Figura 4.24: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 6 del grupo experimental.....	74
Figura 4.25 Evidencia de superficial a robusto medido a través de la técnica "Dibuja y Explica"	78
Figura 4.26 Evidencia de superficial a mixto medido a través de la técnica "Dibuja y Explica"	78
Figura 4.27: Distribución de respuestas sobre el interés generado por las actividades previas.....	80
Figura 4.28: Comparación de las medias de percepción de comprensión y predicción.....	81
Figura 4.29: Percepción del grupo experimental sobre componente pedagógico más útil para comprender la precesión	82
Figura 4.30: Comparación de las dificultades percibidas entre los grupos	83
Figura 4.31: Valoración global de la guía de simulación	84

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Operacionalización de la mejora del modelo mental en la precesión giroscópica.....	28
Tabla 3.1 Correspondencia entre dimensiones de mejora y preguntas de la prueba	36
Tabla 3.2 Rangos de interpretación del KR-20	39
Tabla 3.3 Clasificación de la ganancia de aprendizaje de Hake	40
Tabla 3.4 Interpretación del Tamaño del Efecto para el Coeficiente (r)	40
Tabla 3.5 Matriz de Interpretación para el Diagrama de Concentración Adaptado (S vs. Γ)	43
Tabla 3.6 Interpretación de los patrones de respuestas para diagrama S-C	44
Tabla 4.1 Fiabilidad (KR-20) del instrumento por componente y momento de medición.....	49
Tabla 4.2: Composición de la muestra según grupo	51
Tabla 4.3: Medidas de tendencia central y dispersión en el pre-test (Nivel 1)	52
Tabla 4.4: Medidas de tendencia central y dispersión en el pre-test (Nivel 2)	53
Tabla 4.5: Ganancia de Hake y variabilidad en los niveles 1 y 2	53
Tabla 4.6: Correlación biserial de rango (r) por nivel	55
Tabla 4.7: Proporción de justificaciones correctas (N2) dado que la respuesta (N1) fue correcta.....	58
Tabla 4.8: Estadísticos del índice individual de coherencia	60
Tabla 4.9:Análisis de Chi-cuadrado por pregunta sobre el nivel de conocimiento robusto entre los grupos	67
Tabla 4.10: Resumen de modelos mentales identificados por pregunta.....	75
Tabla 4.11: Cambios en el modelo mental de los estudiantes del grupo de control	76
Tabla 4.12: Cambios en el modelo mental de los estudiantes del grupo experimental.....	77
Tabla 4.13: Estadísticos descriptivos de la percepción de interés generado por las actividades previas	79
Tabla 4.14: Estadísticos descriptivos de la percepción de comprensión y capacidad de predicción	81

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La física es una de las ciencias esenciales en la formación de ingenieros, no solo porque estudia el comportamiento que rige a los sistemas naturales y tecnológicos, sino también porque permite el desarrollo del pensamiento crítico y analítico. Esto prepara a los futuros ingenieros para enfrentar desafíos complejos en sus respectivas áreas.

Los sólidos fundamentos de esta disciplina permiten abordar problemas prácticos con un enfoque científico, lo cual se considera vital en el contexto ecuatoriano. En 2022, el 14.8% de los estudiantes ecuatorianos matriculados en institutos de educación superior se inscribieron en carreras de ingeniería, industria y construcción, con 4851 de ellos como estudiantes de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). (Secretaría de Educación Superior y Dirección Nacional de Gestión de la Información, 2023)

La ESPOL es reconocida por su compromiso en ofrecer programas educativos orientados a brindar una formación ingenieril de alta calidad, capaz de responder al mercado laboral y cumplir con estándares internacionales, tal como menciona Zaitseva en Escuela Superior Politécnica del Litoral (2023). Como se puede evidenciar en su propuesta académica, la ESPOL brinda una formación que vincula la teoría con la práctica, a través de laboratorios equipados y proyectos integradores que permiten a los estudiantes aplicar sus conocimientos en situaciones reales. De esta manera aporta significativamente al desarrollo de profesionales competentes y capacitados para liderar el sector tecnológico y científico del país.

Dentro de este marco académico, uno de los desafíos recurrentes es la comprensión de la dinámica rotacional, especialmente en aplicaciones como el giróscopo, que constituyen un ejemplo esencial de cómo los principios físicos se trasladan a la ingeniería moderna. Como señalan Kaplan y Hirsch (2014), el giróscopo se emplea en entornos educativos para ilustrar cómo las fuerzas se combinan para mantener el equilibrio de un objeto en rotación, incluso bajo la influencia de la gravedad. Sin embargo, debido a la naturaleza abstracta de estos conceptos, los estudiantes suelen encontrar dificultades para relacionar ideas como el momento angular y el torque. Este desafío destaca la necesidad de implementar estrategias innovadoras que ayuden a los estudiantes a visualizar y concretar conceptos mientras desarrollan el pensamiento crítico.

Durante el periodo de pandemia Covid-19, las universidades tuvieron que cerrar sus puertas y migrar sus clases a entornos virtuales. Los docentes experimentaron con nuevas tecnologías, muchas de las que siguen vigentes gracias a que han demostrado ser útiles para mejorar notablemente la comprensión de conceptos físicos complejos. Por ejemplo, un estudio de Chiodi et al. (2021) permitió argumentar que el uso de simulaciones es un excelente recurso para consolidar conceptos y reforzar el aprendizaje de los estudiantes de manera más práctica. De hecho, estos laboratorios virtuales facilitan la experimentación con una mayor variedad de escenarios, en comparación con los analizados en las clases tradicionales.

El uso de estas tecnologías proporciona a los estudiantes acceso a herramientas que les permiten revisar y ajustar sus estructuras mentales. De hecho, estos procesos son importantes ya que, como señala el enfoque constructivista, el aprendizaje se basa en la construcción de nuevos conocimientos a partir de los preconceptos existentes (Ausubel, 1968). Del Carmen Cuesta et al. (2019) sostienen que, si estas estructuras mentales no se abordan adecuadamente, los estudiantes pueden aprender temporalmente para un examen, pero luego regresan a sus ideas originales equivocadas.

En conclusión, a pesar de contar con laboratorios de física, los estudiantes suelen enfrentarse a dificultades para conectar los modelos matemáticos, experimentales y mentales, lo que conduce a un aprendizaje basado en la memorización y la mecanización de fórmulas. Por lo tanto, es crucial implementar técnicas pedagógicas que fomenten un entendimiento más profundo de los fenómenos físicos. En este sentido, el presente estudio propone como alternativa la incorporación de actividades de simulación a las prácticas experimentales sobre el giróscopo.

1.2. Descripción del problema

1.2.1. Limitaciones de la enseñanza tradicional

A pesar de los esfuerzos de los docentes para que los estudiantes puedan conectar la teoría con la práctica, desde pequeños experimentos hasta actividades de laboratorio elaboradas, mejorar los modelos mentales implica un desafío para todos los niveles educativos. El Ineval (2024) reporta un incremento de 0.29% en el desempeño de estudiantes de bachillerato durante el período 2022-2023, en comparación con el anterior. No obstante, este aumento sigue sin alcanzar el nivel mínimo de competencia requerido. Además, se reporta que todos los estudiantes necesitan intervención inmediata para comprender conceptos fundamentales de conservación de energía mediante aplicaciones prácticas.

De manera similar, Malavé (2017) mostró que la mayoría de los estudiantes de la ESPOL creen que las limitaciones en su aprendizaje de física se deben a la falta de conocimientos adquiridos durante la secundaria, dificultando la búsqueda de una metodología efectiva para entender la materia. Estos resultados reflejan la realidad académica con la que los jóvenes ingresan a la universidad, lo que destaca el desafío que enfrentan los docentes universitarios para promover un aprendizaje significativo, especialmente debido a la persistencia de preconceptos erróneos sobre los cuales se fundamentan los nuevos conocimientos.

El problema radica en que la enseñanza tradicional ha demostrado sus limitaciones al descuidar la indagación en los modelos mentales, los cuales los alumnos utilizan para resolver problemas y que influyen en su interpretación de los fenómenos

físicos. Por lo tanto, es crucial que los educadores se centren en potenciar estos modelos más elaborados a través de estrategias específicas (Moreira y Lagreca, 2016).

En este sentido, Nuriyah et al. (2018) implementaron un método de aprendizaje experiencial que involucró a los estudiantes en experimentos prácticos. Este enfoque les permitió interactuar directamente con los conceptos, observándolos de manera concreta, lo que facilitó una comprensión más clara de las leyes implicadas. A pesar de los resultados alentadores, se observó que algunos estudiantes seguían conservando ideas erróneas, especialmente al aplicar estas leyes en contextos reales. Esto confirma la necesidad de abordar a tiempo los preconceptos equivocados para mejorar la comprensión analítica y el rendimiento académico.

Aunque estudios han señalado la conexión entre el éxito académico y la construcción de modelos mentales eficientes, aprobar una materia no necesariamente es un indicador de una evolución conceptual positiva. Donoso (2011) reveló que el 51,4% de los estudiantes que aprobaron todas sus asignaturas de física mantuvieron las mismas preconcepciones con las que ingresaron a la universidad.

1.2.2. Potencial y limitaciones de las estrategias basadas en laboratorio y simulación

Para abordar esta problemática desde un enfoque constructivista, es bien conocido que los laboratorios son herramientas pedagógicas efectivas para mejorar la comprensión y desarrollar modelos mentales más robustos. Carreras, Yuste, y Sánchez (2007, como se citó en Agudelo y García (2010)) señalaron que "los experimentos, por sencillos que sean, permiten a los estudiantes profundizar en el conocimiento de un fenómeno determinado, estudiarlo teórica y experimentalmente, y desarrollar habilidades y actitudes propias de los investigadores" (p. 150).

Aunque un análisis detallado de las prácticas de laboratorio tradicionales puede indicar que están bien estructuradas y contienen componentes cognitivos valiosos,

una revisión más profunda desde la perspectiva de los estudiantes podría revelar que el proceso es disperso, carece de razonamiento científico y limita la comprensión de los fenómenos físicos (Ardila, 2011).

Como respuesta, estrategias como el Aprendizaje Basado en Simulación (ABS) han mostrado resultados positivos. Pérez-Higuera et al. (2020) reportaron un aumento de la media de rendimiento de 43,02 a 60,97 tras incorporar simulaciones a la resolución de problemas, situando a los estudiantes en un contexto científico real. Sin embargo, si se comparan prácticas experimentales con laboratorios virtuales se puede caer en un reduccionismo. A pesar de que estos últimos ofrecen un apoyo alternativo y versátil para abordar las estructuras mentales, no son suficientes para desarrollar habilidades prácticas (Arena et al., 2011).

En síntesis, tanto las prácticas de laboratorio como las simulaciones aportan beneficios al aprendizaje, pero presentan limitaciones cuando se emplean de forma aislada. Integrarlas permite combinar el desarrollo de destrezas prácticas con el fortalecimiento del análisis conceptual, mejorando el rendimiento no solo en física mecánica, pilar fundamental de ingeniería, sino también en otras disciplinas que se construyen a partir de estos conocimientos.

1.3. Justificación

La desvinculación de los modelos matemáticos y experimentales lleva a los estudiantes a memorizar fórmulas sin comprender su significado. Esto no solo se traduce en un desempeño académico deficiente, como lo evidencian las estadísticas, sino que también limita la capacidad de los futuros ingenieros para abordar problemas reales en sus respectivas disciplinas. Por ello, se vuelve imperativo complementar las prácticas de laboratorio con estrategias pedagógicas que fomenten un aprendizaje más profundo y duradero, contribuyendo a generar representaciones mentales más precisas y funcionales.

Esta necesidad se evidencia de manera particular en el estudio de sistemas complejos como el giróscopo, cuya dinámica desafía la intuición y dificulta que los estudiantes construyan un entendimiento sólido. Aunque adquieren conocimientos

sobre momento angular, torque y precesión, estos conceptos suelen quedar desconectados en su estructura cognitiva, limitando su capacidad para comprender el sistema y predecir su comportamiento. Un modelo mental bien desarrollado no solo facilita la comprensión, sino que también tiene un impacto directo en cómo se percibe su aplicación en diversos sistemas tecnológicos. Desde estabilizadores de navegación en aviones y satélites hasta dispositivos médicos y sensores de orientación en teléfonos inteligentes, el correcto entendimiento del giróscopo es clave para el desarrollo de tecnologías que mejoran la productividad e incluso la calidad de vida.

El enfoque pedagógico de este estudio no solo enriquecerá la experiencia educativa de los alumnos, sino que también brindará a los docentes de la ESPOL la oportunidad de transformar su práctica pedagógica. Además, ofrecerá recursos y estrategias que fortalezcan el andamiaje educativo, facilitando una guía más efectiva en la construcción progresiva del conocimiento. Esto se reflejará en clases más dinámicas, mejor adaptadas a los diferentes estilos de aprendizaje y con mayor capacidad para despertar y sostener la curiosidad académica.

Los hallazgos podrán servir de base para su aplicación en otros temas de la física e, incluso, en diversas carreras de ingeniería, generando un impacto más amplio en la calidad educativa institucional. En última instancia, contribuirán a la formación de ingenieros más capacitados, preparados para innovar y aportar al desarrollo científico y tecnológico del país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar una prepráctica como complemento a la práctica de laboratorio mediante el uso de simuladores, para el mejoramiento del modelo mental de giróscopo en estudiantes de física mecánica de la ESPOL.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar las limitaciones de la práctica de laboratorio tradicional sobre el giróscopo en el fortalecimiento de los modelos mentales de estudiantes de física mecánica, a través de la aplicación de pruebas diagnósticas y pruebas de salida.
- Diseñar una prepráctica de laboratorio que combine el uso de un software libre de simulación con una guía didáctica, para la preparación previa a la experimentación física y mejora de sus modelos mentales en el laboratorio de física mecánica.
- Cuantificar la efectividad de la combinación del modelo propuesto en la ganancia de aprendizaje de los estudiantes, para la validación de la mejora de los modelos mentales de giróscopo en los estudiantes de física mecánica de la ESPOL.

1.5. Pregunta de investigación

¿De qué manera contribuye el uso de simulaciones en preprácticas de laboratorio al desarrollo y mejora de los modelos mentales de giróscopo en estudiantes de física mecánica?

1.6. Hipótesis

H1: El uso de simulaciones en prácticas de laboratorio mejora la ganancia de aprendizaje en los estudiantes, específicamente en la práctica relacionada con giróscopo.

H0: El uso de simulaciones en prácticas de laboratorio no tiene un impacto en la ganancia de aprendizaje en los estudiantes, específicamente en la práctica relacionada con giróscopo.

1.7. Alcance

Este estudio se desarrolla en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), específicamente en el contexto del curso de Física Mecánica (componente práctico) para estudiantes de ingeniería.

El alcance comprende un semestre académico, durante el cual se diseña, implementa y evalúa una prepráctica basada en simulaciones como complemento a la práctica de laboratorio tradicional. La recolección de datos se realizó entre el 4 y el 15 de agosto de 2025, mediante la aplicación de pruebas diagnósticas y de salida para medir la evolución conceptual de los estudiantes y la efectividad del método propuesto.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aporte de las prácticas de laboratorio en el aprendizaje de física

La enseñanza de la física representa un verdadero desafío para los docentes, ya que muchos estudiantes perciben esta materia como complicada e inaccesible. A lo largo de la historia, los avances en esta área y en la pedagogía, junto a la integración de modelos, teorías científicas y el uso de tecnologías innovadoras, han permitido que la enseñanza de esta disciplina evolucione.

Una formación efectiva requiere una variedad de métodos que respondan a los distintos estilos de aprendizaje, contextos y recursos con el propósito de inmiscuir al alumno en su propio proceso de aprendizaje. Particularmente, como menciona Kahar (2017), para lograr una comprensión más completa del contenido, es necesario incluir actividades de laboratorio en la pedagogía de la física.

Estudios han demostrado que la integración de actividades experimentales para explicar fenómenos físicos puede aumentar la motivación de los estudiantes. Según Dwija (citado en Kahar, 2018), la motivación humana puede entenderse tanto como causa (el impulso interno hacia el aprendizaje) como consecuencia (el resultado emocional positivo tras la interacción con las actividades). Por ejemplo, un estudiante que se siente motivado por el deseo de explorar fenómenos físicos (causa) elegirá invertir su tiempo en actividades que le permitan hacerlo. Asimismo, un estudiante que experimenta entusiasmo como resultado de las prácticas de laboratorio (consecuencia) estará más inclinado a seguir involucrándose en su aprendizaje.

Por consiguiente, Kahar (2018) realizó un estudio para describir la motivación de los estudiantes después de participar en actividades de laboratorio de física, ya sea

como causa o como consecuencia. Los resultados indicaron una fuerte correlación entre la motivación y el rendimiento académico. Además, se identificaron diferentes niveles de motivación en los estudiantes. Un análisis más detallado reveló que la mayoría de ellos se enfocaron más en completar los informes que en comprender el fenómeno físico asociado. Esto sugiere que los resultados de aprendizaje no son lo suficientemente relevantes para ellos, lo que limita su capacidad para aplicar sus conocimientos en situaciones prácticas del mundo real. De este modo, el autor enfatiza que, aunque las actividades de laboratorio mejoran la motivación de los estudiantes por aprender, es necesario desarrollar estrategias que les permitan mantenerse comprometidos a lo largo de sus experiencias de aprendizaje.

Otro aspecto fundamental es que los laboratorios contribuyen a mejorar las habilidades prácticas del estudiantado. Esto incluye no solo el uso adecuado de instrumentos de laboratorio, sino también la capacidad para armar esquemas, reconocer variables físicas, analizar, interpretar y comparar resultados. Bajo este enfoque, Flores (2018) implementó una metodología de enseñanza combinando talleres teóricos-prácticos que demostró fortalecer la comprensión conceptual de los estudiantes mientras mejoraron sus habilidades prácticas. Sin embargo, en el contexto de la enseñanza de la física, muchos estudiantes presentaron un nivel regular tanto en conocimiento como en habilidades prácticas. Este hallazgo llevó a los autores a reconocer la necesidad de identificar las carencias en la formación inicial y de promover métodos de aprendizaje activos y pragmáticos.

Hasta este punto, se ha examinado el aporte de las prácticas de laboratorio desde distintas perspectivas, todos vinculados a un beneficio común: mejorar el rendimiento. Numerosos estudios sostienen que para alcanzar el éxito académico se requiere esencialmente de una comprensión conceptual sólida.

Por lo tanto, uno de los principales desafíos para lograr este objetivo, como se menciona en Liu y Fang (2021), es que los estudiantes no llegan al salón de clases como “pizarras en blanco” que el profesor puede llenar, sino con una variedad de preconcepciones y modelos mentales derivados de experiencias previas. Si estas no son abordadas oportunamente, se transfieren de una disciplina a otra, llegando

incluso hasta su aplicación en el ámbito profesional. Reconociendo que las concepciones erróneas solo se pueden rectificar a través del uso de estrategias pedagógicas, los investigadores recogieron datos mediante la técnica de *pensamiento en voz alta*. El propósito de este estudio fue evaluar la efectividad en la corrección de conceptos erróneos de estudiantes de pregrado, comparando el aprendizaje tradicional con lo que llamaron *experimentación práctica mejorada*.

En consecuencia, observaron que esta última resultó en un 55.8% de ganancia media en el aprendizaje y una reducción significativa del 47.9% de conceptos erróneos. En este contexto, por ejemplo, los estudiantes pudieron experimentar la fuerza de un resorte al extenderlo o comprimirlo, lo que convirtió un concepto abstracto en una experiencia tangible. Si bien los resultados fueron prometedores para el aprendizaje basado en la experimentación, los investigadores advirtieron que ambas intervenciones resultaron ineficaces para corregir errores conceptuales de alto nivel. Este resultado indica un gran desafío en la enseñanza, donde se requiere invertir una gran cantidad de tiempo de clase para abordar estos preconceptos antes de impartir nuevos contenidos.



Figura 2.1 Beneficios de las prácticas de laboratorio en el aprendizaje de la física

Nota. Elaboración propia, basado en las aportaciones de Kahar (2018), Flores (2018) y Liu y Fang (2021)

En síntesis, aunque los laboratorios mejoran la motivación, las habilidades prácticas y la comprensión de conceptos (Figura 2.1), uno de los mayores obstáculos que enfrentan los estudiantes es la dificultad para vincular la teoría con la práctica. Esta desconexión limita el desarrollo conceptual y puede provocar una percepción de inaccesibilidad en temas abstractos como el giróscopo, afectando el proceso metacognitivo del alumno y su participación en el aprendizaje.

Finalmente, este trabajo adopta como postura principal el potencial de los laboratorios para mejorar la comprensión conceptual, favoreciendo la corrección y construcción de modelos mentales que faciliten el paso de un conocimiento abstracto a uno aplicable y significativo. Esto subraya la importancia de un enfoque pedagógico que potencie la capacidad de los estudiantes para interpretar y aplicar los principios de la física en escenarios reales y en futuros desafíos profesionales.

2.2. Modelos mentales en la comprensión conceptual de física

A lo largo de la historia de la investigación educativa, se han estudiado ampliamente las concepciones alternativas que los estudiantes presentan en distintas áreas de la ciencia. Estas se entienden como ideas conceptuales erróneas que se construyen en base al entorno, incluyendo actitudes, creencias, emociones, vivencias y conocimientos previos (Alvarez-Alvarado et al., 2019). Una vez identificadas, las investigaciones se centraron en cómo transformarlas en un conocimiento científico validado.

Dado que el aprendizaje es un proceso cognitivo, es decir, una forma de procesar mentalmente la información para luego poder utilizarla, se reconoció el papel crucial que desempeñan las representaciones internas como intermediarias en dicho proceso. Esto marcó un cambio de enfoque: desde la década de 1970, centrada en las concepciones alternativas, hacia la década de 1990 caracterizada por el estudio de los modelos mentales (Rodríguez y Moreira, 2002).

Originado en la psicología cognitiva, el concepto de modelo mental se refiere a cómo las personas comprenden, aprenden y recuerdan información. Estos modelos son estructuras internas que los estudiantes construyen para entender y resolver

problemas basados en experiencias previas. Su importancia radica en la influencia que tienen sobre la función cognitiva y la capacidad de convertir el conocimiento en representaciones externas, facilitando el razonamiento lógico, la comprensión y la predicción del comportamiento en el mundo físico (Haili et al., 2017).

Cuando el alumno se enfrenta a una situación o concepto científico, primero construye un modelo mental para interpretarlo; este modelo actúa como un puente entre la experiencia inmediata y el conocimiento almacenado de forma estable en su memoria a largo plazo, dando lugar a una concepción que puede ser correcta o incorrecta. La literatura subraya que, si se comete el mismo error repetidamente, es porque el aprendizaje sigue guiado por concepciones alternativas que la enseñanza no ha logrado modificar. Por lo tanto, es necesario cambiar y enriquecer desde el fundamento, es decir sus modelos mentales (Rodríguez y Moreira, 2002).

En este proceso (Figura 2.2), la comprensión de un fenómeno requiere que los modelos mentales se alineen con modelos físicos, conceptuales y matemáticos, tal como señalan Greca y Moreira (2002) y Kamarainen et al. (2015).

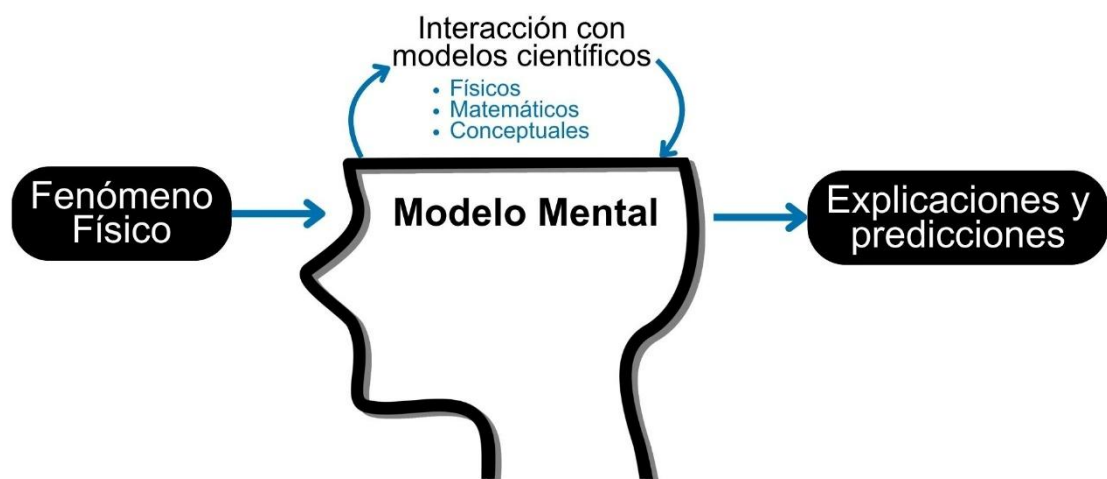


Figura 2.2 Proceso de construcción y refinamiento de un modelo mental

Nota. Elaboración propia, basado en las ideas de Haili et al (2017), Greca y Moreira (2002), Rodríguez y Moreira (2002) y Kamarainen et al. (2015).

Estos autores destacan que los modelos físicos son representaciones simplificadas y tangibles de sistemas o fenómenos, ofreciendo una forma concreta de explorar y entender esquemas complejos. En contraste, los modelos matemáticos emplean el

lenguaje matemático para describir estos sistemas a través de ecuaciones, facilitando su análisis científico. Por último, los modelos conceptuales son fundamentales para comprender y explicar los fenómenos, ya que organizan y guían el razonamiento científico.

Con respecto a este último, Williams y Clement (2014) afirman que las discusiones facilitan la evaluación y generación de modelos impulsando el pensamiento crítico. Esto se observó en su estudio sobre cómo los profesores de física utilizan estrategias cognitivas durante debates para apoyar la construcción y refinamiento de los modelos conceptuales de los estudiantes. Asimismo, Volfson et al. (2023) desarrollaron una propuesta de discusiones dialógicas sobre trucos circenses para enseñar conceptos de física. Este estudio se llevó a cabo en un circo con la participación de 400 personas expuestas a conversaciones que les permitieron confrontar sus ideas, adoptarlas o rechazarlas, y afinar sus concepciones. Las actividades dinámicas propuestas lograron despertar el interés y atención, permitiendo cambios significativos en los modelos conceptuales. Sin embargo, estos estudios sugieren que, si bien los métodos basados en el debate y la interacción mejoran este tipo de modelos, su crítica radica en que la efectividad de estos métodos depende tanto de la habilidad del docente para guiar las discusiones como de la necesidad de herramientas de evaluación que verifiquen el proceso.

Por otro lado, Redish (2016) llevó a cabo un estudio donde integró la modelización matemática en la enseñanza de la física, con el objetivo de proporcionar un significado más profundo al mundo físico mediante herramientas y representaciones matemáticas. Esta asociación permite realizar predicciones, organizar el conocimiento conceptual y explicar fenómenos físicos, enriqueciendo la comprensión de conceptos mediante representaciones simbólicas. Otro estudio también destaca la importancia de los modelos matemáticos en el desarrollo del pensamiento crítico. En particular, el software "Modellus" permite a los estudiantes seguir los fenómenos físicos mientras establecen relaciones matemáticas a través de gráficos interactivos. Jonny et al. (2020) señalan que esta estrategia no solo mejora la resolución de problemas, sino que también fomenta una comprensión significativa.

No obstante, ambos estudios advierten que los estudiantes aún enfrentan ciertas dificultades para aplicar conocimientos matemáticos abstractos en contextos físicos, lo que limita una comprensión conceptual completa y efectiva. Esto sugiere la necesidad de herramientas que permitan diagnosticar la profundidad de la comprensión y los cambios conceptuales logrados, validando así el alcance de estas estrategias.

Por último, Barrage et al. (2017) implementaron modelos físicos en cursos de mecánica con el propósito de desarrollar habilidades de observación y pensamiento crítico. Para ello, utilizaron una metodología en la que los estudiantes primero experimentaban con estructuras tangibles, lo cual les brindaba una base intuitiva antes de exponerlos a la conceptualización de los fenómenos físicos. Esto se basó en el ciclo de aprendizaje de cuatro etapas de Lewin, que comprende: (1) experiencia concreta; (2) interacción con el entorno; (3) observación y (4) reflexión. Además, esta teoría evolucionó para evidenciar que la modelización mental es una actividad natural y primaria del razonamiento humano. El estudio mostró que el uso de modelos físicos tangibles mejoró la intuición de los estudiantes al permitirles sentir las fuerzas. También abordaron conceptos erróneos, lo que les permitió alejarse de la memorización de fórmulas y adoptar un enfoque de pensamiento crítico para resolver problemas complejos.

Finalmente, como indican Kamarainen et al. (2015), los modelos físicos pueden utilizarse en las clases para ofrecer experiencias educativas relevantes que permitan a los estudiantes interactuar con los sistemas, llevándolos hacia una comprensión más profunda del tema. Por esta razón, la propuesta de este proyecto se fundamenta en el uso de simuladores que complementen las prácticas de laboratorio, brindando a los estudiantes la oportunidad de ajustar y corregir sus modelos mentales a través de modelos físicos en diferentes escenarios, aprovechando los recursos disponibles tanto en la universidad como en el entorno estudiantil.

2.3. Estrategias pedagógicas para mejorar los modelos mentales

Para mejorar los modelos mentales, es fundamental emplear estrategias pedagógicas que se adapten a las complejidades de estas representaciones internas. Estas prácticas se centran en guiar al estudiante hacia una efectiva comprensión e interacción con los sistemas. En este apartado se proponen tres métodos que permiten mejorar los esquemas mentales a través de modelos físicos, en el contexto del laboratorio de física (Figura 2.3).



Figura 2.3 Tres estrategias pedagógicas para mejorar los modelos mentales

Nota. Elaboración propia, basado en las aportaciones de Supriyatman et al. (2018), Li et al. (2022) y Yechkalo (2018).

En primer lugar, Supriyatman et al. (2018) diseñaron un programa basado en el método *laboratorio de resolución de problemas*. El mismo que formó en los estudiantes una alta capacidad de modelo mental, que se refiere a la habilidad para reconstruir, manipular y adaptar los modelos físicos de acuerdo con las condiciones del problema. Este enfoque se desarrolló en varias fases: (1) se orientó a los estudiantes sobre el problema, el propósito y las competencias a desarrollar; (2) realizaron grupos y se les proporcionó una hoja de trabajo con una guía y descripción detallada del equipo experimental; (3) exploraron conceptos relacionados con el contexto del problema, formularon predicciones teóricas y diseñaron sus propios procedimientos experimentales; (4) realizaron la experimentación diseñada previamente, aplicando sus conocimientos teóricos a escenarios prácticos; y (5) finalmente, analizaron sus datos y discutieron sus hallazgos.

Aplicando este método, los investigadores encontraron que la proporción de estudiantes con una alta eficiencia en su capacidad de modelo mental aumentó. Como consecuencia, aquellos que obtuvieron una calificación igual y superior a 7 en resolución de problemas incrementaron del 16% al 41%. A pesar de las mejoras, algunos estudiantes aún enfrentaban dificultades para conectar los conceptos necesarios para resolver problemas. A menudo, se centraban en un solo concepto, limitando su capacidad para relacionar las partes como un todo. Esto sugiere la necesidad de guiarlos constantemente hacia discusiones grupales antes de realizar los experimentos.

En segundo lugar, el método de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) involucra a los estudiantes en un proceso activo donde deben imaginar el mecanismo de funcionamiento de un concepto y la interrelación de sus partes dentro del sistema. Este enfoque les permite construir y ajustar sus modelos mentales a medida que aplican sus conocimientos a tareas prácticas, fortaleciendo su comprensión del contenido (Li et al., 2022). Esto se observa en la investigación de Borish et al. (2022) quienes implementaron un *laboratorio basado en proyectos* con estudiantes universitarios, guiándolos a través de un proceso que incluye: (1) formulación de preguntas de investigación elegidas por los alumnos; (2) diseño del dispositivo experimental que abarca la planificación, selección de materiales, construcción, pruebas y ajustes; (3) recolección de datos; (4) comparación entre variables teóricas y experimentales; (5) análisis de resultados; y (6) presentación final del proyecto.

Al combinar el ABP con los laboratorios, el estudio observó que esta metodología aumentó las habilidades de modelado de los participantes. Además, se reportó una mayor motivación, ya que ellos se identificaron con sus proyectos y asumieron responsabilidad por su pregunta de investigación. Sin embargo, también se identificaron limitaciones. Por ejemplo, el compromiso puede variar entre estudiantes, ya que algunos enfrentan desafíos técnicos o dificultades con la naturaleza abierta de los proyectos. Otro obstáculo radica en que esta estrategia demanda más tiempo y recursos que los laboratorios tradicionales, lo cual complica su implementación.

Finalmente, las simulaciones permiten la interacción con fenómenos físicos de manera visual y dinámica. De manera que, al observar cómo los resultados son influenciados por los cambios en las variables, los modelos mentales se van construyendo y ajustando. Este tipo de aprendizaje brinda un entorno propicio donde los estudiantes pueden formular hipótesis, ponerlas a prueba y recibir retroalimentación inmediata, enriqueciendo la comprensión de los conceptos físicos (Yechkalo, 2018).

Simbolon y Silalahi (2023) analizaron la influencia de complementar los laboratorios tradicionales con simulaciones interactivas, proporcionando una experiencia de aprendizaje integral que combina la comprensión conceptual con la aplicación práctica. El uso de los laboratorios virtuales permitió a los estudiantes explorar conceptos de forma independiente y fomentó tanto el desarrollo cognitivo como las habilidades de pensamiento crítico. A pesar del rol fundamental que tienen las simulaciones en la asimilación de conceptos abstractos difíciles de observar en la vida real, otros autores, como Arena et al. (2011), advierten sobre el uso exclusivo de laboratorios virtuales para la enseñanza. Estos laboratorios no reflejan plenamente la imprevisibilidad y complejidad de los experimentos reales, limitando la exposición a los desafíos y cuestionamientos científicos del entorno práctico.

Teniendo en cuenta la necesidad de superar las limitaciones del enfoque puramente virtual o tradicional, este proyecto adopta el ABS para complementar las prácticas de laboratorio. En particular, se busca aprovechar el beneficio de las experiencias virtuales con respecto al mejoramiento de los modelos mentales, al tiempo que conserva el desarrollo de habilidades prácticas y críticas que solo pueden presentarse en entornos de experimentación real. De esta manera, se pretende reforzar la relación teoría- práctica en la enseñanza de la física en la ESPOL.

2.4. Estrategias de evaluación de modelos mentales

Acceder a los modelos mentales que tienen los estudiantes implica ir más allá de calificar una respuesta correcta o incorrecta. Esta evaluación requiere de una profunda indagación en las representaciones internas que han construido para

explicar y predecir fenómenos, comprender la estructura y coherencia de sus ideas, así como los posibles vacíos o concepciones alternativas que influyen en su razonamiento.

Para este fin, se han estudiado diversas estrategias e instrumentos que permiten revelar, analizar y evaluar estas representaciones, desde enfoques cualitativos hasta métodos más estructurados que integran pruebas escritas. A continuación, se presentan cuatro propuestas que ilustran diferentes formas de explorar y valorar los modelos mentales en el contexto de la enseñanza de ciencias.

El dibujo es una herramienta que facilita el acceso y exploración de modelos mentales de los estudiantes, ya que, según Tytler et al. (2020), permite plasmar sus ideas de forma externa para analizarlas, mejorarlas o generar otras nuevas. Esta técnica, cumple un doble papel: como espejo, reflejando pensamientos que pueden ajustarse y desarrollarse, y como revelador, abriendo paso a ideas que antes no se habían considerado. Para analizar su efecto, los autores trabajaron con estudiantes de nivel escolar, donde encontraron que estos se involucraban en un proceso de proto-modelado, donde establecían una correspondencia entre su dibujo y el fenómeno, así como una coherencia interna en su explicación. Aunque el dibujo puede ser inspeccionado, evaluado y revisado, por sí mismo es solo una parte del razonamiento del estudiante, por lo que necesita del apoyo verbal o gestual para ser entendido en su totalidad.

Por otro lado, el método de entrevista con protocolo de pensamiento en voz alta es una técnica de investigación cualitativa diseñada para capturar los procesos cognitivos de un individuo en tiempo real. El estudio de Ríos et al. (2019), se utilizó para caracterizar el razonamiento basado en modelos de estudiantes avanzados de física en un contexto de laboratorio. Mientras realizaban la tarea de diagnosticar y reparar un circuito, los estudiantes debían pensar en voz alta, lo que permitió hacer visibles las subtareas del proceso de modelado físico y tener una visión más realista del razonamiento científico. Entre las recomendaciones mencionadas, los autores recalcan que el diseño del instrumento de evaluación no debe imponer un orden fijo de tareas, a fin de no alterar los flujos reales y variados del proceso de

modelado, y así poder capturar tanto las secuencias comunes como las menos frecuentes. De este modo, se asegura que la intervención del entrevistador no altere el proceso cognitivo del alumno.

Una alternativa a los cuestionarios de opción múltiple comúnmente usados son los cuestionarios de 2 o 3 niveles. Estos no solo evalúan el conocimiento, reduciendo la influencia del azar en la respuesta, sino que indagan cómo llegó el estudiante a esa conclusión mediante un segundo nivel de justificación, e incluso puede llegar a evaluar el grado de confianza que tiene el individuo acerca de su respuesta.

Fратиwi et al. (2020) aplicaron una prueba de dos niveles adaptando preguntas del Inventario de Conceptos de Fuerza para clasificar los modelos mentales de los estudiantes sobre las Leyes de Newton. Los autores señalan que el uso de este formato para mapear modelos mentales es poco frecuente, ya que habitualmente se lo emplea para identificar concepciones alternativas. A pesar de ello, destacaron que les permitió identificar estas estructuras internas de forma cuantitativa, presentándolo como una alternativa a las entrevistas o preguntas abiertas, las cuales se enfocan en resultados netamente cualitativos. Los resultados del análisis mostraron que el instrumento cumplía con los criterios de validez y fiabilidad, lo que les permitió concluir que el instrumento era idóneo para la identificación de los modelos mentales.

Por último, Rodríguez y Moreira (2002) integraron varios de estos métodos para evaluar los modelos mentales a largo plazo con el fin de verificar la estabilidad de sus representaciones. Utilizaron como instrumentos un cuestionario detallado y una entrevista semiestructurada para recopilar representaciones externas de los estudiantes, como textos, dibujos y verbalizaciones. El análisis de estos datos se basó en la Teoría de los Modelos Mentales, examinando tres niveles: la selección de conceptos, el uso que se les daba y el empleo o no de imágenes. Un aspecto positivo destacado en los resultados fue la consistencia en el tipo de modelo mental asignado en ambas mediciones que demuestra la eficacia del método para capturar estructuras cognitivas estables o "esquemas". Mientras que una de las limitaciones mencionadas fue que no se realizó un análisis ciego, el mismo que se considera

generalmente un estándar más riguroso para reducir el sesgo del investigador. Finalmente, la contrastación se realizó con una muestra de nueve estudiantes, limitando la posibilidad de generalizar los resultados a una población más amplia.

A partir de lo expuesto, se evidencia que los métodos de evaluación cualitativos son los más utilizados para indagar en los modelos mentales de los estudiantes. Sin embargo, presentan limitaciones importantes en cuanto al tamaño de la muestra y al tiempo requerido tanto para el docente-investigador como para el estudiante. Esto restringe su aplicación a grupos reducidos.

Por ello, en este estudio se opta principalmente por el uso de una prueba de dos niveles, que permite abarcar a un mayor número de estudiantes y cuantificar el impacto de la estrategia enfatizando el nivel de justificación de las respuestas. De forma complementaria, se consideran entrevistas semiestructuradas que integren técnicas de dibujo y de pensamiento en voz alta, con el fin de profundizar en la comprensión de los modelos mentales persistentes, de modo que se obtiene insumos para la mejora y ajuste de la intervención. Este planteamiento se sintetiza en la Figura 2.4.

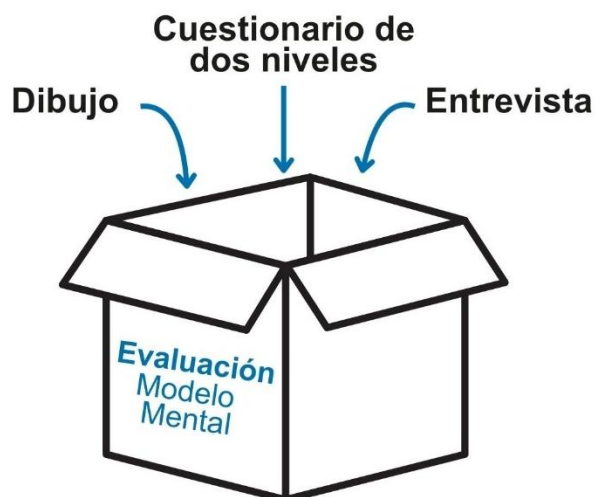


Figura 2.4 Estrategia combinada para la evaluación de modelos mentales en este estudio

Nota. Elaboración propia, basado en la estrategia de integración de instrumentos propuesta por Rodríguez y Moreira (2002).

2.5. Herramientas para el aprendizaje basado en simulación

El ABS es una estrategia pedagógica que brinda una experiencia educativa emulando prácticas reales. Investigadores como Chernikova et al. (2020) y Ghadiri et al. (2016), señalan que este tipo de aprendizaje permite superar las limitaciones presentes en situaciones reales y constituye un método eficaz para desarrollar habilidades complejas. Con el tiempo, el valor de las simulaciones ha sido reconocido gracias a que logran una comprensión conceptual profunda que solo puede basarse en hallazgos empíricos.

Para establecer una base conceptual común, se define la simulación como una herramienta educativa que modela o reproduce las características de un sistema o proceso del mundo natural. Su utilidad radica en que permite al estudiante ajustar o modificar variables, realizar repeticiones sin alteraciones, recibir retroalimentación inmediata e interactuar con fenómenos que son difíciles de observar en contextos reales.

Las simulaciones pueden diferenciarse según su propósito disciplinar. Por un lado, existen las simulaciones operativas, que se utilizan para enseñar habilidades y procedimientos; por otro lado, están las simulaciones conceptuales, que se basan en el dominio de los fundamentos de la ciencia (Ghadiri et al., 2016). En cambio, Yechkalo (2018) las clasifica según el tipo de software empleado.

En primer lugar, están los *entornos de actividad orientado a objetos*, cuyo diseño proporciona al usuario un ambiente de aprendizaje inmersivo y activo donde puede construir y experimentar dentro de un marco de simulación abierto. En este contexto, el estudiante plantea y verifica hipótesis e incluso modifica aspectos fundamentales del modelo.

El segundo tipo incluye programas de *demonstración y modelado*, utilizados principalmente para visualizar y explicar tanto conceptos como fenómenos asociados. Estos programas pueden ser no interactivos, que solo presentan información de manera dinámica, o interactivos, que permiten manipular ciertos parámetros para explorar cómo cambia el fenómeno sin afectar el diseño. Esta

clase de software es más intuitivo y permite una comprensión más rápida y clara de los conceptos.

Por otro lado, Simbolon y Silalahi (2023) destacan que el ABS mejora significativamente los resultados educativos cuando se utiliza el modelo de *indagación guiada*, el cual es adecuado para combinarlo con prácticas experimentales. Este enfoque educativo enfatiza el proceso de pensamiento y la creación de experiencias mediante la participación activa del estudiante, donde el docente actúa como facilitador al definir temas, preguntas y materiales de apoyo. Basado en este método, Yuni Ardiyanti (2023) desarrolló materiales didácticos incluyendo hojas de trabajo para los estudiantes. Las actividades propuestas requerían que los alumnos pasaran por un proceso de formulación de preguntas, hipótesis, observación, análisis de datos y emisión de conclusiones. La hoja de trabajo diseñada por el profesor a partir del método 4D obtuvo un 85.6% de respuestas favorables por parte de los estudiantes.

El modelo sistemático 4D abarca las siguientes etapas:

- Definir los objetivos de aprendizaje y los recursos necesarios. Esto incluye un análisis del contexto educativo para garantizar la relevancia y efectividad del material.
- Diseñar el contenido del material.
- Desarrollar las hojas de trabajo y realizar las revisiones necesarias para mejorar su eficacia.
- Difundir el material didáctico con los estudiantes y evaluar su impacto.

Asimismo, Dementievska y Sokolyuk (2022) enfatizan que las guías para simulación deben poseer ciertas características para mejorar la experiencia con estos entornos:

- Su diseño debe ser fácil de comprender y seguir, considerando que se desarrollan como aprendizaje autónomo donde la asistencia del profesor no es directa.
- Las actividades deben incluir elementos predictivos que se puedan verificar mediante la simulación.

- En lugar de establecer metas generales, que son comunes en los laboratorios tradicionales, deben definirse resultados de aprendizaje específicos y medibles.
- Se debe proporcionar acceso a las simulaciones necesarias mediante enlaces directos o versiones descargables que no requieran conexión a internet.

Para el contexto de este estudio, la elección de un enfoque de aprendizaje basado en simulaciones conceptuales es particularmente adecuada para estudiantes del primer nivel de educación superior. El software propuesto es del tipo *demostración y modelado*, ya que no solo permite comprender el movimiento de precesión de un giróscopo a través de la manipulación de distintos parámetros como fuerza o momento angular, sino que también evita la sobrecarga cognitiva en estos alumnos que recién inician su ciclo de aprendizaje.

De acuerdo con la Teoría de la Carga Cognitiva (Sweller, 1988), el aprendizaje se ve obstaculizado cuando la memoria de trabajo se satura. Esta distingue entre tres tipos de carga: la intrínseca, que es la dificultad inherente al material de aprendizaje; la extrínseca, derivada de la forma en que se presenta la información; y la carga pertinente, que se dedica a la construcción de esquemas mentales y la transferencia del conocimiento a la memoria a largo plazo. Para un diseño instruccional eficaz se debe minimizar la carga extrínseca, de modo que se libere recursos cognitivos que pueden ser dedicados a la carga pertinente, que es la que finalmente conduce a un aprendizaje significativo (Paas y Sweller, 2014).

En consonancia con lo antes mencionado, la guía de simulación se desarrolla siguiendo el modelo 4D. Su propósito es actuar como un andamiaje cognitivo: una herramienta preparatoria que reduce la carga extrínseca al familiarizar a los estudiantes con un fenómeno de alta carga intrínseca, como es el movimiento anti-intuitivo de un giróscopo, antes de su experiencia en el laboratorio real.

2.6. Dimensiones e indicadores de la mejora en el modelo mental del giróscopo

La mejora de un modelo mental se refiere a la evolución progresiva de las representaciones internas que un individuo construye para comprender, explicar y predecir un fenómeno (Greca y Moreira, 2002; Johnson-Laird, 1983). Un modelo mental mejorado se distingue por ser más coherente con el conocimiento científico, integrar de manera adecuada conceptos y relaciones, y permitir la resolución efectiva de problemas (Haili et al., 2017).

En este sentido, la precesión giroscópica constituye un ejemplo clásico de un fenómeno físico contraintuitivo para estudiantes de ingeniería. La dificultad no reside en la formulación matemática, sino en un conflicto con los modelos mentales que los estudiantes han construido a partir de su experiencia cotidiana. Según estas representaciones intuitivas, una fuerza aplicada provoca un movimiento en la misma dirección; sin embargo, en un giroscopio, una fuerza neta descendente (el peso) produce un movimiento lateral (la precesión), contradiciendo de forma directa esa expectativa. Esta discrepancia no solo dificulta que los estudiantes comprendan y visualicen el fenómeno, sino también que logren articular una explicación coherente de por qué ocurre.

Por lo tanto, definir qué significa *mejorar el modelo mental* en este contexto permite establecer indicadores observables que sirvan para diagnosticar y evaluar el aprendizaje. En este trabajo, dicha mejora se operacionaliza en tres dimensiones clave: momento angular, diferencial de momento angular producido por un torque neto y cómo interactúan estos para producir la precesión, cada una con indicadores medibles que facilitan la evaluación antes y después de la intervención con simulaciones.

Un modelo mental robusto del momento angular implica comprenderlo como la cantidad fundamental que describe el movimiento rotacional, definida por $\vec{L} = I\vec{\omega}$ y con una naturaleza vectorial cuya dirección, determinada por la regla de la mano derecha, es perpendicular al plano de rotación. Este concepto requiere un puente

entre la abstracción matemática y la experiencia física para ser comprendido plenamente.

Una de las dificultades más comunes es que los estudiantes identifican incorrectamente la dirección del vector de momento angular \vec{L} , ya que suelen asumir que se encuentra en el plano de movimiento (Mashood K. K., 2014). Esta confusión se debe, en gran medida, a que es una abstracción matemática cuya dirección no corresponde a un desplazamiento físico ni un flujo de materia, a diferencia de vectores como velocidad o fuerza con los que están más familiarizados. En consecuencia, los estudiantes se sienten más cómodos con la idea de que los vectores representan magnitudes que pueden ver o experimentar de manera tangible (Barniol et al., 2013).

Una vez que se ha establecido un modelo funcional del vector \vec{L} , el siguiente paso crítico es comprender cómo las interacciones externas (torques $\vec{\tau}$) afectan a este vector. El modelo científico no solo conoce la fórmula, sino que la interpreta como una relación causal donde la dirección del cambio en el momento angular $d\vec{L}$, durante un pequeño intervalo de tiempo dt , es la misma que la dirección del vector de torque neto, $\vec{\tau}_{neto}$. Este es el vínculo conceptual clave que explica por qué la precesión ocurre de la manera en que lo hace.

El estudio de Barniol et al. (2013) evidenció que los estudiantes no logran conceptualizar el torque como un agente de cambio del momento angular, sino como una "fuerza angular" que causa un movimiento directo en la misma dirección del vector torque. Esta dificultad, ejemplificada con un estudiante que aplicó incorrectamente la idea de precesión de un trompo a una viga estática, revela la dificultad para reconocer que el efecto del torque depende del estado inicial del momento angular del sistema.

Finalmente, la culminación de un modelo mental funcional es su capacidad predictiva. Un estudiante que comprende verdaderamente la precesión puede predecir no solo que ocurrirá, sino también su dirección y cómo su velocidad depende de los parámetros del sistema.

En este sentido, la relación inversa entre la velocidad de giro y la velocidad de precesión constituye una oportunidad pedagógica, ya que desafía una de las reglas intuitivas más comunes en el razonamiento de los estudiantes: a mayor causa, mayor efecto. Este resultado contraintuitivo sorprende a los aprendices y puede aprovecharse como un “evento discrepante” que genere conflicto cognitivo (Fäldt y Fredlund, 2023).

Asimismo, los estudiantes pueden presentar dificultades para aislar variables relevantes en la precesión giroscópica. En la configuración utilizada por Fäldt y Fredlund (2023), un ejemplo común fue no reconocer que añadir peso al extremo del eje aumenta el torque mientras el momento angular permanece prácticamente constante, lo que provoca una precesión más rápida. Esta confusión impide comprender correctamente la relación entre las magnitudes físicas involucradas y limita la capacidad de hacer predicciones precisas sobre el fenómeno.

A partir de estas consideraciones conceptuales y de las dificultades comunes identificadas, se propone una operacionalización de la mejora del modelo mental en tres dimensiones, como muestra la Figura 2.5. Además, en la Tabla 2.1 se contrastan modelos ingenuos frecuentes con indicadores observables de un modelo mental alineado con el conocimiento científico, que servirán como referencia para evaluar el cambio conceptual antes y después de la intervención con simulaciones.

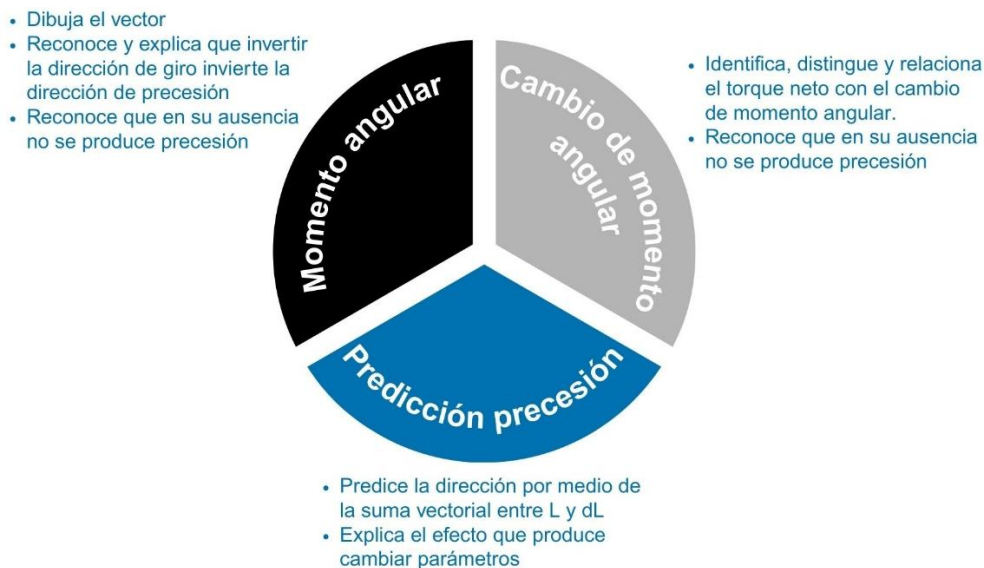


Figura 2.5 Dimensiones de mejora de un modelo mental sobre la precesión giroscópica

Tabla 2.1 Operacionalización de la mejora del modelo mental en la precesión giroscópica

Dimensión de mejora	Modelo mental ingenuo	Indicadores clave de un modelo mental mejorado
Comprensión del momento angular	<p>Cree que el momento angular está en el plano de rotación o en la dirección de la velocidad lineal.</p> <p>No relaciona la dirección de giro con el momento angular.</p>	<p>Dibuja correctamente el vector \vec{L} apuntando a lo largo del eje de rotación y perpendicular al disco.</p> <p>Reconoce y explica que invertir la dirección de giro invierte la dirección de \vec{L}.</p> <p>Reconoce que cuando $\vec{L} = 0$ no se produce precesión y el torque actúa directamente sobre el cuerpo.</p>

<p>Comprensión del cambio de momento angular</p>	<p>No relaciona el torque con el cambio del momento angular.</p> <p>No identifica las fuerzas que generan el torque neto.</p> <p>Cree que la precesión ocurre siempre que el disco gira, independientemente de si existe torque neto.</p>	<p>Identifica las fuerzas relevantes y calcula/describe el torque neto que actúa sobre el giroscopio.</p> <p>Explica que el torque cambia la dirección de \vec{L}.</p> <p>Distingue entre magnitud y dirección del torque y su efecto sobre la precesión.</p> <p>Reconoce que en ausencia de torque neto, el giróscopo no precesa.</p>
<p>Predicción de la precesión</p>	<p>Cree que la dirección de la precesión coincide con la dirección del vector de torque, sin considerar la relación entre el momento angular inicial y el cambio que este sufre.</p> <p>No relaciona los parámetros físicos (momento angular, torque, velocidad angular, momento de inercia, etc) con la velocidad de precesión.</p>	<p>Predice correctamente la dirección de la precesión usando \vec{L} y $\vec{\tau}$.</p> <p>Explica el efecto cualitativo de cambiar parámetros sobre la velocidad de precesión.</p>

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque y tipo de investigación

El presente estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo con apoyo cualitativo, ya que combina análisis estadísticos inferenciales y descriptivos con la interpretación de entrevistas y dibujos que evidencian la evolución de los modelos mentales de los estudiantes.

En cuanto a su diseño, se trata de una investigación cuasi-experimental de tipo comparativo entre grupos, en la que se buscó determinar el efecto del uso de simulaciones como prepráctica en la comprensión de la precesión giroscópica. La distribución de los participantes no fue aleatoria, sino que se respetó la asignación institucional de los paralelos de laboratorio.

Se establecieron dos condiciones de análisis:

- Grupo control: Desarrolló la práctica de laboratorio tradicional sobre giróscopo.
- Grupo experimental: realizó la misma práctica, pero con la incorporación de una prepráctica basada en simulaciones interactivas.

La variable independiente del estudio la constituyó la estrategia pedagógica implementada: uso de una prepráctica con simulador. La variable dependiente corresponde a la mejora del aprendizaje de los estudiantes, evaluada principalmente mediante la ganancia normalizada de Hake, que constituyó el indicador central de análisis en este trabajo.

Para complementar el análisis cuantitativo, esta mejora se explora como la evolución que el estudiante experimentó en tres dimensiones conceptuales:

- Comprensión del momento angular.

- Comprensión del cambio del momento angular producido por un torque neto.
- Capacidad de predicción de la precesión.

Esto se observó en la transición desde respuestas incorrectas o superficiales hacia respuestas correctas y bien justificadas. Para el análisis global, las tres dimensiones fueron consideradas con igual peso, de modo que se pudiese cuantificar la efectividad de la intervención.

También se analizaron otros indicadores derivados (coherencia de respuestas, transiciones conceptuales, concentración de Bao y análisis de distractores). Esta estructura permitió contar con una medida cuantitativa global de la efectividad de la intervención y, al mismo tiempo, con una caracterización de los procesos de cambio conceptual involucrados.

3.2. Contexto y población de estudio

La investigación se desarrolló en una universidad de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. El escenario específico fue el curso de Física Mecánica correspondiente a carreras de ingeniería, durante el primer periodo académico 2025-2026. Las sesiones de intervención se llevaron a cabo en los laboratorios de física de la institución, equipados con giroscopios didácticos y recursos tecnológicos complementarios.

La población de estudio estuvo conformada por los estudiantes matriculados en cuatro paralelos de la asignatura. La muestra final incluyó 159 participantes: 77 en el grupo control y 82 en el grupo experimental. Con el fin de reducir posibles sesgos de instrucción, la práctica fue dictada por el mismo docente en cada paralelo.

3.3. Equivalencia inicial de grupos

Para garantizar condiciones comparables, la subdivisión en control y experimental se realizó de manera planificada dentro de cada paralelo, con el fin de asegurar que los estudiantes de ambos grupos compartieran el mismo docente de teoría, el mismo horario y condiciones académicas equivalentes.

Para equilibrar el nivel académico inicial, la distribución se realizó tomando en cuenta los resultados del rendimiento del primer parcial. Una vez conformados los grupos, se aplicó la prueba de conocimientos previos, sin realizar posteriores modificaciones en la asignación. Finalmente, el análisis de los puntajes permitió corroborar la homogeneidad entre los grupos, confirmando que partieron de niveles de conocimiento similares antes de la intervención.

3.4. Descripción de la intervención

3.4.1. Desarrollo de la práctica en los grupos

Tanto el grupo control como el experimental realizaron las actividades previas habituales de la asignatura, que incluyeron el control de lectura y la revisión de la guía instruccional. Durante la sesión de laboratorio, ambos grupos iniciaron con la aplicación del pre-test de conocimientos (20 minutos). A continuación, el grupo de control pasó directamente a la práctica de laboratorio tradicional sobre giroscopio, en la cual se explicó el funcionamiento del equipo, se guió la toma de datos y se orientó a los estudiantes sobre la coherencia de sus resultados con la teoría (35 minutos). Finalmente, se aplicó el post-test (20 minutos).

Por su parte, el grupo experimental siguió la misma secuencia, pero con la incorporación de una prepráctica con simulación interactiva inmediatamente después del pre-test y antes de la práctica de laboratorio. Esta actividad tuvo una duración aproximada de 50 minutos y consistió en el uso de una guía didáctica que conducía a los estudiantes en la manipulación de un simulador en línea.

La prepráctica se realizó en parejas de estudiantes, cada una con un dispositivo electrónico (computadora, tableta o teléfono móvil). Posteriormente, el grupo experimental realizó la práctica de laboratorio y el post-test en las mismas condiciones y tiempos que el grupo de control. La Figura 3.1 muestra el flujo de las actividades desarrolladas por grupo.

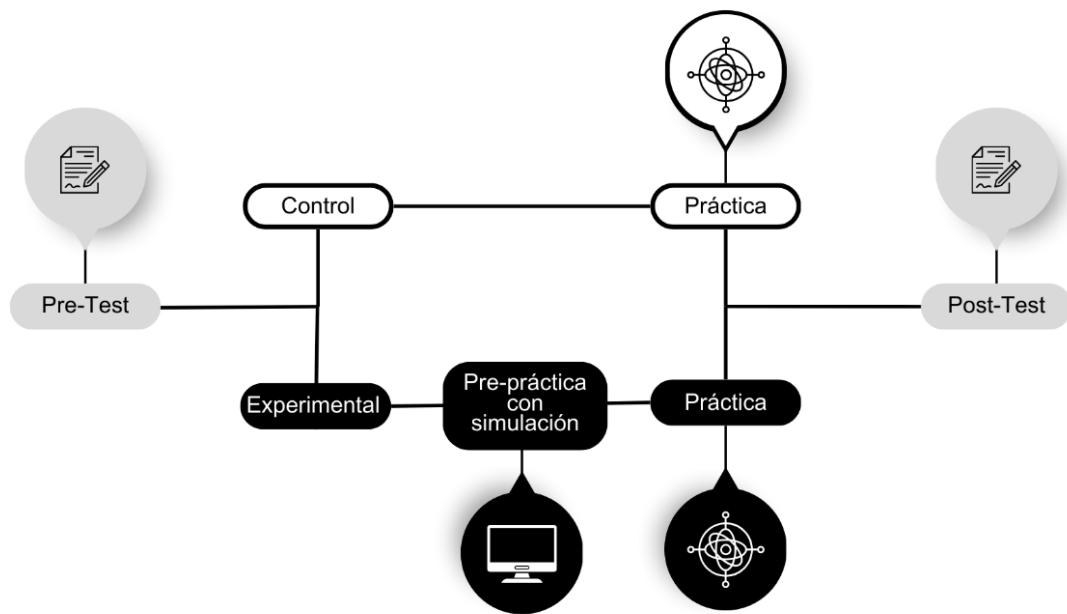


Figura 3.1 Esquema del procedimiento aplicado a los grupos

3.4.2. Diseño de la guía de simulación

La guía de simulación fue concebida como un recurso de andamiaje cognitivo para preparar a los estudiantes en la comprensión de un fenómeno contraintuitivo como la precesión giroscópica.

Para garantizar su pertinencia, la guía fue sometida a un proceso de validación preliminar que incluyó pruebas piloto con estudiantes de otros paralelos y un focus group que permitió detectar dificultades de comprensión, ajustar el orden de las actividades y afinar la redacción de la guía. Estas revisiones aseguraron que el material fuera claro, progresivo y adecuado al nivel de los estudiantes.

La versión final de la guía (Apéndice A) se organizó en tres secciones conceptuales, directamente relacionadas con las dimensiones de análisis del modelo mental:

- Momento angular del disco, orientada a identificar correctamente la dirección y magnitud del vector, su relación con la velocidad angular y de precesión.
- Diferencial de momento angular y torque neto, centrada en comprender la relación causal entre el torque y el cambio en la dirección del momento angular del disco.

- Predicción del movimiento de precesión, enfocada en integrar los vectores anteriores mediante una suma vectorial y en establecer la relación entre parámetros físicos y la rapidez de la precesión.

Cada sección combinó preguntas de predicción, refuerzo y confirmación (Figura 3.2), de manera que los estudiantes primero formularan hipótesis sobre el comportamiento del sistema, luego manipularan parámetros en el simulador (velocidad angular, peso, dirección de giro, etc.), y finalmente contrastaran sus predicciones con la simulación. Este diseño buscó promover un aprendizaje activo y reflexivo.

Nombre: _____ Paralelo: _____

GUIA DE SIMULACIÓN

¡Bienvenido/a! Esta guía de simulación te ayudará a descubrir el movimiento de precesión de un giroscopio. El objetivo es que al final seas capaz de predecir con exactitud la dirección de la precesión y entender las variables físicas que la gobiernan.

Parte 1: MOMENTO ANGULAR (\vec{L})

Para efectos prácticos de esta guía, recordemos que el vector momento angular para un cuerpo rígido se define como $\vec{L} = I\vec{\omega}$ donde I es el _____ del disco y $\vec{\omega}$ es su _____.

1. De acuerdo con la relación anterior, ¿qué variable determina la dirección de \vec{L} ?

a) La velocidad angular del disco b) El momento de inercia del disco

Simulación

- Ingresa a la simulación de giroscopio: <https://www.falstad.com/top/>
- En el panel derecho, realiza las siguientes configuraciones:
 - Example: Gyroscope
 - Spin speed: [deslizador]
 - Initial Tilt: [deslizador]
 - Gravity: [deslizador]
 - Damping of Nutation/Precession: [deslizador]
 - Stopped:
 - Show Velocity:
 - Show B-Vector:
 - Show Angular Momentum:
 - Show Trajectory:
 - Solid Floor:
- Da clic sostenido sobre la pantalla y mueve la perspectiva para que identifiques el sistema de coordenadas que se encuentra en la parte superior derecha.

Dato clave 1: Usa tu mano derecha y enrolla tus dedos siguiendo el sentido de giro del disco. Tu pulgar extendido te mostrará la dirección de la velocidad angular.

2. ¿Cuál es la dirección de la velocidad angular del disco $\vec{\omega}_d$? (Usa el sistema de coordenadas de la simulación)

a) +x c) +y e) +z
 b) -x d) -y f) -z

- Comprueba tu respuesta activando la opción: Show **B-Vector**: (muestra el vector velocidad angular de giro ($\vec{\omega}_d$) en celeste).

Figura 3.2 Fragmento de la guía de simulación con estructura de actividades

Nota. La versión completa se encuentra en los anexos.

La simulación se implementó con el recurso interactivo en línea Top View Gyroscope de Falstad (s.f.) disponible en la plataforma web Falstad, el cual permite manipular variables como el momento angular, el torque y el peso del disco en un entorno tridimensional dinámico (Figura 3.3). Este simulador sirvió como base para

las actividades de la guía, orientando a los estudiantes en la formulación de predicciones, la manipulación de parámetros y la verificación de sus conclusiones.

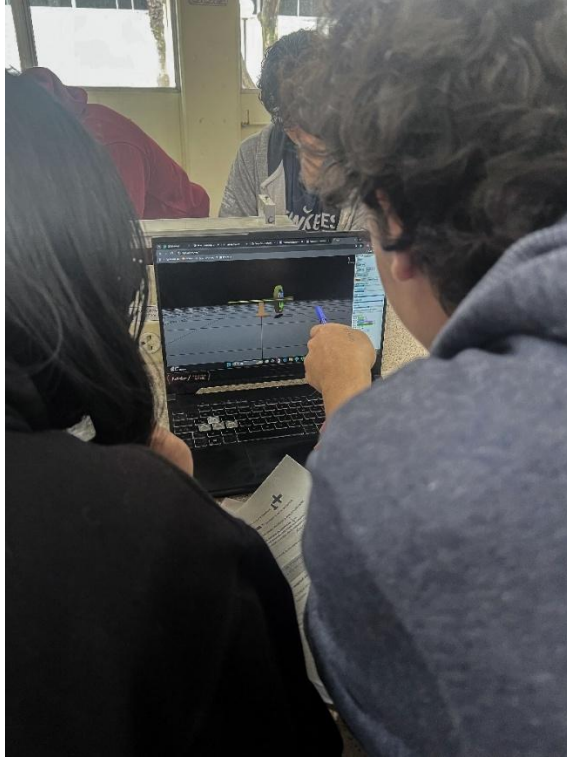


Figura 3.3 Estudiantes desarrollando la prepráctica con simulación en pareja

3.5. Instrumentos de recolección de datos

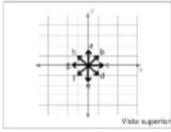
Para evaluar el efecto de la intervención, se emplearon diversos instrumentos cuantitativos y cualitativos:

- 1. Prueba diagnóstica y de salida:** Se diseñó un cuestionario de dos niveles compuesto por 6 preguntas de opción múltiple acompañadas de justificación escrita (Figura 3.4). Este instrumento permitió identificar tanto las respuestas correctas como la estructura conceptual subyacente en los estudiantes, posibilitando la caracterización de sus modelos mentales.

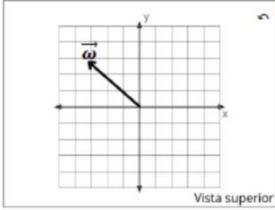
Nombre: _____ Paralelo: _____ Grupo: C / E

PRUEBA 1

PREGUNTA 1: La figura muestra la velocidad angular $\vec{\omega}$ de un giroscopo. Si se conoce que la precesión es en sentido antihorario (\curvearrowright), desde la vista superior, ¿cuál es la dirección del torque neto?



Vista superior



Vista superior

a) El vector a
b) El vector b
c) El vector c
d) El vector d
e) El vector e
f) El vector f
g) El vector g
h) El vector h

Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:

Figura 3.4 Extracto del cuestionario de dos niveles aplicado en el pre-test y post-test

El diseño se orientó a evaluar tres dimensiones conceptuales relacionadas con el modelo mental de la precesión giroscópica, tal como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Correspondencia entre dimensiones de mejora y preguntas de la prueba

Dimensión de mejora	Pregunta
Momento angular	Pregunta 2 Pregunta 3
Cambio del momento angular	Pregunta 4 Pregunta 5
Predicción de la precesión	Pregunta 1 Pregunta 6

La consistencia interna del cuestionario fue evaluada mediante el coeficiente KR-20 y se calcularon índices de dificultad y discriminación de los ítems, cuyos resultados se presentan en el capítulo 4. El instrumento completo se puede consultar en el Apéndice B.

2. Entrevistas semiestructuradas: Con el fin de explorar en mayor profundidad las representaciones internas de los estudiantes, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a una submuestra. Estas incluyeron la

elaboración de dibujos y la técnica de pensamiento en voz alta, con el propósito de triangular los hallazgos de las pruebas escritas y aportar evidencia cualitativa sobre la evolución de los modelos mentales. El protocolo detallado y la hoja de actividad utilizada durante las entrevistas se adjuntan en el Apéndice C.

- 3. Encuesta de percepción estudiantil:** Al finalizar la intervención, se aplicó a ambos grupos una encuesta que incluye ítems tipo Likert de cinco puntos.

El cuestionario (Apéndice D) midió la percepción de los estudiantes sobre:

- a. Interés generado por las actividades introductorias a la práctica.
- b. Comprensión y capacidad de predicción ganado debido a la intervención.
- c. Componente pedagógico más útil.
- d. Aspectos que demandaron mayor esfuerzo cognitivo.
- e. Valoración global de la guía de simulación.

3.6. Métodos de análisis de datos

Para evaluar la efectividad de la intervención y analizar la evolución de los modelos mentales de los estudiantes, se aplicó un conjunto de técnicas estadísticas y cualitativas. El procesamiento y análisis de datos se organizó en las fases mostradas en la Figura 3.5. El código de R utilizados para llevar a cabo los análisis estadísticos se encuentra disponibles en los Apéndices E y F.



Figura 3.5 Ruta metodológica para el análisis de resultados

3.6.1. Fiabilidad y calidad del instrumento

Se calculó el coeficiente de Kuder y Richardson (1937) (KR-20), propuesto para ítems de respuesta dicotómica para el instrumento completo y para cada uno de sus niveles:

Nivel 1: Respuesta seleccionada

Nivel 2: Justificación

Para la interpretación del coeficiente KR-20, se utilizaron los rangos comúnmente aceptados en la literatura, los cuales se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Rangos de interpretación del KR-20

Rango del coeficiente	Interpretación de la Fiabilidad
> 0.90	Excelente
0.80-0.89	Bueno
0.70-0.79	Aceptable
0.60-0.69	Cuestionable (Moderado)
0.50-0.59	Pobre
< 0.50	Inaceptable

Nota. Clasificación basada en las recomendaciones de DeVellis (2017).

Además, se calcularon los índices de dificultad y discriminación de cada pregunta para valorar su capacidad de diferenciar entre los estudiantes con mayor y menor dominio del tema.

3.6.2. Análisis descriptivo y de equivalencia inicial

Se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión para caracterizar el rendimiento previo y los resultados del pre-test en ambos grupos. Se utilizaron histogramas y diagramas de caja para la visualización de las distribuciones.

Para las pruebas de equivalencia se empleó Chi-cuadrado para comparar la distribución de variables categóricas como la proporción de estudiantes repetidores y la asignación a los paralelos. Además, Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para verificar el supuesto de normalidad en las calificaciones previas.

Para comparar las medias del rendimiento previo (normalmente distribuidas), se aplicó la prueba T de Welch para muestras independientes. Mientras que para comparar las medianas del pre-test (distribución no normal), se utilizó la prueba U de Mann y Whitney (1947).

3.6.3. Evaluación del efecto de la intervención

El impacto de la simulación sobre el aprendizaje se evaluó principalmente a través de la ganancia normalizada de Hake (1998), cuya interpretación se encuentra en la Tabla 3.3, y se realizó una comparación entre grupos mediante la prueba U de Mann–Whitney.

Tabla 3.3 Clasificación de la ganancia de aprendizaje de Hake

Clasificación	Rango de ganancia
Baja ganancia	$g < 0.3$
Mediano	$0.3 \leq g < 0.7$
Grande	$g \geq 0.7$

Nota. Clasificación basada en el estudio de Hake (1998).

El tamaño del efecto se estimó con la correlación biserial de rango (r). La interpretación de la magnitud del efecto se basó en los criterios establecidos por Cohen (1988) que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Interpretación del Tamaño del Efecto para el Coeficiente (r)

Magnitud del efecto	Valor del coeficiente (r)	Interpretación general
Pequeño	0.10	El efecto es perceptible, pero no evidente. Una relación débil.
Mediano	0.30	El efecto es aparente a simple vista para un observador. Una relación moderada.
Grande	0.50	El efecto es claramente visible y obvio. Una relación fuerte.

Nota. Basado en Cohen (1988).

Para examinar si el efecto de la intervención era consistente entre diferentes subgrupos de estudiantes, se empleó la prueba de Scheirer et al. (1976). Esta prueba no paramétrica, análoga a un ANOVA factorial, se utilizó para evaluar no solo el efecto principal del grupo, sino también la influencia de otras variables

académicas como conocimiento previo, condición de repetidor y rendimiento académico, junto con las posibles interacciones entre el grupo y dichas variables.

Adicionalmente, para cuantificar la asociación entre la intervención y el avance conceptual en cada dimensión, se ajustó un modelo de regresión logística ordinal. A partir de este modelo, se calcularon los Odds Ratios (OR). El OR estima cuántas veces es más probable que un estudiante del grupo experimental avance a una categoría de comprensión superior en comparación con un estudiante del grupo control. Un OR mayor que 1 indica un efecto positivo de la intervención (Hosmer et al., 2013).

3.6.4. Análisis de la transformación de modelos mentales

Se utilizaron métodos cuantitativos y cualitativos para analizar los cambios en la estructura conceptual de los estudiantes:

Análisis de coherencia: Para evaluar la consistencia entre el conocimiento procedimental (saber la respuesta) y el conceptual (saber por qué), se calculó un índice de coherencia individual y general. El mismo que se operacionalizó como la proporción de ítems en los que el estudiante no solo seleccionó la respuesta correcta en el primer nivel, sino que también proporcionó la justificación conceptualmente correcta en el segundo nivel. La fórmula utilizada fue:

$$\text{Índice de coherencia} = \frac{N2}{N1} \quad (3.1)$$

Donde, N2 es el número de respuestas con justificación correcta y N1 es el número total de respuestas de opción múltiple correctas.

Patrones de concentración: Los diagramas de concentración de Bao permiten observar la forma en que los errores se distribuyen y aporta información valiosa sobre la naturaleza de los modelos mentales de los estudiantes, diferenciando entre equivocaciones sistemáticas y aleatorias.

Para obtener una visión detallada de la evolución de los modelos mentales de los estudiantes, se utilizó el análisis de concentración de Bao y Redish (2006). Este método se aplicó de dos formas complementarias: un análisis a nivel individual (por estudiante) y un análisis tradicional a nivel de clase (por pregunta).

Para analizar el perfil de conocimiento de cada participante, se adaptó el modelo de Bao para generar un diagrama de dispersión donde cada punto representa a un estudiante.

Eje X - Puntaje (S): Corresponde a la calificación individual obtenida por el estudiante en el test, expresada como un porcentaje (de 0% a 100%).

Eje Y - Índice de Concentración de errores (Γ): Se calcula únicamente sobre las respuestas incorrectas de un estudiante. Un valor alto de Γ indica que los errores del estudiante se concentran consistentemente en un distractor específico, sugiriendo un modelo mental alternativo estable. Por el contrario, un valor bajo de Γ refleja que los errores se distribuyen de manera dispersa entre varios distractores, lo que es característico de la adivinación o de un conocimiento fragmentado.

La combinación de estos dos ejes permite clasificar a cada estudiante en uno de cuatro perfiles de conocimiento, como se muestra en la Tabla 3.5 y la Figura 3.6. Para delimitar estos perfiles, se establecieron dos umbrales metodológicos. Primero, se fijó un umbral de $S = 50\%$ en el puntaje para separar a los estudiantes con un bajo dominio del contenido de aquellos que demostraban al menos un conocimiento parcial. Segundo, se estableció un umbral de $\Gamma = 0.50$ en el índice de concentración para diferenciar entre un patrón de error disperso y uno concentrado. La intersección de estos umbrales define los cuatro cuadrantes del análisis.

Tabla 3.5 Matriz de Interpretación para el Diagrama de Concentración Adaptado (S vs. Γ)

S	Γ	Clasificación	Interpretación
bajo	bajo	Novato (Adivinando)	No posee un modelo mental coherente
bajo	alto	Modelo único incorrecto	Modelo mental estable pero incorrecto
alto	alto	Modelo mixto	Revela la coexistencia de un modelo correcto con una concepción errónea persistente
alto	bajo	Experto	Posee un modelo mental robusto

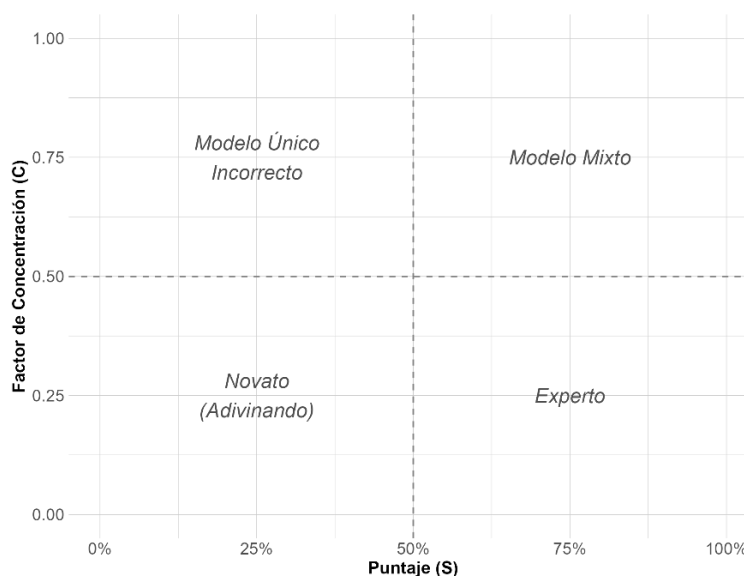


Figura 3.6 Diagrama de concentración de Bao adaptado

Particularmente, los estudiantes clasificados como expertos se caracterizan por puntajes altos acompañados de un factor de concentración bajo. Este patrón indica que, aunque cometen algunos errores, estos se distribuyen de manera aleatoria y no siguen una lógica sistemática hacia un distractor específico, lo cual es consistente con un modelo mental más robusto.

En contraste, los estudiantes con modelo mixto también alcanzan puntajes elevados, pero sus errores tienden a concentrarse en ciertos distractores, revelando

la persistencia de concepciones erróneas parciales que coexisten con ideas correctas.

En adición, para complementar el análisis individual, se aplicó el índice de concentración de Bao a nivel general. En este caso, cada punto en el diagrama representa el desempeño de toda la clase en una pregunta específica.

Eje X - Puntaje (S): Es la calificación promedio de toda la clase en una pregunta.

Eje Y - Factor de Concentración (C): Mide si las respuestas de la clase (tanto correctas como incorrectas) se concentran en una sola opción o se dispersan entre varias.

Este análisis permite diagnosticar el estado de conocimiento de la clase frente a cada concepto evaluado, identificando preguntas en las que predominó una concepción alternativa popular (C alto) o en las que hubo confusión general (C bajo). La interpretación de esta gráfica se encuentra en la Tabla 3.6

Tabla 3.6 Interpretación de los patrones de respuestas para diagrama S-C

S	C	Clasificación
alto	alto	Un modelo correcto
bajo	alto	Un modelo incorrecto dominante
bajo	medio	Dos posibles modelos incorrectos
medio	medio	Dos modelos populares (uno correcto y otro incorrecto)
bajo	bajo	Azar

Nota. Adaptado de Bao y Redish (2006). Los niveles cualitativos se definen por los siguientes rangos numéricos: para el puntaje (S), "bajo" corresponde a $S \leq 0.4$, "medio" a $0.4 < S \leq 0.7$, y "alto" a $S > 0.7$. Para la concentración (C), "baja" corresponde a $C \leq 0.2$, "medio" a $0.2 < C \leq 0.5$, y "alto" a $C > 0.5$.

Niveles de comprensión y transiciones: Para analizar la evolución conceptual de los estudiantes, cada respuesta de la prueba de dos niveles fue clasificada en uno de los tres posibles estados, definidos de la siguiente manera:

Modelo Incorrecto: El estudiante selecciona una respuesta incorrecta en el primer nivel del test (N1), independientemente de su justificación.

Modelo Superficial: El estudiante selecciona la respuesta correcta en el primer nivel (N1), pero no es capaz de proporcionar una justificación conceptualmente adecuada en el segundo nivel (N2).

Modelo Robusto: El estudiante selecciona la respuesta correcta en el primer nivel (N1) y, además, la sustenta con una justificación correcta y coherente en el segundo nivel (N2).

El análisis de transición consistió en rastrear el cambio en el modelo mental de cada estudiante desde el pre-test hasta el post-test para cada pregunta. Se definió una "Transición Exitosa" como el paso de un estado de comprensión inferior a un estado de comprensión robusto. Específicamente, se analizaron dos rutas de transición exitosa:

- La transición desde un Modelo Superficial a un Modelo Robusto.
- La transición desde un Modelo Incorrecto a un Modelo Robusto.

Para determinar si la proporción de estudiantes que lograron estas transiciones fue significativamente diferente entre el grupo control y el experimental, se utilizó la prueba de Chi-cuadrado de independencia.

Análisis de distractores: Para identificar las concepciones erróneas específicas de los estudiantes, se realizó un análisis de distractores. Este consistió en calcular la frecuencia de selección de cada opción de respuesta incorrecta en el pre-test y en el post-test. Un distractor fue considerado como representativo de un modelo mental alternativo si atraía un porcentaje de respuestas significativamente mayor al esperado por azar, permitiendo así comprender la naturaleza de los errores más comunes de los estudiantes.

Análisis cualitativo: Se realizó una codificación de las entrevistas semiestructuradas para identificar y describir la evolución individual de los modelos mentales en una submuestra de ambos grupos.

Análisis de percepción estudiantil: La encuesta de percepción se analizó mediante estadística descriptiva y la prueba de Wilcoxon para comparar las valoraciones entre grupos. También se calcularon proporciones para identificar los componentes pedagógicos percibidos como más útiles y los aspectos que demandaron mayor esfuerzo cognitivo.

3.7. Consideraciones éticas

Se buscó equilibrar los objetivos del proyecto prestando atención al bienestar y a la equidad de los estudiantes. De modo que, los procedimientos se diferenciaron para cada fase de la recolección de datos.

Para la intervención principal, en la que se realizó pre-test, simulación y post-test, a los estudiantes de los paralelos seleccionados para la intervención se les notificó que participarían en una investigación educativa. Esto se realizó a través de un mensaje escrito que detalló adjuntos logísticos de la sesión. El consentimiento para esta fase se asumió de manera implícita a través de su asistencia y colaboración.

Este mismo procedimiento se llevó a cabo para la fase cualitativa, que involucró entrevistas semiestructuradas con una submuestra de estudiantes, tanto del grupo de control como el experimental. Se contactó a cada estudiante de manera individual, se le explicó el propósito de la entrevista y el uso que se le daría a la información.

Como parte de la intervención, se ofrecieron incentivos académicos. En el grupo experimental a quienes gestionaran un dispositivo personal para el trabajo en parejas, mientras que en el grupo control en función del desempeño en el post-test. Ambas participaciones de manera libre y voluntaria. Si bien esta decisión buscó mantener la equidad, se reconoce que fue posible que influyera en la percepción del estudiante, lo cual constituye una limitación ética que se debe de considerar en futuras investigaciones.

En todas las fases de la investigación se aplicaron medidas estrictas de confidencialidad y protección de datos. Los resultados cuantitativos y cualitativos

fueron codificados para desvincular cualquier identificación personal en el tratamiento de datos. De manera adicional, la encuesta de percepción fue completamente anónima para asegurar la privacidad de las respuestas.

3.8. Limitaciones del estudio

Es importante reconocer las posibles limitaciones metodológicas presentes en esta investigación. Aunque se emplearon métodos para minimizar sesgos, existen factores inherentes al diseño que merecen ser señalados y discutidos.

Debido a que los participantes no fueron asignados aleatoriamente a los grupos, sino a través de un cuasi-experimento, existen restricciones a la validez interna. Aunque se realizó una asignación planificada y verificaciones de equivalencia inicial para asegurar comparabilidad de los grupos en las variables observadas, no puede descartarse la influencia de factores no controlados.

Por otro lado, una limitación de las investigaciones educativas es el “Efecto Hawthorne”, que se refiere a la manera en que algunos de los participantes cambian su comportamiento cuando saben que están siendo observados. Este efecto se atribuye a diversas causas, incluyendo la atención especial, la novedad de la tarea o el simple hecho de ser consciente de que se está participando en un experimento (Adair et al., 1989).

No obstante, se ha discutido acerca del impacto real de este fenómeno. De hecho, el metaanálisis de Adair et al. (1989) cuestionó su relevancia porque no se encontró evidencia empírica que respaldara un patrón asociado con el "Efecto Hawthorne". Los autores sugieren que una fuente de sesgo más probable no es el efecto en sí, sino las expectativas de los participantes sobre los resultados o su conciencia de la hipótesis del estudio.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es razonable suponer que los factores cognitivos mencionados pudieron estar presentes. Por lo tanto, se reconoce que esto constituye una posible variable de confusión que debe ser considerada al momento de interpretar la efectividad de la intervención.

Asimismo, se debe considerar el sesgo de deseabilidad social en las respuestas a la encuesta de percepción estudiantil. Es posible que el contexto del aula y la relación con el docente/investigador hayan influenciado a los estudiantes a proporcionar valoraciones más favorables sobre la intervención de las que realmente sentían, con el fin de proyectar una imagen positiva.

Por último, este estudio está restringido a una muestra particular. Su especificidad contextual, institucional, curricular y demográficas limitan la generalización de los resultados. Como tal, la efectividad de la intervención en esta población no puede generalizarse directamente a estudiantes de otras disciplinas o instituciones que presenten perfiles académicos y metodológicos distintos.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

Los resultados detallados de las pruebas estadísticas que se muestran en este capítulo se encuentran en el Apéndice G.

4.1. Fiabilidad y calidad del instrumento de medición

Para valorar las características psicométricas del instrumento de medición aplicado, se calculó el coeficiente de fiabilidad interna de Kuder-Richardson (KR-20). En su análisis, se consideró por separado los dos niveles y la prueba en todo su conjunto.

De acuerdo con la Tabla 4.1, el nivel 1 y el nivel 2 tienen un KR-20 *bajo*, mientras que el instrumento completo logra una fiabilidad de 0.66 (*moderada*). Estos índices aumentaron notablemente en el post-test. El análisis individual de los niveles muestra que alcanzaron una fiabilidad *aceptable* y, combinados, los niveles tienen un coeficiente de 0.87, considerado *bueno*. Esto implica que administrar la prueba a estudiantes con un nivel de conocimiento similar al de la muestra produciría resultados consistentes.

Tabla 4.1 Fiabilidad (KR-20) del instrumento por componente y momento de medición

Componente	Nº Ítems	KR-20 Pre	KR-20 Pos
Nivel 1: Respuestas de opción múltiple	6	0.39	0.70
Nivel 2: Justificación	6	0.41	0.78
Combinado (Respuestas + Justificación)	12	0.66	0.87

Nota. KR-20 es equivalente al α de Cronbach para ítems dicotómicos. Valores ≥ 0.70 se consideran adecuados.

Cabe señalar que la mejora en la fiabilidad en la prueba no se debe a cambios en el instrumento, ya que se aplicaron las mismas preguntas para ambas mediciones. La mejora sugiere que los estudiantes, tanto en el grupo de control como en el experimental, respondieron al test de manera más consistente y coherente que la primera vez, disminuyendo la aleatoriedad y alineándose mejor con el constructo medido.

Para detallar mejor estos resultados, en la Figura 4.1 se presenta el comportamiento de cada pregunta en relación con su índice de dificultad y de discriminación en el pre-test y post-test.

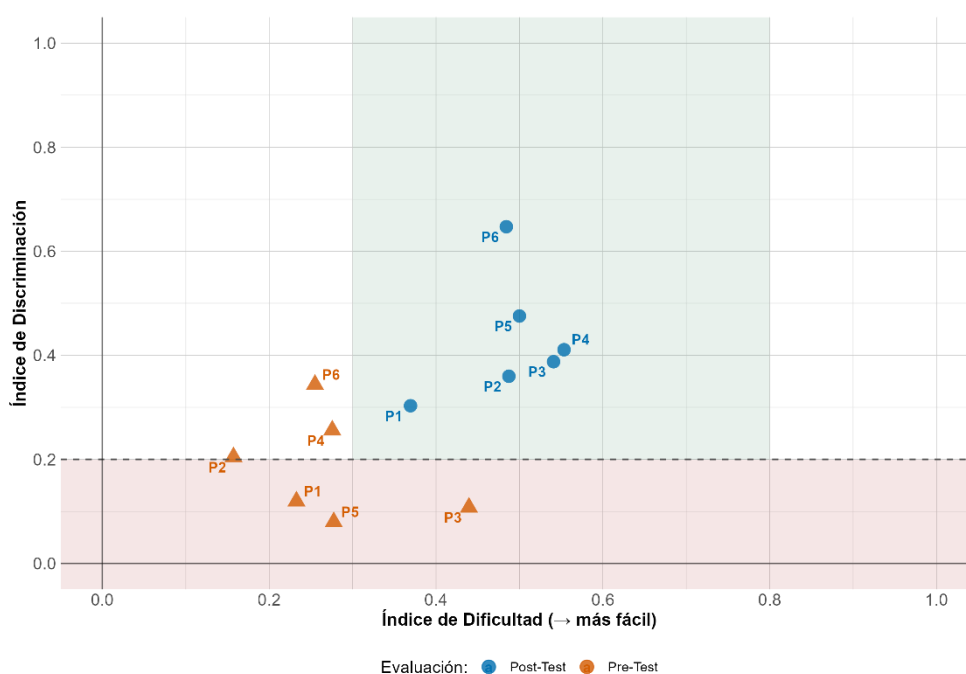


Figura 4.1 Evolución de la calidad de las preguntas (Nivel 1)

Como se puede evidenciar, en el momento previo a la intervención, las preguntas 1, 2, 4 y 5 se ubicaron en la zona de alta dificultad y baja discriminación (menor a 0.3). Esto indica que, además de resultar complejas para los estudiantes, no permitían diferenciar adecuadamente entre quienes tenían mayor o menor dominio del tema. Por otro lado, la pregunta 3 se considera la más fácil, pero con una capacidad limitada de discriminación. En contraste, la pregunta 6 sí permite discriminar bien, pero su nivel de dificultad está fuera de los rangos adecuados.

En el momento posterior a la intervención, se observa una mejora significativa. Todas las preguntas se sitúan dentro de un rango de dificultad adecuado y alcanzan valores de discriminación mayores o iguales a 0.3. Dentro de este grupo, la pregunta 6 destaca como la que tiene mayor discriminación, mientras que la pregunta 1 como la de mayor dificultad.

En síntesis, se considera que la prueba fue apta para medir los cambios conceptuales del estudiante promedio después de las intervenciones respectivas.

4.2. Análisis descriptivo de la muestra

4.2.1. Características de la muestra

Para establecer una primera comparación, la Tabla 4.2 muestra la composición de los grupos en términos de número de estudiantes, proporción de repetidores y distribución por paralelos.

Tabla 4.2: Composición de la muestra según grupo

Grupo	N	Número de repetidores	Estudiantes por paralelo			
			1	2	3	4
Control	77	14	18	19	23	17
Experimental	82	13	22	22	16	22

Ambos grupos tuvieron similar número de participantes y proporción de estudiantes repetidores (18% y 16%). La distribución por paralelos también se considera uniformemente distribuida, como lo confirmó la prueba de Chi-cuadrado de independencia ($p = 0.5007$).

Estos resultados muestran que se controlaron factores claves en cada grupo, eliminando así el sesgo por cantidad de estudiantes, horario de la clase y por profesor.

4.2.2. Rendimiento previo y equivalencia inicial de conocimientos

Otro elemento que se buscó equilibrar en los grupos fue el rendimiento del primer parcial. Para ello, se aplicó el test de Shapiro-Wilk obteniendo un valor p de 0.4355

para el grupo de control y de 0.6767 para el grupo experimental. Estos resultados comprobaron el supuesto de normalidad en las calificaciones (Figura 4.2), lo cual habilitó el uso de la prueba T de Welch para muestras independientes. El valor p obtenido ($p=0.7185$) indica que no se encontró diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos.

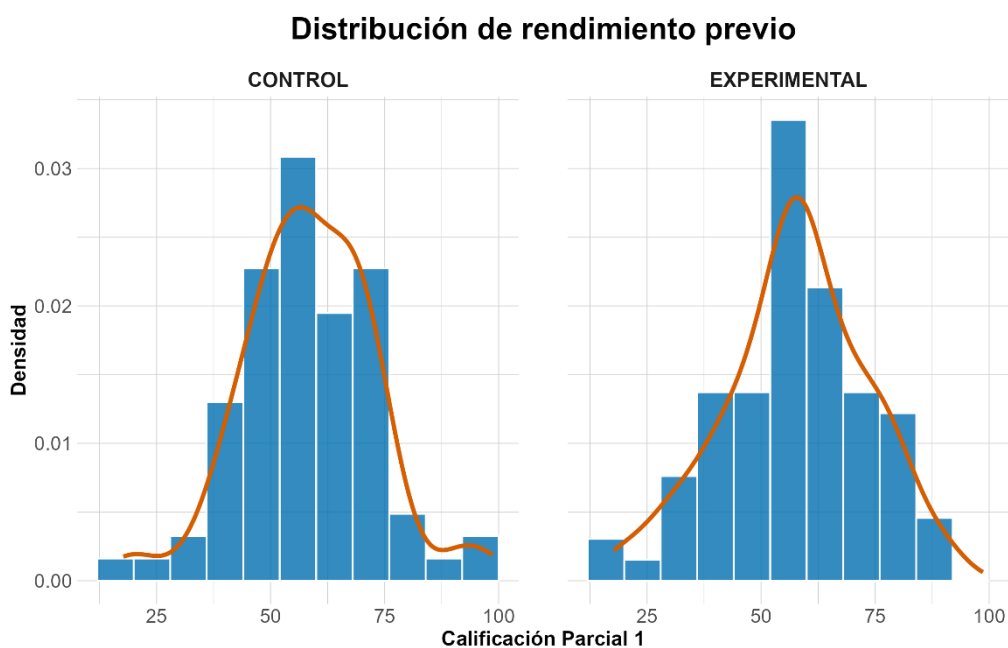


Figura 4.2: Histograma de la nota de primer parcial en grupo de control y experimental

Por otro lado, al analizar los resultados del pre-test, la distribución de ambos grupos no presenta normalidad. Por esta razón, se empleó la prueba U de Mann-Whitney, con un valor p de 0.5297, lo cual muestra que no existe evidencia significativa de diferencias entre los grupos en las respuestas del nivel 1 del instrumento. Los estadísticos descriptivos correspondientes se muestran en la Tabla 4.3, donde se aprecia una alta dispersión en ambos grupos.

Tabla 4.3: Medidas de tendencia central y dispersión en el pre-test (Nivel 1)

Grupo	Media	Mediana	Desviación Estándar
Control	26.19	16.67	22.04
Experimental	27.43	33.33	21.17

De manera similar, para el nivel 2 se aplicó la misma prueba, obteniendo un valor p de 0.7045, que confirma la equivalencia antes de la intervención. Los estadísticos descriptivos se presentan en la Tabla 4.4, donde se observa que la mayoría de los estudiantes obtuvo puntajes cercanos a cero al considerar su justificación.

Tabla 4.4: Medidas de tendencia central y dispersión en el pre-test (Nivel 2)

Grupo	Media	Mediana	Desviación Estándar
Control	11.69	0	17.54
Experimental	9.76	0	13.34

En síntesis, ambos grupos partieron desde el mismo nivel de conocimiento y rendimiento, lo que garantiza condiciones para comparar y evaluar el efecto de la prepráctica basada en simulación.

4.3. Análisis del efecto de la intervención

4.3.1. Ganancia de aprendizaje

La Tabla 4.5 muestra que, en el nivel 1, la ganancia de Hake del grupo experimental superó en 40 puntos porcentuales al grupo de control. De manera similar, en el nivel 2, la diferencia fue de 44 puntos porcentuales. Estos resultados evidencian un efecto positivo de la intervención en ambos niveles de análisis.

Tabla 4.5: Ganancia de Hake y variabilidad en los niveles 1 y 2

Grupo	Nivel 1: Respuestas		Nivel 2: Justificación	
	Ganancia de Hake	Desviación estándar	Ganancia de Hake	Desviación estándar
Control	0.038 (4%)	0.346 (35%)	0.034 (3%)	0.203 (20%)
Experimental	0.510 (51%)	0.395 (40%)	0.481 (48%)	0.324 (32%)

Para complementar estos resultados, se presentan las gráficas de cajas correspondientes. En cuanto al nivel 1 (Figura 4.3), el rango intercuartílico del grupo de control es estrecho, reflejando que la mayoría de los estudiantes no experimentaron cambios relevantes. En contraste, el grupo experimental presenta

una mayor variabilidad en la magnitud de la ganancia, lo cual coincide con lo reportado en la Tabla 4.5 y sugiere que algunos estudiantes se beneficiaron en mayor medida que otros. Asimismo, se evidencia que en el grupo de control existen más casos con ganancias negativas, mientras que en el experimental estos casos no son frecuentes.

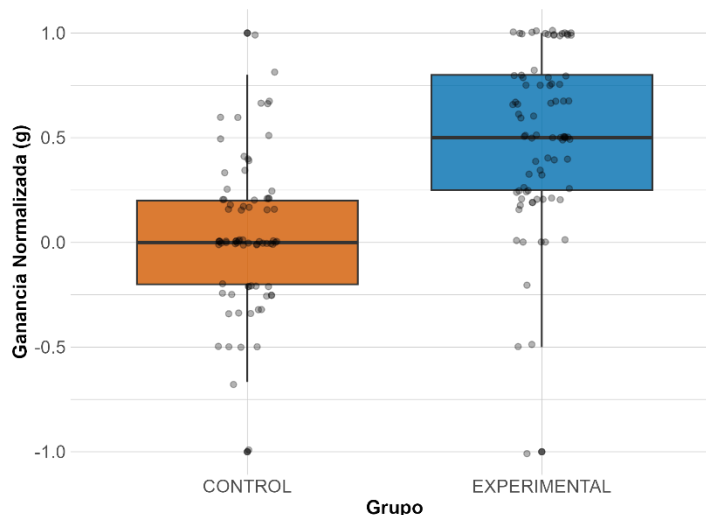


Figura 4.3: Comparativo de ganancia de Hake del nivel 1 (respuestas)

El comportamiento de la ganancia del nivel 2 (Figura 4.4) es consistente con lo esperado al aplicar un filtro de justificación. En el grupo de control, los resultados se agrupan todavía más alrededor de cero, lo que confirma la ausencia de un cambio relevante a nivel conceptual.

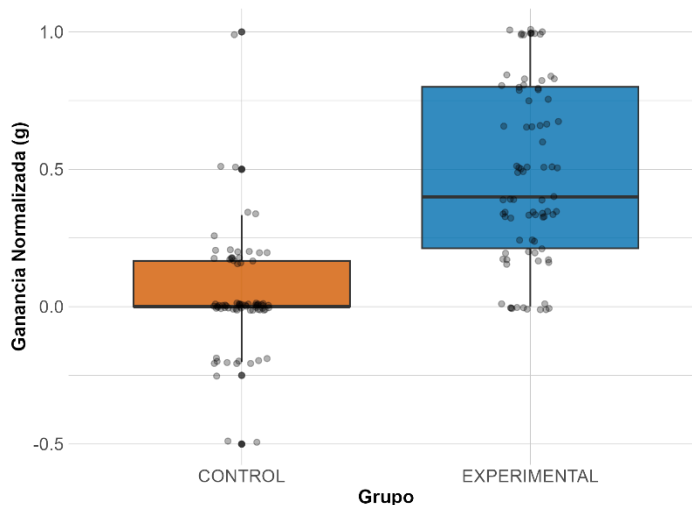


Figura 4.4: Comparativo de ganancia de Hake del nivel 2 (justificación)

Las pruebas U de Mann-Whitney aplicadas para contrastar las ganancias de Hake entre ambos grupos evidencian diferencias altamente significativas. En el nivel 1, se obtuvo un valor $p = 1.657e-13$, mientras que en el nivel 2 el valor fue aún menor, $p = 2.2e-16$. Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula de la prueba y confirman que la mayor ganancia observada en el grupo experimental no responde al azar, sino al efecto de la intervención pedagógica en ambos niveles.

4.3.2. Tamaño del efecto de la intervención

En la Tabla 4.6 se presenta la correlación biserial de rango (r), obtenida a partir de la prueba de Wilcoxon. En ambos niveles se observa un valor superior a 0.5, lo que indica que existe una separación clara entre los grupos.

Tabla 4.6: Correlación biserial de rango (r) por nivel

Componente	r
Nivel 1	0.585
Nivel 2	0.672

Estos resultados evidencian que la intervención en el grupo experimental produjo un efecto notable en el aprendizaje de los estudiantes.

4.3.3. Efecto de variables académicas sobre la ganancia de aprendizaje

Se comparó 3 modelos de interacción:

- Grupo x Conocimiento previo (pre-test)
- Grupo x Condición de repetidor
- Grupo x Rendimiento Académico (calificación del primer parcial)

Los resultados del análisis Sceirer-Ray-Hare confirmaron un efecto robusto del grupo experimental en todos los modelos ($p < 0.001$). Además, se comprobó que la intervención favoreció de manera homogénea a los estudiantes, independientemente de su nivel inicial de conocimiento, su condición de repetidor de la asignatura o su rendimiento previo en el primer parcial.

Una comparación visual de estos modelos se proporciona en la Figura 4.5. En el primero y segundo gráfico, la diferencia entre los grupos se mantiene constante, mostrando el mismo patrón de ventaja a favor del grupo experimental. Para el rendimiento del primer parcial (tercer gráfico), se observa una tendencia a una pendiente positiva para el grupo experimental, sin embargo, esta interacción no alcanzó significancia estadística.

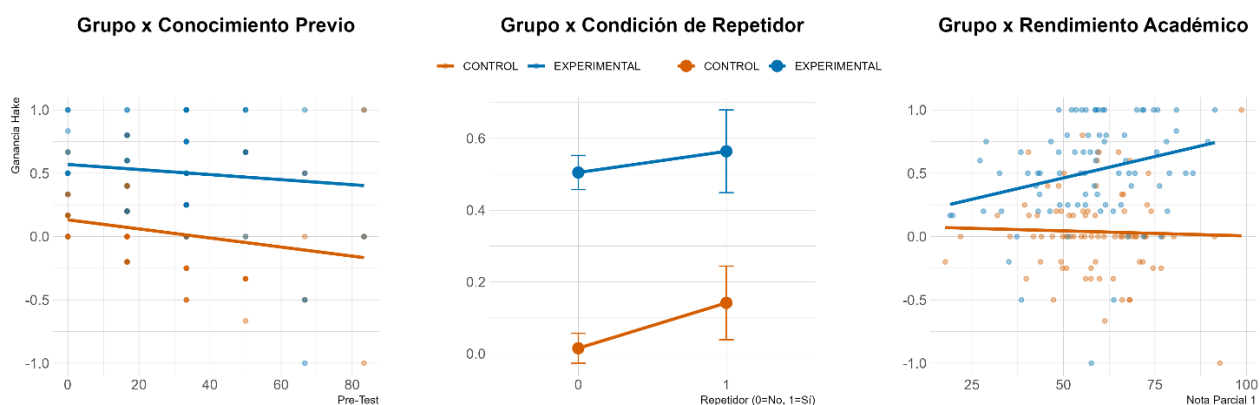


Figura 4.5: Interacciones sobre la ganancia de Hake

Finalmente, aunque los resultados no explican la alta variabilidad en la ganancia observada, sí indican que la intervención no solo benefició a estudiantes con cierto perfil académico, sino que es posible generalizarla en el contexto del estudio. Este hallazgo abre la posibilidad de considerar la guía de simulación como un recurso pedagógico homogéneo y equitativo que permite nivelar el aprendizaje sin generar nuevas brechas entre estudiantes de diversos antecedentes académicos.

4.3.4. Análisis gráfico del efecto de la intervención por dimensión conceptual

Los Odds Ratios (OR) del efecto de la intervención se presentan en Figura 4.6. Los valores estimados indican que el grupo experimental tuvo aproximadamente de 8 a 15 veces más probabilidades de lograr avances en la comprensión. Especialmente el momento angular y el cambio de momento angular presentan el mayor impacto. En todos los casos, los intervalos de confianza se sitúan por encima de 1, lo que respalda la evidencia de un efecto estadísticamente significativo de la intervención en cada área.

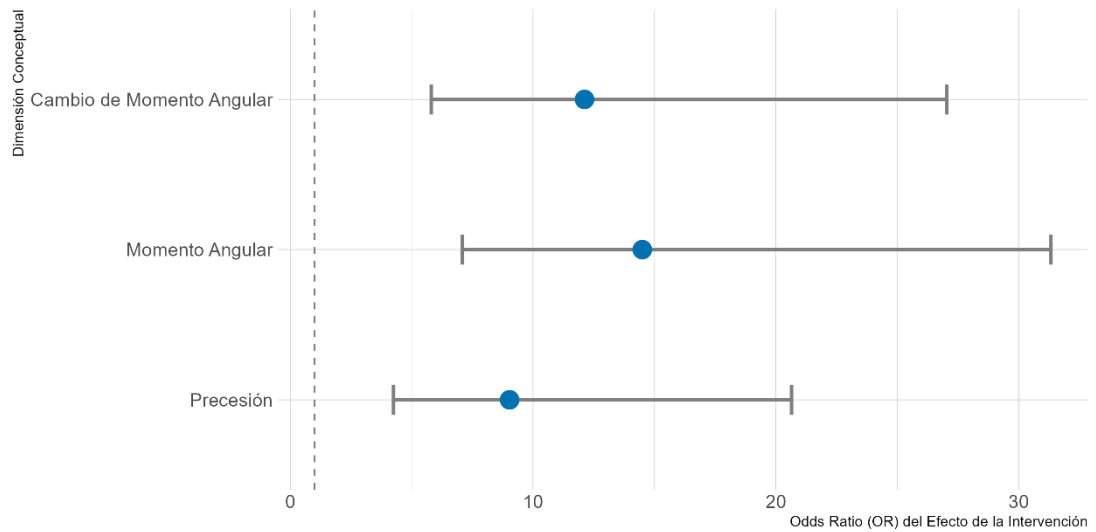


Figura 4.6: Odds Ratios del efecto de la intervención por dimensión conceptual

La Figura 4.7 complementa este análisis mostrando la probabilidad predicha de éxito en función del puntaje del pre-test, donde se debe apreciar lo siguiente:

- Aunque en “Cambio de momento angular” y “Momento angular” la mejora se mantiene constante, la diferencia entre grupos se percibe mucho mayor en estudiantes que partían con calificaciones más bajas.
- En “precesión”, la estrategia fue especialmente útil para estudiantes con puntajes bajos en el pre-test.

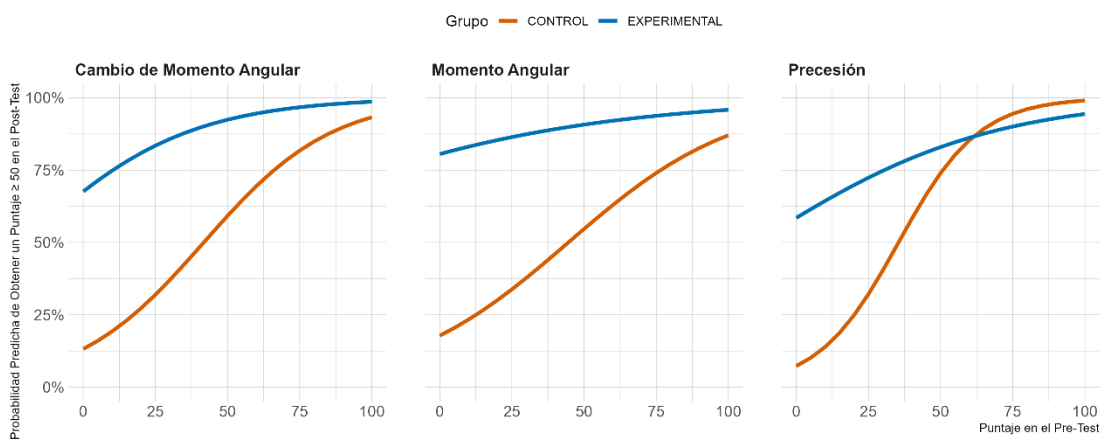


Figura 4.7: Probabilidad de éxito predicha según grupo y dimensión conceptual

Nota. Las curvas representan las probabilidades predichas por el modelo ordinal en función del puntaje inicial (puntaje ≥ 50 en el post-test).

En síntesis, este análisis revela que la intervención fue significativa para mejorar la comprensión del momento angular y cambio del momento angular, variables físicas necesarias para construir un modelo mental robusto del fenómeno de precesión. Además, la guía sirvió como herramienta para nivelar especialmente a estudiantes con baja comprensión en predicción y análisis vectorial de la precesión.

4.4. Transformación conceptual en los modelos mentales

4.4.1. Análisis de coherencia general de las respuestas

En la Tabla 4.7 y Figura 4.8 se presenta la proporción de estudiantes por grupo que alcanzaron un nivel de comprensión robusto, es decir, aquellos que no solo respondieron correctamente (N1), sino que además ofrecieron una justificación adecuada (N2).

Tabla 4.7: Proporción de justificaciones correctas (N2) dado que la respuesta (N1) fue correcta

Test	N1	N2	Proporción	IC 95%
Control				
Pre-test	121	54	44.6%	35.7 – 53.7
Post-test	142	66	46.5%	38.2 – 54.7
Experimental				
Pre-test	135	48	35.6%	27.4 – 44.1
Post-test	323	258	79.9%	75.4 – 83.9

Nota. N1 = Nivel 1 de comprensión (número de respuestas correctas); N2 = Nivel 2 de comprensión (número de respuestas con justificación correcta); IC95% = Intervalo de confianza al 95%, que indica el rango en el cual se espera que se encuentre el valor real de la proporción con un 95% de certeza estadística.

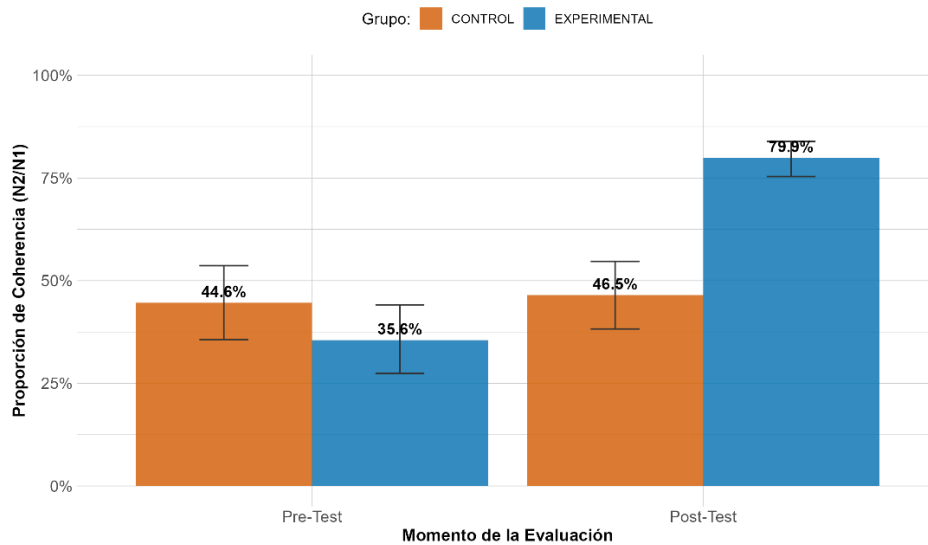


Figura 4.8: Proporción de justificaciones correctas para respuestas acertadas

En el grupo de control el 46.5% de las respuestas correctas en el post-test estuvieron acompañadas de una justificación correcta, mientras que en el grupo experimental esta proporción ascendió al 79.9%. Dado que los intervalos de confianza no se superponen, la diferencia entre ambos grupos puede considerarse estadísticamente consistente, esto se confirmó con los resultados de la prueba Chi-cuadrado ($p=1.19e-12$).

Los resultados reflejan un efecto positivo de la intervención pedagógica sobre la coherencia entre respuesta y justificación, de modo que la ganancia no solo se evidencia porque aumentó el número de respuestas correctas, sino también por la capacidad de los estudiantes del grupo experimental para sostenerlas con explicaciones conceptualmente adecuadas.

4.4.2. Análisis de índice individual de coherencia

Para complementar el análisis de coherencia general, se calculó un índice para cada estudiante, considerando la proporción de respuestas en las que contestó correctamente y, además, justificó de manera adecuada. La Tabla 4.8 resume los estadísticos descriptivos de este índice.

Tabla 4.8: Estadísticos del índice individual de coherencia

Momento	Media	Mediana	Desviación Estándar
Control			
Pre-test	0.397	0.333	0.406
Post-test	0.425	0.400	0.419
Experimental			
Pre-test	0.330	0.333	0.360
Post-test	0.767	0.917	0.299

En el grupo de control se observa un leve incremento en su media. En comparación, el grupo experimental mostró un efecto significativo, lo que indica que la mitad de los estudiantes del grupo experimental lograron justificar correctamente más del 91% de las respuestas que acertaron, mientras que el estudiante promedio el 77%.

La Prueba de Mann-Whitney reportó un valor $p = 1.97e-6$, lo que confirma la existencia de esta diferencia significativa. Además, el tamaño del efecto, estimado mediante la correlación biserial de rango ($r = 0.398$), se ubica en el rango moderado, reforzando los resultados de coherencia general.

La curva acumulada de percentiles revela la disparidad entre los dos grupos (Figura 4.9). En el grupo de control, el 50% de los estudiantes se ubicaron en un índice de coherencia no mayor a 0.4, pero en el grupo experimental el mismo porcentaje alcanzó un índice de hasta 0.917.

De manera similar, en los percentiles más bajos donde encontramos la diferencia más notable. En el grupo de control, el 40% de los estudiantes no alcanzaron ningún nivel de coherencia; mientras que en el experimental, incluso en los percentiles más bajos, supera el 0.3.

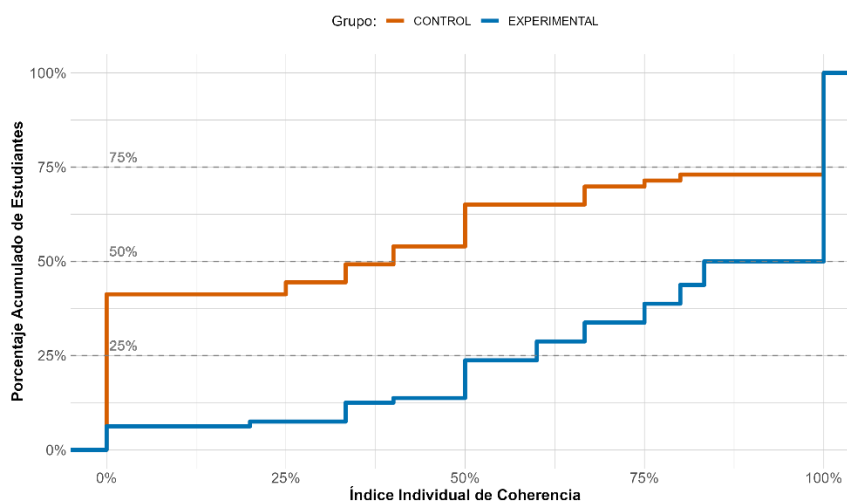


Figura 4.9 Distribución acumulada por percentiles del índice de coherencia individual

Nota: La curva muestra el porcentaje acumulado de estudiantes con un índice de coherencia igual o inferior a cada valor en el eje X.

Aproximadamente el 20% de los estudiantes del grupo experimental obtuvo índices de coherencia moderados (0.33-0.50). Esto señala que este subgrupo requiere de algún tipo de apoyo pedagógico adicional para reforzar la relación entre su respuesta y su justificación.

4.4.3. Análisis de transición y patrones de concentración

Los diagramas de concentración por estudiante muestran una clara diferenciación en los perfiles de conocimiento tras la intervención. La Figura 4.10 refleja el estado previo, donde se resalta que la mayoría de los estudiantes se agruparon en el cuadrante *novato*.

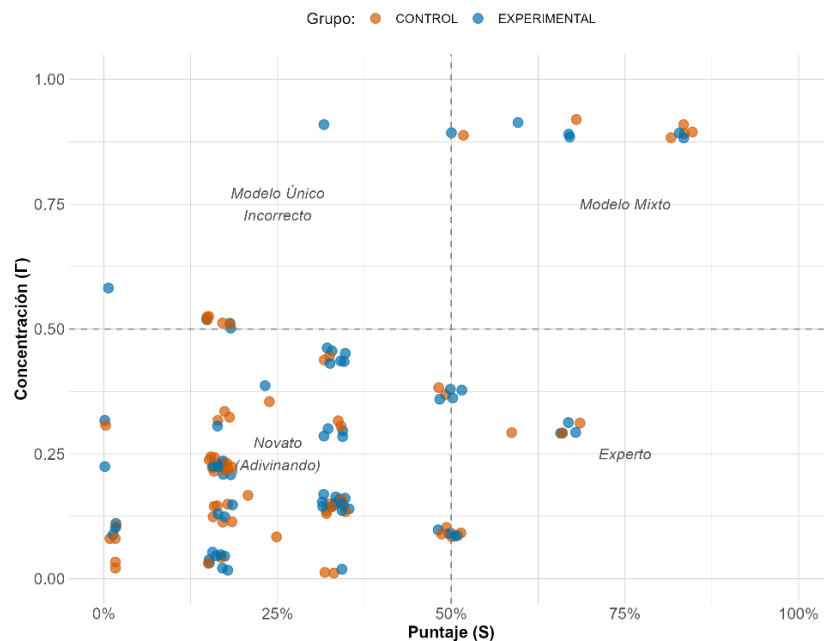


Figura 4.10: Diagrama de concentración por estudiante (Pre-Test)

Nota: El índice de concentración (Γ) se calcula únicamente sobre las respuestas incorrectas; valores altos indican que los errores se concentran en un distractor específico, mientras que valores bajos reflejan una distribución dispersa entre varios distractores.

Por consiguiente, la Figura 4.11 presenta la distribución en el post-test, donde se evidencia un contraste notable entre los grupos. Mientras que el grupo de control permanece mayoritariamente en zonas asociadas a modelos erróneos o adivinados, el grupo experimental se desplaza hacia los cuadrantes de modelo experto y modelo mixto.

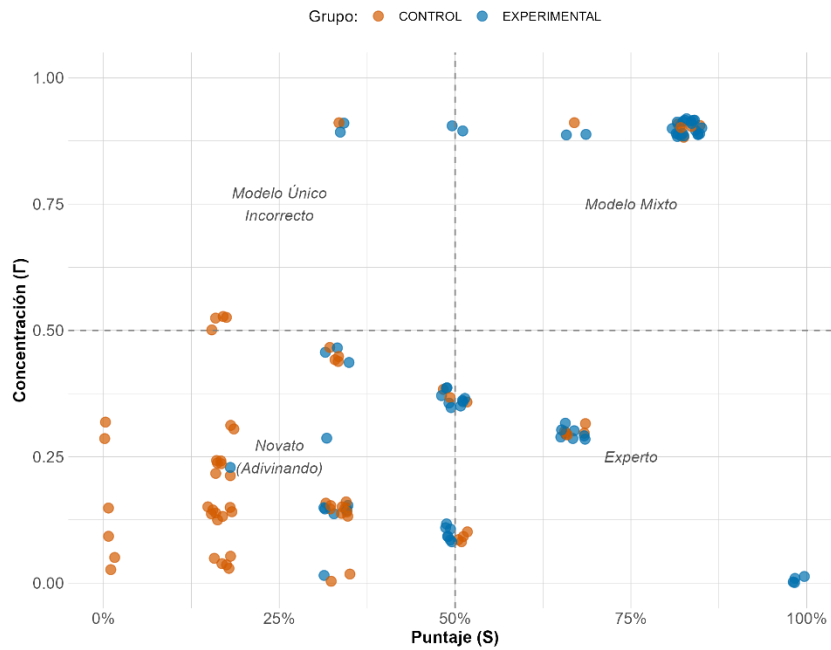


Figura 4.11: Diagrama de concentración por estudiante (Post-Test)

Nota: El índice de concentración (Γ) se calcula únicamente sobre las respuestas incorrectas; valores altos indican que los errores se concentran en un distractor específico, mientras que valores bajos reflejan una distribución dispersa entre varios distractores.

4.4.3.1. Transición de modelo superficial a robusto

La Figura 4.12 muestra la proporción de estudiantes que lograron ir desde un modelo superficial hacia un modelo robusto. En el grupo experimental, el 46% de los estudiantes alcanzaron esta transición, en comparación con solo el 9% en el grupo de control. Esta diferencia es estadísticamente significativa ($p = 1.379e-07$), lo que evidencia que la intervención pedagógica facilitó de manera clara la consolidación de modelos mentales más sólidos. Esto se puede ejemplificar en la Figura 4.13.

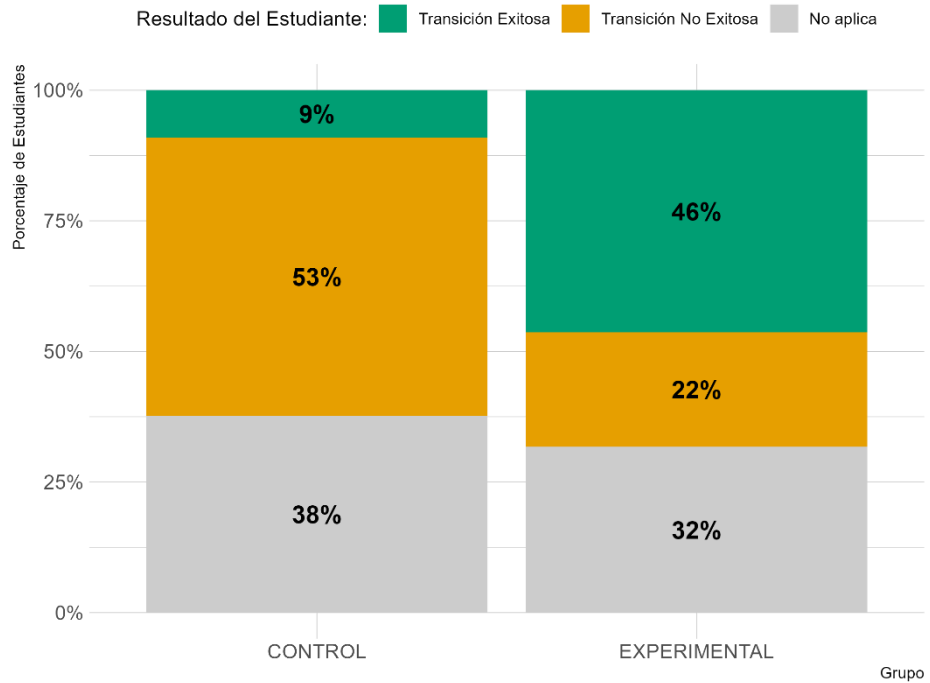


Figura 4.12: Transición desde modelo superficial a robusto

Nota: El análisis incluye únicamente a los estudiantes que presentaron al menos una pregunta con transición exitosa.

Pre-test

PREGUNTA 4: En un giróscopo se coloca una masa m tal como se muestra en la figura. Entonces se va a observar que:

- El giróscopo deja de precesar y cae por acción del peso.
- El giróscopo precesa más lentamente.
- El giróscopo precesa más rápido.
- No hay variación porque la velocidad de precesión no depende de la masa m .

Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:
Si hay más masa en la punta, pensé que precesa más rápido

Post-test

PREGUNTA 4: En un giróscopo se coloca una masa m tal como se muestra en la figura. Entonces se va a observar que:

- El giróscopo deja de precesar y cae por acción del peso.
- El giróscopo precesa más lentamente.
- El giróscopo precesa más rápido.
- No hay variación porque la velocidad de precesión no depende de la masa m .

Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:
Tenemos la fórmula $\omega = \frac{I}{I'}$, donde $T = \frac{2\pi}{\omega}$, donde D depende de su peso, entonces a más masa, menor será el torque, y como el torque es directamente proporcional a la velocidad de precesión, se puede decir que el giróscopo precesa más rápido

Figura 4.13 Ejemplo de transición superficial a robusto

4.4.3.2. Transición de modelo incorrecto a robusto

La Figura 4.14 presenta la transición desde un modelo incorrecto, cuando los estudiantes seleccionan una opción equivocada, hacia un modelo robusto, en el que lograron identificar la respuesta correcta y justificarla adecuadamente (Figura 4.15).

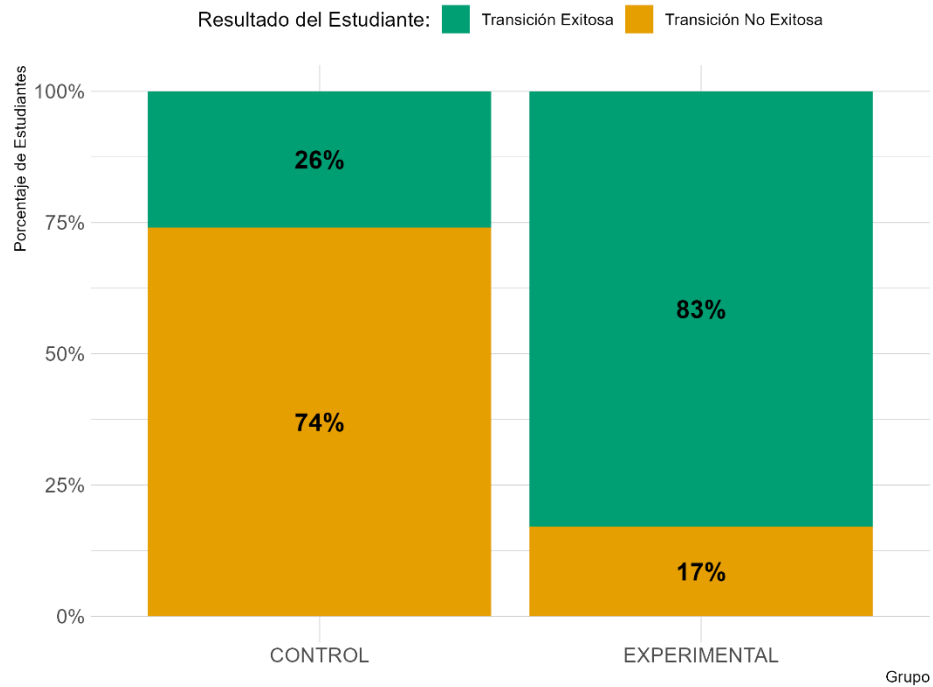


Figura 4.14: Transición desde modelo incorrecto a robusto

Nota: El análisis incluye únicamente a los estudiantes que presentaron al menos una pregunta con transición exitosa.

En este caso, el 83% de los estudiantes del grupo experimental lograron al menos una transición exitosa, frente al 26% en el grupo de control. La diferencia es altamente significativa ($p = 1.669e-12$), lo cual muestra que la intervención no solo ayudó a afianzar respuestas correctas, sino que permitió superar concepciones erróneas previas y reemplazarlas por explicaciones fundamentadas.

Pre-test

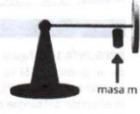
PREGUNTA 4: En un giróscopo se coloca una masa m tal como se muestra en la figura. Entonces se va a observar que:

- a) El giróscopo deja de precesar y cae por acción del peso.
- b) El giróscopo precesa más lentamente.
- c) El giróscopo precesa más rápido.
- d) No hay variación porque la velocidad de precesión no depende de la masa m .

Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:

Ω = Es independiente de la masa si duplicáramos su masa la Ω no se vería afectada



Post-test

PREGUNTA 4: En un giróscopo se coloca una masa m tal como se muestra en la figura. Entonces se va a observar que:

- a) El giróscopo deja de precesar y cae por acción del peso.
- b) El giróscopo precesa más lentamente.
- c) El giróscopo precesa más rápido.
- d) No hay variación porque la velocidad de precesión no depende de la masa m .

Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:

$\Omega = \frac{\tau}{I \omega} = \frac{R \times F}{I \omega}$ \rightarrow Peso = mg

Aumentar la masa, aumenta la fuerza del peso por lo que el torque aumenta, y el torque es directamente proporcional con Ω




Figura 4.15 Ejemplo de transición incorrecto a robusto

4.4.4. Análisis de transición por pregunta

La Figura 4.16 muestra la distribución de los niveles de comprensión (incorrecto, superficial y robusto) en los grupos de control y experimental, diferenciando entre el pre-test y el post-test por pregunta.

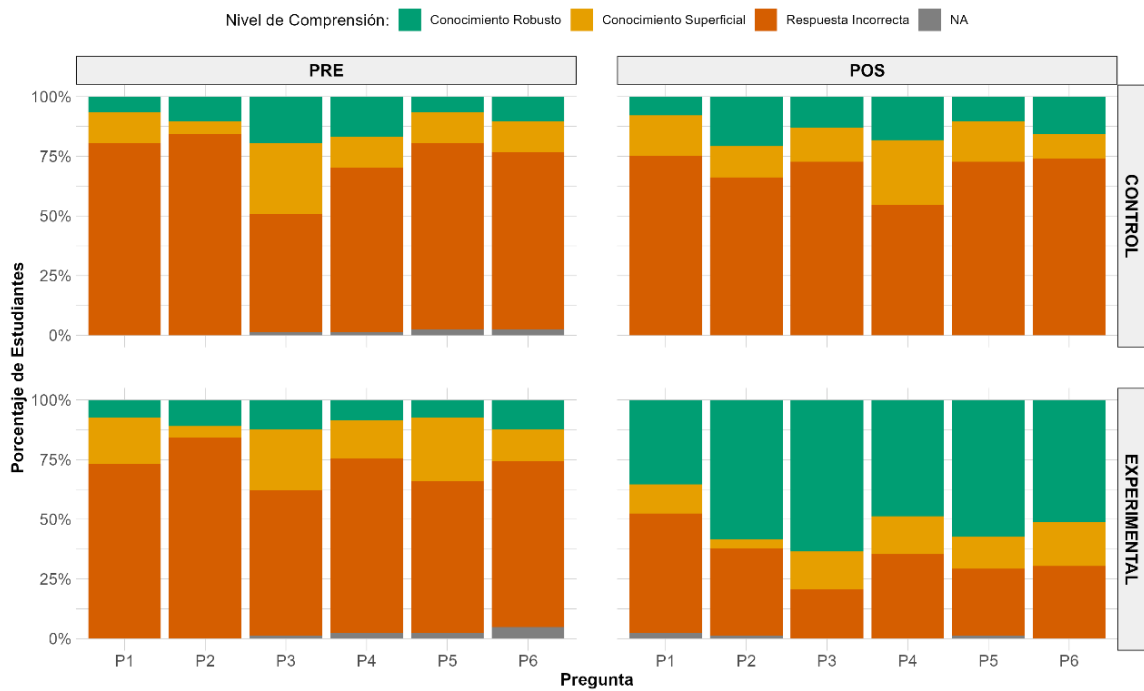


Figura 4.16: Distribución del nivel de comprensión

En el pre-test, ambos grupos presentaron una alta proporción de respuestas incorrectas, con pocos casos de modelos superficiales y robustos. Sin embargo, en el post-test se logra apreciar diferencias notables entre los grupos.

En el grupo de control, aunque hubo un ligero aumento en el nivel de comprensión robusto y una reducción parcial de respuestas incorrectas, la mayoría de los estudiantes se mantuvo en niveles superficiales o incorrectos. En contraste, el grupo experimental mostró un cambio sustancial, se redujo drásticamente la proporción de respuestas incorrectas, y se incrementó significativamente la presencia de conocimiento robusto, especialmente en las preguntas 1, 2 y 6.

La Tabla 4.9 presenta los resultados de la prueba de Chi-cuadrado aplicada a cada ítem. En todos los casos se obtuvieron valores de p inferiores a 0.001, lo cual evidencia que la distribución de respuestas entre los tres niveles de comprensión (Incorrecto, Superficial y Robusto) difirió significativamente tras la intervención. Esto indica que los cambios no se debieron al azar, sino a un efecto sistemático asociado a la experiencia formativa.

Tabla 4.9: Análisis de Chi-cuadrado por pregunta sobre el nivel de conocimiento robusto entre los grupos

Pregunta	Chi-cuadrado	df	Valor p
1	18.374	2	0.0001024
2	25.129	2	3.495e-6
3	49.345	2	1.927e-11
4	16.64	2	0.0002436
5	41.531	2	9.585e-10
6	31.158	2	1.714e-7

4.5. Análisis de modelos mentales

4.5.1. Índice de concentración por pregunta

En la Figura 4.17 se evidencia que en el grupo de control existe un ligero desplazamiento positivo en algunas preguntas. Sin embargo, la mayoría se mantiene dentro de la zona baja de puntaje (< 40%). Los valores de concentración se ubican mayormente por debajo de 0.25, lo cual indica un patrón de respuestas cercano al azar. Esto sugiere que los estudiantes de este grupo no consolidaron ningún modelo mental (correcto o alternativo), permaneciendo en un nivel inicial de ensayo-error.

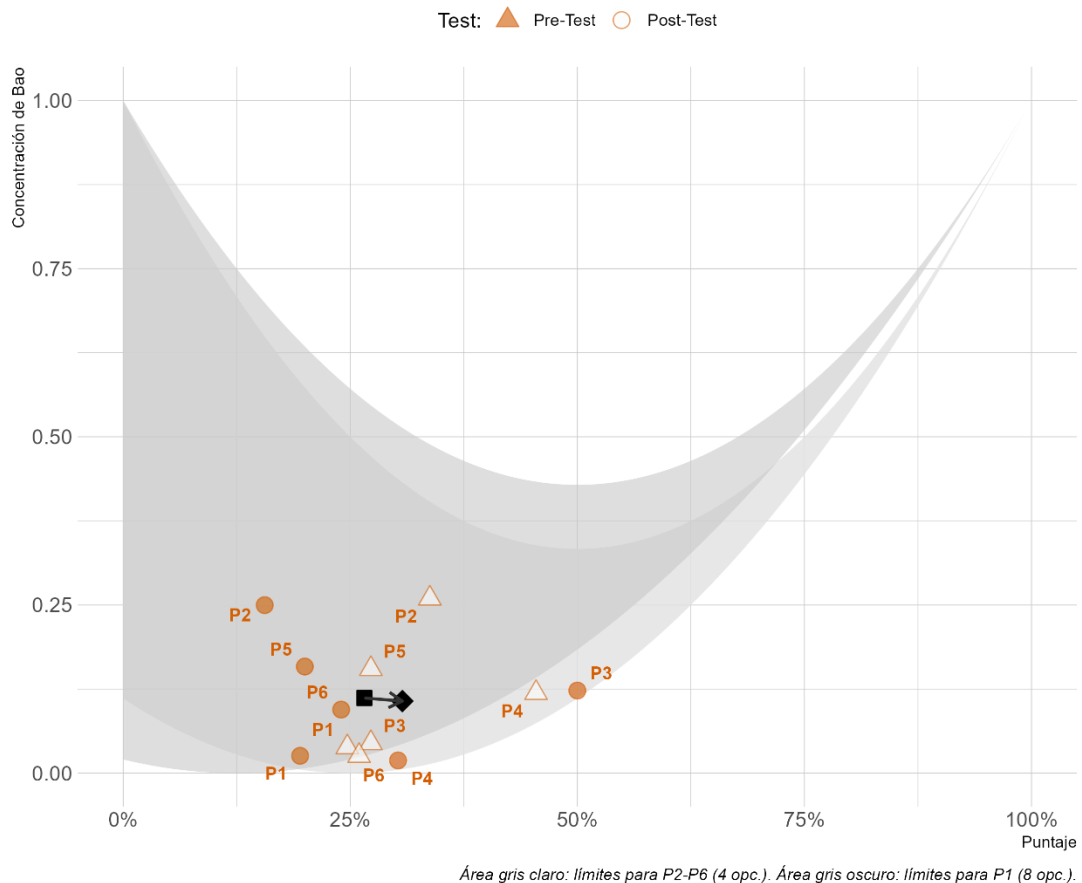


Figura 4.17: Concentración de Bao para el grupo de control

Nota. Cada punto representa el estado de la clase para una pregunta específica. El Puntaje (S) es la proporción de respuestas correctas, mientras que la Concentración de Bao (C) mide si los errores se distribuyen al azar (C bajo) o se concentran en un modelo mental incorrecto (C alto). La flecha representa la trayectoria del estado promedio de todas las preguntas desde el Pre-Test (■) hasta el Post-Test (◆).

En contraste, el grupo experimental evidencia en la Figura 4.18 un patrón claramente distinto al del grupo de control. Se observa un desplazamiento general hacia la derecha (mayor puntaje correcto), acompañado de un aumento progresivo

del índice de concentración en varias preguntas. Esto indica no solo una ganancia en el número de aciertos, sino también una mayor coherencia en los modelos mentales construidos.

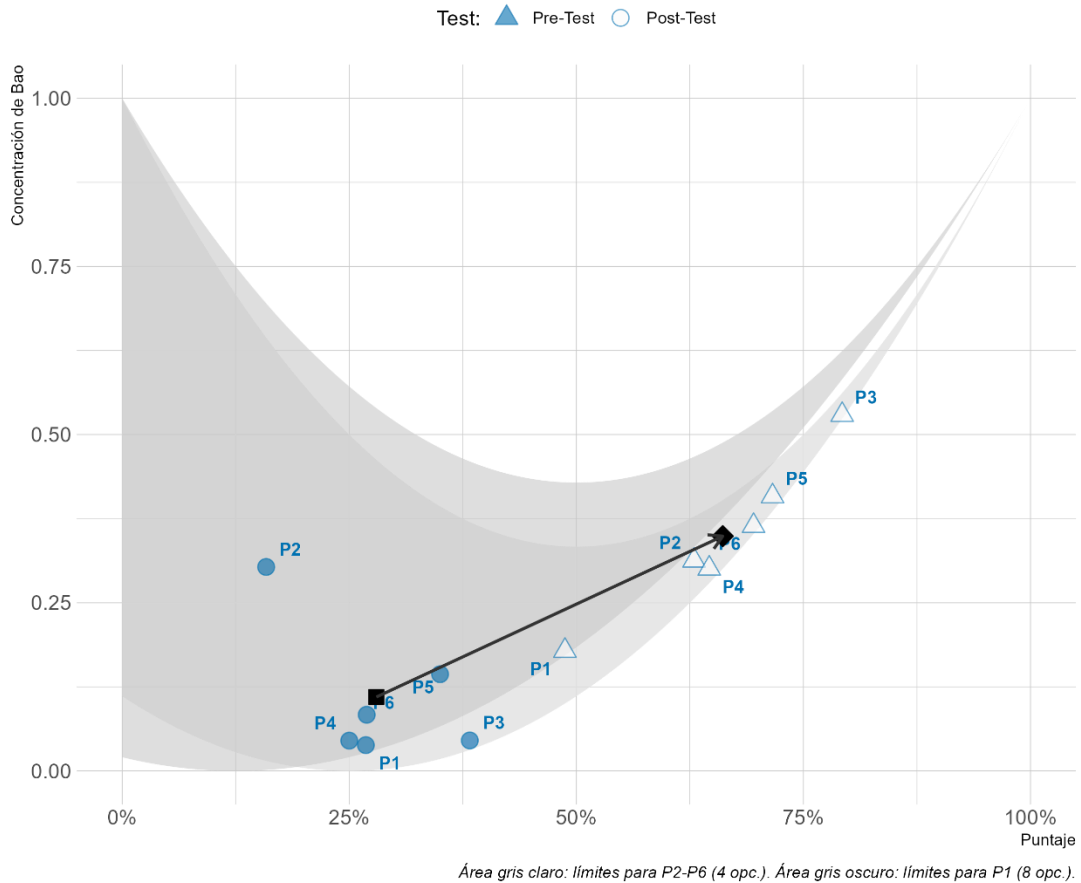


Figura 4.18: Concentración de Bao para el grupo experimental

Nota: Cada punto representa el estado de la clase para una pregunta específica. El Puntaje (S) es la proporción de respuestas correctas, mientras que la Concentración de Bao (C) mide si los errores se distribuyen al azar (C bajo) o se concentran en un modelo mental incorrecto (C alto). La flecha representa la trayectoria del estado promedio de todas las preguntas desde el Pre-Test (■) hasta el Post-Test (◆).

La pregunta 1 refleja que los estudiantes incrementan el porcentaje de aciertos, pero el índice de concentración se mantiene bajo, lo que sugiere que quienes aún fallan lo hacen de manera dispersa, sin un distractor dominante. Esto es típico de una fase en la que el concepto empieza a comprenderse, pero persisten dudas parciales.

En las preguntas 2 y 4, el patrón revela que los estudiantes se dividen entre dos interpretaciones: probablemente un modelo correcto y otro alternativo. Esta

coexistencia es característica de un momento de cambio conceptual, donde el nuevo conocimiento compite con ideas preconcebidas.

Por otro lado, en las preguntas 3, 5 y 6 se observa un claro incremento tanto en puntaje como en índice de concentración, lo cual indica que el grupo converge hacia un modelo mental dominante y más consistente. En particular, la Pregunta 3 alcanza los valores más altos, evidenciando que la mayoría de los estudiantes no solo responden correctamente, sino que además coinciden en un mismo razonamiento.

Finalmente, la trayectoria del promedio del grupo muestra un avance simultáneo en ambas dimensiones (S y C). Este movimiento hacia la zona superior derecha del diagrama es un indicador de que los estudiantes del grupo experimental lograron modificar sus modelos mentales hacia representaciones más consistentes y robustas, confirmando la efectividad de la intervención con simulaciones.

4.5.2. Análisis de distractores

Con el fin de complementar la visión global obtenida, a continuación, se presentan los modelos mentales incorrectos evidenciados en las respuestas de los estudiantes.

En la Figura 4.19 se presentan los porcentajes de respuestas de los estudiantes en el pre-test y post-test para la pregunta 1. En el diagnóstico inicial se observa una alta dispersión de respuestas entre los distractores, lo que refleja la ausencia de consenso en torno a la respuesta correcta. La opción correcta (f) fue seleccionada únicamente por el 27% de los estudiantes en el pre-test.

Tras la intervención, se evidencia un desplazamiento significativo hacia la alternativa correcta, que alcanza el 49% de las respuestas en el post-test. Sin embargo, se mantienen porcentajes considerables en varios distractores, algunos de los cuales prácticamente no disminuyeron respecto al diagnóstico inicial, lo que respalda lo mostrado en la Figura 4.16.

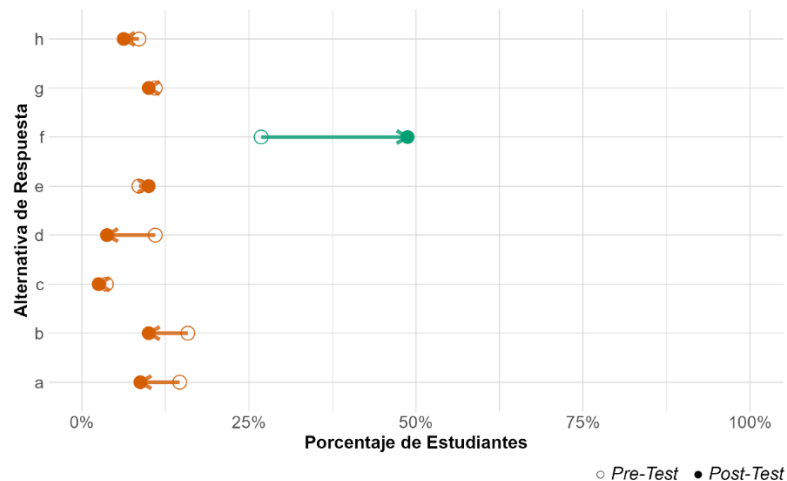


Figura 4.19: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 1 del grupo experimental

Para la pregunta 2 (Figura 4.20) se observa un cambio sustancial hacia la opción b (correcta), que pasó de ser seleccionada por un 16% de los estudiantes en el diagnóstico inicial a superar el 60% en la evaluación posterior. Este desplazamiento refleja que la mayoría de los estudiantes logró reconstruir su modelo mental hacia una explicación más coherente con el conocimiento científico.

Al mismo tiempo, se aprecia una disminución notable en la selección de la opción a, que representaba el modelo mental alternativo más fuerte en el pre-test, con un 28% de preferencia. En el post-test, su frecuencia se reduce significativamente, indicando que los estudiantes abandonaron progresivamente este modelo incorrecto.

En conjunto, el patrón revela que los estudiantes no solo mejoraron en términos de acierto, sino que además se reorganizó la estructura de sus errores, pasando de un modelo predominante alternativo a una dispersión menor, lo cual es consistente con un proceso de transición conceptual propio de la zona de “dos modelos” descrita en el diagrama de Bao.

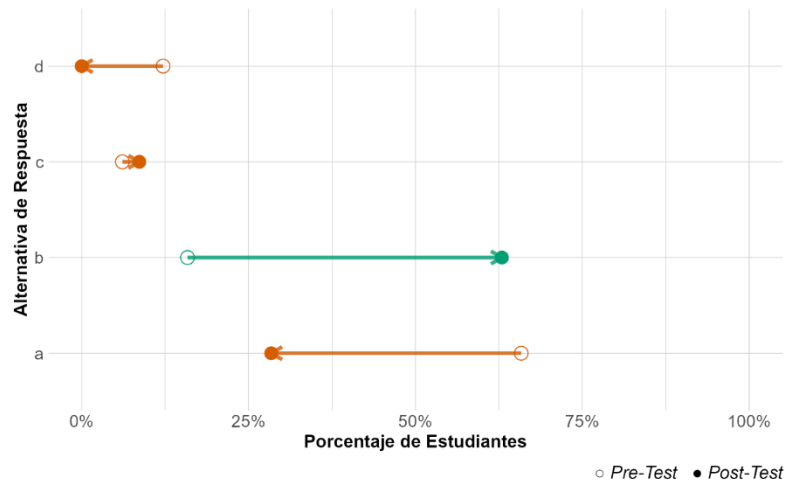


Figura 4.20: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 2 del grupo experimental

En la Figura 4.21 se aprecia un claro incremento en la alternativa b (correcta), que pasó de un 38% al 79% de las elecciones en la evaluación final. Este resultado evidencia que la mayoría de los estudiantes logró ajustar su razonamiento hacia la respuesta adecuada después de la intervención, predominando un modelo mental correcto.

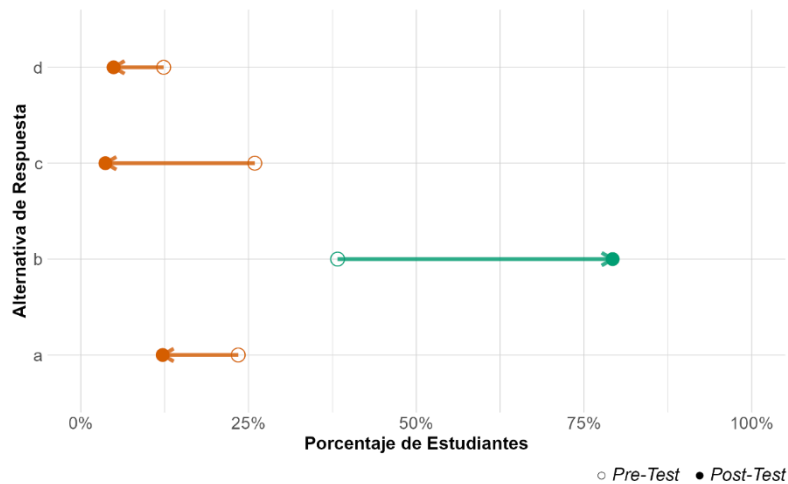


Figura 4.21: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 3 del grupo experimental

De manera similar a la pregunta 2, la Figura 4.22 muestra un aumento significativo en la selección de la respuesta correcta (c). La opción b, que inicialmente alcanzaba el 40%, descendió a 22%, consolidándose como uno de los modelos alternativos más persistentes después de la intervención, aunque en menor proporción que al inicio.

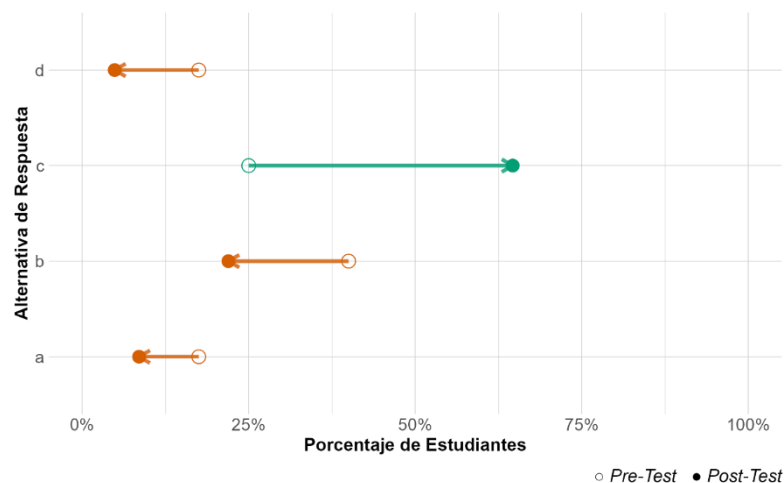


Figura 4.22: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 4 del grupo experimental

En la Figura 4.23 y la Figura 4.24 se muestra las preguntas 5 y 6 respectivamente. Tras la intervención, más del 70% de los estudiantes seleccionó la respuesta correcta. Esto confirma que en los ítems de mayor nivel de concentración y puntuación el grupo logró consolidar un modelo mental más consistente. No obstante, en la pregunta 5 un 20% mantiene la opción a como distractor atractivo, mientras que en la pregunta 6 las respuestas incorrectas se distribuyen entre a y b en menor proporción.

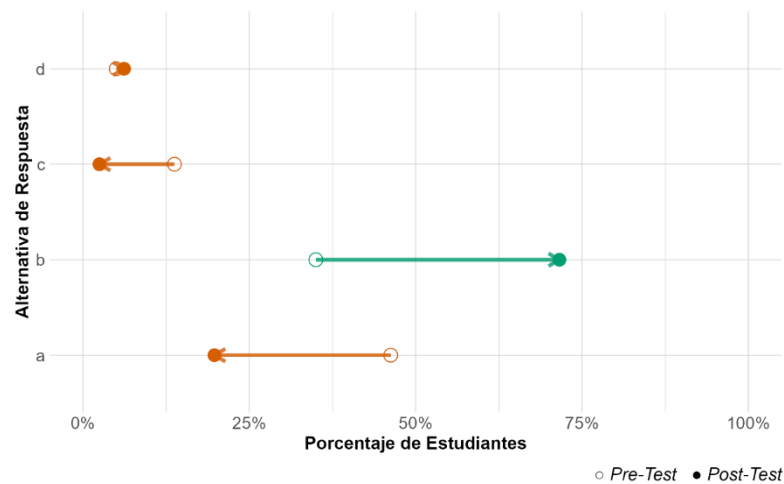


Figura 4.23: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 5 del grupo experimental

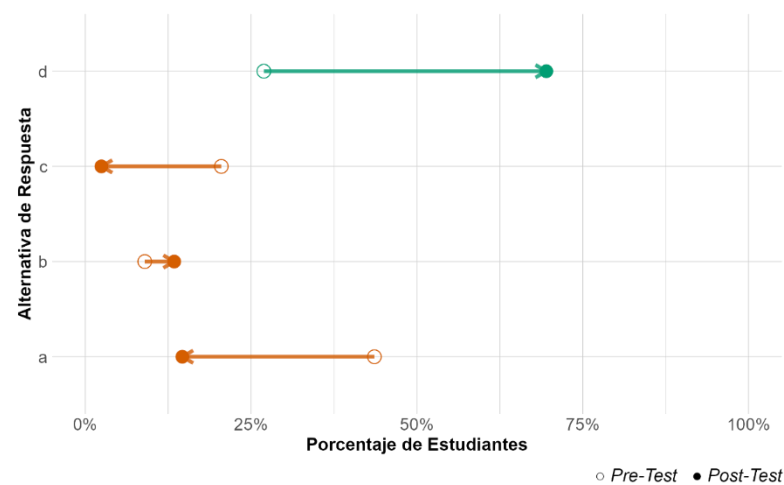


Figura 4.24: Evolución de respuestas entre pre y post test para la pregunta 6 del grupo experimental

En síntesis, se presenta en la Tabla 4.10 un resumen de los modelos mentales identificados en el post-test para cada pregunta, acompañado del porcentaje de estudiantes del grupo experimental que seleccionó la respuesta correcta. Además, se incluyen los distractores más frecuentes, lo que permite visualizar de manera global los modelos alternativos que aún persisten tras la intervención. Esto ofrece una perspectiva integral del estado final de los modelos mentales alcanzados por los estudiantes.

Tabla 4.10: Resumen de modelos mentales identificados por pregunta

Pregunta	Modelo correcto	% selección	Modelos alternativos	% selección
1	El torque neto apunta en dirección del movimiento de precesión. Perpendicular al momento angular del disco.	49%	Disperso	-
2	Cuando la rapidez angular del disco disminuye, la rapidez de precesión aumenta.	63%	Cuando la rapidez angular del disco disminuye, la rapidez de precesión disminuye.	28%
3	Cuando el disco tiene momento angular de 0, el sistema se mueve en el sentido producido por el torque neto.	79%	En ausencia de momento angular, el sistema se mantiene en equilibrio horizontal.	12%
4	Al aumentar el torque, la rapidez de precesión aumenta.	65%	Al aumentar el torque, la rapidez de precesión disminuye.	22%
5	El desplazamiento angular aumenta porque el vector $d\vec{L}$ aumenta.	72%	El desplazamiento angular aumenta porque el vector \vec{L} aumenta.	20%
6	Para que la rapidez de precesión disminuya se debe aumentar el momento angular y disminuir el torque.	70%	Disperso	-

4.5.3. Evolución individual de los modelos mentales a partir de entrevistas semiestructuradas

En las entrevistas semiestructuradas, se observó que tres estudiantes del grupo de control (n=5), permanecieron en el mismo nivel conceptual (superficial o mixto), mientras que dos avanzaron de un modelo superficial a mixto. Ninguno de los participantes alcanzó un modelo robusto, lo que indica que, aunque existieron pequeños ajustes en la forma de expresar sus ideas, no se consolidaron comprensiones profundas ni explicaciones científicas consistentes. En la Tabla 4.11 se aprecia que las explicaciones se mantuvieron mayoritariamente intuitivas o fragmentadas.

Tabla 4.11: Cambios en el modelo mental de los estudiantes del grupo de control

N	Modelo Mental Inicial	Modelo Mental Final	Transición
1	Superficial: No distingue la inferencia del torque y el momento angular en la precesión (dirección y rapidez)	Mixto: Reconoce que el torque y la velocidad angular del disco producen la precesión. No se muestra causalidad en su explicación, ni la interacción entre vectores.	Superficial a Mixto
2	Superficial: Reconoce que el efecto giroscópico se produce debido a la rotación. No distingue la inferencia del torque.	Superficial: Reconoce que debe existir rotación y una masa para que se de la precesión. Su explicación es no científica e intuitiva.	Ninguna
3	Mixto: Reconoce el vector momento angular y que su dirección interviene en la precesión. No reconoce la acción del torque en el movimiento.	Mixto: Muestra fórmulas referentes, pero en su interpretación escrita no se evidencia comprensión del fenómeno. Confunde el cambio del momento angular producido por el torque con el momento angular del disco.	Ninguna

En contraste, en el grupo experimental ($n=3$), todos los participantes evidenciaron un cambio en su modelo mental. Como se detalla en la Tabla 4.12, un estudiante pasó de un nivel superficial a robusto, mostrando una explicación detallada con uso correcto de los vectores y reconocimiento de la influencia conjunta del torque y del momento angular en el sentido y rapidez de la precesión. Otro caso representativo corresponde a un estudiante que evolucionó de superficial a mixto, logrando identificar la relación entre momento angular y torque, aunque aún con ideas erróneas sobre la rapidez de la precesión.

En síntesis, mientras que el grupo de control mostró una evolución limitada, el grupo experimental reflejó una progresión clara, con todos los entrevistados mejorando su modelo mental y al menos uno alcanzando un nivel robusto. Estos hallazgos cualitativos se basan en un pequeño número de casos ($n=8$) y deben tratarse con cautela. Esto se presenta como tendencias ilustrativas y como un aspecto complementario a los resultados cuantitativos, en lugar de ser representativos de la población estudiantil.

Tabla 4.12: Cambios en el modelo mental de los estudiantes del grupo experimental

N	Modelo Mental Inicial	Modelo Mental Final	Transición
4	Superficial: Indicó que no reconocía qué es precesión y qué la produce. De manera escrita replicó lo que recordaba y señaló que la precesión dependía del momento angular y el torque.	Robusto: Realizó una explicación detallada, señaló los vectores correctamente, reconoce la influencia del torque y el momento angular en el sentido y rapidez de precesión.	Superficial a Robusto (Figura 4.25)
5	Superficial: Indica que la precesión es producida por un motor y su rapidez depende de la masa del disco. No reconoce la influencia del torque y momento angular.	Mixto: Reconoce que la precesión depende del momento angular y del torque neto diferente de 0. Tiene aún ideas erróneas sobre cómo estas variables influyen en la rapidez de precesión.	Superficial a Mixto (Figura 4.26)

4.6. Percepción estudiantil sobre la intervención pedagógica

4.6.1. Interés generado por las actividades introductorias

En la Tabla 4.13 se presentan los estadísticos descriptivos por grupo. Ambos alcanzaron una mediana de 4, lo que indica que en general los estudiantes coincidieron en que las actividades previas a la práctica despertaron interés. Sin embargo, la media del grupo experimental fue superior a la del grupo de control, lo que refleja una tendencia positiva mayor en los estudiantes que participaron en actividades de simulación.

Tabla 4.13: Estadísticos descriptivos de la percepción de interés generado por las actividades previas

Grupo	Media	Mediana	N
Control	3.64	4	72
Experimental	4.01	4	68

La Figura 4.27 complementa estos resultados, mostrando la distribución de las respuestas a través de un gráfico tipo violín con diagrama de caja. En el grupo experimental se observa una concentración más marcada en los niveles altos (valores de 4 y 5), con pocos casos en los niveles bajos (1 y 2). En cambio, el grupo de control presenta una mayor dispersión, incluyendo varios estudiantes que manifestaron poco interés (valores de 1 y 2).

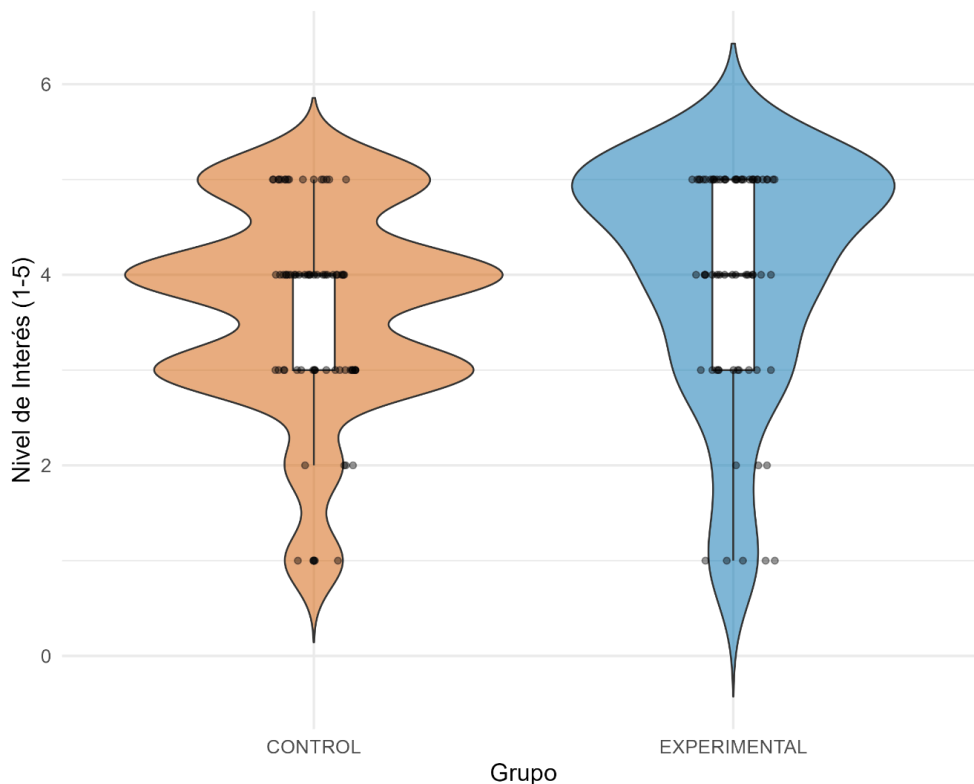


Figura 4.27: Distribución de respuestas sobre el interés generado por las actividades previas

Nota: Escala Likert de 1 = Muy en desacuerdo a 5 = Muy de acuerdo

El análisis estadístico mediante la prueba de Wilcoxon para muestras independientes mostró una diferencia significativa entre los grupos ($p = 0.0104$). Esto confirma que las actividades de simulación aportaron un nivel de interés significativamente mayor que las actividades previas tradicionales.

En síntesis, aunque ambos grupos reconocieron que las actividades previas despertaron su curiosidad por el tema, los estudiantes del grupo experimental no solo valoraron más positivamente esta dimensión, sino que también lo hicieron de manera más consistente.

4.6.2. Percepción sobre la comprensión y capacidad de predicción ganado debido a la intervención

Por otro lado, en la Tabla 4.14 y en la Figura 4.28 se muestra de manera comparativa las medias de ambos grupos. Se observa que en las dos dimensiones evaluadas los estudiantes del grupo experimental reportaron puntuaciones más

altas que los del grupo control, siendo la brecha más evidente en la comprensión de conceptos. En ambos casos, las desviaciones estándar son cercanas a 1, lo que indica una dispersión moderada de respuestas.

Tabla 4.14: Estadísticos descriptivos de la percepción de comprensión y capacidad de predicción

Grupo	Comprensión			Predicción		
	Media	Mediana	Desviación Estándar	Media	Mediana	Desviación Estándar
Control	3.71	4	1.04	3.49	3.5	1.02
Experimental	4.15	4.5	1.15	3.82	4	1.17

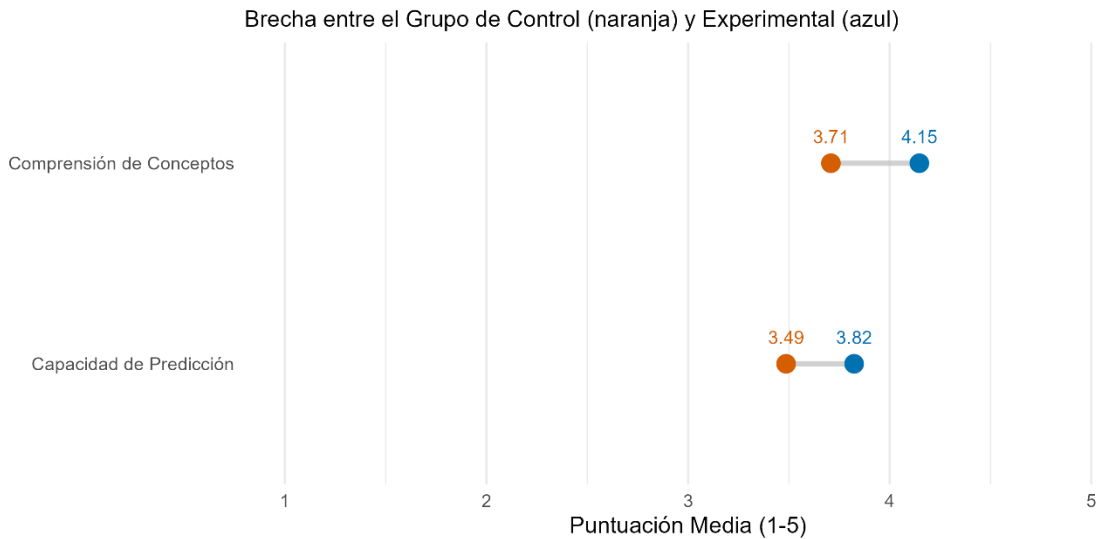


Figura 4.28: Comparación de las medias de percepción de comprensión y predicción

Nota: Escala Likert de 1 = Muy en desacuerdo a 5 = Muy de acuerdo

En síntesis, los resultados sugieren que los estudiantes del grupo experimental no solo percibieron una mayor comprensión de la relación entre momento angular, torque y precesión, sino que también se sintieron más capaces de realizar predicciones sobre cambios en estas variables. La diferencia entre grupos resultó estadísticamente significativa, según la prueba de Wilcoxon (comprensión: $p = 0.0025$; predicción: $p = 0.0233$). Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño, reforzando la coherencia entre los efectos cognitivos y las percepciones estudiantiles.

4.6.3. Componente pedagógico más útil para el estudiante

En la Figura 4.29 se presentan las preferencias de los estudiantes del grupo experimental respecto al componente pedagógico que consideraron más útil para su aprendizaje. La opción más recurrente fue la guía de simulación, mencionada por 40 estudiantes, seguida de la experimentación con el equipo físico, con 26 menciones y, en menor medida, la guía instruccional del aula virtual que fue señalada por 2 estudiantes.

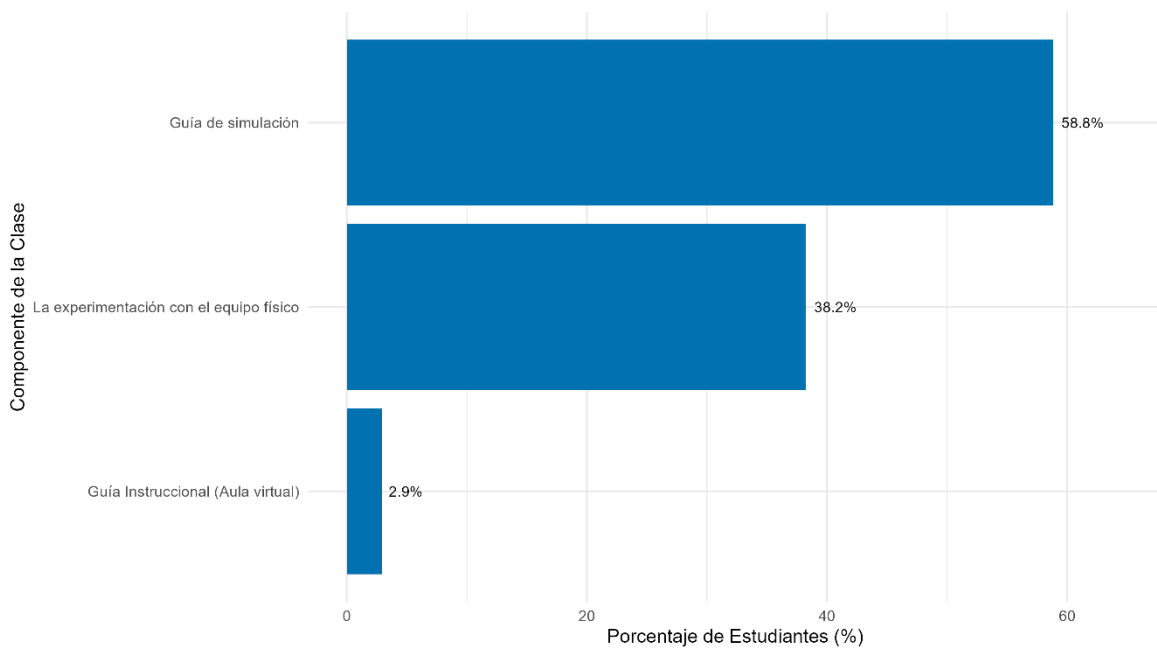


Figura 4.29: Percepción del grupo experimental sobre componente pedagógico más útil para comprender la precesión

El análisis estadístico de diferencia en proporciones entre las dos opciones más relevantes mostró una diferencia significativa a favor de la simulación ($p = 0.0236$). Esto sugiere que, los estudiantes valoran altamente la simulación como recurso de mediación conceptual para comprender la precesión, sin que ello reste importancia al valor de la experimentación física, considerada también como un elemento complementario para la verificación empírica de los fenómenos.

4.6.4. Aspectos que demandaron mayor esfuerzo cognitivo

La Figura 4.30 resume los aspectos que los estudiantes señalaron como los más difíciles de asimilar durante la intervención. Los resultados indican que la dirección de la precesión y la predicción de variables fueron mencionadas por

aproximadamente un tercio de los estudiantes en ambos grupos, sin diferencias relevantes.

En cambio, el momento angular destacó como el aspecto con mayor diferencia entre grupos: el 71% de los estudiantes del grupo control lo identificó como difícil, mientras que en el grupo experimental solo el 37% lo hizo. Este resultado sugiere que la simulación favoreció la comprensión de este concepto, reduciendo significativamente la percepción de dificultad.

Por otro lado, la relación torque–diferencial de momento angular se mantuvo como el mayor reto para ambos grupos, reflejando que, aunque los estudiantes pudieron avanzar en su comprensión, reconocieron que fue el aspecto que más esfuerzo cognitivo les demandó.

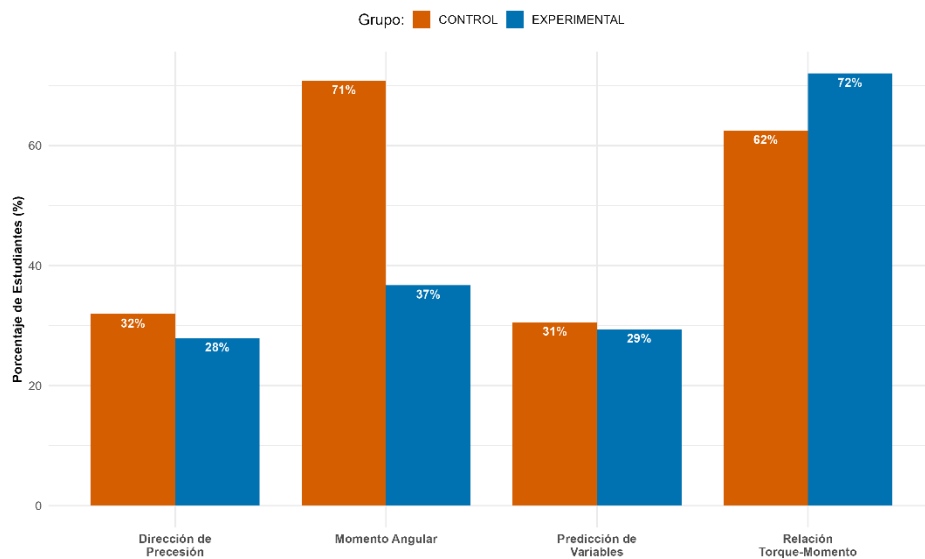


Figura 4.30: Comparación de las dificultades percibidas entre los grupos

4.6.5. Valoración global de la guía de simulación

La distribución de las respuestas referente a la calificación que los estudiantes le proporcionan a la guía se presenta en la Figura 4.31.

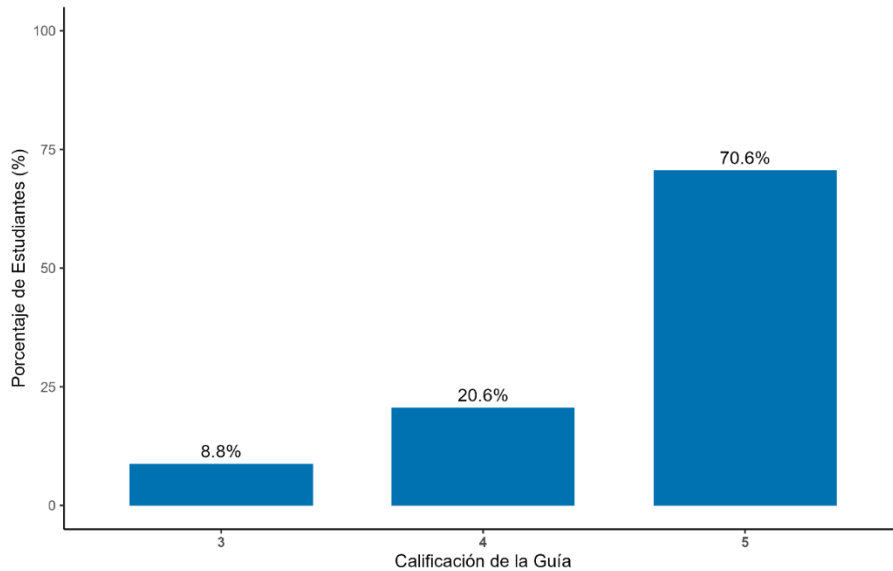


Figura 4.31: Valoración global de la guía de simulación

Nota: Escala Likert de 1 = Muy en desacuerdo a 5 = Muy de acuerdo

Los resultados muestran una tendencia fuertemente positiva: la mayoría de los estudiantes calificó con valores de 4 o 5 la utilidad de la intervención. El 70.6% de los participantes otorgó la calificación más alta posible. No se registraron respuestas en los niveles más bajos de la escala (1 o 2).

Estos resultados reflejan que la guía de simulación fue percibida como un recurso altamente beneficioso y bien recibido por la mayoría de los estudiantes. La concentración de respuestas en las categorías más altas (4 y 5) indica no solo satisfacción, sino también reconocimiento de su utilidad directa para comprender conceptos relacionados con giróscopo.

En conjunto, los resultados de percepción muestran que la simulación despertó el interés, fue reconocida como el componente más útil y favoreció la comprensión del momento angular. La valoración global de la intervención fue altamente positiva, lo que refuerza la coherencia entre el desempeño conceptual y la percepción estudiantil.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Principales hallazgos del estudio

En relación con el primer objetivo específico, los resultados permiten concluir que la práctica de laboratorio tradicional sobre el giróscopo presenta limitaciones claras para el fortalecimiento de los modelos mentales de los estudiantes.

La ganancia de aprendizaje alcanzada en el grupo de control fue prácticamente nula (4% en respuestas y 3% en justificación), lo que muestra que la experiencia por sí sola no produce avances significativos, salvo en casos aislados.

A pesar de que el 26% de los alumnos del grupo de control consiguió pasar de un modelo erróneo a uno robusto, este porcentaje fue significativamente más bajo que el 83% registrado en el grupo experimental, lo cual confirma las restricciones que tiene la práctica convencional para producir modificaciones conceptuales sistemáticas. Esta limitación también se refleja en el índice de coherencia, en el cual aproximadamente el 40% de los estudiantes de este grupo no pudo justificar ninguna de sus respuestas correctas, y en los diagramas de concentración, que presentaron la predominancia de perfiles de *Novato (Adivinando)*. En conjunto, en el grupo de control no se observó indicios de un fortalecimiento coherente como sugieren Haili et al. (2017), quienes destacan que un modelo mental robusto debería combinar conceptos y relaciones, y con Bao y Redish (2006), quienes argumentan que los patrones de adivinanza se correlacionan con la falta de una estructura conceptual estable.

En adición, el desagregado por preguntas evidenció que ningún concepto ganó fuerza de manera clara, salvo mejoras muy leves en dos ítems, lo que coincide con lo advertido por Rodríguez y Moreira (2002) acerca de la persistencia de

concepciones alternativas en ausencia de intervenciones específicas que influyan en sus modelos mentales.

Esta tendencia también se reflejó en la percepción estudiantil: aunque la mayoría valoró las actividades previas con niveles de interés de 3 y 4, las respuestas fueron dispersas, lo que indica diferencias en la manera en que cada estudiante se vinculó con estas actividades.

A pesar de que algunos estudiantes manifestaron que la práctica les ayudó a comprender, esta percepción no se tradujo en mejoras objetivas, lo que confirma la advertencia de Liu y Fang (2021) respecto a la dificultad de la enseñanza tradicional para corregir concepciones erróneas de nivel profundo.

El hecho de que el momento angular y la relación torque–momento angular fueran señalados como los más desafiantes de entender corrobora lo que Mashood (2014) y Barniol et al. (2013) indican, que los conceptos abstractos y no tangibles tienden a ser particularmente resistentes al cambio cuando se abordan únicamente desde la práctica experimental.

En cuanto al segundo objetivo específico, se cumplió con el diseño y aplicación de una prepráctica de laboratorio basada en simulación y acompañada de una guía didáctica.

El 70,6% de estudiantes otorgó la calificación máxima con respecto a su utilidad y el 58,8% señaló que la guía de simulación les ayudó a comprender la precesión más que la práctica tradicional, lo que refuerza la pertinencia del diseño.

Esta percepción favorable se ve claramente respaldada por la ganancia del grupo experimental, lo que indica que la combinación sinérgica de la guía con el simulador fue un elemento crucial que ayudó a entender el fenómeno y potenció el efecto de la intervención.

En este sentido, la guía no se utilizó únicamente para operar el simulador, sino que también sirvió como andamiaje cognitivo. Esto permitió organizar la experiencia y reducir la carga extrínseca, de modo que los estudiantes pudiesen concentrar sus recursos mentales en la construcción de modelos conceptuales significativos (Sweller, 1988; Paas y Sweller, 2014).

El diseño respondió a las características que la literatura recomienda para este tipo de material: instrucciones claras, predicciones y resultados de aprendizaje específicos, tal como destacan Dementievska y Sokolyuk (2022) y Yuni Ardiyanti (2023). Por lo tanto, la evidencia confirma que el objetivo de diseñar una prepráctica efectiva se alcanzó, demostrando que la guía de simulación fue un recurso pedagógico de valor para enseñar un fenómeno contraintuitivo como la precesión giroscópica.

Con respecto al tercer objetivo específico, los resultados indican que la intervención basada en una guía de prepráctica con simulación tuvo un fuerte impacto en fortalecer los modelos mentales de los estudiantes.

Las ganancias de Hake fueron de 0,51 en el nivel 1 y 0,48 en el nivel 2, las cuales se encuentran dentro del rango de ganancia *media*, muy por encima del grupo de control. Esta diferencia significativa, junto con un tamaño de efecto *grande*, indica que el enfoque pedagógico tuvo un impacto real en la comprensión del fenómeno. Este efecto no estuvo condicionado por el perfil académico, y tanto los estudiantes con buen rendimiento previo como aquellos con mayores dificultades mejoraron al utilizar la estrategia, reflejando la validez del modelo propuesto.

Asimismo, al analizar por separado las dimensiones conceptuales, se observó que la intervención multiplicó significativamente (hasta 15 veces) las probabilidades de mejora en las tres áreas evaluadas. Aunque el estudiante percibió que su mayor reto cognitivo se centró en la relación *torque–diferencial de momento angular*, los resultados también evidenciaron un avance consistente en esa área específica. Por lo tanto, la intervención generó un impacto representativo aún en los conceptos que los estudiantes consideran los más difíciles.

La calidad de las respuestas también mostró una diferencia clara. El índice de coherencia general aumentó en un 44,3%, lo que significa que no solo respondieron correctamente, sino que lograron justificar de manera alineada con la teoría. En la misma línea, al analizar los modelos se evidenció un mayor número de estudiantes que pasaron de la categoría *novatos* a categorías *mixtas* y *expertas* a nivel general. Además, el 46% de estudiantes cambiaron de un modelo superficial a uno robusto y el 83% de un modelo incorrecto a uno robusto en al menos una pregunta. Esta evidencia demostró que, en la mayoría de los casos, los modelos mentales fueron transformados y correspondieron con precisión a los modelos científicos del giróscopo.

A nivel individual, aunque se registraron ganancias en casi todas las preguntas, persistieron algunas dificultades, particularmente en el sentido de la precesión y en la relación entre la rapidez de giro y la rapidez de precesión. Esta última percepción estuvo presente en el 28% de la muestra experimental y constituye un ejemplo de la naturaleza contraintuitiva de este fenómeno, ya documentada en estudios previos (Mashood, 2014; Barniol et al., 2013).

Este cambio también se reflejó en la parte cualitativa: las entrevistas mostraron que algunos estudiantes que inicialmente no entendían nada del fenómeno lograron posteriormente explicarlo de forma completa y coherente, lo que ilustra un cambio conceptual profundo. Además de esto, la percepción del estudiante fue mucho mejor en el grupo experimental, especialmente con respecto a la comprensión y predicción. En conjunto, la evidencia cuantitativa y cualitativa respalda que la intervención efectivamente transformó los modelos mentales de los estudiantes y estableció su pertinencia como estrategia pedagógica para un concepto complejo y contraintuitivo como la precesión giroscópica.

En conclusión, la combinación de una prepráctica basada en simulación con la práctica de laboratorio favoreció de manera significativa al fortalecimiento de los modelos mentales de los estudiantes sobre la precesión giroscópica.

Estos hallazgos permiten rechazar H_0 y aceptar H_1 , dado que la ganancia de aprendizaje en el grupo experimental fue significativamente mayor ($p < 0.001$; tamaño del efecto grande, $r > 0.5$). Sin embargo, cabe señalar que los resultados se refieren exclusivamente a un contexto y muestra particular, y por lo tanto no deben generalizarse a todo tipo de población.

5.2. Aportes e implicaciones pedagógicas

Los hallazgos de este estudio aportan al marco teórico sobre los modelos mentales en la enseñanza de la física. Es posible afirmar que las prácticas de laboratorio tradicionales, por sí solas, no son suficientes para establecer un cambio profundo en la conceptualización. En contraste, integrar una prepráctica basada en simulación permite que los estudiantes articulen mejor sus observaciones con explicaciones teóricas, lo que es coherente con un enfoque centrado en la transformación de los modelos mentales (Rodríguez y Moreira, 2002) y con las perspectivas constructivistas, que enfatiza la construcción activa del conocimiento por parte del aprendiz.

La guía diseñada sirvió como un andamiaje cognitivo que organizó la experiencia y redujo la carga extrínseca, en línea con la teoría de la carga cognitiva, lo que facilitó que la atención de los estudiantes se centrara en las ideas clave del fenómeno.

Este método ha demostrado ser una herramienta educativa inclusiva, pues los hallazgos del estudio sostienen que favoreció de forma equitativa a los alumnos con mayores dificultades y a los de alto rendimiento, lo cual valida su uso en clases heterogéneas. Además, se observó que no solo despierta la motivación, sino que también fomenta la curiosidad y cuestionamiento, componentes cruciales de una formación científica integral. Si bien estas variables no fueron medidas directamente, la literatura respalda que las simulaciones interactivas promueven un rol más activo del estudiante. Autores como Simbolon y Silalahi (2023) señalan que los laboratorios virtuales fomentan la exploración independiente y el pensamiento crítico, mientras que Yechkalo (2018) destaca que permiten al estudiante formular y poner a prueba sus propias hipótesis, lo cual está intrínsecamente ligado a la curiosidad.

Los resultados tienen importantes implicaciones desde el punto de vista pedagógico. La integración de simulaciones y laboratorios no solamente contribuye a que un fenómeno contraintuitivo como la precesión giroscópica pueda ser visualizado, sino que también promueve el desarrollo del pensamiento crítico y analítico; esto se debe a que reta a los estudiantes a poner sus predicciones en comparación con los datos y a examinar la coherencia de sus mediciones en la práctica. Tener a disposición un banco de simulaciones y guías estructuradas puede beneficiar a estudiantes con distintos estilos de aprendizaje, brindando un apoyo pedagógico que contribuye a fortalecer la comprensión de conceptos. Por último, al reforzar la habilidad de análisis, esta propuesta capacita a los estudiantes para formular conclusiones fundamentadas, lo cual los aproxima a la manera de pensar y trabajar en el ámbito científico.

5.3. Recomendaciones

A partir de los hallazgos de esta investigación, se pueden plantear varias recomendaciones para mejorar el uso de preprácticas con simulación en los laboratorios de física.

En primer lugar, se aconseja dedicar más tiempo a estas actividades. Aunque los 50 minutos de la sesión fueron adecuados para terminar la guía, no lo fueron para que los estudiantes exploraran más detenidamente todas las opciones del simulador o meditar en profundidad sobre los resultados. Disponer con una hora completa brindaría a los estudiantes un margen más amplio para explorar el simulador y reforzar los conceptos trabajados. Para aprovechar aún mejor el tiempo en el aula, es recomendable que los estudiantes se familiaricen previamente con la herramienta, de modo que la sesión pueda enfocarse en la interpretación conceptual y no en el reconocimiento inicial del entorno digital. No obstante, en contextos donde el tiempo de clase es limitado, algunas de estas actividades pueden hacerse en casa, siempre y cuando los estudiantes cuenten con la motivación para realizarlas.

Además, sería apropiado implementar recursos de apoyo para reforzar los conocimientos previos esenciales, como la fuerza y el torque. En la práctica, se

notó que algunos estudiantes presentaban vacíos fundamentales en estos temas, los cuales son saberes imprescindibles para estudiar la precesión. Asimismo, se sugiere pensar en estrategias específicas para los estudiantes que, a pesar de la intervención, no lograron un alto índice de coherencia. Para este grupo, podría ser útil dedicar más tiempo a la experimentación o tener apoyo puntual que posibilite investigar sus razonamientos e involucrase de cerca en su proceso.

Para vencer los obstáculos que se presentan al entender la relación entre el momento angular y el torque, se recomienda incluir andamiajes progresivos que aborden sus características vectoriales. Además, se sugiere utilizar analogías cercanas a la precesión, como la rueda de bicicleta o trompo, que están disponibles en el simulador, porque representan un enlace intuitivo que podría facilitar la creación de modelos mentales más robustos.

Desde el punto de vista técnico, es aconsejable instruir a los estudiantes en reiniciar y reconfigurar el simulador cuando se efectúen cambios importantes en los parámetros. Esta práctica sencilla asegura una mayor estabilidad en el flujo de trabajo, a pesar de que los problemas fueron esporádicos. Siguiendo esta línea, también podría explorarse el uso de simuladores adicionales que permitan modificar otras variables, como el radio del disco. Esto enriquecería el análisis y facilitaría la inclusión de conceptos como el momento de inercia.

Respecto a la resolución de la guía, se recomienda conservarla en su formato impreso, dado que escribir y dibujar directamente sobre ella disminuye las distracciones y permite una mejor concentración en el simulador. Además, aunque es posible resolverla individualmente, trabajar en parejas resultó más beneficioso porque promovió el diálogo y la construcción conjunta del conocimiento.

Asimismo, es crucial prestar atención especial al diseño de procedimientos de autocorrección en la guía. Es decir, esta debe contener puntos de control claros donde los estudiantes contrasten sus predicciones con los resultados de la simulación, ya que el propósito es promover un aprendizaje independiente con poca intervención por parte del profesor. Esto es esencial para garantizar que no

fortalezcan por accidente una concepción equivocada y sean capaces de rectificar su modelo mental en tiempo real, asegurando así que la herramienta alcance su objetivo de formación.

Más allá de la práctica específica de giroscopio, este tipo de actividades previas se recomienda como preparación para todas las prácticas de laboratorio. Además, se recomienda que los docentes empleen la etapa de contraste entre predicción y simulación como un espacio de debate en el aula, con el fin de orientar a los estudiantes a ser más críticos cuando midan y examinen los datos obtenidos en la experimentación real.

Por último, se sugiere que la guía de prepráctica elaborada en esta investigación, que ya es un producto aplicable a la ESPOL, sea utilizada como modelo para establecer un repositorio institucional de recursos similares. De esta manera, la implementación de estas estrategias sería más práctica para el docente, garantizando la escalabilidad y sostenibilidad de esta propuesta pedagógica.

5.4. Futuras investigaciones

Este trabajo abre la puerta a múltiples opciones de investigación que permitirían una exploración más profunda del efecto que tienen las preprácticas con simulación en la enseñanza de física.

En primer lugar, se recomienda replicar esta investigación en otras disciplinas e instituciones, con el fin de evaluar si la estrategia es factible en contextos diferentes y en poblaciones más numerosas.

Respecto al contenido abarcado, una aplicación inmediata podría ser el aprendizaje de dinámica, un tema que suele ser complicado para los estudiantes y se aborda de forma mecánica. En este campo, si se emplean simulaciones, se permitiría visualizar de forma más clara las interacciones, fuerzas, aceleración, desplazamiento y tiempo. Esto daría lugar a nuevas oportunidades para que el aprendizaje sea más significativo. Aunque este estudio se enfocó en la precesión

giroscópica, esta estrategia es aplicable a prácticamente todos los fenómenos de la física mecánica.

Una línea de investigación complementaria sería comparar directamente el efecto de la simulación guiada versus la simulación libre. El diseño de este estudio no incluyó un grupo que empleara únicamente la simulación, sin la ayuda pedagógica que ofrecía la guía, por lo que un nuevo estudio permitiría identificar el rol específico de la guía como andamiaje cognitivo. Asimismo, resultaría valioso evaluar la efectividad de estas preprácticas cuando se implementan en modalidad domiciliaria versus presencial, para comprender mejor cómo el contexto de aprendizaje influye en los resultados.

Un enfoque de investigación innovador podría ser explorar el uso de modelos de lenguaje como el Transformador Generativo Pre-entrenado (GPT), con el fin de reforzar la guía en contextos de aprendizaje autónomo. De este modo, se podría entrenar a un modelo con instrucciones concretas (prompts) para que funcione como un tutor de soporte. Su labor consistiría en proporcionar de manera inmediata retroalimentación formativa, lo que ayudaría al estudiante a entender conceptos previos y, lo más importante, a comparar sus respuestas con el modelo científico. Esto abordaría el riesgo de que un estudiante consolide una idea incorrecta al trabajar sin la supervisión directa de un maestro.

Otro camino de investigación importante es el seguimiento a largo plazo. Un estudio longitudinal permitiría evaluar no solo la ganancia inmediata de aprendizaje, sino también la retención y evolución de los modelos mentales después de varios meses, lo cual daría una visión más completa sobre la persistencia de los cambios conceptuales.

Finalmente, futuras investigaciones podrían incorporar nuevas variables de análisis. A pesar de que los resultados globales fueron coherentes, se notaron desviaciones estándar altas en algunos indicadores, lo cual evidencia la diversidad de formas de aprender. Por ello, sería valioso analizar el grado de motivación que generan estas actividades, la relación con los distintos perfiles de aprendizaje y el

potencial de despertar interés real en quienes consideran la física como un campo abstracto y difícil de entender. Desde el plano cualitativo, también resultaría enriquecedor ampliar el número de entrevistas y análisis individuales para mapear de manera más detallada las concepciones alternativas, tanto en giroscopio como en conceptos previos como torque y momento angular.

6. REFERENCIAS

- Adair, J. G., Sharpe, D., & Huynh, C. L. (1989). Hawthorne Control Procedures in Educational Experiments: A Reconsideration of Their Use and Effectiveness. *Review of Educational Research*, 59(2), 215–228. <https://doi.org/10.3102/00346543059002215>
- Agudelo, J. D., & García, G. (2010). Aprendizaje significativo a partir de prácticas de laboratorio de precisión. *Latin American Journal of Physics Education*, 4(1), 22. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3694950.pdf>
- Alvarez-Alvarado, M. S., Mora, C., & Cevallos-Reyes, C. B. (2019). Peer instruction to address alternative conceptions in Einstein's special relativity. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 41(4), e20190008. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0008>
- Ardila, J. C. C. (2011). Importancia de usar tecnología en el desarrollo de prácticas de laboratorio de física mecánica. *Revista Educación En Ingeniería*, 6(11), 24–34. <https://doi.org/10.26507/rei.v6n11.121>
- Arena, L. E., Ré, M. A., & Giubergia, M. F. (2011). Laboratorio virtual para una definición operativa de masa inercial. *VI Congreso de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. Holt, Rinehart and Winston.
- Bao, L., & Redish, E. F. (2006). Model analysis: Representing and assessing the dynamics of student learning. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 2(1), 010103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.010103>
- Barniol, P., Zavala, G., & Hinojosa, C. (2013). Students' difficulties in interpreting the torque vector in a physical situation. *AIP Conference Proceedings*, 58–61. <https://doi.org/10.1063/1.4789651>
- Barrage, R., Brodland, G. W., & Al-Hammoud, R. (2017). Helping students to feel mechanics. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2017-June*. <https://doi.org/10.18260/1-2--28433>
- Borish, V., Hoehn, J. R., & Lewandowski, H. J. (2022). Student engagement with modeling in multiweek student-designed lab projects. *Physical Review Physics Education Research*, 18(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.020135>
- Chernikova, O., Heitzmann, N., Stadler, M., Holzberger, D., Seidel, T., & Fischer, F. (2020). Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 90(4), 499–541. <https://doi.org/10.3102/0034654320933544>
- Chiodi, G. A., Soutadet, A. J., & Bosio, M. A. (2021). Virtual Laboratory and Mobile Devices as a Support Tool for the Teaching-Learning Processes of Physics in Pandemic Times. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)*, 9(3), 76. <https://doi.org/10.3991/ijes.v9i3.24473>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Del Carmen Cuesta, A., Fager, M. N. B., & Rodríguez, N. B. P. (2019). Fenómenos magnéticos: indagación de modelos mentales y uso de estrategias de aprendizaje activo. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31(1), 245–250. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7578674>

- Dementievska, N. P., & Sokolyuk, O. M. (2022). *Virtual laboratory works in physics using interactive computer simulations: a collection of educational materials*. <https://doi.org/10.33407/lib.naes.733495>
- DeVellis, R. F. (2017). *Scale development: Theory and applications* (4th ed.). SAGE Publications.
- Donoso, E. P. L. (2011). *La modelización conceptual de la mecánica newtoniana en estudiantes de física universitarios: una aplicación de la teoría de Ausubel de aprendizaje significativo*. <https://doi.org/10.36443/10259/165>
- Escuela Superior Politécnica del Litoral. (2023, noviembre 9). *Espol cuenta con 20 Ingenierías de alta calidad con sello Eur-Ace*. <https://www.espol.edu.ec/es/noticias/espol-cuenta-con-20-ingenierias-de-alta-calidad-con-sello-eur-ace>
- Fäldt, Å., & Fredlund, T. (2023). The gyroscopic effect and moment of inertia. *Physics Education*, 58(2). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aca73a>
- Flores, J. A. (2018). *Nivel de conocimiento y habilidades prácticas en la asignatura de física en las escuelas profesionales de ingenierías de la universidad católica de Santa María* [Tesis de maestría]. Universidad Católica de Santa María.
- Fратиwi, N. J., Samsudin, A., Ramalis, T. R., Saregar, A., Diani, R., Irwandani, Rasmitadila, & Ravanis, K. (2020). Developing memori on Newton's laws: For identifying students' mental models. *European Journal of Educational Research*, 9(2), 699–708. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.9.2.699>
- Ghadiri, Z., Norouzi, D., & Fardanesh, H. (2016). Investigation of the Effect of Computer Simulation-Based Learning Based on Constructivism in Removing Physics Misconceptions. *Interdisciplinary Journal of Virtual Learning in Medical Sciences*, 6(4). <https://doi.org/10.5812/ijvlms.11997>
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2002). Mental, Physical, and Mathematical Models in the Teaching and Learning of Physics. *Science Education*, 86(1), 106–121. <https://doi.org/10.1002/sce.10013>
- Haili, H., Maknun, J., & Siahaan, P. (2017). Problem solving based learning model with multiple representations to improve student's mental modelling ability on physics. *AIP Conference Proceedings*, 1868(1), 070004. <https://doi.org/10.1063/1.4995180>
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied Logistic Regression* (3rd ed). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118548387>
- Ineval. (2024). *Políticas transformadoras: hacia el nuevo Ecuador, desde la evaluación educativa*. <https://www.evaluacion.gob.ec>
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Harvard University Press.
- Jonny, H. P., Rajagukguk, D., & Rajagukguk, J. (2020). Computational Modelling Based on Modellus to Improve Students' Critical Thinking on Mechanical Energy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1428(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1428/1/012042>
- Kahar, M. S. (2017). Analisis Minat Belajar Mahasiswa Terhadap Penggunaan Alat Peraga Neraca Cavendish. *SEJ (Science Education Journal)*, 1(2), 73–83. <https://doi.org/10.21070/sej.v1i2.1177>

- Kahar, M. S. (2018). Motivation Analysis Learning in The Implementation of Physics Practicum. *Formatif: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA*, 8(1). <https://doi.org/10.30998/formatif.v8i1.2304>
- Kamarainen, A. M., Metcalf, S., Grotzer, T., & Dede, C. (2015). Exploring Ecosystems from the Inside: How Immersive Multi-user Virtual Environments Can Support Development of Epistemologically Grounded Modeling Practices in Ecosystem Science Instruction. *Journal of Science Education and Technology*, 24(2-3), 148-167. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9531-7>
- Kaplan, H., & Hirsch, A. (2014). Gyroscopic Motion: Show Me the Forces! *The Physics Teacher*, 52(1), 30–33. <https://doi.org/10.1119/1.4849150>
- Kuder, G. F., & Richardson, M. W. (1937). The theory of the estimation of test reliability. *Psychometrika*, 2(3), 151–160. <https://doi.org/10.1007/BF02288391>
- Li, S., Chua, C., Campo, J., & Raza, K. (2022). Mental models and engineering education: a literature review. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA)*. <https://doi.org/10.24908/pceea.vi.15918>
- Liu, G., & Fang, N. (2021). The effects of enhanced hands-on experimentation on correcting student misconceptions about work and energy in engineering mechanics. *Research in Science and Technological Education*, 41(2), 462–481. <https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1909555>
- Malavé, C. A. (2017). *Análisis descriptivo de las dificultades que afrontan estudiantes de Ingeniería en el aprendizaje de Física de una Universidad ecuatoriana* [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. DSpace ESPOL.
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Mashood K. K. (2014). *Development and evaluation of a concept inventory in rotational kinematics* [Tesis doctoral, Tata Institute of Fundamental Research]. Homi Bhabha Centre for Science Education.
- Moreira, M. A., & Lagreca, M. do C. B. (2016). Representações mentais dos alunos em mecânica clássica: três casos. *Investigações em ensino de ciências.*, 3(2), 83–106. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/141144>
- Nuriyah, R., Yuliaty, L., & Supriana, E. (2018). Eksplorasi penguasaan konsep menggunakan experiential learning pada materi hukum Newton. *Jurnal Pendidikan: Teori, Penelitian, dan Pengembangan*, 3(10), 1353 –1357. <https://doi.org/10.17977/jptpp.v3i10.11608>
- Paas, F., & Sweller, J. (2014). Implications of cognitive load theory for multimedia learning. En *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, Second Edition*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.004>
- Falstad, P. (s.f.). *Top View Gyroscope Simulator*. Falstad.com. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de <https://www.falstad.com/top/>
- Pérez-Higuera, G. D., Niño-Vega, J. A., & Fernández-Morales, F. H. (2020). Estrategia pedagógica basada en simuladores para potenciar las competencias de solución de problemas de física. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 8(3), 17-23. <https://doi.org/10.15649/2346030x.863>
- Redish, E. F. (2016). Analysing the Competency of Mathematical Modelling in Physics. *Springer Proceedings in Physics*, 190, 25–40. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44887-9_3
- Ríos, L., Pollard, B., Dounas-Frazer, D. R., & Lewandowski, H. J. (2019). Using think-aloud interviews to characterize model-based reasoning in electronics for a

- laboratory course assessment. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.15.010140>
- Rodríguez, M., & Moreira, M. (2002). Modelos mentales vs Esquemas de célula. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(1), 77–103.
- Scheirer, C. J., Ray, W. S., & Hare, N. (1976). The Analysis of Ranked Data Derived from Completely Randomized Factorial Designs. *Biometrics*, 32(2), 429–434. <https://doi.org/10.2307/2529511>
- Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación & Dirección Nacional de Gestión de la Información. (2023, agosto). *Registro de Matrícula*. <https://siau.senescyt.gob.ec/universidades-y-escuelas-politecnicas-matriculas/>
- Simbolon, D. H., & Silalahi, E. K. (2023). Physics Learning Using Guided Inquiry Models Based on Virtual Laboratories and Real Laboratories to Improve Learning. *Journal for Lesson and Learning Studies*, 6(1), 55–62. <https://doi.org/10.23887/jlls.v6i1.61000>
- Supriyatman, Suhandi, A., Rusdiana, D., Samsudin, A., & Wibowo, F. C. (2018). Problem-Solving Laboratory-Based Course Development to Improve Mental Model and Mental-Modeling Ability. *Proceedings Of The First Indonesian Communication Forum Of Teacher Training And Education Faculty Leaders International Conference On Education 2017 (ICE 2017)*. <https://doi.org/10.2991/ice-17.2018.2>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. [https://doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7)
- Tytler, R., Prain, V., Aranda, G., Ferguson, J., & Gorur, R. (2020). Drawing to reason and learn in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(2), 209–231. <https://doi.org/10.1002/tea.21590>
- Volfson, A., Eshach, H., & Ben-Abu, Y. (2023). Physics teaching via dialogic discussions about circus activities. *Contemporary Educational Technology*, 15(2), ep413. <https://doi.org/10.30935/cedtech/12964>
- Williams, G., & Clement, J. (2014). Identifying Multiple Levels of Discussion-Based Teaching Strategies for Constructing Scientific Models. *International Journal of Science Education*, 37(1), 82–107. <https://doi.org/10.1080/09500693.2014.966257>
- Yechkalo, Y. (2018). *Tools of computer simulation in learning physics*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.05381>
- Yuni Ardiyanti, N. (2023). Development of guided inquiry model of science learning tools to train science process skills and improve student learning outcomes. *Review of multidisciplinary education, culture and pedagogy*, 2(1), 54–63. <https://doi.org/10.55047/romeo.v2i1.604>

7. APÉNDICES Y ANEXOS

Apéndice A: Guía Didáctica de la Simulación

La versión final de la guía didáctica de simulación que se proporcionó a los estudiantes del grupo experimental se muestra a continuación. Este material tuvo como finalidad actuar como un andamiaje cognitivo para favorecer la comprensión del fenómeno de la precesión giroscópica antes de realizar prácticas en el laboratorio.

GUÍA DE SIMULACIÓN

¡Bienvenido/a! Esta guía de simulación te ayudará a descifrar el movimiento de precesión de un giróscopo. El objetivo es que al final seas capaz de predecir con exactitud la dirección de la precesión y entender las variables físicas que la gobiernan.

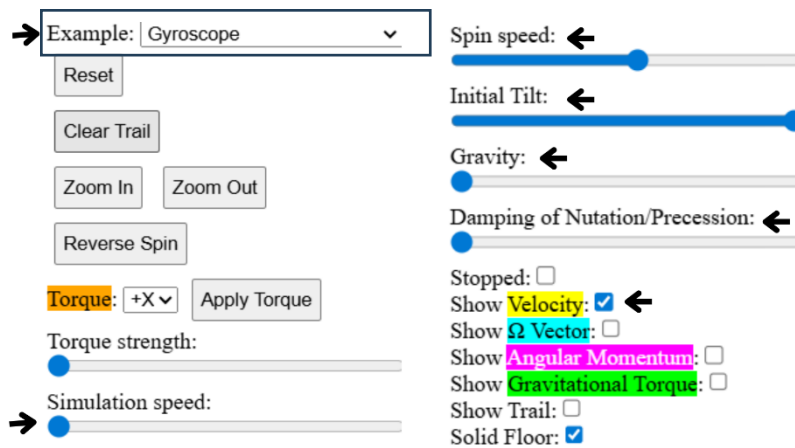
Parte 1: MOMENTO ANGULAR (\vec{L})

Para efectos prácticos de esta guía, recordemos que el vector momento angular para un cuerpo rígido se define como $\vec{L} = I\vec{\omega}$ donde I es el _____ del disco y $\vec{\omega}$ es su _____.

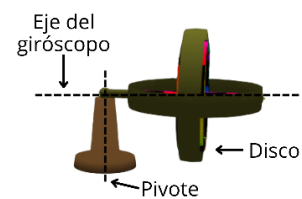
1. De acuerdo con la relación anterior, ¿qué variable determina la dirección de \vec{L} ?
 - a) La velocidad angular del disco
 - b) El momento de inercia del disco

Simulación

- Ingresa a la simulación de giróscopo: <https://www.falstad.com/top/>
- En el panel derecho, realiza las siguientes configuraciones:



- Da clic sostenido sobre la pantalla y mueve la perspectiva para que identifiques el sistema de coordenadas que se encuentra en la parte superior derecha.



Dato clave 1: Usa tu mano derecha y enrolla tus dedos siguiendo el sentido de giro del disco. Tu pulgar extendido te mostrará la dirección de la velocidad angular.

2. ¿Cuál es la dirección de la velocidad angular del disco $\vec{\omega}_d$? (Usa el sistema de coordenadas de la simulación)

- | | | |
|-------|-------|-------|
| a) +x | c) +y | e) +z |
| b) -x | d) -y | f) -z |

- Comprueba tu respuesta activando la opción: Show **Omega Vector**: (muestra el vector velocidad angular de giro ($\vec{\omega}_d$) en celeste).

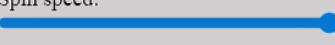
3. ¿Cuál es la dirección del momento angular del disco \vec{L}_d ?

- | | | |
|-------|-------|-------|
| a) +x | c) +y | e) +z |
| b) -x | d) -y | f) -z |



- Contrasta con la pregunta 1 y 2.

- Comprueba tu respuesta activando la opción:
Show **Angular Momentum**: (muestra el vector momento angular del disco (\vec{L}_d) en rosado).

Dato clave 2: Para que ocurra una precesión estable, el momento angular \vec{L}_d del disco debe ser grande. Así que aumentemos la velocidad del momento

angular: Spin speed: 

- ¿Comenzó a precesar? ¡No todavía! Porque también necesitamos un torque neto distinto de 0. En este giróscopo lo produce el peso del disco. Así que activemos la gravedad con los siguientes ajustes:

Simulation speed:  Gravity: 

4. ¿Cuál es la dirección de la precesión ($\vec{\Omega}$)? (Coloca la simulación en una perspectiva superior)

a) Horario \curvearrowright

b) Antihorario \curvearrowleft

- Ahora cambiemos el sentido de giro del disco:

5. ¿Qué sucede con los vectores $\vec{\omega}_d$ y \vec{L}_d al invertir el sentido de giro del disco?

a) Se mantienen en el mismo sentido

b) Cambian de sentido

6. ¿Cambió la dirección de la precesión ($\vec{\Omega}$)?

a) Si

b) No

En resumen, la dirección del m _____ a _____ del d _____ afecta la dirección de la precesión.

A continuación, veamos cómo el momento angular del disco también influye en la rapidez de precesión Ω :

- Disminuye la velocidad angular de giro del disco ($\vec{\omega}_d$) y observa con atención:

Spin speed: 

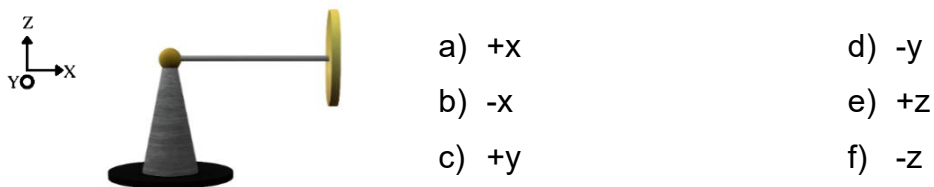
- b) El torque neto es directamente proporcional al cambio del momento angular ($d\vec{L}$)
- c) Ambas son correctas

Dato clave 3: Recuerda que el torque se calcula como $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$, donde \vec{F} es la fuerza que causa el giro y \vec{r} es el vector desde el pivote hasta donde se aplica la fuerza.

2. En el gir6scopo de la simulaci6n, ¿qu6 fuerza provoca torque con respecto al pivote?
 - a) La reacci6n en el pivote
 - b) El peso del disco y varilla

3. Sabiendo que el torque es producido por el peso, dibuja los vectores \vec{r} y \vec{F} sobre el gir6scopo mostrado. Adem6s, selecciona la direcci6n del torque neto.

Nota: El eje Y+ se encuentra saliendo de la hoja.



Simulaci6n

- Reinicia el simulador usando y realiza la siguiente configuraci6n:

Vuelve a configurarlo para que el disco se coloque en posici6n.

Torque strength:

Simulation speed:

Spin speed: Stopped:

Initial Tilt: Show Velocity:

Gravity: Show Ω Vector:

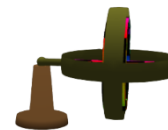
Damping of Nutation/Precession: Show Angular Momentum:

Show Gravitational Torque:

Show Trail:

Solid Floor:

- Rota la perspectiva hasta obtener una imagen como la siguiente:



- Activa la opción: Show **Gravitational Torque**: (muestra el vector del torque producido por el peso ($\vec{\tau}_{neto}$) en verde).
- Cambia ligeramente la perspectiva para que puedas identificar la dirección del vector.



Para las siguientes dos preguntas considera el sistema de referencia:

Nota: No tomes en cuenta el sistema de referencia del simulador, sino el dado en la pregunta 3.

- ¿La dirección del $\vec{\tau}_{neto}$ que muestra el simulador coincide con tu respuesta a la pregunta 3?
 - Si coincide
 - No coincide
- ¿Cuál debería ser la dirección del diferencial de momento angular ($d\vec{L}$)?
 - +y
 - y

Dato clave 4: *Para que la precesión sea un movimiento circular suave y estable, es fundamental que el cambio de momento angular ($d\vec{L}$) sea muy pequeño en comparación con el momento angular del disco (\vec{L}_d).*

Ahora analicemos cómo la magnitud del $d\vec{L}$ afecta a la rapidez de precesión Ω :

- ¿Qué sucedería con el torque neto ($\vec{\tau}_{neto}$) si se **incrementa** el peso?
 - Aumenta
 - Disminuye

- Desactiva la opción Stopped:

- Aumenta el peso del disco usando: Gravity:

Nota importante: Este deslizador NO cambia la masa, solo el peso.

1. Para ese instante:

1) Dibuja el vector \vec{L}_d

2) Desde la punta de \vec{L}_d dibuja $d\vec{L}$

Nota: Ten en cuenta que el simulador no está a escala y $\vec{L}_d \gg d\vec{L}$.

3) Encuentra el vector resultante $\vec{R} = \vec{L}_d + d\vec{L}$.

4) Dibuja una flecha curva (\curvearrowright o \curvearrowleft) dentro del triángulo para representar el barrido angular desde \vec{L}_d hacia \vec{R} .

Perspectiva superior (Plano 2D)

Dato clave 5: Piensa en $d\vec{L}$ como el pequeño “paso” que el giróscopo dará a continuación. La magnitud del “paso” define qué tan rápido se mueve y la dirección es lo que define el sentido de la precesión. \vec{L}_d sería la posición actual del eje del giróscopo en ese instante y \vec{R} te muestra su posición futura (siguiente instante).

2. Con base en la suma vectorial, ¿hacia dónde debería estar el movimiento de precesión del giróscopo?

a) Horario \curvearrowright

b) Antihorario \curvearrowleft

- Inicia el movimiento desactivando Stopped: y confirma tu respuesta.
- Activa Show Trail: para observar la trayectoria circular que sigue el eje del giróscopo.

3. ¿Qué sucedería si el vector $d\vec{L}$ aumenta en magnitud?

a) El desplazamiento angular (θ) es mayor por lo que su precesión ($\vec{\Omega}$) es más rápida.

b) El desplazamiento angular (θ) es menor por lo que su precesión ($\vec{\Omega}$) es más lenta.

Nota: Compare su respuesta con el “Dato clave 5” y la pregunta 8 de la parte 2.

4. ¿Qué ángulo siempre debe existir entre el vector \vec{L}_d y $d\vec{L}$ para una precesión estable?
- a) 0°
 - b) 90°
 - c) No importa el ángulo

Dato clave 6: Recuerda que mientras siga actuando el torque neto ($\vec{\tau}_{neto}$) en dirección perpendicular al momento angular del disco (\vec{L}_d), la precesión continuará de manera estable.

Parte 4: RELACIÓN DE PROPORCIONALIDAD

Finalmente, define la relación de proporcionalidad entre L_d , τ_{neto} y Ω .

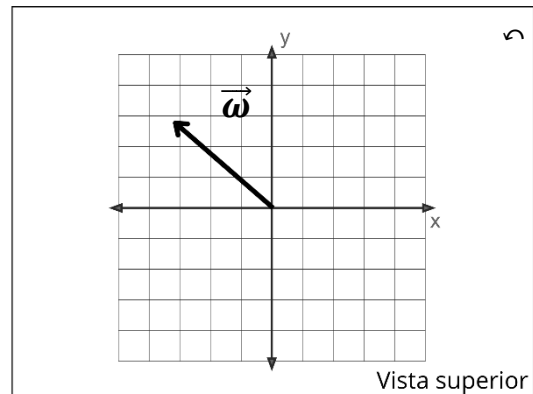
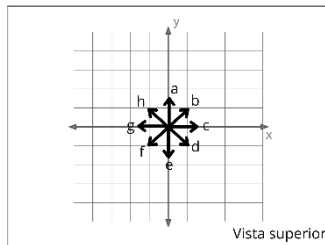
- a) $\Omega = \frac{L_d}{\tau_{neto}} = \frac{I\omega}{|\vec{r} \times \vec{F}|}$
- b) $\Omega = \frac{\tau_{neto}}{L_d} = \frac{|\vec{r} \times \vec{F}|}{I\omega}$
- c) $\Omega = \tau_{neto} L_d = |\vec{r} \times \vec{F}| I\omega$

Apéndice B: Cuestionario de dos niveles

El cuestionario de dos niveles, que se empleó como la principal herramienta de medición en esta investigación, se presenta en esta sección. La prueba se llevó a cabo en los grupos de control y experimental, tanto antes como después (pre-test y post-test), con el propósito de analizar la ganancia del aprendizaje y el cambio en los modelos mentales. Para el post-test, se utilizó el mismo instrumento, pero se modificó solo el orden de las preguntas con el fin de reducir los efectos de memoria. El formato de dos niveles (respuesta y justificación) permitió el análisis de la coherencia conceptual en cada elección.

PRUEBA 1

PREGUNTA 1: La figura muestra la velocidad angular $\vec{\omega}$ de un giróscopo. Si se conoce que la precesión es en sentido antihorario (\curvearrowright), desde la vista superior, ¿cuál es la dirección del torque neto?



- a) El vector a
- b) El vector b
- c) El vector c
- d) El vector d
- e) El vector e
- f) El vector f
- g) El vector g
- h) El vector h

Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:

PREGUNTA 2: El disco de un gir6scopo se est1 frenando por la fricci6n en el eje, por lo tanto, la rapidez de precesi6n es:

- a) Cada vez menor
- b) Cada vez mayor
- c) Se mantiene igual porque el peso no cambia
- d) Depende de si la precesi6n ocurre a favor o en contra de la fricci6n

Estoy seguro No estoy seguro

Justificaci6n:

PREGUNTA 3: El disco de un gir6scopo que est1 precesando disminuye significativamente la magnitud de su momento angular \vec{L} de modo que se hace 0.

Entonces se observar1 que:

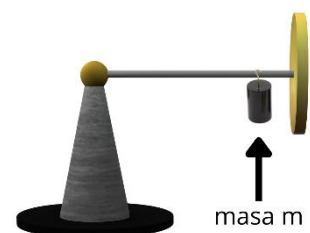
- a) El eje se quedar1 suspendido horizontalmente en un estado de equilibrio, ya que el movimiento simplemente cesa.
- b) El eje caer1 r1pidamente, ya que el torque ahora causa un cambio muy grande en comparaci6n con el momento angular.
- c) El eje continuar1 su movimiento circular horizontal, pero cada vez m1s lento, hasta detenerse.
- d) El torque se reduce hasta hacerse despreciable, por lo que el disco dejar1 de precesar.

Estoy seguro No estoy seguro

Justificaci6n:

PREGUNTA 4: En un gir6scopo se coloca una masa m tal como se muestra en la figura. Entonces se va a observar que:

- a) El gir6scopo deja de precesar y cae por acci6n del peso.
- b) El gir6scopo precesa m1s lentamente.
- c) El gir6scopo precesa m1s r1pido.



- d) No hay variación porque la velocidad de precesión no depende de la masa m .

Estoy seguro No estoy seguro

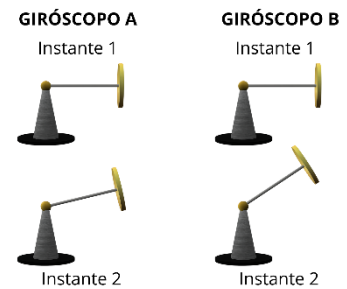
Justificación:

PREGUNTA 5: La imagen muestra una instantánea de la precesión de dos giróscopos, cuyos ejes suben. Se puede observar que el giróscopo B tiene un mayor desplazamiento angular porque:

- a) El momento angular del disco es mayor
- b) El diferencial de momento angular es mayor
- c) El momento de inercia del disco es mayor
- d) La masa del disco es mayor

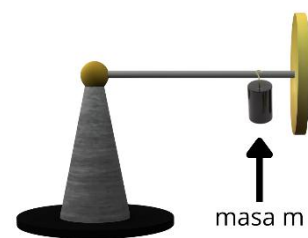
Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:



PREGUNTA 6: Si se desea que un giróscopo precese más lentamente, entonces se debe:

- a) Disminuir la velocidad angular del disco y aumentar la masa m
- b) Aumentar la velocidad angular del disco y aumentar la masa m
- c) Disminuir la velocidad angular del disco y disminuir la masa m
- d) Aumentar la velocidad angular del disco y disminuir la masa m



Estoy seguro No estoy seguro

Justificación:

Apéndice C: Guía de entrevistas semiestructurada

En este apéndice se describe el protocolo y los materiales que se emplearon para las entrevistas semiestructuradas, que se llevaron a cabo antes y después de la intervención a un subconjunto de alumnos.

Objetivo: Detectar, describir y documentar el progreso del modelo mental de un estudiante acerca de la precesión giroscópica.

Duración aproximada: De 15 a 20 minutos por estudiante.

Materiales: Formato de codificación del investigador, hoja de actividad y esferos.

Fases:

1. Presentación y presentación de la actividad: "Hola, gracias por ser parte de esta investigación. Estamos llevando a cabo un estudio para comprender de qué manera los estudiantes perciben un fenómeno físico. No existen respuestas erradas o acertadas, únicamente nos importa tu punto de vista. Tu respuesta será anónima; en tu hoja emplearemos este código de identificación.
2. Actividad individual (Dibuja y explica): Se proporcionaba la hoja de actividad (Figura C.1) junto con la instrucción verbal: "Por favor, en esta hoja dibuja cómo te imaginas el movimiento de un giróscopo y todos los elementos que consideras que están implicados. Cuando termines de dibujar, explica en un párrafo qué es la precesión y cómo crees que se produce."

Datos

Pregunta

Área para dibujar y explicar

Código estudiante: _____ Grupo: _____

Fecha: _____

Dibuja y explica: ¿Qué es y por qué se produce la precesión?

Figura C.1 Hoja de actividad entregada a los estudiantes durante la entrevista

3. Conversación de indagación: Luego de que el estudiante terminara, el investigador revisaba y leía la hoja. Se establecía un diálogo abierto con preguntas de sondeo para aclarar y profundizar en las ideas del estudiante a partir de su producción (su dibujo y su texto). Algunas de las preguntas que se plantearon fueron:

"Veo que hiciste esto, ¿por qué lo pusiste aquí? Cuéntame un poco más".

"En tu explicación, mencionas [cita del estudiante]. ¿Qué quieres decir con eso?"

"¿Qué crees que sucedería si se alterara una variable, como por ejemplo que el disco rotara con mayor velocidad?"

El propósito de esta etapa era evidenciar las características ocultas del modelo mental del estudiante y corroborar la interpretación del investigador.

4. Codificación y análisis subsiguiente: Después de la entrevista, se empleó un formato para codificar los resultados siguiendo la estructura de la Tabla C.1.

Tabla C.1 Matriz de Codificación para el Análisis de Modelos Mentales

Código del estudiante	Modelo: Inicial, Mixto, Robusto	Torque	Momento angular	Predicción de la precesión

Apéndice D: Encuesta de percepción estudiantil

Para representar las actividades concretas que cada grupo realizó, se elaboraron dos versiones de la encuesta: una para el grupo experimental y otra para el control. Las encuestas se realizaron al término de la sesión del laboratorio y eran anónimas. Se muestran a continuación las dos versiones.

Versión para el grupo de control

	Muy en desacuerdo	En desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Muy de acuerdo
Antes de comenzar la práctica de laboratorio, las actividades previas me hicieron sentir más interesado y/o con mayor curiosidad por el tema.					
La sesión de hoy me ayudó a entender la relación momento angular – torque – precesión.					
Después de la sesión, me siento más capaz de predecir cambios cuando varían L , el torque y otras variables de la precesión.					
Al terminar la sesión me sentí preparado para responder el post-test.					

¿Qué componente te ayudó más a comprender la precesión?

- La experimentación con el equipo físico
- Guía Instruccional (Aula virtual)
- Otros:

¿Qué aspecto te resultó más difícil?

- Comprender el momento angular (dirección y cómo afecta a la precesión)
- Relación torque - diferencial de momento angular (dirección y cómo afecta a la precesión)
- Predicción de la dirección de precesión
- Predicción al modificar variables
- Otros:

Indica una mejora concreta para que la sesión práctica explique mejor el tema de giróscopo.

Versión para el grupo experimental

	Muy en desacuerdo	En desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Muy de acuerdo
Antes de comenzar la práctica de laboratorio, las actividades de simulación me hicieron sentir más interesado y/o con mayor curiosidad por el tema.					
La sesión de hoy (simulación + práctica) me ayudó a entender la relación momento angular – torque – precesión.					

Después de la sesión (simulación + práctica), me siento más capaz de predecir cambios cuando varían L , el torque y otras variables de la precesión					
Al terminar la sesión (simulación + práctica) me sentí preparado para responder el post-test					

¿Qué componente te ayudó más a comprender la precesión?

- La experimentación con el equipo físico
- Guía Instruccional (Aula virtual)
- Guía de simulación
- Otros:

¿Qué aspecto te resultó más difícil?

- Comprender el momento angular (dirección y cómo afecta a la precesión)
- Relación torque - diferencial de momento angular (dirección y cómo afecta a la precesión)
- Predicción de la dirección de precesión
- Predicción al modificar variables
- Otros:

A nivel general, ¿Cómo calificarías la guía + simulación para tu aprendizaje de giróscopo?

1



2



3



4



5



Indica una mejora concreta para que la sesión práctica explique mejor el tema de giróscopo.

Apéndice E: Código de R para el análisis de resultados (Prueba de dos niveles)

El siguiente código en R muestra los métodos estadísticos utilizados en este estudio para analizar la prueba de dos niveles. Se ofrece con objetivos de transparencia en cuanto a la metodología y para permitir que el estudio sea replicado.

```
# =====  
# CÓDIGO R PARA EL ANÁLISIS DE PRUEBA DE DOS NIVELES  
# Autor: Katherine Camacho  
# -----  
# Este script contiene todo el código utilizado para generar los resultados  
# presentados en el Capítulo 4. Está organizado de forma secuencial y lógica  
# para garantizar la reproducibilidad del análisis.  
# =====  
  
# =====  
# SECCIÓN 1: CONFIGURACIÓN INICIAL  
# -----  
# En esta sección se cargan todas las librerías necesarias, se define la ruta  
# del archivo de datos y se cargan los datos iniciales.  
  
# 1.1. Carga de Librerías  
# -----  
library(tidyverse) # Para manipulación de datos y gráficos (incluye ggplot2,  
dplyr)  
library(readxl) # Para leer archivos de Excel (.xlsx)  
library(psych) # Para análisis psicométrico (KR-20)  
library(hrbrthemes) # Para temas de gráficos estéticos  
library(ggrepel) # Para evitar solapamiento de etiquetas en gráficos  
library(knitr) # Para crear tablas con formato  
library(rstatix) # Para cálculos de tamaño del efecto  
library(rcompanion) # Para la prueba Scheiner-Ray-Hare  
library(patchwork) # Para combinar múltiples gráficos en una sola figura  
library(MASS) # Para modelos de regresión ordinal (función polr)  
library(boot) # Para bootstrapping (cálculo de intervalos de confianza)  
library(scales) # Para formatear ejes de gráficos (ej. porcentajes)  
library(stringr) # Para manipulación de texto  
select <- dplyr::select
```

```

# 1.2. Definición de la Ruta del Archivo y Carga de Datos
# -----
# IMPORTANTE: Modifica esta ruta para que apunte a la ubicación de tu archivo
Excel.
ruta_archivo_datos <- "C:/Users/Katherine/Desktop/MAESTRIA/TESIS/DATOS/2. DB
GENERAL GRUPO FINAL.xlsx"
datos <- read_excel(ruta_archivo_datos)

# 1.3. Definición de Plantillas y Paletas de Colores
# -----
# Plantilla con las respuestas correctas para cada pregunta
plantilla_respuestas <- c(
  P1 = "f", P2 = "b", P3 = "b",
  P4 = "c", P5 = "b", P6 = "d"
)

# Paletas de colores consistentes para los gráficos
colores_2_grupos <- c("CONTROL" = "#D55E00", "EXPERIMENTAL" = "#0072B2")
colores_3_modelos <- c(
  "Conocimiento Robusto" = "#009E73",
  "Conocimiento Superficial" = "#E69F00",
  "Respuesta Incorrecta" = "#D55E00"
)

# Tema gráfico personalizado para todos los gráficos de la tesis
mi_tema_tesis <- function() {
  hrbrthemes::theme_ipsum(base_family = "Arial") +
    theme(
      plot.title = element_text(size = 18, face = "bold", hjust = 0.5, color =
"#222222"),
      plot.subtitle = element_text(size = 14, hjust = 0.5, margin = margin(b =
15)),
      axis.title = element_text(size = 12, face = "bold", hjust = 0.5),
      legend.position = "top",
      strip.text = element_text(size = 12, face = "bold", hjust = 0.5) # Para
títulos en facet_wrap/grid
    )
}

# =====

```

```

# SECCIÓN 2: PREPARACIÓN Y CALIFICACIÓN DE DATOS
# =====
# Se califican las respuestas de opción múltiple (MCQ) y se crea un
# dataframe "largo" que facilita los análisis posteriores.

datos_calificados <- datos %>%
  mutate(
    # --- Calificación PRE-TEST ---
    MCQ_P1_PRE = ifelse(tolower(Resp_P1PRE) == plantilla_respuestas["P1"], 1, 0),
    MCQ_P2_PRE = ifelse(tolower(Resp_P2PRE) == plantilla_respuestas["P2"], 1, 0),
    MCQ_P3_PRE = ifelse(tolower(Resp_P3PRE) == plantilla_respuestas["P3"], 1, 0),
    MCQ_P4_PRE = ifelse(tolower(Resp_P4PRE) == plantilla_respuestas["P4"], 1, 0),
    MCQ_P5_PRE = ifelse(tolower(Resp_P5PRE) == plantilla_respuestas["P5"], 1, 0),
    MCQ_P6_PRE = ifelse(tolower(Resp_P6PRE) == plantilla_respuestas["P6"], 1, 0),
    # --- Calificación POST-TEST ---
    MCQ_P1_POS = ifelse(tolower(Resp_P1POS) == plantilla_respuestas["P1"], 1, 0),
    MCQ_P2_POS = ifelse(tolower(Resp_P2POS) == plantilla_respuestas["P2"], 1, 0),
    MCQ_P3_POS = ifelse(tolower(Resp_P3POS) == plantilla_respuestas["P3"], 1, 0),
    MCQ_P4_POS = ifelse(tolower(Resp_P4POS) == plantilla_respuestas["P4"], 1, 0),
    MCQ_P5_POS = ifelse(tolower(Resp_P5POS) == plantilla_respuestas["P5"], 1, 0),
    MCQ_P6_POS = ifelse(tolower(Resp_P6POS) == plantilla_respuestas["P6"], 1, 0)
  )

# Reestructuración a formato largo para análisis de coherencia y transiciones
mcq_long <- datos_calificados %>%
  select(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, starts_with("MCQ_")) %>%
  pivot_longer(cols = -c(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO), names_to = "temp", values_to = "N1_Score") %>%
  separate(temp, into = c("tipo", "Pregunta", "Test"), sep = "_")

jus_long <- datos_calificados %>%
  select(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, matches("^P\\d_(PRE|POS)")) %>%
  pivot_longer(cols = -c(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO), names_to = "temp", values_to = "N2_Score") %>%
  separate(temp, into = c("Pregunta", "Test"), sep = "_")

datos_largos_completos <- full_join(mcq_long, jus_long, by =
c("NOMBRE_ESTUDIANTE", "GRUPO", "Pregunta", "Test")) %>%
  na.omit()

```

```

# =====
# SECCIÓN 3: FIABILIDAD Y CALIDAD DEL INSTRUMENTO (KR-20)
# =====
# Análisis psicométrico para evaluar la consistencia interna del cuestionario.

# 3.1. Función Auxiliar para Análisis
# -----
analizar_fiabilidad <- function(items_df, nombre_test) {
  cat("=====\n")
  cat(" ANÁLISIS PSICOMÉTRICO PARA:", nombre_test, "\n")
  cat("=====\n\n")
  items_df <- na.omit(items_df)
  fiabilidad <- psych::alpha(items_df, check.keys = FALSE)
  cat("1. FIABILIDAD GENERAL (KR-20 / Alpha de Cronbach):\n")
  cat("   - Alpha:", round(fiabilidad$total$raw_alpha, 4), "\n\n")
  cat("2. ESTADÍSTICAS POR ÍTEM:\n")
  stats_items <- fiabilidad$item.stats %>%
    select(n, mean, r.drop) %>%
    rename(Dificultad = mean, Discriminacion = r.drop)
  print(round(stats_items, 3))
  return(fiabilidad)
}

# 3.2. Ejecución del Análisis de Fiabilidad
# -----
# Preparación de los dataframes de ítems
items_mcq_pre <- datos_calificados %>% select(starts_with("MCQ_") &
ends_with("_PRE"))
items_jus_pre <- datos_calificados %>% select(matches("^P\\d_PRE"))
items_mcq_pos <- datos_calificados %>% select(starts_with("MCQ_") &
ends_with("_POS"))
items_jus_pos <- datos_calificados %>% select(matches("^P\\d_POS"))

# Cálculo y muestra de resultados
analisis_mcq_pre_obj <- analizar_fiabilidad(items_mcq_pre, "Respuestas MCQ PRE-
TEST")
analisis_jus_pre_obj <- analizar_fiabilidad(items_jus_pre, "Justificaciones PRE-
TEST")
analisis_mcq_pos_obj <- analizar_fiabilidad(items_mcq_pos, "Respuestas MCQ POST-
TEST")

```

```

 analisis_jus_pos_obj  <-  analizar_fiabilidad(items_jus_pos,  "Justificaciones
 POST-TEST")
 analizar_fiabilidad(cbind(items_mcq_pre,  items_jus_pre),  "Test Combinado PRE-
 TEST (12 ítems)")
 analizar_fiabilidad(cbind(items_mcq_pos,  items_jus_pos),  "Test Combinado POST-
 TEST (12 ítems)")

# 3.3. Gráfico de Dificultad vs. Discriminación (Nivel 1)
# -----
 stats_mcq <-  rbind(
   analisis_mcq_pre_obj$item.stats  %>%  mutate(Test  =  "Pre-Test",  Item  =
 rownames(.)),
   analisis_mcq_pos_obj$item.stats  %>%  mutate(Test  =  "Post-Test",  Item  =
 rownames(.))
 ) %>%
   rename(Dificultad = mean, Discriminacion = r.drop) %>%
   mutate(Item = gsub("MCQ_|_PRE|_POS", "", Item))

 grafico_dificultad_discriminacion <-  ggplot(stats_mcq, aes(x = Dificultad, y =
 Discriminacion)) +
   annotate("rect", xmin = -Inf, xmax = Inf, ymin = -Inf, ymax = 0.2, fill =
 "firebrick", alpha = 0.1) +
   annotate("rect", xmin = 0.3, xmax = 0.8, ymin = 0.2, ymax = Inf, fill =
 "seagreen", alpha = 0.1) +
   geom_point(aes(color = Test, shape = Test), size = 4, alpha = 0.8) +
   geom_text_repel(aes(label = Item, color = Test), size = 3.5, fontface = "bold",
 max.overlaps = 15) +
   geom_hline(yintercept = 0.2, linetype = "dashed", color = "gray30") +
   scale_color_manual(values = c("Pre-Test" = colores_2_grupos["CONTROL"], "Post-
 Test" = colores_2_grupos["EXPERIMENTAL"])) +
   scale_shape_manual(values = c("Pre-Test" = 17, "Post-Test" = 16)) +
   labs(
     title = "Comparación de Dificultad vs. Discriminación",
     subtitle = "Nivel 1: Respuestas de opción múltiple",
     x = "Índice de Dificultad (Proporción de aciertos)",
     y = "Índice de Discriminación (Correlación ítem-test)"
   ) +
   mi_tema_tesis()

 print(grafico_dificultad_discriminacion)

```

```

# =====
# SECCIÓN 4: ANÁLISIS DE EQUIVALENCIA INICIAL DE GRUPOS
# =====
# Se verifica si los grupos Control y Experimental son comparables antes de la
# intervención en términos de rendimiento académico y conocimientos previos.

# 4.1. Rendimiento Académico Previo (Calificación Parcial 1)
# -----
cat("\n--- 4.1. ANÁLISIS DE EQUIVALENCIA: RENDIMIENTO PREVIO (PARCIAL 1) ---\n")
# a) Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)
shapiro_control <- shapiro.test(filter(datos, GRUPO == "CONTROL")$PARCIAL1)
shapiro_exp <- shapiro.test(filter(datos, GRUPO == "EXPERIMENTAL")$PARCIAL1)
cat("Shapiro-Wilk p-value (Control):", shapiro_control$p.value, "\n")
cat("Shapiro-Wilk p-value (Experimental):", shapiro_exp$p.value, "\n")

# b) Prueba T de Welch (ya que los datos son normales)
t_test_parcial1 <- t.test(PARCIAL1 ~ GRUPO, data = datos)
cat("\nResultado de la Prueba T de Welch para Parcial 1:\n")
print(t_test_parcial1)

# c) Gráfico de Distribución
hist_parcial1 <- ggplot(datos, aes(x = PARCIAL1)) +
  geom_histogram(aes(y = ..density..), binwidth = 8, fill =
colores_2_grupos["EXPERIMENTAL"], color = "white", alpha = 0.8) +
  geom_density(color = colores_2_grupos["CONTROL"], size = 1.2) +
  facet_wrap(~ GRUPO) +
  labs(title = "Distribución del Rendimiento Previo (Parcial 1)", x =
"Calificación", y = "Densidad") +
  mi_tema_tesis()
print(hist_parcial1)

# 4.2. Conocimientos Previos (Resultados del Pre-Test)
# -----
cat("\n\n--- 4.2. ANÁLISIS DE EQUIVALENCIA: CONOCIMIENTOS PREVIOS (PRE-TEST) ---
\n")
# a) Prueba U de Mann-Whitney para Respuestas (Nivel 1)
cat("\nPrueba U de Mann-Whitney para Pre-Test Nivel 1 (Respuestas):\n")
wilcox_test_resp_pre <- wilcox.test(PRE_RESP ~ GRUPO, data = datos)
print(wilcox_test_resp_pre)

```

```

# b) Prueba U de Mann-Whitney para Justificaciones (Nivel 2)
cat("\nPrueba U de Mann-Whitney para Pre-Test Nivel 2 (Justificaciones):\n")
wilcox_test_jus_pre <- wilcox.test(PRE_JUS ~ GRUPO, data = datos)
print(wilcox_test_jus_pre)

# =====
# SECCIÓN 5: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA INTERVENCIÓN
# =====
# Se mide el impacto de la intervención usando la ganancia de Hake, el tamaño
# del efecto y el análisis de interacciones.

# 5.1. Ganancia de Aprendizaje (Hake)
# -----
cat("\n--- 5.1. GANANCIA DE APRENDIZAJE (HAKE) ---\n")
# a) Limpieza de datos (Hake no es calculable si PRE_TEST = 100)
datos_hake <- datos %>%
  mutate(HAKE_RESP = as.numeric(HAKE_RESP), HAKE_JUS = as.numeric(HAKE_JUS)) %>%
  filter(is.finite(HAKE_RESP) & is.finite(HAKE_JUS))

# b) Tabla descriptiva
tabla_hake <- datos_hake %>%
  group_by(GRUPO) %>%
  summarise(
    N = n(),
    Media_Hake_Resp = mean(HAKE_RESP, na.rm = TRUE),
    DE_Hake_Resp = sd(HAKE_RESP, na.rm = TRUE),
    Media_Hake_Jus = mean(HAKE_JUS, na.rm = TRUE),
    DE_Hake_Jus = sd(HAKE_JUS, na.rm = TRUE)
  )
cat("\nTabla Descriptiva de Ganancia de Hake:\n")
print(kable(tabla_hake, digits = 3))

# c) Pruebas de hipótesis (Mann-Whitney)
wilcox_hake_resp <- wilcox.test(HAKE_RESP ~ GRUPO, data = datos_hake)
wilcox_hake_jus <- wilcox.test(HAKE_JUS ~ GRUPO, data = datos_hake)
cat("\nMann-Whitney para Hake Nivel 1 (p-valor):", wilcox_hake_resp$p.value,
"\n")
cat("Mann-Whitney para Hake Nivel 2 (p-valor):", wilcox_hake_jus$p.value, "\n")
print(wilcox_hake_jus)

```

```

# d) Gráficos de cajas
boxplot_hake_resp <- ggplot(datos_hake, aes(x = GRUPO, y = HAKE_RESP, fill =
GRUPO)) +
  geom_boxplot(alpha = 0.8) + geom_jitter(width = 0.1, alpha = 0.3) +
  scale_fill_manual(values = colores_2_grupos) +
  labs(title = "Ganancia de Hake (Nivel 1)", x = "Grupo", y = "Ganancia Normalizada
(g)") +
  mi_tema_tesis() + theme(legend.position = "none")

boxplot_hake_jus <- ggplot(datos_hake, aes(x = GRUPO, y = HAKE_JUS, fill = GRUPO))
+
  geom_boxplot(alpha = 0.8) + geom_jitter(width = 0.1, alpha = 0.3) +
  scale_fill_manual(values = colores_2_grupos) +
  labs(title = "Ganancia de Hake (Nivel 2)", x = "Grupo", y = "Ganancia Normalizada
(g)") +
  mi_tema_tesis() + theme(legend.position = "none")

print(boxplot_hake_resp)
print(boxplot_hake_jus)

# 5.2. Tamaño del Efecto
# -----
cat("\n\n--- 5.2. TAMAÑO DEL EFECTO ---\n")
effect_size_resp <- datos_hake %>% wilcox_effsize(HAKE_RESP ~ GRUPO)
effect_size_jus <- datos_hake %>% wilcox_effsize(HAKE_JUS ~ GRUPO)
cat("Tamaño del efecto para Hake Nivel 1 (r):\n"); print(effect_size_resp)
cat("\nTamaño del efecto para Hake Nivel 2 (r):\n"); print(effect_size_jus)

# 5.3. Análisis de Interacciones
# -----
cat("\n\n--- 5.3. ANÁLISIS DE INTERACCIONES (SCHEIRER-RAY-HARE) ---\n")
datos_interaccion <- datos %>%
  mutate(GRUPO = as.factor(GRUPO), REP = as.factor(REP), HAKE_RESP =
as.numeric(HAKE_RESP)) %>%
  drop_na(HAKE_RESP, GRUPO, PRE_RESP, REP, PARCIAL1)

# a) Pruebas estadísticas (descomentadas para revisión)
# print(scheirerRayHare(HAKE_RESP ~ GRUPO * PRE_RESP, data = datos_interaccion))
# print(scheirerRayHare(HAKE_RESP ~ GRUPO * REP, data = datos_interaccion))
# print(scheirerRayHare(HAKE_RESP ~ GRUPO * PARCIAL1, data = datos_interaccion))

```

```

# b) Gráfico de interacciones
g1 <- ggplot(datos_interaccion, aes(x = PRE_RESP, y = HAKE_RESP, color = GRUPO))
+
  geom_point(alpha = 0.4) + geom_smooth(method = "lm", se = FALSE, size = 1.2) +
  scale_color_manual(values = colores_2_grupos) +
  labs(title = "Grupo x Conocimiento Previo", x = "Pre-Test", y = "Ganancia Hake")
+ mi_tema_tesis()

g2 <- ggplot(datos_interaccion, aes(x = REP, y = HAKE_RESP, color = GRUPO, group
= GRUPO)) +
  stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.1) +
  stat_summary(fun = mean, geom = "point", size = 4) + stat_summary(fun = mean,
geom = "line", size = 1.2) +
  scale_color_manual(values = colores_2_grupos) +
  labs(title = "Grupo x Condición de Repetidor", x = "Repetidor (0=No, 1=Sí)", y
= "") + mi_tema_tesis()

g3 <- ggplot(datos_interaccion, aes(x = PARCIAL1, y = HAKE_RESP, color = GRUPO))
+
  geom_point(alpha = 0.4) + geom_smooth(method = "lm", se = FALSE, size = 1.2) +
  scale_color_manual(values = colores_2_grupos) +
  labs(title = "Grupo x Rendimiento Académico", x = "Nota Parcial 1", y = "") +
mi_tema_tesis()

grafico_final_interacciones <- (g1 + g2 + g3) +
  plot_layout(guides = 'collect') &
  theme(legend.position = 'top') &
  plot_annotation(
    title = 'Análisis Visual de Interacciones sobre la Ganancia de Aprendizaje',
    subtitle = 'Comparación de la efectividad del tratamiento en diferentes
subgrupos',
    theme = mi_tema_tesis())$theme
)
print(grafico_final_interacciones)

# =====
# SECCIÓN 6: TRANSFORMACIÓN DE MODELOS MENTALES
# =====
# Análisis detallado de cómo cambiaron los modelos mentales de los estudiantes,

```

```

# evaluando coherencia, transiciones y patrones de error.

# 6.1. Coherencia General de las Respuestas (N2 | N1)
# -----
cat("\n\n--- 6.1. COHERENCIA GENERAL (N2 | N1) ---\n")
# a) Tabla de coherencia
tabla_coherencia_general <- datos_largos_completos %>%
  group_by(GRUPO, Test) %>%
  summarise(
    N_N1 = sum(N1_Score == 1),
    N_N2_dado_N1 = sum(N1_Score == 1 & N2_Score == 1)
  ) %>%
  mutate(Proporcion = N_N2_dado_N1 / N_N1)
cat("\nTabla de Coherencia General:\n"); print(kable(tabla_coherencia_general,
digits=3))

# b) Prueba de proporciones para el Post-Test
conteo_pos <- filter(tabla_coherencia_general, Test == "POS")
test_prop_coherencia <- prop.test(x = conteo_pos$N_N2_dado_N1, n =
conteo_pos$N_N1)
cat("\nPrueba de Proporciones para Coherencia en Post-Test:\n");
print(test_prop_coherencia)

# 6.2. Coherencia a Nivel Individual
# -----
cat("\n\n--- 6.2. ÍNDICE DE COHERENCIA INDIVIDUAL ---\n")
indice_individual <- datos_largos_completos %>%
  group_by(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, Test) %>%
  summarise(
    N_N1 = sum(N1_Score == 1),
    N_N1_N2 = sum(N1_Score == 1 & N2_Score == 1), .groups = "drop"
  ) %>%
  mutate(coh_ind = ifelse(N_N1 == 0, NA, N_N1_N2 / N_N1))

# a) Tabla resumen
tabla_resumen_individual <- indice_individual %>%
  group_by(GRUPO, Test) %>%
  summarise(N = n(), Media = mean(coh_ind, na.rm = TRUE), Mediana =
median(coh_ind, na.rm = TRUE), DE = sd(coh_ind, na.rm = TRUE))

```

```

cat("Tabla Resumen del Índice Individual de Coherencia:\n");
print(kable(tabla_resumen_individual, digits=3))

# b) Prueba de Mann-Whitney para el Post-Test
test_coh_ind <- indice_individual %>% filter(Test == "POS") %>%
wilcox.test(coh_ind ~ GRUPO, data = .)
cat("\nPrueba Mann-Whitney para Índice Individual (Post-Test):\n");
print(test_coh_ind)

# =====
# SECCIÓN 7: ANÁLISIS DE NIVELES DE COMPRENSIÓN POR PREGUNTA
# =====
# Este análisis visualiza la distribución de respuestas en tres categorías:
# Conocimiento Robusto, Conocimiento Superficial y Respuesta Incorrecta,
# permitiendo una comparación directa entre grupos y momentos del test.

cat("\n\n--- 7. ANÁLISIS DE NIVELES DE COMPRENSIÓN (GRÁFICO 2X2) ---\n")

# 7.1. Clasificación de cada respuesta en una de las 3 categorías
#-----
datos_categorias <- datos_largos_completos %>%
  mutate(
    Categoria = case_when(
      N1_Score == 0 ~ "Respuesta Incorrecta",
      N1_Score == 1 & N2_Score == 0 ~ "Conocimiento Superficial",
      N1_Score == 1 & N2_Score == 1 ~ "Conocimiento Robusto"
    ),
    # Convertimos a factor para ordenar las categorías y el test en el gráfico
    Categoria = factor(Categoria, levels = c("Conocimiento Robusto",
"Conocimiento Superficial", "Respuesta Incorrecta")),
    Test = factor(Test, levels = c("PRE", "POS"), labels = c("Pre-Test", "Post-
Test"))
  )

# 7.2. Generación del gráfico de barras apiladas al 100%
#-----
grafico_comprension_por_pregunta <- ggplot(datos_categorias, aes(x = Pregunta,
fill = Categoria)) +
  geom_bar(position = "fill") +
  # Facet_grid crea la matriz 2x2 para comparar GRUPO vs Test

```

```

facet_grid(GRUPO ~ Test) +
scale_y_continuous(labels = scales::percent_format()) +
scale_fill_manual(values = colores_3_modelos, name = "Nivel de Comprensión:")
+
labs(
  title = "Distribución del Nivel de Comprensión por Pregunta",
  subtitle = "Comparación entre grupos y momentos de la evaluación",
  x = "Pregunta",
  y = "Porcentaje de Estudiantes"
) +
mi_tema_tesis() +
theme(strip.background = element_rect(fill = "#EFEFEF", color = "black", size
= 0.5))

print(grafico_comprension_por_pregunta)

# =====
# SECCIÓN 8: ANÁLISIS DE RUTAS DE APRENDIZAJE (TRANSICIONES)
# =====
# Esta sección analiza si los estudiantes lograron transiciones de conocimiento
# exitosas entre el Pre-Test y el Post-Test. Se evalúan dos rutas clave:
# 1. Profundización: De Conocimiento Superficial (S) a Robusto (R).
# 2. Adquisición: De Respuesta Incorrecta (I) a Conocimiento Robusto (R).

cat("\n\n--- 8. ANÁLISIS DE RUTAS DE APRENDIZAJE (TRANSICIONES) ---\n")

# 8.1. Ruta 1: Transición de Superficial a Robusto (S -> R)
#-----
# a) Clasificar el estado de cada estudiante por pregunta
transiciones_SR_por_pregunta <- datos_largos_completos %>%
  mutate(
    Categoria = case_when(
      N1_Score == 1 & N2_Score == 0 ~ "Superficial",
      N1_Score == 1 & N2_Score == 1 ~ "Robusto",
      TRUE ~ "Otro"
    )
  ) %>%
  select(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, Pregunta, Test, Categoria) %>%
  pivot_wider(names_from = Test, values_from = Categoria)

```

```

# b) Clasificar a cada estudiante según su transición global
estudiantes_clasificados_SR <- transiciones_SR_por_pregunta %>%
  group_by(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO) %>%
  summarise(
    hizo_transicion_exitosa = any(PRE == "Superficial" & POS == "Robusto", na.rm
= TRUE),
    era_candidato = any(PRE == "Superficial", na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  ) %>%
  mutate(
    Categoria_Final = case_when(
      hizo_transicion_exitosa ~ "Transición Exitosa",
      !hizo_transicion_exitosa & era_candidato ~ "Transición No Exitosa",
      !era_candidato ~ "No aplica"
    ),
    Categoria_Final = factor(Categoria_Final, levels = c("Transición Exitosa",
"Transición No Exitosa", "No aplica"))
  )

# c) Gráfico de la transición S -> R
grafico_transicion_SR <- ggplot(estudiantes_clasificados_SR, aes(x = GRUPO, fill
= Categoria_Final)) +
  geom_bar(position = "fill") +
  geom_text(
    aes(label = after_stat(scales::percent(count / tapply(count, x, sum)[x],
accuracy = 1))),
    stat = "count", position = position_fill(vjust = 0.5),
    family = "Arial", fontface = "bold", size = 5
  ) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent_format()) +
  scale_fill_manual(values = c("Transición Exitosa" = "#009E73", "Transición No
Exitosa" = "#E69F00", "No aplica" = "grey80"), name = "Resultado del Estudiante:")
+
  labs(
    title = "Ruta de Aprendizaje 1: Profundización (S→R)",
    subtitle = "Estudiantes que transitaron de Conocimiento Superficial a
Robusto",
    x = "Grupo",
    y = "Porcentaje de Estudiantes"
  ) +

```

```

mi_tema_tesis()

print(grafico_transicion_SR)

# d) Prueba de Chi-cuadrado para la transición S -> R
cat("\n\n--- Prueba de Hipótesis para la Transición S -> R ---\n")
datos_test_SR <- estudiantes_clasificados_SR %>%
  filter(Categoria_Final != "No aplica") %>%
  droplevels()

tabla_contingencia_SR <- table(datos_test_SR$GRUPO,
  datos_test_SR$Categoria_Final)
cat("\nTabla de Contingencia (S -> R):\n")
print(tabla_contingencia_SR)
cat("\nResultado de la Prueba Chi-cuadrado:\n")
print(chisq.test(tabla_contingencia_SR))

# 8.2. Ruta 2: Transición de Incorrecto a Robusto (I -> R)
#-----
# a) Clasificar el estado de cada estudiante por pregunta
transiciones_IR_por_pregunta <- datos_largos_completos %>%
  mutate(
    Categoria = case_when(
      N1_Score == 0 ~ "Incorrecto",
      N1_Score == 1 & N2_Score == 1 ~ "Robusto",
      TRUE ~ "Otro"
    )
  ) %>%
  select(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, Pregunta, Test, Categoria) %>%
  pivot_wider(names_from = Test, values_from = Categoria)

# b) Clasificar a cada estudiante según su transición global
estudiantes_clasificados_IR <- transiciones_IR_por_pregunta %>%
  group_by(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO) %>%
  summarise(
    hizo_transicion_exitosa = any(PRE == "Incorrecto" & POS == "Robusto", na.rm
= TRUE),
    era_candidato = any(PRE == "Incorrecto", na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  ) %>%

```

```

mutate(
  Categoria_Final = case_when(
    hizo_transicion_exitosa ~ "Transición Exitosa",
    !hizo_transicion_exitosa & era_candidato ~ "Transición No Exitosa",
    !era_candidato ~ "No aplica"
  ),
  Categoria_Final = factor(Categoria_Final, levels = c("Transición Exitosa",
"Transición No Exitosa", "No aplica"))
)

# c) Gráfico de la transición I -> R
grafico_transicion_IR <- ggplot(estudiantes_clasificados_IR, aes(x = GRUPO, fill
= Categoria_Final)) +
  geom_bar(position = "fill") +
  geom_text(
    aes(label = after_stat(scales::percent(count / tapply(count, x, sum)[x],
accuracy = 1))),
    stat = "count", position = position_fill(vjust = 0.5),
    family = "Arial", fontface = "bold", size = 5
  ) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent_format()) +
  scale_fill_manual(values = c("Transición Exitosa" = "#009E73", "Transición No
Exitosa" = "#E69F00", "No aplica" = "grey80"), name = "Resultado del Estudiante:")
+
  labs(
    title = "Ruta de Aprendizaje 2: Adquisición (I→R)",
    subtitle = "Estudiantes que transitaron de una Respuesta Incorrecta a
Conocimiento Robusto",
    x = "Grupo",
    y = "Porcentaje de Estudiantes"
  ) +
  mi_tema_tesis()

print(grafico_transicion_IR)

# d) Prueba de Chi-cuadrado para la transición I -> R
cat("\n\n--- Prueba de Hipótesis para la Transición I -> R ---\n")
datos_test_IR <- estudiantes_clasificados_IR %>%
  filter(Categoria_Final != "No aplica") %>%
  droplevels()

```

```

tabla_contingencia_IR          <-          table(datos_test_IR$GRUPO,
datos_test_IR$Categoria_Final)
cat("\nTabla de Contingencia (I -> R):\n")
print(tabla_contingencia_IR)
cat("\nResultado de la Prueba Chi-cuadrado:\n")
print(chisq.test(tabla_contingencia_IR))

# =====
# SECCIÓN 9: ANÁLISIS DE DISTRACTORES
# =====
# Esta sección analiza cómo cambia la selección de respuestas (tanto correctas
# como incorrectas/distractores) del Pre-Test al Post-Test. Ayuda a
# identificar conceptos erróneos comunes y persistentes.

cat("\n\n--- 9. ANÁLISIS DE DISTRACTORES ---\n")

# 9.1. Preparación de datos de respuestas
#-----
datos_respuestas <- datos %>%
  select(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, starts_with("RESP_")) %>% #
  pivot_longer(
    cols = -c(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO),
    names_to = "columna_original",
    values_to = "Alternativa"
  ) %>%
  mutate(
    Pregunta = str_extract(columna_original, "P\\d"),
    Test = str_extract(columna_original, "PRE|POS")
  ) %>%
  filter(!is.na(Alternativa) & !is.na(Pregunta))

# 9.2. Tabla de frecuencias de selección de alternativas
#-----
tabla_distractores <- datos_respuestas %>%
  group_by(GRUPO, Test, Pregunta, Alternativa) %>%
  summarise(Conteo = n(), .groups = "drop") %>%
  group_by(GRUPO, Test, Pregunta) %>%
  mutate(Porcentaje = Conteo / sum(Conteo)) %>%
  ungroup() %>%

```

```

select(GRUPO, Test, Pregunta, Alternativa, Porcentaje) %>%
unite("Grupo_Test", GRUPO, Test) %>%
pivot_wider(names_from = Grupo_Test, values_from = Porcentaje, values_fill = 0)
%>%
mutate(
  Respuesta_Correcta = plantilla_respuestas[Pregunta],
  Es_Correcta = ifelse(Alternativa == Respuesta_Correcta, "Sí", "")
) %>%
arrange(Pregunta, Alternativa) %>%
select(Pregunta, Alternativa, Es_Correcta, CONTROL_PRE, EXPERIMENTAL_PRE,
CONTROL_POS, EXPERIMENTAL_POS)

cat("\n--- Tabla de Porcentajes de Selección de Alternativas ---\n\n")
print(kable(tabla_distractores,
            digits = 2,
            col.names = c("Pregunta", "Alt.", "Correcta", "Control PRE", "Exp.
PRE", "Control POST", "Exp. POST"),
            caption = "Porcentaje de estudiantes que eligieron cada
alternativa."))

# 9.3. Gráfico de "dumbbell" para el análisis de distractores por pregunta
#-----
datos_para_grafico_distractores <- datos_respuestas %>%
  group_by(GRUPO, Test, Pregunta, Alternativa) %>%
  summarise(Conteo = n(), .groups = "drop") %>%
  group_by(GRUPO, Test, Pregunta) %>%
  mutate(Porcentaje = Conteo / sum(Conteo)) %>%
  ungroup() %>%
  select(-Conteo) %>%
  pivot_wider(names_from = Test, values_from = Porcentaje, values_fill = 0) %>%
  mutate(EsCorrecta = ifelse(Alternativa == plantilla_respuestas[Pregunta],
"Correcta", "Incorrecta"))

for (pregunta_actual in paste0("P", 1:6)) {

  grafico_individual_exp <- datos_para_grafico_distractores %>%
    filter(GRUPO == "EXPERIMENTAL", Pregunta == pregunta_actual) %>%
    filter(PRE > 0 | POS > 0) %>%
    ggplot(aes(y = Alternativa, color = EsCorrecta)) +
    geom_segment(aes(x = PRE, xend = POS, yend = Alternativa),

```

```

        arrow = arrow(length = unit(0.3, "cm")), size = 1.2, alpha =
0.8) +
  geom_point(aes(x = PRE), size = 4, shape = 1) +
  geom_point(aes(x = POS), size = 4, shape = 16) +
  scale_color_manual(values = c("Correcta" = "#009E73", "Incorrecta" =
"#D55E00")) +
  scale_x_continuous(labels = scales::percent_format(), limits = c(0, 1)) +
  labs(
    title = paste("Análisis de Distractores para la Pregunta",
pregunta_actual),
    subtitle = "Grupo Experimental",
    x = "Porcentaje de Estudiantes",
    y = "Alternativa de Respuesta",
    caption = "○ Pre-Test    ● Post-Test"
  ) +
  mi_tema_tesis() +
  theme(legend.position = "none")

print(grafico_individual_exp)
}

# =====
# SECCIÓN 10: DIAGRAMA DE CONCENTRACIÓN DE BAO
# =====
# El diagrama de Bao es una herramienta de visualización avanzada que mapea
# el rendimiento de los estudiantes (eje X) contra la consistencia de sus
# errores (eje Y). Permite clasificar los modelos mentales de los estudiantes
# en categorías como "Experto", "Novato (Adivinando)" o "Modelo Único Incorrecto".

cat("\n\n--- 10. DIAGRAMA DE CONCENTRACIÓN DE BAO ---\n")

# 10.1. Diagrama de Bao a Nivel de Estudiante
#-----
# a) Calcular S y C para cada estudiante
N_items <- 6 # Número total de preguntas
M <- datos_respuestas %>%
  filter(Alternativa != plantilla_respuestas[Pregunta]) %>%
  pull(Alternativa) %>%
  unique() %>%
  length() # Número total de distractores

```

```

datos_bao_individual <- datos_respuestas %>%
  mutate(EsCorrecta = ifelse(Alternativa == plantilla_respuestas[Pregunta], 1,
0)) %>%
  group_by(NOMBRE_ESTUDIANTE, GRUPO, Test) %>%
  summarise(
    S = mean(EsCorrecta, na.rm = TRUE),
    respuestas_incorrectas = list(Alternativa[EsCorrecta == 0]),
    total_incorrectas = length(respuestas_incorrectas[[1]]),
    suma_proporciones_cuadrado = if (total_incorrectas > 1) {
      tibble(alternativa = respuestas_incorrectas[[1]]) %>%
        count(alternativa) %>%
        mutate(prop = n / total_incorrectas) %>%
        summarise(sum_sq = sum(prop^2)) %>%
        pull(sum_sq)
    } else if (total_incorrectas == 1) { 1.0 } else { NA },
    C = (N_items / (N_items - 1)) * (suma_proporciones_cuadrado - (1 / M)),
    .groups = "drop"
  ) %>%
  mutate(C = ifelse(is.na(C), 0, C), C = pmin(pmax(C, 0), 1)) # Limitar C entre
0 y 1

# b) Generar gráficos de Bao (Pre y Post)
grafico_bao_pre <- datos_bao_individual %>%
  filter(Test == "PRE") %>%
  ggplot(aes(x = S, y = C, color = GRUPO)) +
  geom_jitter(width = 0.02, height = 0.02, alpha = 0.7, size = 3) +
  geom_vline(xintercept = 0.5, linetype = "dashed", color = "gray50") +
  geom_hline(yintercept = 0.5, linetype = "dashed", color = "gray50") +
  annotate("text", x = 0.25, y = 0.75, label = "Modelo Único\nIncorrecto", color
= "gray30", fontface="italic") +
  annotate("text", x = 0.25, y = 0.25, label = "Novato\n(Adivinando)", color =
"gray30", fontface="italic") +
  annotate("text", x = 0.75, y = 0.75, label = "Modelo Mixto", color = "gray30",
fontface="italic") +
  annotate("text", x = 0.75, y = 0.25, label = "Experto", color = "gray30",
fontface="italic") +
  scale_color_manual(values = colores_2_grupos, name = "Grupo:") +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 1), labels = scales::percent) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 1)) +

```

```

labs(title = "Diagrama de Concentración de Bao (Pre-Test)",
      subtitle = "Cada punto representa un estudiante",
      x = "Puntaje (S)", y = "Concentración (C)") +
mi_tema_tesis()

grafico_bao_pos <- datos_bao_individual %>%
  filter(Test == "POS") %>%
  ggplot(aes(x = S, y = C, color = GRUPO)) +
  geom_jitter(width = 0.02, height = 0.02, alpha = 0.7, size = 3) +
  geom_vline(xintercept = 0.5, linetype = "dashed", color = "gray50") +
  geom_hline(yintercept = 0.5, linetype = "dashed", color = "gray50") +
  annotate("text", x = 0.25, y = 0.75, label = "Modelo Único\nIncorrecto", color =
"gray30", fontface="italic") +
  annotate("text", x = 0.25, y = 0.25, label = "Novato\n(Adivinando)", color =
"gray30", fontface="italic") +
  annotate("text", x = 0.75, y = 0.75, label = "Modelo Mixto", color = "gray30",
fontface="italic") +
  annotate("text", x = 0.75, y = 0.25, label = "Experto", color = "gray30",
fontface="italic") +
  scale_color_manual(values = colores_2_grupos, name = "Grupo:") +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 1), labels = scales::percent) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 1)) +
  labs(title = "Diagrama de Concentración de Bao (Post-Test)",
      subtitle = "Cada punto representa un estudiante",
      x = "Puntaje (S)", y = "Concentración (C)") +
mi_tema_tesis()

print(grafico_bao_pre)
print(grafico_bao_pos)

# 10.2. Diagrama de Bao a Nivel de Pregunta
#-----
cat("\n\n--- 10.2. Diagrama de Bao a Nivel de Pregunta ---\n")

# a) Definir el número de opciones por pregunta
num_opciones <- c("P1" = 8, "P2" = 4, "P3" = 4, "P4" = 4, "P5" = 4, "P6" = 4)
opciones_df <- enframe(num_opciones, name = "Pregunta", value = "m")

# b) Calcular S y C para cada pregunta, grupo y test
datos_bao_por_pregunta <- datos_respuestas %>%

```

```

mutate(EsCorrecta = ifelse(Alternativa == plantilla_respuestas[Pregunta], 1,
0)) %>%
group_by(GRUPO, Test, Pregunta) %>%
summarise(
  S = mean(EsCorrecta, na.rm = TRUE),
  qsum = if (sum(EsCorrecta == 0) > 0) {
    tibble(alt = Alternativa[EsCorrecta == 0]) %>%
    count(alt, name = "n") %>%
    mutate(prop = n / sum(n)) %>%
    summarise(sum_sq = sum(prop^2)) %>%
    pull(sum_sq)
  } else { 0 },
  .groups = "drop"
) %>%
left_join(opciones_df, by = "Pregunta") %>%
mutate(
  sumsq_all = S^2 + (1 - S)^2 * qsum,
  C = (m * sumsq_all - 1) / (m - 1),
  C = pmin(pmax(C, 0), 1) # Asegurar que C esté entre 0 y 1
)

# c) Calcular los promedios para la flecha de transición
promedios_bao <- datos_bao_por_pregunta %>%
group_by(GRUPO, Test) %>%
summarise(
  S_promedio = mean(S, na.rm = TRUE),
  C_promedio = mean(C, na.rm = TRUE),
  .groups = "drop"
) %>%
pivot_wider(names_from = Test, values_from = c(S_promedio, C_promedio))

# d) Generar las curvas límite teóricas
s_curve <- seq(0, 1, by = 0.001)
curvas_limite_p1 <- tibble(S = s_curve, Cmax = (8 * (s_curve^2 + (1 - s_curve)^2)
- 1) / 7, Cmin = (8 * (s_curve^2 + (1 - s_curve)^2 / 7) - 1) / 7)
curvas_limite_p2_6 <- tibble(S = s_curve, Cmax = (4 * (s_curve^2 + (1 - s_curve)^2)
- 1) / 3, Cmin = (4 * (s_curve^2 + (1 - s_curve)^2 / 3) - 1) / 3)

# e) Plantilla base para el gráfico
base_plot <- ggplot() +

```

```

    geom_ribbon(data = curvas_limite_p2_6, aes(x = S, ymin = Cmin, ymax = Cmax),
fill = "grey90", alpha = 0.8) +
    geom_ribbon(data = curvas_limite_p1, aes(x = S, ymin = Cmin, ymax = Cmax), fill
= "grey80", alpha = 0.6) +
    scale_shape_manual(values = c("PRE" = 21, "POS" = 24), name = "Test:", labels
= c("Pre-Test", "Post-Test")) +
    scale_x_continuous(labels = scales::percent_format(accuracy = 1), limits = c(0,
1)) +
    scale_y_continuous(limits = c(0, 1)) +
    labs(x = "Puntaje (S)", y = "Concentración (C)") +
    mi_tema_tesis()

```

f) Generar el gráfico para el GRUPO CONTROL

```

grafico_bao_control <- base_plot +
    geom_point(data = filter(datos_bao_por_pregunta, GRUPO == "CONTROL"), aes(x =
S, y = C, shape = Test, fill = Test), size = 4, color =
colores_2_grupos["CONTROL"], alpha = 0.7) +
    geom_text_repel(data = filter(datos_bao_por_pregunta, GRUPO == "CONTROL"),
aes(x = S, y = C, label = Pregunta), fontface = "bold", size = 3.5, color =
colores_2_grupos["CONTROL"], box.padding = 0.4) +
    geom_point(data = filter(promedios_bao, GRUPO == "CONTROL"), aes(x =
S_promedio_PRE, y = C_promedio_PRE), size = 4, shape = 22, fill = "black") +
    geom_point(data = filter(promedios_bao, GRUPO == "CONTROL"), aes(x =
S_promedio_POS, y = C_promedio_POS), size = 4, shape = 23, fill = "black") +
    geom_segment(data = filter(promedios_bao, GRUPO == "CONTROL"), aes(x =
S_promedio_PRE, y = C_promedio_PRE, xend = S_promedio_POS, yend = C_promedio_POS),
arrow = arrow(length = unit(0.3, "cm")), linewidth = 0.8, color = "gray20") +
    scale_fill_manual(values = c("PRE" = colores_2_grupos["CONTROL"], "POS" =
"white"), name = "Test:", labels = c("Pre-Test", "Post-Test")) +
    guides(shape = guide_legend(override.aes = list(fill =
c(colores_2_grupos["CONTROL"], "white")))) +
    labs(title = "Diagrama de Bao por Pregunta (Grupo Control)")

```

g) Generar el gráfico para el GRUPO EXPERIMENTAL

```

grafico_bao_experimental <- base_plot +
    geom_point(data = filter(datos_bao_por_pregunta, GRUPO == "EXPERIMENTAL"),
aes(x = S, y = C, shape = Test, fill = Test), size = 4, color =
colores_2_grupos["EXPERIMENTAL"], alpha = 0.7) +

```

```

    geom_text_repel(data = filter(datos_bao_por_pregunta, GRUPO == "EXPERIMENTAL"),
aes(x = S, y = C, label = Pregunta), fontface = "bold", size = 3.5, color =
colores_2_grupos["EXPERIMENTAL"], box.padding = 0.4) +
    geom_point(data = filter(promedios_bao, GRUPO == "EXPERIMENTAL"), aes(x =
S_promedio_PRE, y = C_promedio_PRE), size = 4, shape = 22, fill = "black") +
    geom_point(data = filter(promedios_bao, GRUPO == "EXPERIMENTAL"), aes(x =
S_promedio_POS, y = C_promedio_POS), size = 4, shape = 23, fill = "black") +
    geom_segment(data = filter(promedios_bao, GRUPO == "EXPERIMENTAL"), aes(x =
S_promedio_PRE, y = C_promedio_PRE, xend = S_promedio_POS, yend = C_promedio_POS),
arrow = arrow(length = unit(0.3, "cm")), linewidth = 0.8, color = "gray20") +
    scale_fill_manual(values = c("PRE" = colores_2_grupos["EXPERIMENTAL"], "POS" =
"white"), name = "Test:", labels = c("Pre-Test", "Post-Test")) +
    guides(shape = guide_legend(override.aes = list(fill =
c(colores_2_grupos["EXPERIMENTAL"], "white")))) +
    labs(title = "Diagrama de Bao por Pregunta (Grupo Experimental)")

print(grafico_bao_control)
print(grafico_bao_experimental)

```

Apéndice F: Código de R para el análisis de la encuesta de percepción estudiantil

El siguiente código en R muestra los métodos estadísticos utilizados en este estudio para analizar la encuesta de percepción. Se ofrece con objetivos de transparencia en cuanto a la metodología y para permitir que el estudio sea replicado.

```
# =====
# ANÁLISIS DE ENCUESTA DE PERCEPCIÓN ESTUDIANTIL
# Autor: Katherine Camacho
# -----
# Este script analiza los datos de la encuesta de retroalimentación,
# comparando percepciones entre el grupo Control y Experimental, y
# profundizando en las respuestas del grupo Experimental.
# =====
# =====
# SECCIÓN 1: CONFIGURACIÓN INICIAL
# =====
# Carga de librerías, definición de rutas, carga de datos y plantillas.

# 1.1. Carga de Librerías
#-----
library(tidyverse)
library(readxl)
library(stringr)
select <- dplyr::select

# 1.2. Definición de la Ruta del Archivo y Carga de Datos
#-----
# IMPORTANTE: Modifica esta ruta para que apunte a tu archivo Excel.
ruta_encuesta <- "C:/Users/Katherine/Desktop/MAESTRIA/TESIS/DATOS/ANALISIS
FINAL/ENCUESTA/Formulario de retroalimentación (Experimental) (Respuestas).xlsx"

tryCatch({
  datos_encuesta <- read_excel(ruta_encuesta)
  print("¡Archivo de encuesta cargado correctamente!")
}, error = function(e) {
  print(paste("Error al cargar el archivo:", e$message))
})

# 1.3. Definición de Paletas y Temas
```

```

#-----
# Paleta de colores consistentes para los gráficos
colores_encuesta <- c("CONTROL" = "#D55E00", "EXPERIMENTAL" = "#0072B2")

# Tema gráfico personalizado para todos los gráficos de la encuesta
mi_tema_encuesta <- function() {
  theme_minimal(base_family = "Arial", base_size = 14) +
    theme(
      plot.title = element_text(size = 18, face = "bold", hjust = 0.5, color =
"#222222"),
      plot.subtitle = element_text(size = 13, hjust = 0.5, margin = margin(b =
15)),
      axis.title = element_text(size = 12, face = "bold", hjust = 0.5),
      legend.position = "top"
    )
}

# =====
# SECCIÓN 2: PREPARACIÓN GENERAL DE DATOS
# =====
# Limpieza inicial y conversión de tipos de datos para todo el script.

datos_encuesta <- datos_encuesta %>%
  mutate(
    # Convertir grupo a factor para análisis y gráficos
    GRUPO = as.factor(GRUPO),

    # Convertir columnas de encuesta (Likert) a numéricas
    interes_actividades_previas = as.numeric(interés_actividades_previas),
    comprension_post = as.numeric(comprension_post),
    prediccion_post = as.numeric(prediccion_post),
    percepcion_guia = as.numeric(percepcion_guia)
  )

cat("\nDatos de la encuesta preparados para el análisis.\n")

# =====
# SECCIÓN 3: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE GRUPOS
# =====
# En esta sección se comparan las respuestas entre el Grupo Control

```

```

# y el Grupo Experimental.

# 3.1. Interés en Actividades Introdutorias
#-----
cat("\n\n--- 3.1. ANÁLISIS: INTERÉS EN ACTIVIDADES INTRODUTORIAS ---\n")

# a) Análisis descriptivo
resumen_interes <- datos_encuesta %>%
  filter(!is.na(interres_actividades_previas)) %>%
  group_by(GRUPO) %>%
  summarise(
    N = n(),
    Media = mean(interres_actividades_previas),
    Mediana = median(interres_actividades_previas)
  )
print(resumen_interes)

# b) Prueba U de Mann-Whitney
test_interes <- wilcox.test(interres_actividades_previas ~ GRUPO, data =
datos_encuesta)
cat("P-valor (Mann-Whitney) para diferencia de interés:", test_interes$p.value,
"\n")
if (test_interes$p.value < 0.05) cat("-> La diferencia es estadísticamente
significativa.\n") else cat("-> La diferencia NO es estadísticamente
significativa.\n")

# c) Visualización (Gráfico de violín)
grafico_interes <- ggplot(filter(datos_encuesta,
!is.na(interres_actividades_previas)), aes(x = GRUPO, y =
interres_actividades_previas, fill = GRUPO)) +
  geom_violin(trim = FALSE, alpha = 0.6) +
  geom_boxplot(width = 0.1, fill = "white") +
  geom_jitter(height = 0, width = 0.1, alpha = 0.4) +
  scale_fill_manual(values = colores_encuesta) +
  labs(
    title = "Interés Generado por las Actividades Introdutorias",
    subtitle = "Comparación entre la simulación (Experimental) y las actividades
tradicionales (Control)",
    x = "Grupo",
    y = "Nivel de Interés (1-5)"
  )

```

```

) +
mi_tema_encuesta() +
theme(legend.position = "none")
print(grafico_interes)

# 3.2. Percepción del Aprendizaje (Comprensión y Predicción)
#-----
cat("\n\n--- 3.2. ANÁLISIS: PERCEPCIÓN DEL APRENDIZAJE ---\n")

# a) Análisis descriptivo detallado
resumen_aprendizaje <- datos_encuesta %>%
  filter(!is.na(comprension_post) & !is.na(prediccion_post)) %>%
  group_by(GRUPO) %>%
  summarise(
    N = n(),
    Media_Comprension = mean(comprension_post),
    DE_Comprension = sd(comprension_post),
    Media_Prediccion = mean(prediccion_post),
    DE_Prediccion = sd(prediccion_post)
  )
print(resumen_aprendizaje)

# b) Pruebas U de Mann-Whitney
test_comprension <- wilcox.test(comprension_post ~ GRUPO, data = datos_encuesta)
cat("\nP-valor (Mann-Whitney) para 'Comprensión de Conceptos':",
test_comprension$p.value, "\n")

test_prediccion <- wilcox.test(prediccion_post ~ GRUPO, data = datos_encuesta)
cat("P-valor (Mann-Whitney) para 'Capacidad de Predicción':",
test_prediccion$p.value, "\n")

# c) Visualización (Gráfico de mancuernas/dumbbell)
datos_mancuernas <- resumen_aprendizaje %>%
  select(GRUPO, Media_Comprension, Media_Prediccion) %>%
  pivot_longer(cols = !GRUPO, names_to = "metrica", values_to = "media") %>%
  pivot_wider(names_from = GRUPO, values_from = media) %>%
  mutate(metrica = recode(metrica,
    "Media_Comprension" = "Comprensión de Conceptos",
    "Media_Prediccion" = "Capacidad de Predicción"))

```

```

grafico_mancuernas <- ggplot(datos_mancuernas) +
  geom_segment(aes(x = CONTROL, xend = EXPERIMENTAL, y = metrica, yend = metrica),
color = "grey", linewidth = 1.5, alpha = 0.7) +
  geom_point(aes(x = CONTROL, y = metrica), color = colores_encuesta["CONTROL"],
size = 5) +
  geom_point(aes(x = EXPERIMENTAL, y = metrica), color =
colores_encuesta["EXPERIMENTAL"], size = 5) +
  geom_text(aes(x = CONTROL, y = metrica, label = round(CONTROL, 2)), color =
colores_encuesta["CONTROL"], size = 4, vjust = -1.5) +
  geom_text(aes(x = EXPERIMENTAL, y = metrica, label = round(EXPERIMENTAL, 2)),
color = colores_encuesta["EXPERIMENTAL"], size = 4, vjust = -1.5) +
  scale_x_continuous(limits = c(1, 5)) +
  labs(
  title = "Comparación de la Percepción del Aprendizaje",
  subtitle = "Brecha entre el Grupo de Control (naranja) y Experimental (azul)",
  x = "Puntuación Media (1-5)", y = ""
) +
  mi_tema_encuesta() +
  theme(panel.grid.major.y = element_blank())
print(grafico_mancuernas)

```

```
# 3.3. Dificultades Conceptuales Persistentes
```

```
#-----
cat("\n\n--- 3.3. ANÁLISIS: DIFICULTADES CONCEPTUALES PERSISTENTES ---\n")
```

```
# a) Preparación de datos de dificultades
```

```

datos_dificultades <- datos_encuesta %>%
  rename(
    dificultad_momento_angular = `aspecto_difícil: Comprender el momento angular
(dirección y cómo afecta a la precesión)`,
    dificultad_torque_momento = `aspecto_difícil: Relación torque - diferencial
de momento angular (dirección y cómo afecta a la precesión)`,
    dificultad_dir_precesion = `aspecto_difícil: Predicción de la dirección de
precesión`,
    dificultad_pred_variables = `aspecto_difícil: Predicción al modificar
variables`
  ) %>%
  group_by(GRUPO) %>%
  summarise(
    across(starts_with("dificultad_"), ~ mean(.x, na.rm = TRUE) * 100)
  )

```

```

) %>%
  pivot_longer(cols = !GRUPO, names_to = "dificultad", values_to = "porcentaje",
names_prefix = "dificultad_") %>%
  mutate(dificultad = recode(dificultad,
                             "momento_angular" = "Momento Angular",
                             "torque_momento" = "Relación Torque-Momento",
                             "dir_precesion" = "Dirección de Precesión",
                             "pred_variables" = "Predicción de Variables"))

# b) Visualización (Gráfico de barras agrupadas)
grafico_dificultades <- ggplot(datos_dificultades, aes(x = dificultad, y =
porcentaje, fill = GRUPO)) +

# La única modificación es quitar "color = 'black'" de la siguiente línea
geom_col(position = "dodge", width = 0.8) +

geom_text(
  aes(label = paste0(round(porcentaje), "%")),
  position = position_dodge(width = 0.8),
  vjust = 1.5, color = "white", fontface = "bold", size = 4
) +
scale_fill_manual(values = colores_encuesta, name = "Grupo:") +
scale_x_discrete(labels = function(x) str_wrap(x, width = 20)) +
labs(
  title = "Dificultades Conceptuales Persistentes Post-Intervención",
  subtitle = "Porcentaje de estudiantes que seleccionaron cada concepto como
difícil",
  x = NULL, y = "Porcentaje de Estudiantes (%)"
) +
mi_tema_encuesta() +
theme(axis.text.x = element_text(face = "bold"), axis.ticks.x =
element_blank())

print(grafico_dificultades)
ggsave("grafico_dificultades_conceptuales.png", plot = grafico_dificultades,
width = 12, height = 8, dpi = 300)

# =====
# SECCIÓN 4: ANÁLISIS ENFOCADO EN EL GRUPO EXPERIMENTAL
# =====

```

```

# En esta sección se analizan preguntas específicas respondidas
# únicamente por el Grupo Experimental sobre la intervención.

# 4.1. Componente Pedagógico Más Útil
#-----
cat("\n\n--- 4.1. ANÁLISIS: COMPONENTE MÁS ÚTIL (SOLO EXPERIMENTAL) ---\n")

# a) Análisis descriptivo
tabla_preferencias <- datos_encuesta %>%
  filter(GRUPO == "EXPERIMENTAL", !is.na(componente_util)) %>%
  count(componente_util, name = "n_estudiantes") %>%
  mutate(porcentaje = n_estudiantes / sum(n_estudiantes) * 100) %>%
  arrange(desc(porcentaje))
print(tabla_preferencias)

# b) Prueba de proporciones (comparando las 2 opciones principales)
if (nrow(tabla_preferencias) >= 2) {
  test_pref <- prop.test(x = tabla_preferencias$n_estudiantes[1:2], n =
rep(sum(tabla_preferencias$n_estudiantes), 2))
  cat("\nP-valor (Prueba de Proporciones) para las 2 opciones más votadas:",
test_pref$p.value, "\n")
}

# c) Visualización (Gráfico de barras horizontales)
grafico_preferencias <- ggplot(tabla_preferencias, aes(x =
reorder(componente_util, porcentaje), y = porcentaje)) +
  geom_col(fill = colores_encuesta["EXPERIMENTAL"]) +
  geom_text(aes(label = paste0(round(porcentaje, 1), "%")), hjust = -0.2) +
  coord_flip() +
  scale_y_continuous(limits = c(0, max(tabla_preferencias$porcentaje) * 1.1)) +
  labs(
  title = "Componente Pedagógico Más Útil Según el Grupo Experimental",
  x = "Componente de la Clase", y = "Porcentaje de Estudiantes (%)") +
  mi_tema_encuesta()
print(grafico_preferencias)

# 4.2. Percepción de la Guía de Simulación
#-----

```

```
cat("\n\n--- 4.2. ANÁLISIS: PERCEPCIÓN DE LA GUÍA DE SIMULACIÓN (SOLO  
EXPERIMENTAL) ---\n")
```

```
# a) Análisis descriptivo
```

```
datos_guia <- filter(datos_encuesta, GRUPO == "EXPERIMENTAL",  
  !is.na(percepcion_guia))
```

```
tabla_guia <- datos_guia %>%
```

```
  count(percepcion_guia, name = "n_estudiantes") %>%
```

```
  mutate(porcentaje = n_estudiantes / sum(n_estudiantes) * 100)
```

```
print(tabla_guia)
```

```
cat("\nCalificación Media:", mean(datos_guia$percepcion_guia), "\n")
```

```
cat("Calificación Mediana:", median(datos_guia$percepcion_guia), "\n")
```

```
# b) Visualización (Gráfico de barras)
```

```
grafico_guia_barras <- ggplot(tabla_guia, aes(x = as.factor(percepcion_guia), y  
= porcentaje)) +
```

```
  geom_col(fill = colores_encuesta["EXPERIMENTAL"], width = 0.7) +
```

```
  geom_text(aes(label = paste0(round(porcentaje, 1), "%")), vjust = -0.5, size =  
5) +
```

```
  scale_y_continuous(limits = c(0, 100)) +
```

```
  labs(
```

```
    title = "Percepción de la Guía de Simulación en el Grupo Experimental",
```

```
    subtitle = "Distribución de las calificaciones (1=Mala, 5=Excelente)",
```

```
    x = "Calificación de la Guía", y = "Porcentaje de Estudiantes (%)"
```

```
  ) +
```

```
  mi_tema_encuesta()
```

```
print(grafico_guia_barras)
```

Apéndice G: Tablas complementarias de Resultados Estadísticos

Este apéndice contiene una tabla consolidada que completa los hallazgos del Capítulo 4, exhibiendo los datos estadísticos de las pruebas de hipótesis esenciales empleadas para comparar los grupos de estudio.

Tabla G.1 Resumen de las principales pruebas de hipótesis

Comparación/Análisis	Prueba Estadística	Estadístico Principal	Valor p
Equivalencia Inicial de Grupos			
Rendimiento Previo (Nota 1er Parcial)	T de Welch	t=0.36118 df=156.92	0.7185
Puntaje Pre-test (Nivel 1)	U de Mann-Whitney	W =2980	0.5297
Puntaje Pre-test (Nivel 2)	U de Mann-Whitney	W=3255.5	0.7045
Distribución de Paralelos	Chi-cuadrado	$\chi^2=2.3621$ df=3	0.5007
Ganancia de Aprendizaje (Hake)			
Nivel 1: Respuesta	U de Mann-Whitney	W =1028	1.657e-13
Nivel 2: Justificación	U de Mann-Whitney	W = 751.5	<2.2e-16
Análisis de coherencia conceptual			
Índice de coherencia general	Chi-cuadrado	$\chi^2=50.503$ df=1	1.19e-12
Índice de coherencia individual	U de Mann-Whitney	W=1394.5	1.97e-06

Análisis de Transiciones Conceptuales			
Transición Superficial → Robusto	Chi-cuadrado	$\chi^2=27.752$ df=1	1.379e-07
Transición Incorrecto → Robusto	Chi-cuadrado	$\chi^2=49.839$ df=1	1.669e-12
Percepción Estudiantil			
Interés generado	Wilcoxon	W = 1859	0.01039
Comprensión de conceptos	Wilcoxon	W = 1756.5	0.002467
Capacidad de predicción	Wilcoxon	W = 1925	0.02334