



Doctorado en Educación

Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagó- gico

Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Director: Dr. Alfonso Vázquez Atochero

Dr. Javier Alberto Sanabria Cala

Bucaramanga – Colombia, junio 2025

Resumen

La disposición inadecuada del aceite vegetal posconsumo constituye un problema ambiental persistente que afecta la calidad del agua y evidencia una brecha educativa en la comprensión escolar de los procesos científicos asociados a su manejo y aprovechamiento. Frente a este vacío, la presente tesis doctoral tuvo como propósito evaluar el efecto de una propuesta pedagógica centrada en la transformación del aceite vegetal posconsumo sobre la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles de estudiantes de educación media, mediante un diseño cuasi-experimental de enfoque mixto. El estudio se desarrolló con 14 estudiantes de dos instituciones públicas de Bucaramanga y combinó análisis cuantitativos y cualitativos apoyados en instrumentos como SPSS, NVivo, entrevistas semiestructuradas y observación estructurada. La intervención incorporó metodologías activas —entre ellas, aula invertida, trabajo experimental y uso de TIC— para promover un aprendizaje autónomo y contextualizado en torno al proceso de transesterificación. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la comprensión conceptual y en las actitudes sostenibles, además de la obtención de biodiésel y subproductos con características técnicas adecuadas para su uso didáctico; estos logros consolidaron la pertinencia pedagógica del modelo y su capacidad para articular saberes científicos con prácticas escolares situadas. En conjunto, la investigación demuestra que la integración de procesos experimentales reales vinculados a problemáticas ambientales locales contribuye a resignificar la educación ambiental, fortalece la alfabetización científica y ofrece un modelo replicable que puede ser adaptado por otras instituciones interesadas en incorporar sostenibilidad, ciencia escolar y transformación social dentro del currículo.

Palabras clave: Educación ambiental, transesterificación, aprendizaje significativo, Metodologías activas, Sostenibilidad educativa.

Abstract

The inadequate disposal of used cooking oil constitutes a persistent environmental challenge that degrades aquatic systems and exposes a critical educational gap in the school-level understanding of the scientific and technological processes involved in waste management and resource valorization. Addressing this deficit, the present doctoral research sought to evaluate the effect of a pedagogical intervention grounded in the transformation of used cooking oil into biodiesel and derived subproducts on students' conceptual understanding and sustainable attitudes, employing a mixed-methods, quasi-experimental design. The study involved 14 upper-secondary students from two public institutions in Bucaramanga and integrated quantitative and qualitative analytical techniques, including statistical processing with SPSS, thematic coding with NVivo, semi-structured interviews, and structured classroom observation. The instructional intervention incorporated active learning methodologies—such as flipped classroom, inquiry-based experimentation, and digitally mediated learning environments—to promote autonomous, situated, and conceptually robust engagement with the transesterification process. Findings indicate statistically significant gains in students' conceptual understanding and measurable improvements in sustainable attitudes, alongside the successful laboratory-scale production of biodiesel and subproducts exhibiting technical properties suitable for educational demonstration and conceptual reinforcement. Collectively, the results substantiate the pedagogical relevance of the intervention and its capacity to bridge disciplinary scientific knowledge with contextually grounded classroom practices. The study concludes that embedding authentic experimental processes derived from local environmental issues enhances environmental education, strengthens scientific literacy, and provides a replicable instructional model adaptable to institutions seeking to integrate sustainability, applied science, and socio-environmental transformation within their curricula.

Keywords: Environmental education, transesterification, meaningful learning, active methodologies, educational sustainability.

Dedicatorias

A mis padres Graciela Estupiñán Hernández y Pedro Alonso Mancilla quienes han sido el motor de mi vida, sin ellos no hubiese podido ser el ser humano que soy.

A mis hermanos John Alexander Mancilla Estupiñán, Yorguin Darío Mancilla Estupiñán quienes siempre han estado incondicionalmente para mí.

A Cristian Leonardo Rojas Hernández, por su apoyo incondicional, su compañía constante y la calidez de una voz amiga que me acompañó en cada etapa de este camino.

Agradecimientos

A Dios, Padre celestial, quien ha sido mi motor, proveedor y quien siempre ha guiado mis pasos en el transcurso de la vida.

Agradezco a la Universidad de Santander (UDES) por brindarme el espacio, la confianza y el respaldo institucional necesarios para llevar a cabo este proceso formativo en el marco de mis funciones administrativas. Su generosa disposición para facilitarme el tiempo y las condiciones requeridas fue fundamental para avanzar en mis estudios doctorales, por el uso de los laboratorios institucionales y a la plataforma Moodle, herramientas clave que hicieron posible el desarrollo experimental, didáctico y metodológico de esta investigación.

Agradezco a las instituciones educativas Gabriela Mistral y Las Américas de Bucaramanga, por su valiosa colaboración y apertura al permitirme desarrollar esta investigación con los estudiantes de sus comunidades educativas. Su disposición para participar activamente en el proceso investigativo, así como el suministro del aceite vegetal posconsumo materia prima fundamental para la elaboración de los productos desarrollados fueron elementos clave para la implementación de las experiencias pedagógicas planteadas. El compromiso de estas instituciones con la educación ambiental y el aprendizaje significativo fue esencial para alcanzar los objetivos de este trabajo doctoral.

Agradezco a mis directores, por su apoyo, dedicación, por ser soporte y apoyo incondicional en mi carrera.

Contenidos

Resumen.....	ii
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Lista de Tablas y Figuras	xiv
Figuras.....	xv
Introducción	1
Planteamiento del Problema	6
Formulación de la pregunta de investigación	9
Pregunta principal de investigación.....	10
Justificación	12
1. Marco de referencia	16
1.1 Marco Legal	16
1.2 Marco Normativo.....	25
1.3 Marco conceptual.....	29
1.3.1 Definiciones	33
1.4 Marco Teórico.....	36
1.4.1 Teorías Pedagógicas.....	36
1.4.2 Teorías Ambientales	36
1.4.3 Teorías Científicas	37

1.4.4 Teorías Tecnológicas	37
1.4.5 Aula Invertida y Aula Extendida Moodle	38
1.4.6 Problemática del Aceite vegetal posconsumo.....	39
1.4.7 Calentamiento Global y Energías Renovables.....	40
1.4.8 Biocombustibles y Educación Científica Escolar	42
1.4.9 Espectroscopía Infrarroja como Herramienta Didáctica.....	43
1.5 Estado del arte	44
1.5.1 Objeto de estudio	45
1.5.2 Campo de acción.....	46
1.5.3 Enfoque epistemológico.....	47
1.5.4 Identificación de variables	48
1.5.5 Relación entre variables.....	49
1.5.6 Educación ambiental escolar: estado del arte	51
1.5.7 Aprovechamiento pedagógico del aceite vegetal posconsumo.....	52
1.5.8 Tecnologías educativas con enfoque sostenible	52
1.5.9 Delimitación conceptual de las categorías de análisis	53
1.6 Cierre integrador del estado del arte	54
2. Diseño metodológico	57
2.1 Paradigma mixto: enfoque convergente.....	57
2.1.1 Justificación del diseño mixto convergente	58

2.1.2 Componentes del diseño convergente paralelo.....	59
2.1.3 Integración de los datos: fase de meta-inferencia	60
2.1.4 Pertinencia del diseño para la pregunta y los objetivos de investigación	61
2.1.5 Síntesis final: contribución metodológica.....	61
2.2 Tipo de investigación: enfoque mixto con diseño cuasi-experimental.....	62
2.2.1 Justificación del diseño mixto convergente	63
2.2.2 Componente cuantitativo: diseño cuasi-experimental intragrupo.....	64
2.2.3 Componente cualitativo: enfoque interpretativo.....	66
2.2.4 Integración de los datos: meta-inferencia	66
2.2.5 Síntesis del diseño investigativo	67
2.3 Hipótesis de Investigación	67
2.3.1 Hipótesis de investigación general (HiG)	68
2.3.2 Hipótesis nula (H_0).....	68
2.3.3 Hipótesis alternativa (H_1).....	68
2.3.4 Hipótesis específicas.....	68
2.3.5 Coherencia metodológica y función de las hipótesis	69
2.4. Variables del estudio.....	71
2.4.1 Definiciones teóricas.....	71
2.4.2 Definiciones operacionales	73
2.5 Fundamentación y construcción de los objetivos de la investigación	75

2.5.1 Objetivo general.....	75
2.5.2 Objetivos Específicos.....	76
2.6 Instrumentos estadísticos y pedagógicos empleados en el análisis de datos	76
2.6.1 Instrumentos de recolección pedagógica	77
2.6.2 Instrumentos de análisis estadístico	79
2.6.3 Instrumentos de recolección de datos experimentales	80
2.6.4 Cuadro resumen de instrumentos	81
2.6.5 Validez y confiabilidad global de los instrumentos	84
2.7. Población y muestra	86
2.8 Factores adicionales relevantes en el diseño y desarrollo de la investigación.....	89
2.9 Diagrama general del proyecto	94
2.9.1 Estrategia pedagógica implementada.....	91
2.9.2 Desarrollo metodológico por fases de la investigación	92
2.9.3 Diseño experimental y definición de variables	93
3. Resultados de la investigación	109
3.1 Contextualización y estructura de los resultados	111
3.1.1 Resultados asociados al Objetivo Específico 1	112
3.1.3 Resultados asociados al Objetivo Específico 3	121
3.1.4 Resultados asociados al Objetivo Específico 4.....	124

3.1.5 Correspondencia entre los objetivos de investigación y los resultados obtenidos	127
3.2 Análisis cualitativo del proceso pedagógico mediante NVivo	133
3.2.1 Procedimiento de codificación cualitativa	133
3.2.2 Evolución conceptual del proceso de transesterificación	134
3.2.3 Control de variables y pensamiento experimental	135
3.2.4 Relación entre resultados experimentales y conceptos teóricos	136
3.2.5 Análisis comparativo de categorías semánticas	136
3.2.6 Desarrollo de actitudes científicas y aprendizaje colaborativo	137
3.3 Análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y su interpretación pedagógica	138
3.3.1 Estadísticos descriptivos como base del análisis inferencial	139
3.3.2 Análisis de correlación entre densidad y pH del biodiésel	140
3.3.3 Análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades fisicoquímicas	141
3.3.4 Representación gráfica de las diferencias entre grupos	142
3.3.5 Integración de resultados mediante análisis comparativo	143
3.3.6 Análisis complementario y visualización integrada	144
3.3.7 Síntesis interpretativa profunda del numeral 3.3	144
3.4 Análisis técnico–pedagógico integrado de los resultados experimentales	145
3.5 Discusión de resultados	148

3.5.1 Discusión de los cambios en la comprensión conceptual	149
3.5.2 Discusión sobre la transformación de actitudes sostenibles	150
3.5.3 Discusión del valor pedagógico del proceso experimental.....	151
3.5.4 Discusión de la integración entre resultados cuantitativos y cualitativos.....	152
3.5.5 Aporte del estudio al campo de la educación científica.....	152
3.5.6 Discusión metodológica e integración triangulada de los resultados	153
3.6 Cierre crítico del Capítulo 3.....	156
4. Conclusiones	158
4.1 Cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos.....	159
4.2 Conclusiones en relación con las hipótesis de investigación.....	162
4.3 Implicaciones pedagógicas desde el enfoque constructivista, los ODS y la educación ambiental crítica.....	164
4.4 Respuesta a las preguntas de investigación	166
4.5 Conclusión integradora de los hallazgos técnico-pedagógicos del proceso experimental.....	169
4.6 Proyecciones educativas, impacto institucional y replicabilidad del proyecto.....	170
4.6.1 Proyecciones educativas y transformaciones pedagógicas	171
4.6.2 Impacto institucional y articulación curricular	171
4.6.3 Replicabilidad del modelo educativo y condiciones mínimas de implementación	172

4.7 Factor diferenciador y contribución original de la tesis doctoral	174
4.8 Recomendaciones para futuras investigaciones y limitaciones del estudio	176
4.8.1 Limitaciones del estudio	176
4.8.2 Proyecciones y recomendaciones para futuras investigaciones	178
4.8.3 Consideraciones sobre replicabilidad	179
4.9 Cierre global del capítulo	179
Referencias	183
Apéndices	197
Apéndice A.	197
Apéndice B	199
Apéndice C	213
Apéndice D	220
Apéndice E	222
Apéndice F	227
Apéndice G	233
Apéndice H	239
Apéndice I	269
Glosario	356

Lista de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1 <i>Matriz legal comparativa colombiana</i>	20
Tabla 2 <i>Impactos del aceite vegetal posconsumo en el entorno escolar y la salud</i>	39
Tabla 3 <i>Resumen de instrumentos estadísticos, pedagógicos y experimentales utilizados en el estudio</i>	82
Tabla 4 <i>Requisitos del biodiésel para mezcla con combustibles diésel y normas para el color del vidrio</i>	95
Tabla 5 <i>Solicitud de pedidos de laboratorio LAB-FT-004-UNDES</i>	102
Tabla 6 <i>Estadísticos descriptivos del pretest y posttest de comprensión conceptual</i>	113
Tabla 7 <i>Comparación de parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido frente a normas de referencia (pretest–posttest)</i>	114
Tabla 8 <i>Correspondencia entre los objetivos de investigación y los resultados obtenidos en el Capítulo 3</i>	128
Tabla 9 <i>Evolución semántica del discurso estudiantil</i>	272
Tabla 10 <i>Comprensión conceptual estudiantes secundaria</i>	279
Tabla 11 <i>Valores de tendencia central y dispersión obtenidos mediante el software SPSS</i>	285
Tabla 12 <i>Sectores de interpretación del coeficiente de correlación de Pearson (r)</i>	295
Tabla 13 <i>Análisis Vibracional de Grupos Funcionales mediante Espectroscopía Infrarroja</i>	308
Tabla 14 <i>Comparación de parámetros físico-químicos entre biodiésel experimental y diésel convencional</i>	315

Tabla 15 <i>Etapas para la obtención de la glicerina y su aporte pedagógico</i>	326
Tabla 16 <i>Análisis de Varianza (ANOVA) entre glicerina comercial (GC) y glicerina obtenida de AVPC (GAPC)</i>	327
Tabla 17 <i>Síntesis de Bioplásticos con glicerina extraída y comercial</i>	335
Tabla 18 <i>Comparación de propiedades físicas en bioplásticos según tipo de glicerina utilizada (GC vs. AVPC)</i>	337
Tabla 19 <i>Interpretación científica de los picos espectrales más relevantes</i>	342
Tabla 20 <i>Resultados del ANOVA de un factor: comparación entre bioplásticos elaborados con GC y GAPC</i>	346
 Figuras	
Figura 1 <i>Reacción de transesterificación</i>	2
Figura 2 <i>Mecanismo de reacción de transesterificación en un medio básico</i>	3
Figura 3 <i>Modelo de Aula Invertida + Aula Extendida Moodle</i>	38
Figura 4 <i>Emisiones mundiales de CO2 de 1995 a 2024</i>	40
Figura 5 <i>Ciclo de aprovechamiento del aceite vegetal posconsumo en biodiésel</i>	41
Figura 6 <i>Biocombustibles y Educación Científica Escolar</i>	42
Figura 7 <i>Espectro IR de biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal posconsumo de la institución educativa Gabriela Mistral</i>	43
Figura 8 <i>Diagrama general del proyecto</i>	90
Figura 9 <i>Diagnóstico de conocimientos previos</i>	96
Figura 10 <i>Clase magistral impartida IE. Gabriela Mistral por docente externo UDES</i> . 97	
Figura 11 <i>Clase magistral impartida IE. Las Américas por docente externo UDES</i>	98

Figura 12 <i>Sesión práctica impartida IE. Gabriela Mistral por docente externo UDES.</i>	98
Figura 13 <i>Sesión práctica impartida IE. Las Américas por docente externo UDES.....</i>	99
Figura 14 <i>Aula invertida Plataforma Integra</i>	100
Figura 15 <i>Material empelado en el aula invertida Integra</i>	100
Figura 16 <i>Empleo Aula Extendida Moodle – UDES.....</i>	101
Figura 17 <i>Montaje para proceso de limpieza del aceite vegetal posconsumo</i>	105
Figura 18 <i>Preparación del metóxido de sodio</i>	105
Figura 19 <i>Reacción de transesterificación 0 – 5 minutos (Figura izquierda), 5 – 10 minutos (Figura central), 10 – 15 minutos (Figura derecha)</i>	105
Figura 20 <i>Obtención del biodiesel y glicerina como subproducto</i>	106
Figura 21 <i>Logro por objetivo específico del proyecto pedagógico</i>	108
Figura 22 <i>Primera pregunta conceptos previos: Autorización información con fines académicos, Figura 22b derecha. Primera pregunta medición del aprendizaje: Autorización información con fines académicos.....</i>	240
Figura 23 <i>Segunda pregunta: ¿Cómo se clasifican las mezclas?</i>	241
Figura 24 <i>Segunda pregunta: ¿Cómo se clasifican las mezclas?</i>	241
Figura 25 <i>Tercera pregunta: ¿En qué consiste el proceso de transesterificación?</i>	242
Figura 26 <i>Tercera pregunta: ¿En qué consiste el proceso de transesterificación?</i>	243
Figura 27 <i>Cuarta pregunta: ¿Cuáles son los tipos de mecanismos de separación empleados para separar aceite y agua?</i>	244
Figura 28 <i>Cuarta pregunta: ¿Cuáles son los tipos de mecanismos de separación empleados para separar aceite y agua?</i>	245
Figura 29 <i>Quinta pregunta: ¿Cuál es la función de una probeta en el laboratorio?</i>	247

Figura 30 <i>Quinta pregunta: ¿Cuál es la función de una probeta en el laboratorio?....</i>	247
Figura 31 <i>¿Cuál de los siguientes elementos mejora la pureza del biodiésel durante la fase de pretratamiento del aceite usado?</i>	254
Figura 32 <i>Comparación de respuestas: Subproducto de la transesterificación.....</i>	255
Figura 33 <i>Undécima pregunta: ¿Se sintió a gusto con el método constructivista empleado para la elaboración del proyecto integrador?</i>	261
Figura 34 <i>Duodécima pregunta: Valoración estudiantil del proyecto de investigación: percepción de excelencia sobre la experiencia pedagógica.....</i>	262
Figura 35 <i>Categorías emergentes en aprendizaje autónomo</i>	265
Figura 36 <i>Mapa de nodos generado en Nvivo 12 con la categoría central: Transesterificación</i>	270
Figura 37 <i>Figura de barras comparativo entre pretest y postest para estas categorías semánticas.....</i>	274
Figura 38 <i>Análisis estadístico de los datos recolectados en la intervención pedagógica – software SPSS</i>	283
Figura 39 <i>Diagrama BoxPlot comparación de puntajes: Pretest vs Postest (t-Student).....</i>	290
Figura 40 <i>Correlación de Pearson. Producción vs Compresión Conceptual ($r = 0.784$)</i>	293
Figura 41 <i>Correlación de Pearson. Producción vs Actitudes sostenibles ($r = 0.705$) ..</i>	295
Figura 42 <i>Correlación entre la comprensión conceptual Vs Producción de Biodiesel.</i>	298
Figura 43 <i>Caracterización. a) Diesel de petróleo (izquierda) y biodiesel del aceite pos-consumo (derecha). b) Escalas de colores Saybolt. c) Densidad. d) pH.....</i>	302
Figura 44 <i>Resultados del biodiésel vs normas técnicas - software SPSS versión 27</i>	304

Figura 45 Variables densidad, pH y color Saybolt del biodiesel obtenido.....	305
Figura 46 Caracterización. a) Espectro UV-VIS. b) espectro FTIR-ATR	310
Figura 47 Figura de Dispersión y Tendencia Frecuencia IR vs Comprensión Conceptual	311
Figura 48 Dispersión entre frecuencia FTIR y Compresión conceptual	312
Figura 49 Comparación de la densidad del biodiésel y diésel convencional	319
Figura 50 Comparación del pH del biodiésel y diésel convencional	320
Figura 51 Comparación del color (índice Saybolt) entre biodiésel y diésel convencional	321
Figura 52 a) Reacción catalizador con aceite posconsumo. b) separación glicerina – Glicerol de subproductos	323
Figura 53 Purificación y separación de glicerina. a) neutralización en medio básico. b) eliminación de contaminantes mediante filtración por gravedad	324
Figura 54 Comparación de densidad de glicerina.....	331
Figura 55 Comparación de pH de glicerina	332
Figura 56 Dispersión y línea de tendencia: Densidad vs pH (GAPC)	333
Figura 57 Producción anticongelante a partir del aceite vegetal posconsumo	335
Figura 58 Bioplásticos. a) superior izquierda y derecha: a partir de glicerina comercial. b) inferior centro: a partir de glicerina extraída del aceite posconsumo	340
Figura 59 Infrarrojo de bioplásticos a partide de glicerina comercial (rojo y azul) y glicerina extraída de aceite posconsumo (verde)	341
Figura 60 Comparación de propiedades físicas de bioplásticos por tipo de glicerina .	345
Figura 61 Comparación de Elasticidad por tipo de glicerina	348

Figura 62 <i>Comparación de resistencia mecánica en los tipos de glicerina</i>	350
Figura 63 <i>Comparación de fragilidad en los tipos de glicerina</i>	351
Figura 64 <i>Comparación de homogeneidad óptica en los tipos de glicerina</i>	353

Introducción

La disposición inadecuada del aceite vegetal posconsumo representa una amenaza ambiental significativa. Un solo litro puede contaminar hasta 40.000 litros de agua, afectando los ecosistemas acuáticos y obstaculizando los procesos de tratamiento del agua (Díaz et al., 2018). Además, su uso prolongado en frituras genera compuestos tóxicos como aldehídos y acroleínas perjudiciales para la salud humana (Martínez & López, 2021). Esta problemática, común en entornos urbanos y escolares, exige respuestas urgentes desde diversos frentes, incluyendo el educativo. En este sentido, la escuela se constituye en un espacio estratégico para abordar desafíos ambientales desde una perspectiva pedagógica que promueva la sostenibilidad, el pensamiento crítico y la transformación de hábitos de consumo.

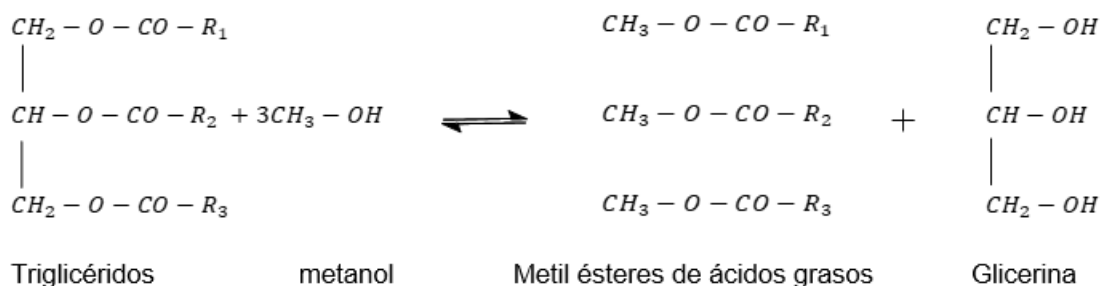
Este trabajo de tesis doctoral tiene como objetivo central diseñar, implementar y evaluar una propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo en productos útiles como estrategia para potenciar la comprensión de procesos científicos y la formación de actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, desde un enfoque constructivista. Se propone como objetivos específicos: (1) fomentar el aprendizaje autónomo y el pensamiento crítico en los estudiantes a través de metodologías constructivistas; (2) emplear estrategias activas como el aula invertida, el uso de TIC y el trabajo experimental para enriquecer los procesos de enseñanza-aprendizaje; (3) promover la conciencia ambiental y la valorización de residuos mediante actividades prácticas en contextos escolares; y (4) Evaluar el volumen y calidad del biodiésel producido por los estudiantes en condiciones experimentales controladas.

Una de las reacciones centrales empleadas en este proyecto es la transesterificación, un proceso químico mediante el cual los triglicéridos presentes en el aceite vegetal reaccionan con un alcohol como el metanol en presencia de un catalizador básico ver Figura 1, formando ésteres

metílicos (biodiésel) y glicerina como subproducto. Esta transformación, sencilla pero altamente significativa, se adapta al contexto escolar como una estrategia pedagógica que combina la teoría con la experimentación, permitiendo a las estudiantes visualizar la aplicabilidad de los conceptos científicos en soluciones reales para el entorno.

Figura 1

Reacción de transesterificación

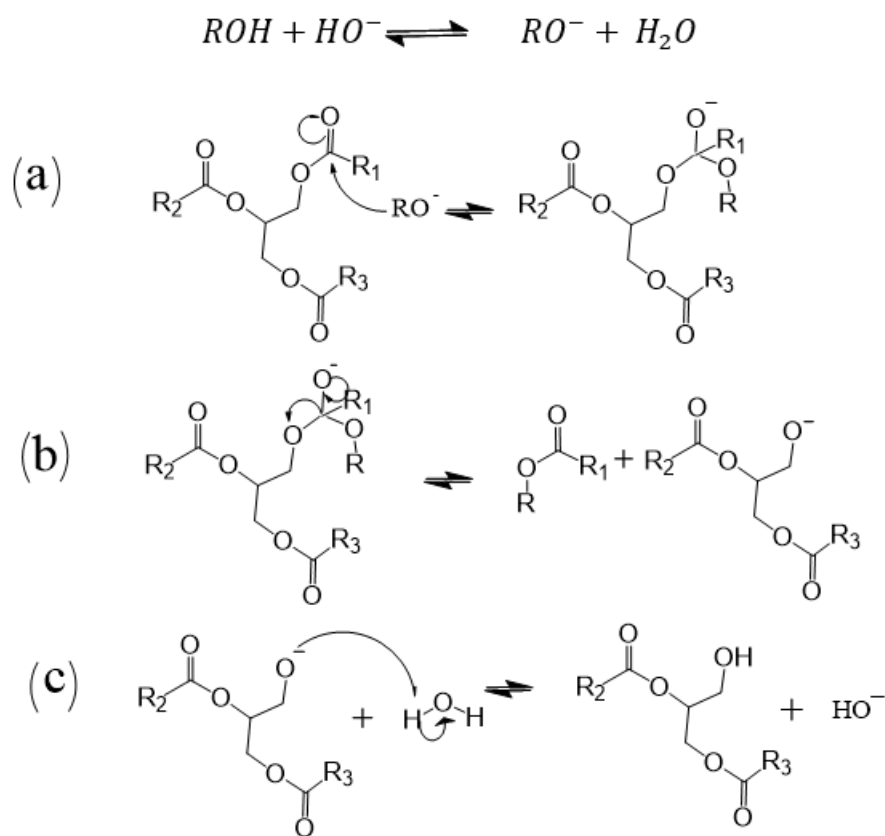


Nota. *Elaboración propia.*

Esta reacción, desarrollada en medio básico, permite ejemplificar cómo los conceptos teóricos adquieren sentido a través de la experimentación. El mecanismo, que se presenta de manera simplificada en la Figura 2, se basa en la generación de un alcóxido nucleofílico a partir de un alcohol primario, el cual ataca la región electrofílica del grupo carbonilo presente en los triglicéridos del aceite vegetal posconsumo. A partir de este punto, se desencadena una secuencia de tres reacciones reversibles: (a) formación de un intermediario tetraédrico (diglicérido); (b) transformación del mismo en un ión diacilglicérido y un éster alquílico del ácido graso; y (c) recuperación del catalizador mediante la transferencia de un protón. Este ciclo se repite hasta obtener tres ésteres de ácidos grasos (biodiésel) y glicerina como subproducto, la cual se reaprovecha en la elaboración de anticongelantes y bioplásticos.

Figura 2

Mecanismo de reacción de transesterificación en un medio básico



Nota. *Elaboración propia.*

La incorporación de este proceso químico al aula, adaptado al nivel escolar y apoyado en estrategias como el trabajo experimental, el uso de TIC y el aula invertida, permite que las estudiantes no solo comprendan los principios de la química desde una perspectiva aplicada, sino que también desarrollen habilidades científicas, pensamiento crítico y una actitud responsable frente al manejo de residuos. De esta forma, la transesterificación trasciende su dimensión técnica y se convierte en un recurso pedagógico que articula la teoría con la práctica, promoviendo una educación en ciencias que es contextual, activa y comprometida con la sostenibilidad.

A pesar de los avances en educación ambiental y en el diseño curricular, persiste una desconexión entre los contenidos escolares y las problemáticas reales del entorno (Gutiérrez, 2017; Meira, 2006). La enseñanza de las ciencias, en particular, se encuentra frecuentemente orientada a la memorización de conceptos, lo que limita el desarrollo de competencias científicas, investigativas y actitudinales. Adicionalmente, la escasa incorporación de residuos como recursos didácticos en la educación formal refleja una debilidad estructural que impide vincular el aprendizaje escolar con los desafíos ambientales que enfrenta la sociedad. Esta investigación busca abordar dicha brecha mediante una estrategia didáctica que articula saberes escolares, prácticas científicas, uso de tecnologías y contextos reales de los estudiantes.

La propuesta se implementa en dos instituciones educativas públicas de Bucaramanga – Santander - Colombia: el colegio Gabriela Mistral y el colegio Las Américas. En estos espacios se recolecta aceite vegetal posconsumo en las cafeterías escolares para ser transformado, mediante reacciones químicas adaptadas al aula, en productos de valor agregado. Este enfoque permite que las estudiantes construyan conocimiento desde la práctica, desarrollen habilidades experimentales, reflexionen sobre su entorno, y asuman un rol activo como agentes de cambio. Además, el proceso promueve una visión interdisciplinaria que vincula ciencias naturales, educación ambiental y formación ciudadana, bajo un modelo pedagógico que favorece la autonomía, la colaboración y el pensamiento crítico.

De este modo, se demuestra que la educación ambiental, cuando se integra de manera activa y contextualizada a la enseñanza de las ciencias bajo un enfoque constructivista, puede fortalecer la alfabetización científica, el pensamiento crítico y la formación de ciudadanos comprometidos con el desarrollo sostenible (Novo, 2009; UNESCO, 2020; Zabala, 1999). Asimismo, se valida el uso de residuos como el aceite vegetal posconsumo como recurso didáctico innovador,

capaz de transformar la práctica pedagógica y generar impactos positivos tanto en el ámbito escolar como en la comunidad.

Planteamiento del Problema

La problemática ambiental generada por la disposición inadecuada del aceite vegetal posconsumo representa un desafío urgente y con consecuencias profundas para los ecosistemas acuáticos y la salud pública. Estudios recientes señalan que un solo litro de aceite vegetal posconsumo puede contaminar hasta 40.000 litros de agua, afectando la calidad del recurso hídrico y provocando un desequilibrio ecológico significativo (Díaz et al., 2018). Además, la reutilización prolongada del aceite en procesos de fritura produce compuestos tóxicos, como aldehídos y acroleínas, que resultan perjudiciales para la salud humana y la seguridad alimentaria (Martínez & López, 2021). Esta problemática, común en contextos urbanos y escolares, demanda respuestas integrales que incluyan la acción educativa como un componente clave para la transformación social y ambiental, especialmente mediante la participación activa de estudiantes de diferentes grados académicos en la elaboración práctica de productos derivados del aceite vegetal posconsumo, como biodiésel, glicerina y bioplásticos. Esta participación directa permite a los estudiantes experimentar y comprender los procesos científicos implicados, fomentando el aprendizaje significativo y la responsabilidad ambiental desde etapas formativas diversas.

El ámbito escolar constituye un escenario estratégico para desarrollar competencias que permitan a los estudiantes comprender la complejidad de estos problemas y actuar en consecuencia. Sin embargo, existe una desconexión palpable entre los contenidos curriculares y las problemáticas ambientales reales que enfrentan los estudiantes en su entorno inmediato. La enseñanza tradicional de las ciencias, enfocada en la memorización y transmisión pasiva de conocimientos, limita el desarrollo de habilidades investigativas y actitudes proactivas ante los desafíos ambientales (Gutiérrez, 2017). Este desfase se agrava debido a la escasa integración de residuos como

recursos pedagógicos en la educación formal, lo cual restringe la posibilidad de contextualizar el aprendizaje y vincularlo con la realidad socioambiental de los estudiantes (Meira, 2015).

Ante este panorama, la incorporación de procesos científicos auténticos y la valorización de residuos como el aceite vegetal posconsumo en el currículo escolar constituyen no solo un reto sino también una oportunidad para innovar en la educación ambiental y científica. La transesterificación, proceso químico mediante el cual los triglicéridos del aceite vegetal reaccionan con un alcohol en medio básico para producir biodiésel y glicerina, ofrece un recurso pedagógico valioso que conecta teoría y práctica de forma contextualizada. No obstante, la aplicación efectiva de este recurso requiere superar barreras relacionadas con la formación docente, la disponibilidad de materiales didácticos adaptados y la implementación de metodologías activas que fomenten el pensamiento crítico y la participación estudiantil (UNESCO, 2020).

En este sentido, la presente investigación propone diseñar, implementar y evaluar una propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo mediante la transesterificación, adaptada a las condiciones y necesidades de las instituciones educativas públicas de Bucaramanga – Santander - Colombia, específicamente el colegio Gabriela Mistral y el colegio Las Américas. A través de esta intervención, se busca potenciar el aprendizaje significativo y la alfabetización científica de las estudiantes, promoviendo al mismo tiempo la conciencia ambiental y la responsabilidad social. La estrategia pedagógica está orientada a transformar las prácticas educativas tradicionales, incorporando metodologías activas como el aula invertida y el uso de tecnologías de la información y la comunicación, que facilitan la autonomía y el desarrollo de competencias científicas y ciudadanas. De manera particular, se contempla la participación activa y articulada de estudiantes de diferentes grados académicos en las actividades prácticas de

transformación del aceite, con el fin de promover el trabajo colaborativo, la interdisciplinariedad y el compromiso progresivo con la sostenibilidad ambiental.

Al implementar este enfoque, se espera superar la desconexión entre el currículo formal y las problemáticas ambientales reales, fortaleciendo la capacidad de las estudiantes para comprender y actuar sobre la gestión sostenible de residuos. Además, la experiencia práctica con la transformación del aceite vegetal posconsumo no solo favorece la construcción de conocimientos científicos, sino que también incentiva cambios en los hábitos de consumo y actitudes hacia la valorización de residuos, generando un impacto positivo dentro y fuera del ámbito escolar. De este modo, la investigación aporta una solución educativa innovadora y contextualizada que contribuye a mitigar los efectos negativos de la contaminación por aceite vegetal posconsumo y a formar ciudadanos comprometidos con la sostenibilidad.

Formulación de la pregunta de investigación

En el contexto contemporáneo de las ciencias de la educación, resulta imprescindible desarrollar investigaciones que respondan no solo a las demandas curriculares, sino también a los retos socioambientales que enfrentan los territorios. En tal sentido, esta tesis doctoral se enmarca dentro de una perspectiva pedagógica crítica y transformadora, orientada a explorar cómo la educación científica puede trascender el aula tradicional para convertirse en un motor de cambio cultural, actitudinal y cognitivo en contextos escolares reales.

La pregunta de investigación que orienta este estudio surge de una necesidad contextual concreta: la abundancia de aceite vegetal posconsumo como residuo doméstico e institucional en la ciudad de Bucaramanga, y la limitada apropiación, por parte de los estudiantes de secundaria, de los principios científicos y ambientales que permitirían su transformación responsable y su aprovechamiento como insumo energético. Esta brecha evidencia una desconexión entre los contenidos escolares y los problemas reales del entorno, lo cual exige repensar las estrategias didácticas tradicionales, incorporando metodologías activas, procesos experimentales contextualizados y tecnologías emergentes.

En consecuencia, la formulación de esta pregunta responde al propósito de construir conocimiento situado desde el campo de la educación, que articule saberes científicos con prácticas pedagógicas innovadoras, en coherencia con los marcos de la alfabetización científica, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y los enfoques constructivistas del aprendizaje significativo.

Pregunta principal de investigación

¿Cómo impacta la implementación de una propuesta pedagógica, centrada en la transformación del aceite vegetal posconsumo a través del proceso de transesterificación, en el desarrollo de competencias científicas, ambientales y ciudadanas en estudiantes de las instituciones educativas públicas de Bucaramanga, específicamente en el colegio Gabriela Mistral y el colegio Las Américas?

Esta pregunta reconoce la necesidad de diseñar procesos formativos que integren los componentes conceptuales, procedimentales y actitudinales de las ciencias naturales con una dimensión ética, social y contextualizada. En este sentido, se privilegia el abordaje interdisciplinario de problemáticas reales a través de proyectos experimentales que activen mecanismos cognitivos complejos, como el razonamiento inductivo, la toma de decisiones basada en evidencia y el análisis sistémico de las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad.

Asimismo, se parte de la premisa teórica de que el desarrollo de competencias científicas en el nivel de educación media no debe limitarse a la adquisición de contenidos, sino que debe incluir habilidades investigativas, pensamiento crítico, y una postura activa frente al conocimiento y su aplicación responsable en la solución de problemas del entorno.

Pregunta secundaria de investigación

¿De qué manera la integración de metodologías activas, tales como el aula invertida y el uso de tecnologías de la información y la comunicación, en el diseño y ejecución de esta propuesta pedagógica, contribuye a fomentar el pensamiento crítico, la autonomía en el aprendizaje y la conciencia ambiental crítica, promoviendo una educación contextualizada, significativa y orientada a la transformación social en el contexto escolar?

Esta segunda pregunta profundiza en el enfoque metodológico del estudio, problematizando los medios y estrategias que median el proceso de aprendizaje. Las metodologías activas como el aula invertida, en conjunto con recursos digitales (plataformas como Moodle, laboratorios virtuales, visualizadores de datos, etc.), no solo propician la diversificación de las formas de acceso al conocimiento, sino que también desplazan el centro del proceso educativo hacia el sujeto que aprende, permitiéndole asumir un rol protagónico en la construcción del saber.

El análisis de esta dimensión metodológica no se limita a aspectos técnicos o instrumentales, sino que indaga por su potencial formativo para el desarrollo de competencias metacognitivas, la reflexión crítica sobre el impacto ambiental de las acciones humanas, y la consolidación de una ciudadanía científica comprometida con la sostenibilidad.

Ambas preguntas, de carácter complementario, orientan la estructura lógica, metodológica y pedagógica de esta investigación. Se constituyen en el eje integrador entre la praxis educativa, la producción científica escolar y la formación de sujetos capaces de transformar su entorno a partir del conocimiento. Su formulación se fundamenta en principios de investigación-acción, en el paradigma socio-crítico de la educación y en las posibilidades emancipadoras de una enseñanza de las ciencias que recupere el vínculo entre lo técnico, lo ético y lo pedagógico.

Justificación

En este apartado se expone la justificación de la investigación, fundamentada en su pertinencia social, ambiental y educativa. A través de este análisis se argumenta la relevancia del estudio en relación con la problemática del aceite vegetal posconsumo, así como su contribución a la formación de ciudadanos críticos, al fortalecimiento de la educación científica y a la promoción de prácticas sostenibles en el contexto escolar.

Pertinencia social y ambiental

El manejo inadecuado del aceite vegetal posconsumo se ha consolidado como uno de los problemas ambientales más frecuentes en contextos urbanos, debido a que su eliminación continúa realizándose mediante prácticas domésticas que no contemplan su tratamiento ni su recuperación. La disposición directa de este residuo en redes de alcantarillado y cuerpos de agua provoca obstrucciones, disminuye la calidad del recurso hídrico, altera el equilibrio ecológico y favorece procesos de deterioro ambiental que afectan tanto los ecosistemas como la salud de las comunidades locales (Gómez & Ramírez, 2019). La persistencia de esta problemática está asociada, en parte, a la ausencia de campañas masivas de sensibilización, a una limitada gestión institucional y al desconocimiento generalizado sobre alternativas de valorización (Pérez & Salazar, 2021).

En este escenario, abordar el aceite vegetal posconsumo desde la escuela adquiere relevancia social porque permite que los estudiantes comprendan el impacto ambiental de las acciones cotidianas y reconozcan el papel que desempeñan como ciudadanos en la protección del entorno. La transformación de este residuo en productos de valor representa, además, una oportunidad para promover conductas responsables, fortalecer la cultura ambiental y fomentar prácticas

locales de sostenibilidad alineadas con el bienestar colectivo y con las dinámicas comunitarias del territorio (Vargas & Medina, 2017; Sánchez et al., 2023).

De esta manera, la investigación se justifica social y ambientalmente por su capacidad para intervenir una problemática real que afecta directamente a la población, y por su potencial para impulsar procesos formativos que contribuyen a la construcción de comunidades más conscientes, informadas y capaces de actuar frente a los desafíos ecológicos actuales.

Pertinencia educativa

En el ámbito escolar, la enseñanza de las ciencias todavía mantiene enfoques tradicionales que no logran conectar plenamente los contenidos teóricos con las problemáticas del entorno. Este vacío resulta especialmente evidente en instituciones públicas de Bucaramanga, como en las instituciones educativas: Gabriela Mistral y Las Américas, donde se identifican dificultades para integrar la educación ambiental con experiencias científicas significativas y contextualizadas. A pesar de los avances curriculares en materia de sostenibilidad, persiste una distancia entre el currículo formal y las realidades ambientales que los estudiantes viven cotidianamente, lo que limita la construcción de conciencia crítica y la participación activa en prácticas responsables (López & Martínez, 2015; Torres, 2020).

La transformación del aceite vegetal posconsumo ofrece una oportunidad educativa para subsanar este vacío, ya que permite articular conceptos de química, física y biología con un problema real del entorno inmediato. A través de procesos experimentales que simulan prácticas científicas auténticas, los estudiantes pueden relacionar teoría y práctica, fortalecer su comprensión conceptual y desarrollar actitudes sostenibles informadas. Esta perspectiva es coherente con enfoques pedagógicos contemporáneos que promueven el aprendizaje significativo, la

indagación, la resolución de problemas y la experiencia directa como vías para mejorar la calidad del aprendizaje científico (Rodríguez & Gómez, 2018).

Asimismo, la incorporación de metodologías activas —como el aula invertida, el trabajo experimental guiado y el uso de tecnologías educativas— favorece la autonomía, la colaboración y el pensamiento crítico, elementos fundamentales para la formación de competencias ciudadanas y científicas en el siglo XXI (Martínez & Ruiz, 2022; Herrera et al., 2014). De acuerdo con las orientaciones internacionales en educación, el uso de TIC y de estrategias innovadoras dinamiza el proceso formativo y permite construir ambientes pedagógicos más pertinentes, participativos y acordes con las demandas actuales del sistema educativo (UNESCO, 2020; Mendoza & Cruz, 2023).

Desde esta perspectiva, la pertinencia educativa de la investigación radica en la necesidad de fortalecer la vinculación entre los contenidos de ciencias y las problemáticas ambientales locales, mediante una propuesta pedagógica que responda directamente a los vacíos detectados en las instituciones mencionadas.

Pertinencia investigativa

Desde el punto de vista investigativo, existe una necesidad evidente de generar evidencia empírica sólida sobre el impacto que tienen las propuestas pedagógicas contextualizadas en la formación científica y ambiental de los estudiantes. Aunque la educación ambiental ha ganado espacio en los discursos institucionales, aún son limitadas las investigaciones que evalúan, con rigor metodológico, el efecto de intervenciones que integran procesos científicos reales —como la transesterificación del aceite vegetal posconsumo— dentro de escenarios escolares (Pérez & Vargas, 2019).

En las instituciones de estudio seleccionadas no solo se identifican vacíos pedagógicos, sino también una escasez de modelos didácticos que permitan comprender cómo las experiencias experimentales influyen sobre variables específicas como la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles, ejes centrales de esta investigación. El diseño mixto y cuasi-experimental empleado permite evaluar estos cambios con mayor precisión, combinando datos cuantitativos y cualitativos que aportan una visión integral del proceso educativo (Lara & Fernández, 2021).

Además, la investigación contribuye al campo educativo al documentar de manera sistemática la implementación de la propuesta pedagógica y al analizar la relación entre los aprendizajes científicos y los productos experimentales obtenidos por los estudiantes. Esto ofrece un marco replicable que puede orientar futuras intervenciones y apoyar la toma de decisiones pedagógicas basadas en evidencia.

1. Marco de referencia

El presente marco de referencia integra los fundamentos teóricos, conceptuales y normativos que sustentan la investigación, estableciendo la relación entre el problema de estudio, los enfoques pedagógicos adoptados y el diseño metodológico implementado. A través de este apartado se articulan los principales referentes que orientan la comprensión de la educación ambiental, la enseñanza de las ciencias y la transformación de problemáticas reales en contextos escolares. De este modo, se garantiza la coherencia interna del estudio, al vincular de manera consistente los elementos conceptuales con las decisiones pedagógicas y metodológicas desarrolladas en la investigación.

1.1 Marco Legal

El marco legal de la presente investigación se construye a partir de un entramado normativo multiescalar que articula derechos fundamentales, políticas públicas, orientaciones curriculares, y compromisos internacionales asumidos por Colombia en materia ambiental y educativa. En este sentido, se justifica plenamente el desarrollo de una propuesta pedagógica enfocada en la transformación del aceite vegetal posconsumo como estrategia para fortalecer competencias científicas y ciudadanas desde una perspectiva de sostenibilidad. Esta sección permite evidenciar cómo la legislación vigente respalda la intervención educativa en problemáticas socioambientales reales, validando su pertinencia pedagógica y su proyección social.

En primer lugar, la Constitución Política de Colombia (1991) establece principios esenciales que sustentan esta investigación. El Artículo 67 define la educación como un derecho de la persona y un servicio público que cumple una función social, orientada a la formación integral. Paralelamente, el Artículo 79 reconoce el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano, comprometiendo al Estado y a los ciudadanos con su preservación. Esta interrelación entre educación

y medioambiente establece una base constitucional para que las instituciones educativas se conviertan en escenarios para la reflexión, el análisis crítico y la transformación de prácticas que afectan la sostenibilidad ambiental.

En el plano normativo ambiental, el tratamiento del aceite vegetal posconsumo ha sido incorporado en distintos marcos regulatorios. Aunque no existe una ley específica para su manejo en Colombia, su peligrosidad potencial lo incluye dentro del ámbito del Decreto 4741 de 2005, el cual reglamenta la gestión integral de residuos peligrosos. Según esta normativa, los residuos generados a partir de aceites usados pueden contaminar el suelo y los cuerpos de agua, por lo que se hace necesario su recolección, almacenamiento y disposición final adecuada, involucrando a los distintos actores sociales, entre ellos las instituciones educativas. Además, el Decreto 1076 de 2015, compilatorio del sector ambiental, define lineamientos para la protección del recurso hídrico, directamente afectado por la disposición inadecuada del aceite vegetal posconsumo.

A nivel de políticas educativas, la Ley 115 de 1994 o Ley General de Educación continúa siendo la columna vertebral del sistema educativo nacional. Esta norma establece como uno de sus fines “la formación en el respeto a la vida y a los demás derechos humanos, a la paz, a los principios democráticos, a la convivencia, a la justicia, a la solidaridad, y al ambiente”. En concordancia con lo anterior, la Ley 115 contempla el desarrollo de proyectos pedagógicos transversales, dentro de los cuales el Proyecto Ambiental Escolar (PRAE) es fundamental. Según el Decreto 1860 de 1994, que reglamenta la organización de los PRAE, estos deben responder a las condiciones sociales, culturales y ecológicas del contexto institucional, lo cual justifica plenamente que esta investigación se enmarque en un proyecto pedagógico contextualizado, con una problemática ambiental específica como eje articulador.

Asimismo, la Ley 1549 de 2012, por medio de la cual se fortalece la institucionalización de la política nacional de educación ambiental, promueve la articulación entre los sectores estatal, educativo y comunitario. Esta ley establece que los PRAE deben ser herramientas para fomentar la conciencia ambiental en los estudiantes, promover el conocimiento crítico de su entorno y desarrollar habilidades para su transformación. Este principio se desarrolla también en el Documento CONPES 3874 de 2016, que formaliza la Política Nacional de Educación Ambiental, definiendo que la educación ambiental debe ir más allá de la información y buscar la transformación de actitudes, conocimientos y valores que fortalezcan la capacidad de los individuos para tomar decisiones responsables con su entorno.

A nivel internacional, Colombia ha ratificado diversos compromisos que refuerzan el valor legal y político de esta investigación. En particular, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada mediante el CONPES 3918 de 2018, establece los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los cuales se destacan el ODS 4 (“Educación de calidad”) y el ODS 12 (“Producción y consumo responsables”). El ODS 4 propone garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida. La meta 4.7 hace énfasis en que los estudiantes deben adquirir conocimientos y habilidades necesarias para promover el desarrollo sostenible. Por su parte, el ODS 12 aboga por prácticas sostenibles en el uso de recursos, siendo el aceite vegetal posconsumo un insumo crítico cuyo manejo inadecuado tiene consecuencias ambientales significativas.

Desde la perspectiva curricular, el Ministerio de Educación Nacional (MEN) ha emitido orientaciones para fortalecer la enseñanza de las ciencias naturales con enfoque en competencias y resolución de problemas reales. Los Lineamientos Curriculares de Ciencias Naturales (MEN, 2010) establecen que el aprendizaje debe partir de la cotidianidad de los estudiantes y vincularse

a fenómenos naturales y sociales de su entorno. Este principio ha sido reafirmado por documentos recientes como el informe del MEN sobre innovación educativa y pensamiento científico (MEN, 2022), que recomienda integrar metodologías activas, indagación guiada, uso de TIC y proyectos interdisciplinarios que conecten el aula con la vida real.

En el contexto regional, Bucaramanga ha establecido compromisos institucionales para el fomento de la sostenibilidad y la participación ciudadana. El Plan de Desarrollo “Bucaramanga Ciudad Sostenible 2020–2023” incorpora como eje transversal la educación ambiental, convocando a las instituciones educativas a desarrollar estrategias para la formación de competencias ciudadanas ambientales. De igual modo, el Acuerdo Municipal 031 de 2021, expedido por el Concejo Municipal, establece que las instituciones de educación básica y media deben promover procesos de formación ambiental integrados a sus planes de estudio, especialmente aquellos que aborden problemáticas urbanas como el manejo de residuos sólidos y líquidos. De manera complementaria, el marco normativo sobre tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en educación también sustenta este estudio. La Ley 1341 de 2009, modificada por la Ley 1978 de 2019, promueve el acceso y uso eficiente de las TIC para transformar las dinámicas educativas y sociales. En línea con esta legislación, el Plan Nacional de Conectividad Educativa (PNCE, 2022–2025) impulsado por el Ministerio de las TIC y el MEN, incentiva el uso pedagógico de herramientas digitales en proyectos de aula, lo que valida la inclusión del aula invertida, la experimentación virtual y el trabajo colaborativo apoyado en tecnologías, componentes esenciales de la propuesta de esta tesis.

En conjunto, el marco legal aquí expuesto configura un andamiaje sólido que no solo avala, sino que exige a las instituciones educativas asumir un rol activo en la transformación del entorno a través de procesos pedagógicos significativos, contextualizados e innovadores. La

propuesta de esta investigación doctoral encuentra respaldo legal en el deber constitucional de proteger el ambiente, en las políticas públicas de educación ambiental, en las normativas de gestión de residuos y en las directrices curriculares que promueven una educación científica con sentido crítico y social.

Por último, la Tabla 1. Matriz legal comparativa colombiana, presenta una síntesis de las normas, decretos y lineamientos que sustentan jurídicamente el desarrollo de esta tesis doctoral en educación, enfocada en la transformación pedagógica del aceite vegetal posconsumo.

Tabla 1

Matriz legal comparativa colombiana

Norma o Documento	Año	Aplicación al Proyecto
Constitución Política de Colombia	1991	Artículos 67 y 79 sustentan el derecho a la educación integral y a un ambiente sano. Fundamentan la propuesta como una acción pedagógica con responsabilidad social y ambiental.
Ley General de Educación – Ley 115	1994	Establece la educación ambiental como componente transversal del currículo. Justifica la

Norma o Documento	Año	Aplicación al Proyecto
		creación de proyectos escolares contextualizados como el presente estudio.
Decreto 1860	1994	Regula los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), dentro de los cuales se enmarca esta investigación como propuesta pedagógica para el desarrollo de competencias científicas.
Decreto 4741	2005	Regula la gestión de residuos peligrosos, entre ellos el aceite vegetal posconsumo. Sustenta la necesidad de educar en el manejo responsable del mismo.
Ley 1341 / Ley 1978	2009 / 2019	Promueven el uso pedagógico de las TIC. Respaldan el uso del aula

Norma o Documento	Año	Aplicación al Proyecto
		invertida y otras herramientas tecnológicas como parte del modelo educativo.
Lineamientos Curriculares Ciencias Naturales – MEN	2010	Indican que la enseñanza debe contextualizarse en problemáticas reales. Respaldan la inclusión del Aceite vegetal posconsumo como eje de un proceso científico escolar.
Ley 1549	2012	Fortalece la educación ambiental como política nacional. Refuerza el papel de la escuela como agente transformador del entorno local.
Decreto 1076	2015	Establece la regulación sobre protección del agua y manejo de residuos.

Norma o Documento	Año	Aplicación al Proyecto
		Justifica el componente ambiental del proyecto desde una perspectiva legal.
CONPES 3874 – Política Nacional de Educación Ambiental	2016	Define lineamientos para una educación ambiental crítica, activa y participativa. Coincide con el enfoque metodológico del proyecto.
Pacto por la Sostenibilidad – ODS 4 y 12 (Agenda 2030)	2015–2022	Metas 4.7 y 12.5 respaldan la formación para el desarrollo sostenible y la gestión adecuada de residuos. Refuerzan el enfoque global-local del proyecto.
Acuerdo Municipal 031 – Bucaramanga	2021	Obliga a instituciones educativas a incluir problemáticas ambientales locales como eje de sus

Norma o Documento	Año	Aplicación al Proyecto
		planes de estudio. Se relaciona directamente con la propuesta del aceite vegetal posconsumo.
Plan Nacional de Conectividad Educativa (PNCE)	2022–2025	Impulsa el uso de TIC en entornos pedagógicos innovadores. Justifica el uso de tecnologías como parte del ambiente de aprendizaje propuesto.
MEN – Informe de Innovación Educativa y Enseñanza de las Ciencias	2022	Recomienda el uso de metodologías activas, TIC y problemas reales para promover pensamiento científico. Valida pedagógicamente el enfoque del proyecto.

Nota. Elaboración propia.

La matriz legal presentada no solo sistematiza el marco normativo que sustenta la investigación, sino que cumple una función metodológica al permitir contextualizar la propuesta pedagógica dentro de los lineamientos educativos, ambientales y tecnológicos vigentes. En este

sentido, la Tabla facilita la comprensión del fundamento jurídico del estudio y evidencia la coherencia entre el diseño de la intervención y las políticas públicas que orientan la educación para la sostenibilidad en Colombia.

1.2 Marco Normativo

El desarrollo de esta investigación doctoral encuentra su fundamento en un entramado normativo sólido que ha evolucionado en las últimas décadas para responder a los desafíos educativos, ambientales y sociales que enfrenta Colombia y la comunidad internacional. El estudio se inscribe en una agenda formativa que reconoce la urgencia de articular el conocimiento científico con la acción educativa orientada a la sostenibilidad, la ciudadanía crítica y el cuidado de los ecosistemas.

En el contexto colombiano, uno de los pilares regulatorios más importantes es la Ley General de Educación (Ley 115 de 1994), la cual, pese a haber sido promulgada hace más de dos décadas, conserva plena vigencia en sus principios rectores. En su articulado se establece que la educación debe contribuir al desarrollo integral de las personas, fomentando en ellas el respeto por el entorno natural, la valoración del conocimiento científico y el compromiso social. Esta ley concibe a las instituciones educativas no solo como espacios de transmisión de saberes, sino también como escenarios para la formación de ciudadanos capaces de transformar su realidad. En este sentido, el tratamiento educativo de problemáticas ambientales, como la gestión del aceite vegetal posconsumo, se convierte en una vía legítima y necesaria para consolidar los fines educativos allí propuestos.

Complementariamente, la Ley 1549 de 2012, que busca fortalecer la gestión ambiental institucional, promueve de manera explícita la inclusión de componentes ambientales en los currículos escolares. Esta normativa dio lugar al Sistema Nacional de Educación Ambiental Escolar

(SINAES), el cual contempla que cada institución debe diseñar estrategias formativas para el cuidado del entorno, a través de proyectos pedagógicos participativos y contextualizados. Dentro de este marco, el desarrollo de procesos científicos en el aula, como la transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel, no solo es deseable, sino que responde al cumplimiento de directrices oficiales.

De particular relevancia para esta investigación es también el Decreto 1076 de 2015, el cual integra la normativa ambiental en Colombia y establece criterios claros para la gestión integral de residuos. En lo que respecta a sustancias como el aceite vegetal posconsumo, esta norma plantea la necesidad de reducir el impacto ambiental de su disposición final, promoviendo alternativas de aprovechamiento. En consonancia, la Resolución 1362 de 2007, aún vigente, establece las condiciones técnicas para la manipulación de residuos peligrosos, orientando a los generadores institucionales como los laboratorios escolares hacia prácticas responsables y formativas.

A nivel de política pública reciente, el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, bajo el lema Colombia potencia mundial de la vida, ha planteado una reconfiguración profunda del rol de la educación frente a los desafíos ecosistémicos del país. Se reconoce a las instituciones educativas como nodos de cambio territorial, donde deben promoverse procesos formativos que vinculen el aprendizaje con la acción social y ambiental. Este plan nacional impulsa la transversalización del componente ambiental en todas las áreas del conocimiento, dando cabida a experiencias de aula que convierten problemáticas locales como la disposición de aceites en oportunidades didácticas y de transformación comunitaria.

Así mismo, el CONPES 3995 de 2020, al establecer directrices para el fortalecimiento de la educación rural, introduce el principio de pertinencia territorial, resaltando la necesidad de que los proyectos educativos respondan a las condiciones y recursos del entorno. Aunque enfocado

en lo rural, este documento técnico establece una lógica de adaptación curricular que también resulta útil en contextos urbanos vulnerables, como aquellos en los que se sitúa esta investigación.

La Ley 2294 de 2023, al reformular el Plan Nacional de Desarrollo en términos de justicia ambiental, consolidó un enfoque holístico donde la educación aparece como eje articulador de las transiciones económicas, sociales y ecológicas. En su articulado se promueve la innovación educativa como mecanismo para enfrentar el cambio climático y se asigna un rol protagónico a las comunidades escolares en la defensa del patrimonio natural. La norma reconoce el papel activo de los niños y jóvenes en procesos de vigilancia ambiental y de generación de alternativas sostenibles.

En el plano internacional, cabe destacar que Colombia es firmante de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada en 2015. Este compromiso multilateral establece una serie de metas orientadas al equilibrio entre desarrollo y conservación. El ODS 4 propone asegurar una educación inclusiva y de calidad, con énfasis en la formación para el desarrollo sostenible, los derechos humanos y la cultura de paz. Paralelamente, el ODS 12, que promueve patrones de producción y consumo sostenibles, se vincula directamente con esta investigación al reconocer la necesidad de reducir el desperdicio y aprovechar recursos como el Aceite Vegetal Posconsumo.

En sintonía con esta agenda, el Marco de Acción de Educación 2030, emanado de la Conferencia de Incheon (UNESCO, 2015), propone una transformación educativa basada en la equidad, la inclusión y la sostenibilidad. Este documento aboga por una educación que no se limite a la acumulación de contenidos, sino que promueva el pensamiento crítico, la innovación y la acción transformadora. Tales lineamientos legitiman los enfoques pedagógicos participativos y contextualizados que esta tesis adopta.

La UNESCO (2020), en sus orientaciones para la reestructuración de los sistemas educativos frente a la emergencia climática, ha insistido en la urgencia de incluir la dimensión ambiental como eje transversal del currículo. A través de metodologías activas, experiencias de laboratorio y proyectos escolares, se recomienda formar estudiantes con capacidad de incidencia en sus comunidades, lo cual guarda estrecha relación con la metodología propuesta en esta investigación.

En el contexto latinoamericano, la Declaración de Lima sobre Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible (2022), firmada por varios países de la región, enfatiza la necesidad de educar para la resiliencia ecológica, reconociendo el conocimiento local, el diálogo de saberes y la responsabilidad intergeneracional. Esta declaración constituye un referente importante para legitimar los procesos de co-construcción de conocimiento en los que se basa la propuesta investigativa.

No menos relevante resulta la Ley 1732 de 2014, que instituyó la Cátedra de la Paz como espacio formativo obligatorio. Esta norma amplía la noción de paz más allá del conflicto armado, incorporando dimensiones ambientales, culturales y sociales. La gestión responsable del Aceite Vegetal Posconsumo puede ser leída, desde este marco, como una forma de construcción de paz territorial y ecológica.

Por último, conviene mencionar las directrices del MEN (Ministerio de Educación Nacional) para el fortalecimiento de las competencias científicas en la educación básica y media (MEN, 2017), en las cuales se promueve una didáctica de la ciencia que combine el trabajo experimental, la resolución de problemas reales y la reflexión ética sobre el impacto de la tecnología. La propuesta de aprovechar el aceite vegetal en prácticas de aula responde a estas orientaciones,

al permitir que los estudiantes comprendan el método científico a través de una problemática significativa para su entorno.

1.3 Marco conceptual

La presente investigación se sustenta en un conjunto de categorías teóricas que orientan el análisis de una propuesta pedagógica centrada en la transformación del aceite vegetal posconsumo (AVPC) y su efecto sobre la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles en estudiantes de educación media. Los conceptos desarrollados —*transformación pedagógica, aprendizaje activo constructivista, residuo posconsumo, transesterificación, educación para la sostenibilidad, competencia científica y ciudadanía ambiental*— se articulan de acuerdo con las variables del estudio y con el enfoque epistemológico que guía la investigación.

Transformación pedagógica

La transformación pedagógica se entiende como un proceso de revisión crítica, continua y deliberada de las prácticas de enseñanza con el fin de promover modelos centrados en la participación activa del estudiante y en la construcción situada del conocimiento. Según Imbernón (2021), este proceso implica “reconfigurar las dinámicas educativas para responder a las exigencias sociales contemporáneas y favorecer experiencias de aprendizaje más profundas y pertinentes”. De acuerdo con García y López (2023), transformar la práctica docente demanda integrar problemáticas reales dentro del currículo para lograr que los contenidos adquieran sentido en la vida cotidiana del estudiante.

En esta investigación, la transformación pedagógica constituye el punto de partida para diseñar una intervención que sustituya enfoques transmisivos en ciencias naturales por prácticas experimentales contextualizadas, ancladas en una problemática ambiental concreta como la gestión del AVPC.

Aprendizaje activo desde el enfoque constructivista

El aprendizaje activo se concibe como un enfoque en el cual los estudiantes participan directamente en actividades que requieren analizar, experimentar, dialogar, resolver problemas y reflexionar sobre su propio proceso. Bonwell y Eison (2020) sostienen que este enfoque permite que los estudiantes elaboren significados a partir de su interacción con fenómenos reales.

Este planteamiento se vincula estrechamente con el constructivismo, entendido como la teoría que afirma que el conocimiento se construye mediante la interacción entre las experiencias y los esquemas cognitivos previos del sujeto (Piaget, 2018; Vygotsky, 2019). Desde esta perspectiva, el rol del docente es mediar y orientar la actividad intelectual del estudiante, facilitando entornos que estimulen la comprensión conceptual.

La presente propuesta pedagógica incorpora estrategias como aula invertida, experimentación guiada y trabajo colaborativo, coherentes con la variable dependiente relacionada con la comprensión conceptual de procesos científicos.

Residuo posconsumo y gestión del aceite vegetal usado

El término *residuo posconsumo* hace referencia a materiales descartados tras su uso doméstico, industrial o comercial, que requieren una gestión adecuada para evitar impactos ambientales. La Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2022) define estos residuos como aquellos que, al no ser tratados apropiadamente, pueden afectar la salud humana y el equilibrio ecosistémico.

El AVPC se considera un residuo de alta carga contaminante debido a su incidencia sobre cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado. Pérez y Salazar (2021) explican que, una vez vertido, forma capas que reducen la oxigenación del agua, dificultan los procesos de tratamiento y alteran el funcionamiento de la biodiversidad acuática.

En este estudio, la gestión del AVPC constituye la base temática de la propuesta pedagógica y opera como variable independiente, en tanto estructura las actividades experimentales que se desarrollan durante la intervención.

Transesterificación como proceso científico escolar

La transesterificación es una reacción química en la que un triglicérido reacciona con un alcohol —generalmente metanol o etanol— en presencia de un catalizador para producir ésteres (biodiésel) y glicerina (Knothe, 2020). Este proceso ha sido utilizado en distintos escenarios educativos por su valor didáctico, dado que articula conceptos de química orgánica, estequiometría, separación de fases y análisis de variables experimentales (Rodríguez & Gómez, 2018).

Su incorporación en la presente propuesta pedagógica permite crear situaciones de aprendizaje basadas en experiencias reales, conectando la dimensión cognitiva de la ciencia escolar con habilidades procedimentales y actitudes ambientales.

Educación para la sostenibilidad

La educación para la sostenibilidad constituye un enfoque transversal que integra las dimensiones ambiental, social y económica para formar sujetos capaces de actuar de manera responsable frente a los retos globales. La UNESCO (2020) plantea que este tipo de educación debe promover no solo conocimientos, sino también valores, habilidades y actitudes orientadas a la resolución de problemas complejos y a la toma de decisiones informadas.

Vargas y Medina (2025) destacan que la sostenibilidad en contextos educativos implica vincular los contenidos disciplinarios con situaciones reales del entorno para desarrollar conciencia crítica y comportamiento responsable.

En esta investigación, este enfoque sustenta la segunda variable dependiente —las actitudes sostenibles— y orienta el diseño de actividades que promuevan la reflexión ambiental y la participación ciudadana.

Competencia científica y ciudadanía ambiental

La competencia científica se define como la capacidad de comprender fenómenos naturales, utilizar el pensamiento lógico y aplicar conocimientos científicos para resolver problemas o tomar decisiones fundamentadas (OCDE, 2019). Esta competencia involucra habilidades cognitivas, procedimentales y comunicativas.

La ciudadanía ambiental, por su parte, se refiere a la disposición a participar en acciones individuales y colectivas orientadas a la protección del ambiente, sustentadas en valores éticos y en la comprensión de la interdependencia entre los seres humanos y la naturaleza (Dobson, 2021).

Ambos conceptos se articulan en esta investigación, ya que el fortalecimiento de la comprensión conceptual y de las actitudes sostenibles favorece la formación de estudiantes capaces de aplicar conocimientos científicos en contextos reales y de asumir conductas responsables frente al manejo de residuos como el AVPC.

Integración conceptual

La convergencia de los conceptos desarrollados establece un marco sólido para comprender la relación entre la propuesta pedagógica basada en la transformación del AVPC y los aprendizajes de los estudiantes. La transformación pedagógica y el aprendizaje activo fundamentan el enfoque metodológico; la gestión del residuo posconsumo y la transesterificación proporcionan el eje contextual y experimental; y la educación para la sostenibilidad, la competencia científica y la ciudadanía ambiental definen el horizonte formativo del estudio.

Todo ello permite sustentar conceptualmente el análisis sobre cómo la intervención puede influir en la comprensión conceptual y en las actitudes sostenibles, en consonancia con los objetivos y el diseño de investigación.

1.3.1 Definiciones

En este apartado se presentan las definiciones conceptuales que fundamentan la investigación, con el propósito de delimitar los principales enfoques teóricos y categorías analíticas que orientan el estudio. Estas definiciones permiten establecer un marco de referencia claro para la interpretación de los resultados, así como para la comprensión de las relaciones entre las variables pedagógicas, ambientales y científicas abordadas en la propuesta.

Enfoque constructivista del aprendizaje.

El constructivismo es una corriente epistemológica que sostiene que el conocimiento se construye activamente a partir de la interacción entre el sujeto y su entorno (Piaget, 1950; Bruner, 1977). Desde una perspectiva sociocultural, este proceso se favorece mediante la mediación, el lenguaje y la interacción social (Vygotsky, 1978; Hernández, 2018). En el contexto de este estudio, el constructivismo orienta la propuesta pedagógica al promover aprendizajes basados en experiencias experimentales, permitiendo que los estudiantes elaboren comprensiones conceptuales sobre la transesterificación y resignifiquen sus prácticas frente al manejo del aceite vegetal posconsumo. Así, el concepto fundamenta las estrategias de aula invertida, experimentación guiada y trabajo colaborativo, vinculándose directamente con la variable de comprensión conceptual y con la competencia científica que se busca desarrollar.

Educación ambiental y sostenibilidad

La educación ambiental se define como un proceso formativo orientado al desarrollo de conocimientos, valores y actitudes para la comprensión y solución de problemáticas ecológicas

(Sauvé, 2010). En el marco normativo colombiano, se concibe como un eje transversal que articula escuela, territorio y responsabilidad social (Mejía & Robayo, 2016). La sostenibilidad, por su parte, se entiende como un principio que integra dimensiones ecológicas, sociales y económicas para promover acciones responsables frente al ambiente (Leff, 2015; Rodríguez & Herrera, 2021).

En esta investigación, ambos conceptos operan como fundamento de la variable “actitudes sostenibles”, al orientar la construcción de juicios críticos sobre el uso del AVPC y promover la participación activa en prácticas escolares de manejo y valorización de residuos. Su delimitación conceptual permite interpretar los cambios actitudinales asociados a la intervención pedagógica.

Ciencia escolar y enseñanza contextualizada

La ciencia escolar se refiere a la adaptación de los saberes científicos al ámbito educativo, mediante actividades que facilitan la comprensión de fenómenos y el desarrollo de competencias como la indagación, la argumentación y el análisis crítico (Acevedo, 2010). La enseñanza contextualizada, por su parte, plantea que los contenidos científicos deben abordarse a partir de situaciones reales del entorno para favorecer su significado escolar (Jiménez-Aleixandre & Puig, 2013).

En esta investigación, estos conceptos permiten estructurar el proceso experimental —la transes-
terificación del AVPC— como un escenario para reforzar la comprensión conceptual, relacionar teoría y práctica, y promover aprendizajes interdisciplinarios. Además, justifican el uso de proyectos experimentales como estrategia didáctica vinculada con las variables cognitivas del estudio.

Pedagogía crítica y ciudadanía ambiental

La pedagogía crítica concibe la educación como un proceso de reflexión y transformación social, mediante el análisis de las realidades que afectan a los sujetos (Freire, 1970; Giroux, 2011). Desde esta perspectiva, la formación ambiental no se limita a la transmisión de contenidos, sino que invita a cuestionar prácticas de consumo y relaciones socioambientales que generan impactos negativos (Muñoz, 2020).

La ciudadanía ambiental se entiende como la disposición para actuar ética y responsablemente frente al ambiente, participando en la toma de decisiones y en el cuidado del territorio (Dobson, 2007; Svampa, 2019).

En este estudio, ambos conceptos orientan la dimensión actitudinal de la intervención, dado que el proyecto sobre AVPC promueve procesos de reflexión crítica y comportamientos responsables asociados a la sostenibilidad. Su delimitación permite analizar cómo la propuesta pedagógica influye en la transformación de actitudes sostenibles en los estudiantes.

Tecnologías educativas, aula invertida y aula extendida Moodle

Las tecnologías educativas se definen como recursos y plataformas que facilitan procesos de enseñanza y aprendizaje mediante la mediación digital (Pérez & Ramírez, 2023). El modelo de aula invertida o *flipped classroom* consiste en trasladar el estudio de contenidos teóricos a espacios virtuales para dedicar el tiempo presencial a la experimentación, la discusión y la resolución de problemas (Bergmann & Sams, 2012). Por su parte, el aula extendida Moodle se refiere al uso de esta plataforma como entorno virtual de apoyo, que permite gestionar contenidos, retroalimentar procesos y ampliar la interacción más allá del aula física (Rodríguez & Ríos, 2022). En esta investigación, estas definiciones respaldan la integración de TIC como mediadoras del aprendizaje científico. Su función operativa se vincula con la variable de comprensión

conceptual al facilitar el acceso anticipado a contenidos teóricos necesarios para comprender la transesterificación, y con la dimensión procedimental al apoyar la organización de actividades experimentales y colaborativas.

1.4 Marco Teórico

El marco teórico de esta investigación doctoral se fundamenta en una interrelación crítica de teorías pedagógicas, ambientales, científicas y tecnológicas, orientadas a la transformación educativa mediante la gestión del aceite vegetal posconsumo. Se asume un enfoque constructivista y sostenible que permite resignificar las prácticas escolares desde una perspectiva crítica, situada y transformadora. Este marco se estructura en diversas secciones que articulan los conceptos clave que sustentan la investigación.

1.4.1 Teorías Pedagógicas

Esta investigación se sustenta en varias teorías pedagógicas clave:

Constructivismo Social (Vygotsky, 1978): El aprendizaje es un proceso social y activo, construido en interacción con otros y con el contexto.

Aprendizaje Basado en Proyectos (Thomas, 2000; Blumenfeld et al., 1991): Enfatiza el aprendizaje interdisciplinario, contextualizado y significativo mediante la resolución de problemas reales.

Pedagogía Crítica (Freire, 1970; Giroux, 2011): Promueve una educación emancipadora que fomenta la conciencia crítica y el compromiso sociopolítico.

Enseñanza para la Comprensión (Perkins, 1992): Centra el aprendizaje en la comprensión profunda de los contenidos, promoviendo la transferencia de conocimientos.

1.4.2 Teorías Ambientales

Las teorías ambientales proporcionan un enfoque ecológico y de sostenibilidad:

Educación para el Desarrollo Sostenible (UNESCO, 2010; Tilbury, 2012): Busca formar ciudadanos críticos y comprometidos con la sostenibilidad.

Ecopedagogía (Gadotti, 2008): Aboga por una educación centrada en la justicia ambiental y la responsabilidad ecológica.

Gestión Integral de Residuos Sólidos (PNUMA, 2015): Proporciona directrices para reducir, reutilizar y reciclar residuos de forma sostenible.

1.4.3 Teorías Científicas

Estas teorías fundamentan el análisis del aceite vegetal posconsumo desde un enfoque científico escolar:

Química Verde (Anastas & Warner, 1998): Enfatiza procesos químicos que minimizan el impacto ambiental.

Termodinámica de Reacciones Químicas: Explica los procesos energéticos en la conversión del aceite vegetal posconsumo en biodiésel.

Educación CTS (Ciencia, Tecnología y Sociedad) (Acevedo, 2004): Conecta el conocimiento científico con sus implicaciones sociales y éticas.

1.4.4 Teorías Tecnológicas

La tecnología educativa es parte integral del modelo didáctico propuesto:

Modelo TPACK (Mishra & Koehler, 2006): Integra conocimiento pedagógico, disciplinar y tecnológico en el diseño instruccional.

Teoría del Conectivismo (Siemens, 2005): Fundamenta el aprendizaje en red y el uso de tecnologías digitales.

Aprendizaje Móvil y Ubicuo (Traxler, 2009; Cobo & Moravec, 2011): Propone una educación flexible apoyada en plataformas digitales como Moodle.

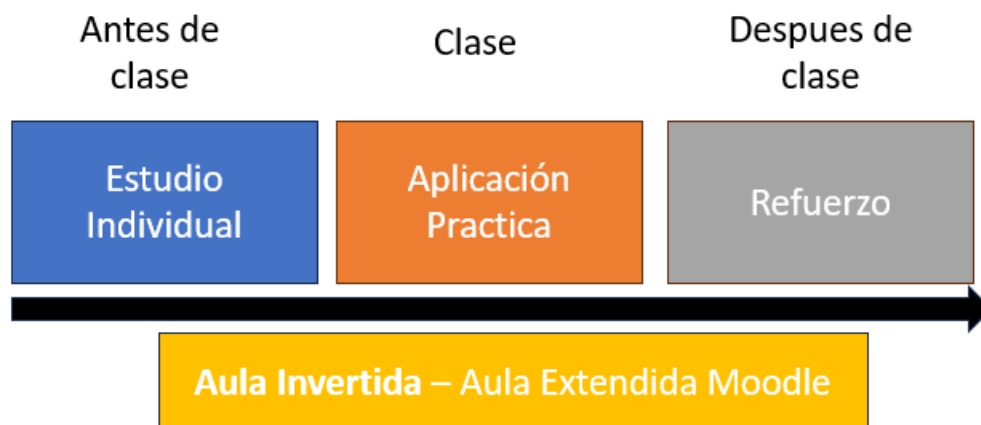
1.4.5 Aula Invertida y Aula Extendida Moodle

La metodología del aula invertida (flipped classroom) redefine los roles tradicionales de enseñanza y aprendizaje. Esta estrategia, implementada por Bergmann y Sams (2012), propone que los estudiantes accedan previamente a los contenidos teóricos mediante recursos digitales y que el tiempo presencial se dedique a actividades colaborativas, experimentales y de resolución de problemas (Verón, Marín & Barrios, 2020).

En este contexto, la plataforma Moodle actúa como un entorno de aula extendida, permitiendo la continuidad del proceso formativo fuera del aula física. Moodle proporciona una estructura pedagógica que integra contenidos, actividades, evaluaciones y retroalimentaciones, favoreciendo la personalización del aprendizaje y el acompañamiento docente (Gunawardena & Liyanage, 2020). Su uso fortalece la autonomía, la metacognición y el trabajo colaborativo, como se ilustra a continuación en la figura 3.

Figura 3

Modelo de Aula Invertida + Aula Extendida Moodle



Nota. Elaboración propia.

1.4.6 Problemática del Aceite vegetal posconsumo

La disposición inadecuada del aceite vegetal posconsumo (AVPC) genera impactos ambientales y riesgos para la salud. Su vertimiento en desagües contribuye a la contaminación del agua y al deterioro de ecosistemas acuáticos. Además, puede obstruir tuberías y generar focos de proliferación bacteriana (Pinillos et al., 2020), como se evidencia en la Tabla 2. Impactos del aceite vegetal posconsumo en el entorno escolar y la salud.

Tabla 2

Impactos del aceite vegetal posconsumo en el entorno escolar y la salud

Impacto	Consecuencia	Fuente
Ambiental	Contaminación de cuerpos de agua	Pinillos et al., 2020
Infraestructura escolar	Obstrucción de drenajes	Mejía & Robayo, 2016
Salud humana	Dermatitis, problemas respiratorios	Loddé & Roguedas, 2014

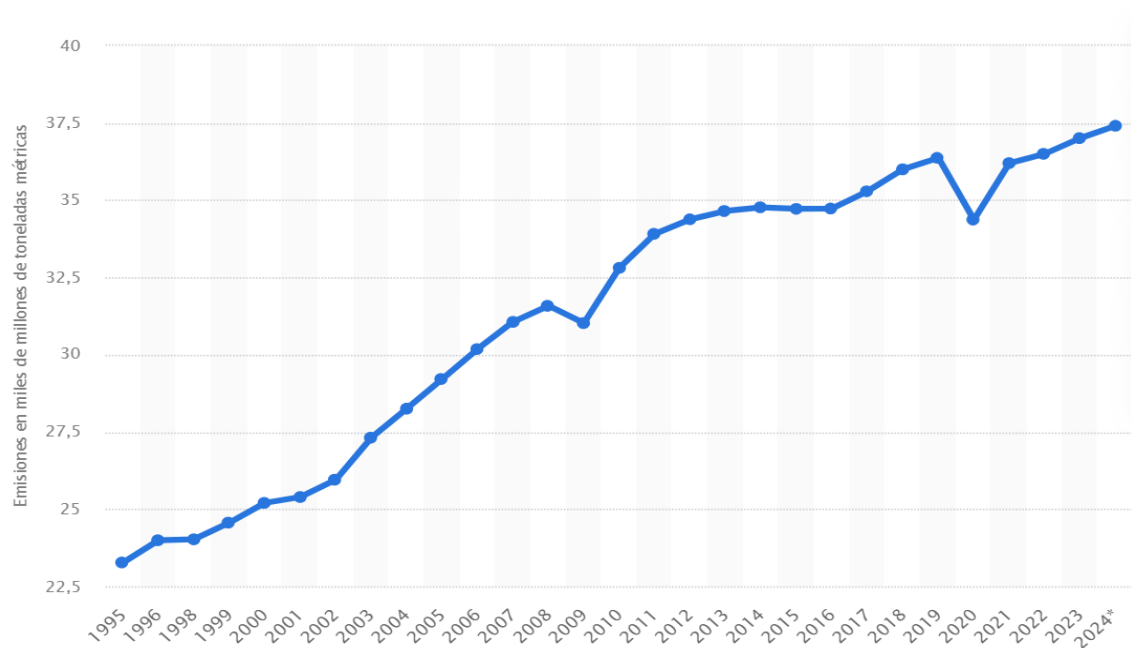
Nota. Adaptado a partir de información adaptada de Pinillos et al. (2020), Mejía y Robayo (2016) y Loddé y Roguedas (2014).

La Tabla 2 presentada permite sintetizar los principales impactos asociados al manejo inadecuado del aceite vegetal posconsumo, constituyéndose en un referente contextual clave para la investigación. En términos metodológicos, esta información sustenta la selección del problema de estudio y justifica la implementación de la propuesta pedagógica, al vincular el aprendizaje de las ciencias naturales con situaciones reales que afectan el entorno escolar, el ambiente y la salud.

Desde la perspectiva de salud pública, el contacto directo del aceite vegetal posconsumo con la piel puede provocar afecciones como irritaciones y dermatitis (Loddé & Roguedas, 2014). Además, su combustión en condiciones no controladas libera compuestos orgánicos volátiles que pueden generar problemas respiratorios como se ilustra en la Figura 4. Emisiones mundiales de CO₂ de 1995 a 2024, tomado de: <https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/>

Figura 4

Emisiones mundiales de CO₂ de 1995 a 2024



Nota. Tomado de Statista. Emisiones mundiales de CO₂ de 1995 a 2024. Recuperado de: <https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/>.

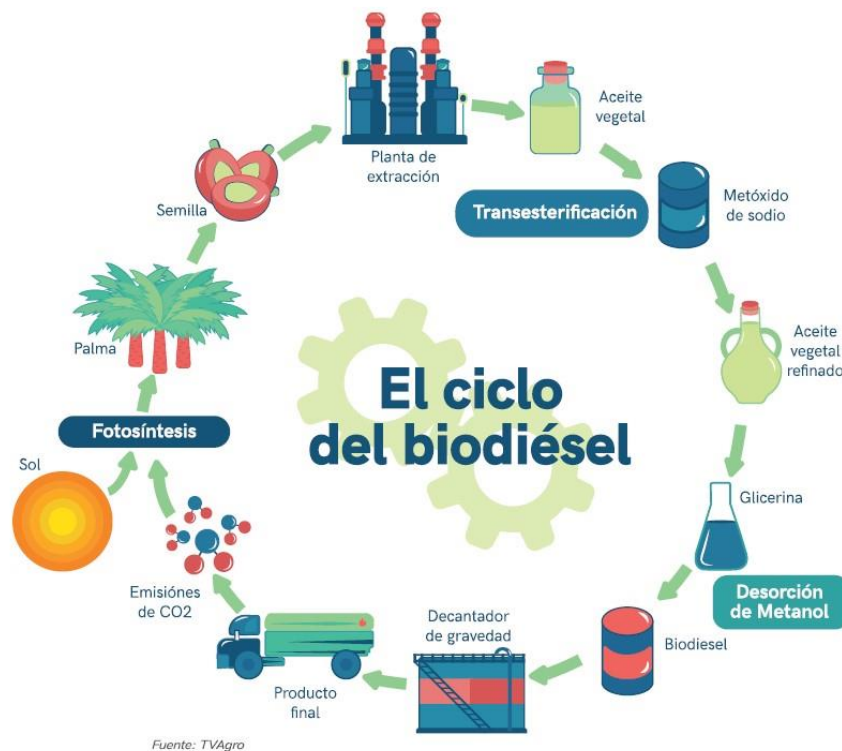
1.4.7 Calentamiento Global y Energías Renovables

La combustión de combustibles fósiles es responsable de aproximadamente el 76,7% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al cambio climático global (Waheed et al., 2018). En este contexto, el desarrollo de energías renovables, como el biodiésel

derivado del aceite vegetal posconsumo, representa una estrategia clave para mitigar el calentamiento global, como se ilustra en la Figura 5. Ciclo de aprovechamiento del aceite vegetal posconsumo en biodiésel, donde se muestran los pasos para optimizar el aceite posconsumo para transformarlo en biodiesel y glicerina.

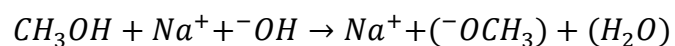
Figura 5

Ciclo de aprovechamiento del aceite vegetal posconsumo en biodiésel



Nota. Tomado de “Los agrocombustibles: el biodiésel y el diésel renovable HVO”, por Fundación Solón, 2023. <https://fundacionsolon.org/2023/05/26/los-agrocombustibles-el-biodiesel-y-el-diesel-renovable-hvo>.

Durante este ciclo ocurre la siguiente reacción química:



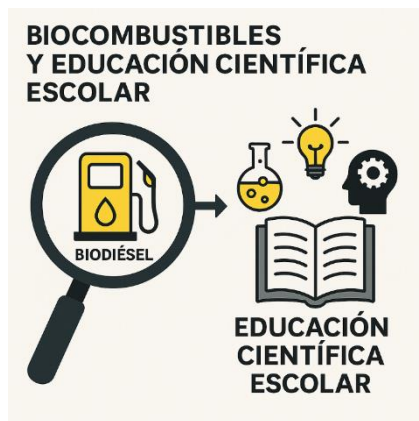
Esta reacción, catalizada por una base como el hidróxido de sodio (NaOH), permite transformar residuos en una fuente de energía alternativa limpia (Zhang et al., 2023).

1.4.8 Biocombustibles y Educación Científica Escolar

Los biocombustibles, como el biodiésel, representan una alternativa pedagógica para abordar la sostenibilidad desde el aula. Su producción y análisis involucran saberes de química, tecnología, medio ambiente y ciudadanía, favoreciendo una enseñanza contextualizada y significativa (Lee et al., 2022), la Figura 6 muestra la relación entre la educación escolar, la generación de ciencia y la producción del biodiesel, a partir de datos científicos.

Figura 6

Biocombustibles y Educación Científica Escolar



Nota. Elaboración propia asistida por inteligencia artificial (modelo: [ChatGPT]).

La enseñanza mediante proyectos de ciencia escolar contextualizada promueve el pensamiento crítico, la argumentación y la toma de decisiones informadas frente a problemas socioambientales (Jiménez-Aleixandre & Puig, 2013). La transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel se constituye como un ejemplo ideal para articular teoría, experimentación y acción ciudadana.

1.4.9 Espectroscopía Infrarroja como Herramienta Didáctica

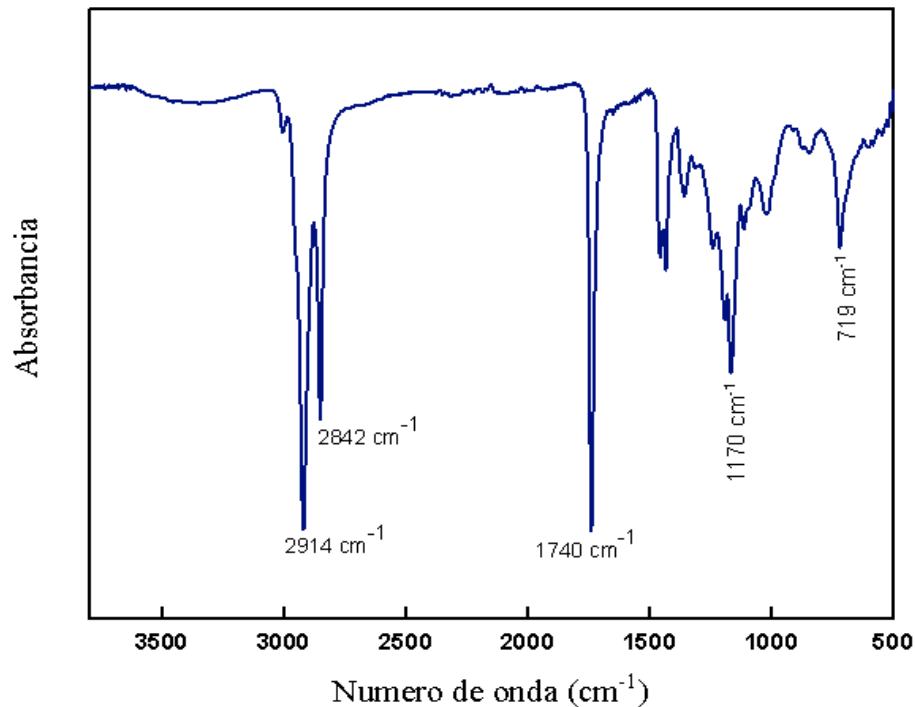
La espectroscopía infrarroja (IR) permite analizar la composición molecular del biodiésel obtenido, facilitando la validación científica de los productos generados. Este tipo de análisis puede implementarse en el aula como una estrategia de alfabetización científica, fomentando el uso de tecnologías analíticas y el rigor metodológico (Zhang et al., 2023).

La Figura 7. Espectro IR de biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal posconsumo de la institución educativa Gabriela Mistral, muestra un análisis realizado a dicho aceite para determinar la calidad del biodiésel obtenido para su posterior uso.

Figura 7

Espectro IR de biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal posconsumo de la institución educativa Gabriela Mistral

Análisis IR biodiesel obtenido de la
cafetería Institución Educativa Gabriela Mistral



Nota. Elaboración propia a partir del análisis FTIR realizado en el Instituto Colombiano del Petróleo – ICP, Santander, Colombia.

1.5 Estado del arte

La presente investigación doctoral se sitúa en la convergencia entre la educación ambiental crítica, la alfabetización científica y la innovación pedagógica basada en el aprovechamiento de residuos, específicamente el aceite vegetal posconsumo (AVPC). A diferencia del marco teórico —orientado a la fundamentación conceptual—, este estado del arte tiene como propósito analizar críticamente la producción académica reciente (2019–2025), identificando tendencias, enfoques metodológicos, hallazgos relevantes y vacíos investigativos relacionados con las variables centrales del estudio.

El análisis se estructura en torno a cuatro ejes: (i) educación ambiental escolar, (ii) aprovechamiento pedagógico del AVPC, (iii) tecnologías educativas con enfoque sostenible y (iv)

articulación interdisciplinaria ciencia–sostenibilidad. A partir de esta revisión, se establece cómo la presente investigación dialoga con el campo, aporta elementos novedosos y responde a limitaciones detectadas en la literatura.

1.5.1 Objeto de estudio

El objeto de estudio se centra en el diseño, implementación y evaluación de una propuesta pedagógica interdisciplinaria que integra la producción experimental de biodiésel y subproductos (glicerina, anticongelantes y bioplásticos) a partir de aceite vegetal posconsumo (AVPC), como estrategia para fortalecer competencias científicas, ambientales y ciudadanas en estudiantes de educación media.

Diversos estudios han señalado la necesidad de articular los saberes científicos escolares con problemáticas socioambientales reales para favorecer aprendizajes significativos (Arias-Navarro et al., 2024; Galvis-Riaño et al., 2023). Sin embargo, gran parte de estas investigaciones se limita a intervenciones teóricas o actividades prácticas aisladas, sin integrar procesos experimentales complejos ni análisis técnico-científico riguroso.

La presente investigación amplía este horizonte al concebir el AVPC no solo como un recurso didáctico, sino como un objeto epistémico integrador, que permite vincular ciencia, tecnología, ética ambiental y ciudadanía crítica. De este modo, el objeto de estudio se proyecta más allá de la enseñanza técnica de la transesterificación, incorporando dimensiones formativas, reflexivas y socioambientales que fortalecen la educación científica contextualizada.

Cierre crítico

El objeto de estudio responde a la necesidad, identificada en la literatura, de propuestas pedagógicas integrales que superen la fragmentación disciplinar y vinculen el aprendizaje científico con la transformación de problemáticas ambientales reales.

1.5.2 Campo de acción

El campo de acción de la presente investigación se sitúa en la educación científica ambiental escolar, específicamente en instituciones públicas de educación media del municipio de Bucaramanga. Este campo se caracteriza por la convergencia entre las ciencias naturales —química, biología y física—, la educación ambiental crítica y la didáctica interdisciplinaria, en un contexto marcado por limitaciones de recursos, diversidad sociocultural y la necesidad de responder a problemáticas ambientales locales.

La literatura reciente reconoce a la escuela como un espacio estratégico para la formación de ciudadanía ambiental, siempre que se superen enfoques normativos, prescriptivos o meramente informativos que reducen la educación ambiental a campañas aisladas o actividades simbólicas (Galindo-Quiroga et al., 2024). No obstante, múltiples estudios coinciden en señalar que, en contextos escolares públicos, persisten dificultades estructurales para integrar prácticas experimentales auténticas, análisis científico riguroso y procesos de reflexión crítica sostenidos en el currículo.

En este escenario, la enseñanza de las ciencias naturales suele fragmentarse en contenidos descontextualizados, con escasa vinculación a problemas reales del entorno, lo que limita el desarrollo de competencias científicas profundas y la apropiación de actitudes ambientales críticas. La presente investigación se inscribe en este campo como una experiencia educativa situada, que busca articular currículo, experimentación científica y sostenibilidad territorial mediante el aprovechamiento pedagógico del aceite vegetal posconsumo, un residuo cotidiano con alto impacto ambiental en el contexto local.

Cierre crítico

El análisis del campo de acción evidencia una brecha persistente entre los discursos institucionales sobre educación ambiental y su materialización en prácticas experimentales integradas y evaluables. Esta investigación asume dicho desafío al proponer una intervención pedagógica concreta, sistemática y contextualizada, orientada a fortalecer la relación entre conocimiento científico escolar, realidad ambiental local y formación ciudadana.

1.5.3 Enfoque epistemológico

El estudio adopta un enfoque epistemológico constructivista crítico-contextual, el cual concibe el conocimiento como una construcción activa, situada y mediada socialmente. Este enfoque se fundamenta en los aportes de Piaget (1992), Vygotsky (1978) y Bruner (1991), quienes coinciden en que el aprendizaje no es un proceso de transmisión pasiva de información, sino una reorganización progresiva de estructuras cognitivas a partir de la interacción con el entorno, el diálogo social y la resolución de problemas significativos.

Desde esta perspectiva, el aprendizaje científico escolar se fortalece cuando el estudiante participa activamente en la formulación de hipótesis, la experimentación, el análisis de datos y la reflexión sobre sus propios procesos de pensamiento. El enfoque constructivista adoptado se amplía mediante la incorporación de la educación ambiental crítica, sustentada en autores como Sauvé (2004), Leff (2009) y Gadotti (2011), quienes plantean que los problemas ambientales deben abordarse desde dimensiones éticas, políticas y socioculturales, reconociendo las relaciones de poder, los modelos de consumo y las dinámicas territoriales que los configuran.

En este marco, el conocimiento científico escolar deja de concebirse como un saber neutro o exclusivamente técnico, para asumirse como una herramienta de comprensión y transformación de la realidad. La producción de biodiésel a partir del aceite vegetal posconsumo se integra,

así como una actividad epistémica situada, que permite a los estudiantes vincular teoría y práctica, ciencia y ética, escuela y contexto.

Cierre crítico

El enfoque epistemológico constructivista crítico-contextual proporciona una base coherente para articular aprendizaje científico, educación ambiental y ciudadanía, orientando la investigación hacia una formación emancipadora que trasciende la memorización de contenidos y promueve la comprensión crítica del mundo.

1.5.4 Identificación de variables

A partir de la revisión teórica y empírica del campo, la presente investigación se estructura en torno a tres variables principales: educación ambiental escolar, aprovechamiento pedagógico del aceite vegetal posconsumo (AVPC) y tecnologías educativas con enfoque sostenible. Estas variables emergen de manera interrelacionada como respuesta a la necesidad de analizar el fenómeno educativo desde una perspectiva integral, superando enfoques fragmentados o reduccionistas que se limitan a evaluar únicamente resultados cognitivos, técnicos o instrumentales.

La educación ambiental escolar se concibe como un proceso formativo complejo que trasciende la transmisión de contenidos ecológicos y se orienta al desarrollo de valores, actitudes críticas y competencias ciudadanas frente a las problemáticas socioambientales del contexto. Esta variable integra dimensiones curriculares, éticas y actitudinales, y se articula con enfoques de educación ambiental crítica que reconocen el carácter político, social y cultural de los problemas ambientales.

El aprovechamiento pedagógico del AVPC se configura como una variable de carácter experimental y didáctico, mediante la cual un residuo doméstico adquiere valor educativo al convertirse en objeto de indagación científica, reflexión ética y acción transformadora. A través de

su transformación en biodiésel y subproductos, el AVPC permite articular contenidos de las ciencias naturales con prácticas experimentales auténticas, favoreciendo la comprensión conceptual, el desarrollo de habilidades procedimentales y la contextualización del aprendizaje científico.

Por su parte, las tecnologías educativas con enfoque sostenible actúan como mediadoras de los procesos de aprendizaje, sistematización y reflexión metacognitiva. Esta variable comprende el uso pedagógico de plataformas digitales, recursos multimedia y estrategias metodológicas activas que facilitan la organización del trabajo experimental, el análisis de datos, la comunicación de resultados y la evaluación formativa, siempre bajo criterios éticos y de sostenibilidad.

La identificación y delimitación de estas variables permite analizar no solo los productos del aprendizaje, sino también los procesos formativos que se generan durante la implementación de la propuesta pedagógica, reconociendo la interacción dinámica entre contenidos científicos, prácticas experimentales, mediaciones tecnológicas y construcción de actitudes sostenibles.

Cierre crítico

La definición de estas variables constituye un elemento central para la coherencia interna del diseño investigativo, en tanto posibilita una lectura sistémica del proceso educativo y fundamenta la adopción de un enfoque metodológico mixto. Al integrar dimensiones pedagógicas, técnicas y tecnológicas, la investigación se distancia de aproximaciones parciales presentes en la literatura y establece una base sólida para la evaluación integral del impacto educativo de la intervención, alineando de manera consistente los objetivos, las hipótesis y los resultados del estudio.

1.5.5 Relación entre variables

La relación entre las variables constituye el núcleo metodológico y pedagógico de la investigación, en tanto permite comprender el fenómeno educativo desde una perspectiva sistémica, integradora y contextualizada. La educación ambiental escolar aporta el marco axiológico,

ético y crítico que orienta la comprensión de las problemáticas socioambientales asociadas al uso y disposición inadecuada del aceite vegetal posconsumo (AVPC). Desde esta variable, el residuo deja de concebirse únicamente como un desecho para convertirse en un objeto de reflexión, análisis y transformación pedagógica.

El aprovechamiento pedagógico del AVPC actúa como eje experimental integrador, articulando los saberes de las ciencias naturales —química, física y biología— mediante prácticas científicas escolares auténticas. A través de la producción de biodiésel y subproductos como glicerina, bioplásticos y anticongelantes, los estudiantes aplican conceptos teóricos, formulan hipótesis, analizan variables fisicoquímicas y toman decisiones fundamentadas, lo que favorece la construcción de conocimiento científico significativo y situado.

Por su parte, las tecnologías educativas con enfoque sostenible cumplen un papel mediador transversal en el proceso formativo. Plataformas como Moodle, recursos digitales y estrategias como el aula invertida facilitan la organización del trabajo experimental, el registro sistemático de datos, la interpretación de resultados, la retroalimentación continua y el desarrollo de procesos metacognitivos. De este modo, las TIC no se emplean de manera instrumental, sino como herramientas cognitivas que potencian la autonomía, la reflexión crítica y la sistematización rigurosa del aprendizaje.

La articulación entre estas variables posibilita la construcción de un modelo pedagógico interdisciplinario en el que convergen ciencia, sostenibilidad y tecnología, superando enfoques fragmentados o exclusivamente conceptuales. Esta relación favorece, además, el diseño de un enfoque metodológico mixto, que integra análisis cuantitativos de carácter experimental con interpretaciones cualitativas de los procesos formativos, permitiendo la triangulación de datos, métodos e instrumentos.

En consecuencia, la relación entre variables no solo sustenta la coherencia interna del diseño investigativo, sino que posibilita una evaluación integral del impacto educativo de la intervención, considerando el desarrollo de competencias científicas, procedimentales, actitudinales y ciudadanas. Este entramado relacional refuerza la pertinencia, originalidad y replicabilidad de la propuesta pedagógica en contextos escolares públicos con enfoque de sostenibilidad.

Cierre crítico

A pesar de los avances teóricos que reconocen la importancia de articular educación ambiental, experimentación científica y tecnologías educativas, la literatura revisada evidencia que estas variables suelen abordarse de manera aislada en el contexto escolar. La principal contribución de la presente investigación radica en integrar dichas dimensiones en un modelo pedagógico coherente y evaluable, capaz de superar la fragmentación identificada en el estado del arte y de ofrecer una alternativa sólida para la enseñanza de las ciencias naturales orientada a la sostenibilidad y la formación ciudadana crítica.

1.5.6 Educación ambiental escolar: estado del arte

La literatura reciente evidencia un crecimiento significativo de investigaciones sobre educación ambiental escolar, particularmente a través de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) en contextos latinoamericanos (Arias-Navarro et al., 2024; Galindo-Quiroga et al., 2024). Estos estudios destacan avances en sensibilización ambiental y cambios actitudinales, pero también señalan limitaciones en la integración curricular, la continuidad de las acciones y la profundidad conceptual de las propuestas.

Diversos autores coinciden en que muchas prácticas de educación ambiental permanecen aisladas del currículo de ciencias naturales, se centran en actividades simbólicas o carecen de un

componente experimental riguroso que permita a los estudiantes comprender los procesos científicos subyacentes a los problemas ambientales.

Vacío identificado

Persiste la ausencia de propuestas interdisciplinarias experimentales que integren educación ambiental crítica, ciencias naturales y análisis de datos en educación media, con evaluaciones sistemáticas de su impacto formativo.

1.5.7 Aprovechamiento pedagógico del aceite vegetal posconsumo

Las investigaciones sobre el aprovechamiento educativo del AVPC son limitadas y, en su mayoría, se concentran en experiencias puntuales o de corto alcance (Salinas-Ortega, 2021; Torres-Nieto, 2020). Aunque estos estudios reportan efectos positivos en la motivación y la reflexión ética, suelen carecer de análisis técnico avanzado, integración curricular sostenida y evaluación rigurosa de competencias científicas.

En general, el AVPC ha sido utilizado como recurso para actividades aisladas (elaboración de jabones, campañas de recolección), sin articular procesos experimentales complejos como la producción de biodiésel y subproductos, ni relacionarlos con aprendizajes científicos profundos.

Vacío identificado

No se identifican investigaciones que incorporen el AVPC en una propuesta pedagógica integral que articule producción de biodiésel y subproductos, análisis cuantitativo, mediación tecnológica y educación ambiental crítica en educación media.

1.5.8 Tecnologías educativas con enfoque sostenible

La literatura contemporánea reconoce el potencial de las tecnologías educativas para fortalecer la educación ambiental y el aprendizaje autónomo (López-Jiménez, 2022; Guzmán et al.,

2023). Plataformas como Moodle, el aula invertida y los recursos digitales han demostrado favorecer la colaboración, la autorregulación y la reflexión crítica. Sin embargo, diversos autores advierten que el uso de TIC suele mantenerse en un nivel instrumental, desvinculado de procesos experimentales reales y del análisis científico profundo (Ríos-Cardozo, 2021).

En muchos casos, las tecnologías se utilizan como repositorios de información o herramientas de comunicación, sin integrarse de manera orgánica a la experimentación científica escolar ni a la evaluación de competencias.

Vacío central desarrollado

La revisión evidencia la inexistencia de investigaciones que articulen de forma sistemática tecnologías educativas, producción experimental real de biocombustibles a partir de AVPC, análisis cuantitativo y educación ambiental crítica en educación media. Este vacío limita el potencial transformador de las TIC y refuerza la necesidad de propuestas integradoras como la que plantea la presente investigación.

1.5.9 Delimitación conceptual de las categorías de análisis

En el desarrollo de la presente investigación se emplean diversos conceptos asociados al aprendizaje en ciencias, los cuales, aunque relacionados, responden a niveles analíticos diferenciados. En este sentido, se establece una delimitación conceptual con el fin de evitar superposiciones interpretativas.

La comprensión conceptual se entiende como la capacidad del estudiante para interpretar, explicar y relacionar conceptos científicos de manera coherente dentro de un marco disciplinar específico. Esta implica no solo la memorización de contenidos, sino su reorganización cognitiva y aplicación en contextos diversos.

Por su parte, el aprendizaje significativo hace referencia al proceso mediante el cual la nueva información se integra de manera sustancial con los conocimientos previos del estudiante, generando estructuras cognitivas más complejas y estables.

En cuanto a las competencias científicas, estas se abordan como un constructo más amplio que integra conocimientos, habilidades y actitudes, permitiendo al estudiante no solo comprender fenómenos, sino también analizarlos, interpretarlos y tomar decisiones fundamentadas en contextos reales.

Bajo esta perspectiva, la comprensión conceptual se configura como un componente de las competencias científicas, mientras que el aprendizaje significativo constituye el proceso a través del cual dicha comprensión se construye y consolida.

1.6 Cierre integrador del estado del arte

En conjunto, el análisis del estado del arte pone en evidencia una fragmentación persistente entre la educación ambiental escolar, la enseñanza de las ciencias naturales, la experimentación científica en contextos educativos y el uso pedagógico de las tecnologías digitales. Aunque la literatura reporta avances parciales en cada uno de estos ámbitos, dichos desarrollos suelen abordarse de manera aislada, lo que limita su impacto formativo y dificulta la consolidación de experiencias educativas verdaderamente integradoras y sostenibles en el tiempo.

De manera recurrente, los estudios revisados evidencian que la educación ambiental continúa circunscribiéndose a enfoques declarativos o actitudinales, con escasa articulación a procesos experimentales rigurosos; que la enseñanza de las ciencias se mantiene fragmentada por disciplinas y desvinculada de problemáticas reales del entorno; y que las tecnologías educativas son empleadas predominantemente desde una lógica instrumental, sin integrarse de forma orgánica a la producción de conocimiento científico escolar ni al análisis sistemático de datos. Esta

disociación metodológica y conceptual ha generado vacíos significativos en la formación de competencias científicas, críticas y ciudadanas en la educación media.

En este escenario, la presente investigación se posiciona como una respuesta pedagógica y epistemológicamente fundamentada a dichos vacíos, al proponer una intervención educativa interdisciplinaria que articula la educación ambiental crítica, la enseñanza de las ciencias naturales, la experimentación escolar real y el uso significativo de tecnologías educativas. La transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel y subproductos se configura como un eje integrador que permite vincular teoría y práctica, ciencia y contexto, aprendizaje escolar y sostenibilidad territorial.

Asimismo, el enfoque metodológico mixto adoptado, junto con la evaluación sistemática de competencias conceptuales, procedimentales y actitudinales, permite superar las limitaciones identificadas en estudios previos, aportando evidencia empírica sólida sobre el impacto formativo de la propuesta. De este modo, la investigación no solo amplía el campo de conocimiento en educación para el desarrollo sostenible, sino que ofrece una ruta replicable y contextualizada para la resignificación del currículo de ciencias naturales en contextos escolares públicos.

Finalmente, en coherencia con el problema de investigación planteado, centrado en la desconexión entre los contenidos de las ciencias naturales y su aplicación en contextos reales, el presente estudio se fundamenta en enfoques teóricos como el constructivismo y el aprendizaje significativo, los cuales reconocen al estudiante como un sujeto activo en la construcción del conocimiento. Desde esta perspectiva, la propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo mediante el proceso de transesterificación se configura como una estrategia didáctica que permite articular la teoría con la práctica, favoreciendo la comprensión conceptual en química y el desarrollo de actitudes sostenibles.

En consecuencia, el diseño metodológico adoptado responde directamente a este marco teórico, mediante la implementación de un enfoque mixto y un diseño cuasi-experimental en contexto real de aula, integrando metodologías activas, experimentación en laboratorio y análisis de datos cuantitativos y cualitativos. Esta articulación garantiza la coherencia interna del estudio, al vincular de manera explícita el problema de investigación, los fundamentos teóricos y las decisiones metodológicas.

2. Diseño metodológico

El diseño metodológico de esta investigación se sustenta en un enfoque mixto que articula de manera coherente métodos cuantitativos y cualitativos para el análisis profundo y riguroso de los procesos pedagógicos, científicos y actitudinales derivados de la implementación de una propuesta educativa centrada en la transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel y sus subproductos en un entorno escolar. Esta elección responde a la complejidad del fenómeno de estudio, que involucra tanto variables objetivas y medibles (como el volumen de biodiésel producido, los resultados en pruebas de comprensión científica, las propiedades fisicoquímicas de los productos) como dimensiones subjetivas y sociales (como las actitudes sostenibles, el discurso de los estudiantes y su percepción de la ciencia).

2.1 Paradigma mixto: enfoque convergente

La presente investigación se sustenta en un paradigma mixto con diseño convergente paralelo, siguiendo los lineamientos propuestos por Creswell y Plano-Clark (2018), Tashakkori y Teddlie (2010) y Hernández-Sampieri et al. (2022). Este enfoque parte del supuesto de que la comprensión profunda de un fenómeno educativo complejo —como el impacto de una propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo (AVPC)— requiere la integración rigurosa de datos cuantitativos y cualitativos analizados de manera simultánea, complementaria y recíprocamente iluminadora.

En el diseño convergente paralelo, ambos enfoques se desarrollan de forma independiente, pero en el mismo periodo temporal, aplicando diferentes instrumentos y técnicas de análisis para posteriormente realizar una integración sistemática mediante estrategias de fusión, comparación y meta-inferencia, tal como recomiendan Creswell y Plano-Clark (2018). Este diseño se eligió porque la investigación involucra variables de naturaleza distinta (conceptuales,

actitudinales, experimentales, técnicas y discursivas), cuya comprensión exige aproximaciones múltiples que ningún enfoque aislado podría cubrir de manera suficiente.

2.1.1 Justificación del diseño mixto convergente

La adopción de un diseño mixto convergente se fundamenta en la naturaleza compleja y multidimensional del objeto de estudio, el cual articula procesos pedagógicos, científicos y socioambientales en el contexto escolar. Evaluar el funcionamiento de una propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo (AVPC), que involucra la producción de biodiésel, bioplásticos y su caracterización mediante técnicas como FTIR-ATR, exige la integración de datos cuantitativos y cualitativos. Esta combinación resulta indispensable para comprender, de manera simultánea, los cambios en la comprensión conceptual de las ciencias naturales, las transformaciones en las actitudes sostenibles, las experiencias y percepciones de los estudiantes durante la intervención, así como la consistencia técnica de los productos experimentales obtenidos.

Desde esta perspectiva, el enfoque mixto permite capturar tanto la dimensión objetiva del fenómeno educativo —expresada en mediciones, puntajes y parámetros fisicoquímicos— como su dimensión interpretativa, vinculada a los discursos, interacciones y procesos de construcción de sentido desarrollados por los estudiantes. La convergencia de ambos tipos de datos posibilita una comprensión más profunda y contextualizada del impacto de la propuesta pedagógica.

Asimismo, el diseño mixto convergente favorece la triangulación metodológica como estrategia para fortalecer la validez del estudio. La contrastación de resultados provenientes de instrumentos cuantitativos (pretest y posttest, escalas Likert, mediciones experimentales) con evidencias cualitativas (observaciones estructuradas, entrevistas semiestructuradas, registros en

Moodle y análisis discursivo mediante NVivo 12) incrementa la credibilidad, confirmabilidad y robustez de los hallazgos, tal como lo señalan Teddlie y Tashakkori (2009).

Finalmente, la elección de este diseño resulta coherente con el enfoque epistemológico que sustenta la investigación. El constructivismo sociocultural reconoce que el aprendizaje se construye a partir de múltiples mediaciones y niveles de interacción (Vygotsky, 1978), mientras que la educación ambiental crítica plantea la necesidad de analizar los fenómenos educativos desde perspectivas integradoras que articulen dimensiones cognitivas, éticas y socioculturales (Leff, 2015). En este sentido, la integración metodológica no solo responde a una exigencia técnica, sino también a una postura epistemológica y pedagógica coherente con los fundamentos del estudio.

2.1.2 Componentes del diseño convergente paralelo

El diseño convergente paralelo se estructuró a partir de dos componentes desarrollados de manera simultánea e independiente: un componente cuantitativo y un componente cualitativo, cuyos resultados fueron integrados en una fase posterior de meta-inferencia.

El componente cuantitativo tuvo como propósito medir el efecto de la propuesta pedagógica en variables educativas y técnicas. En el ámbito educativo, se evaluó la comprensión conceptual en ciencias naturales mediante un instrumento tipo prueba estructurada aplicado en modalidad pretest y posttest, el cual fue validado por experticia y sometido a análisis de consistencia interna mediante el coeficiente alfa de Cronbach. De igual forma, se analizaron las actitudes sostenibles a través de una escala Likert de cinco niveles, diseñada conforme a lineamientos psicométricos para investigaciones educativas (Hernández-Sampieri et al., 2022).

Adicionalmente, el componente cuantitativo incorporó el análisis de variables técnicas derivadas del proceso experimental, tales como pH, densidad, viscosidad y rendimiento del

biodiésel, regiones espectrales obtenidas por FTIR-ATR, parámetros ópticos UV-VIS y propiedades mecánicas de bioplásticos elaborados a partir de glicerina comercial y glicerina obtenida del AVPC. El tratamiento estadístico de estos datos incluyó estadística descriptiva (media, desviación estándar y frecuencias) y estadística inferencial, mediante la prueba t de Student para muestras relacionadas, ANOVA de un factor y correlación de Pearson, utilizando el software SPSS versión 25.

Por su parte, el componente cualitativo se orientó a comprender las percepciones, discursos, representaciones ambientales y experiencias de aprendizaje de los estudiantes durante la implementación de la propuesta pedagógica. Para ello, se emplearon técnicas como la observación participante sistemática durante las actividades experimentales, entrevistas semiestructuradas a estudiantes, análisis de interacciones y producciones escritas registradas en la plataforma Moodle, así como diarios de campo del docente investigador.

El procesamiento de los datos cualitativos se realizó mediante un proceso de codificación abierta, axial y selectiva, siguiendo los lineamientos de Strauss y Corbin (2002). Con el fin de garantizar el rigor metodológico, se aplicaron criterios de credibilidad, confirmabilidad, transferibilidad y dependibilidad. El uso del software NVivo 12 permitió organizar categorías emergentes, generar mapas conceptuales, identificar patrones discursivos y establecer relaciones entre categorías.

2.1.3 Integración de los datos: fase de meta-inferencia

La integración de los datos cuantitativos y cualitativos se llevó a cabo en una fase de meta-inferencia, siguiendo los lineamientos propuestos por Creswell y Plano-Clark (2018). Este proceso incluyó, en primer lugar, la fusión de resultados, mediante la comparación sistemática de

hallazgos cuantitativos y cualitativos en matrices cruzadas que permitieron identificar convergencias, divergencias y complementariedades entre ambos conjuntos de datos.

En segundo lugar, se establecieron conexiones analíticas, en las cuales los resultados cuantitativos orientaron la profundización e interpretación de categorías cualitativas, y viceversa. Finalmente, se formularon meta-inferencias integradas que articularon la evolución conceptual de los estudiantes, la transformación de sus actitudes sostenibles, la experiencia pedagógica vivida durante la intervención, los logros del componente experimental y la relación entre los resultados técnicos y los aprendizajes científicos alcanzados.

Esta fase permitió comprender no solo qué cambios se produjeron en los estudiantes, sino también cómo, por qué y bajo qué condiciones dichos cambios tuvieron lugar.

2.1.4 Pertinencia del diseño para la pregunta y los objetivos de investigación

El diseño mixto convergente resultó fundamental para dar respuesta a la pregunta central de investigación, orientada a comprender el impacto de una propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo en la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles de estudiantes de educación media. De igual manera, permitió operacionalizar de forma coherente los objetivos específicos del estudio, al analizar los cambios conceptuales desde un enfoque cuantitativo, examinar las actitudes sostenibles mediante una aproximación mixta, describir el proceso de implementación desde una perspectiva cualitativa y evaluar las características técnicas del biodiésel en relación con los aprendizajes científicos desarrollados.

2.1.5 Síntesis final: contribución metodológica

En conjunto, el diseño convergente adoptado aporta una comprensión profunda y articulada del fenómeno educativo investigado, al ofrecer evidencia técnica objetiva sobre la validez del proyecto experimental, explicar cómo se desarrollan las competencias científicas en

contextos reales de aprendizaje y comprender la experiencia formativa desde la perspectiva de los estudiantes. Esta robustez metodológica sustenta de manera sólida la innovación pedagógica propuesta y responde plenamente a las exigencias académicas de una tesis doctoral en educación.

2.2 Tipo de investigación: enfoque mixto con diseño cuasi-experimental

La presente investigación se inscribe en un enfoque metodológico mixto, con un diseño convergente paralelo y una estrategia cuasi-experimental de tipo intragrupo. Este enfoque se fundamenta en la necesidad de comprender un fenómeno educativo complejo que articula dimensiones conceptuales, actitudinales, técnicas, experimentales y discursivas, las cuales no pueden ser abordadas de manera exhaustiva desde un único paradigma metodológico. En coherencia con lo planteado por Creswell y Plano-Clark (2018), el diseño mixto convergente permite recolectar y analizar datos cuantitativos y cualitativos de forma simultánea, otorgándoles un peso equivalente y posibilitando su integración posterior para lograr una comprensión más completa y profunda del objeto de estudio.

La elección de este tipo de investigación responde a la naturaleza de la propuesta pedagógica evaluada, la cual combina procesos de enseñanza de las ciencias naturales con prácticas experimentales reales, mediadas por tecnologías educativas y orientadas a la formación en sostenibilidad. En el campo de la educación ambiental, los cambios generados por las intervenciones pedagógicas no se manifiestan exclusivamente en indicadores numéricos, sino también en transformaciones discursivas, reflexivas, éticas y actitudinales que requieren aproximaciones interpretativas. En este sentido, el enfoque mixto posibilita captar tanto las variaciones medibles en la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles como los significados construidos por los estudiantes en torno a su experiencia de aprendizaje.

Desde una perspectiva epistemológica, el diseño adoptado se articula con la postura constructivista crítica que orienta esta tesis, en la cual el conocimiento se concibe como una construcción situada, mediada por la interacción social, el contexto cultural y la reflexión sobre la práctica. La integración de métodos cuantitativos y cualitativos permite analizar no solo los efectos de la intervención pedagógica, sino también los procesos mediante los cuales dichos efectos se configuran en contextos educativos reales. Tal como señalan Tashakkori y Teddlie (2010), los métodos mixtos facilitan responder de manera articulada a las preguntas sobre qué cambia, cómo cambia y por qué se producen dichos cambios, aspectos centrales en investigaciones educativas con enfoque transformador.

2.2.1 Justificación del diseño mixto convergente

El diseño convergente paralelo fue seleccionado por su coherencia directa con los objetivos de investigación y con la complejidad del fenómeno estudiado. El objetivo general, orientado a evaluar el efecto de una propuesta pedagógica interdisciplinaria sobre la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles de estudiantes de educación media, exige la obtención de evidencias empíricas cuantificables, así como la comprensión interpretativa de los procesos educativos subyacentes. De igual forma, los objetivos específicos implican tanto la medición de cambios antes y después de la intervención como la descripción y análisis del proceso de implementación pedagógica y de las experiencias vividas por los estudiantes durante el trabajo experimental.

La producción de biodiésel y subproductos a partir del aceite vegetal posconsumo integra saberes científicos, tecnológicos, ambientales y éticos, configurando un escenario educativo de alta complejidad. Comprender las transformaciones generadas por esta experiencia requiere un diseño metodológico capaz de articular resultados técnicos y educativos con las percepciones, discursos y reflexiones de los participantes. En este sentido, el diseño convergente permite

analizar de manera simultánea los resultados obtenidos en diferentes planos, evitando lecturas fragmentadas del fenómeno educativo. Como sostienen Creswell y Creswell (2023), este tipo de diseño resulta especialmente pertinente en investigaciones educativas donde la dimensión subjetiva del aprendizaje es tan relevante como sus manifestaciones objetivas.

Adicionalmente, el diseño mixto convergente responde a criterios de viabilidad ética y contextual. En los contextos escolares públicos donde se desarrolló la investigación, no fue posible la asignación aleatoria de estudiantes ni la conformación de grupos control, debido a restricciones institucionales y consideraciones éticas. El enfoque cuasi-experimental intragrupo, integrado dentro de un diseño mixto, permitió evaluar los efectos de la intervención respetando las condiciones reales del entorno educativo, sin comprometer el rigor metodológico ni la validez de los resultados. En consonancia con lo planteado por Greene (2007), la integración de métodos favorece la complementariedad, la expansión y la triangulación del fenómeno estudiado, fortaleciendo la comprensión global del proceso educativo.

2.2.2 Componente cuantitativo: diseño cuasi-experimental intragrupo

El componente cuantitativo de la investigación se desarrolló mediante un diseño cuasi-experimental intragrupo con medición antes y después de la intervención pedagógica (pretest–intervención–postest). Este tipo de diseño es ampliamente utilizado en investigaciones educativas aplicadas, especialmente cuando se trabaja en contextos naturales de aula y no es posible implementar procesos de aleatorización. De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2022), los diseños cuasi-experimentales permiten estimar el efecto de una intervención educativa mediante la comparación de mediciones realizadas en diferentes momentos temporales sobre un mismo grupo de participantes.

En el marco de esta investigación, el componente cuantitativo se orientó a identificar variaciones en la comprensión conceptual y en las actitudes sostenibles de los estudiantes, así como a analizar el desempeño técnico asociado al proceso experimental desarrollado durante la intervención. El tratamiento estadístico de los datos se concibió como una herramienta para describir tendencias, identificar diferencias significativas y explorar relaciones entre variables educativas y experimentales, sin perder de vista que dichos resultados serían posteriormente integrados con el análisis cualitativo para una interpretación más profunda y contextualizada.

Si bien este tipo de diseño no contempla la inclusión de un grupo de control, su elección responde a criterios pedagógicos, éticos y contextuales. En primer lugar, la naturaleza de la intervención implicaba la participación activa de todos los estudiantes en una experiencia formativa considerada pertinente para su proceso educativo, lo que limitaba la posibilidad de excluir a un grupo de dicha oportunidad.

Adicionalmente, las condiciones institucionales y el tamaño de la muestra no permitían la conformación de grupos equivalentes que garantizaran comparabilidad sin introducir sesgos adicionales. En este sentido, el diseño con grupo único se considera adecuado para estudios de intervención educativa en contextos reales, donde el interés principal radica en analizar los cambios intra-grupo más que en establecer comparaciones entre grupos.

No obstante, se reconoce que la ausencia de un grupo de control limita la capacidad de atribuir causalidad absoluta a los resultados obtenidos, por lo que los hallazgos deben interpretarse en función de la coherencia entre los análisis cuantitativos y cualitativos realizados. A pesar de esta limitación, el diseño adoptado permite obtener evidencias válidas sobre el efecto de la intervención en el contexto específico estudiado, garantizando consistencia interna en los resultados.

2.2.3 Componente cualitativo: enfoque interpretativo

El componente cualitativo se desarrolló desde un enfoque interpretativo de orientación socioconstructivista, el cual reconoce que los aprendizajes, las actitudes y las prácticas sostenibles se construyen a través de interacciones, discursos y experiencias significativas. Este enfoque permitió comprender cómo los estudiantes interpretaron la propuesta pedagógica, cómo resignificaron los conceptos científicos abordados y de qué manera construyeron sentidos en torno a la sostenibilidad y al aprovechamiento del aceite vegetal posconsumo.

La recolección y el análisis de la información cualitativa se orientaron a reconstruir el proceso educativo vivido por los participantes, atendiendo a sus percepciones, formas de argumentación, dinámicas de trabajo colaborativo y reflexiones éticas surgidas durante la intervención. El rigor del análisis cualitativo se garantizó mediante criterios de credibilidad, transferibilidad, dependabilidad y confirmabilidad, asegurando que las interpretaciones construidas fueran consistentes, fundamentadas y coherentes con el contexto investigado (Lincoln y Guba, 1985).

2.2.4 Integración de los datos: meta-inferencia

En coherencia con el diseño convergente paralelo, la integración de los datos cuantitativos y cualitativos se realizó en una fase de meta-inferencia, orientada a construir interpretaciones globales del fenómeno estudiado. Esta integración permitió contrastar, complementar y articular los resultados obtenidos desde ambos enfoques, identificando convergencias y divergencias que enriquecieron la comprensión del impacto de la propuesta pedagógica.

Siguiendo a Creswell y Plano-Clark (2018), la meta-inferencia constituyó el núcleo interpretativo del diseño mixto, al posibilitar explicaciones que trascienden los datos aislados y permiten comprender las relaciones entre los aprendizajes científicos, las actitudes sostenibles y el desempeño experimental de los estudiantes. De este modo, la integración metodológica no se

limitó a la yuxtaposición de resultados, sino que permitió construir una lectura articulada y coherente del proceso educativo investigado.

2.2.5 Síntesis del diseño investigativo

En síntesis, el estudio se configura como una investigación de enfoque mixto, con diseño convergente paralelo y estrategia cuasi-experimental intragrupo, desarrollada en contextos escolares reales y orientada a la aplicación pedagógica. Su carácter interdisciplinario, interpretativo y contextualizado permite evaluar de manera rigurosa el impacto de una propuesta pedagógica compleja, situada y orientada a la sostenibilidad, en coherencia con los principios de la educación ambiental crítica y del aprendizaje científico significativo. Este diseño garantiza la solidez metodológica necesaria para sustentar los hallazgos de la investigación y responder a las exigencias académicas propias de una tesis doctoral en educación.

2.3 Hipótesis de Investigación

La formulación de hipótesis en esta investigación responde a la necesidad de establecer relaciones verificables entre la variable independiente —la implementación de una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo (AVPC) mediante la producción de biodiésel— y las variables dependientes, definidas como:

- (a) comprensión conceptual en ciencias naturales y
- (b) actitudes sostenibles en estudiantes de educación media.

Dado que el estudio adopta un diseño mixto convergente y un diseño cuasi-experimental intragrupo con pretest y posttest, las hipótesis se presentan de forma precisa, verificable y orientada al contraste empírico, sin incluir fundamentación teórica extensa ni resultados propios del análisis estadístico, tal como exigen Creswell y Plano-Clark (2018) y Hernández-Sampieri et al. (2020).

2.3.1 Hipótesis de investigación general (HiG)

La implementación de una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo generará una mejora significativa en la comprensión conceptual de las ciencias naturales y favorecerá el desarrollo de actitudes sostenibles en los estudiantes de educación media.

2.3.2 Hipótesis nula (H_0)

No se presentarán diferencias estadísticamente significativas entre los resultados del pretest y el posttest en comprensión conceptual ni en actitudes sostenibles después de la implementación de la estrategia pedagógica. De igual forma, no existirá relación significativa entre el nivel de producción de biodiésel y los resultados obtenidos en dichas variables.

2.3.3 Hipótesis alternativa (H_1)

Se presentarán diferencias estadísticamente significativas entre los puntajes del pretest y el posttest en comprensión conceptual y actitudes sostenibles después de la intervención pedagógica. Asimismo, existirá una relación significativa entre el nivel de producción de biodiésel y los resultados obtenidos en comprensión conceptual y actitudes sostenibles.

2.3.4 Hipótesis específicas

Hipótesis específica 1 (H_{11}) — Comprensión conceptual

La comprensión conceptual de los estudiantes aumentará significativamente después de la intervención pedagógica basada en la producción de biodiésel.

H_{01} : No habrá diferencias significativas en la comprensión conceptual entre el pretest y el posttest.

H_{11} : Sí habrá diferencias significativas en la comprensión conceptual entre el pretest y el posttest.

Hipótesis específica 2 (H₁₂) — Actitudes sostenibles

Las actitudes sostenibles de los estudiantes mejorarán significativamente después de su participación en la estrategia pedagógica.

H₀₂: No se presentarán cambios significativos en las actitudes sostenibles entre el pretest y el postest.

H₁₂: Sí se presentarán cambios significativos en las actitudes sostenibles entre el pretest y el postest.

Hipótesis específica 3 (H₁₃) — Relación entre producción de biodiésel y aprendizaje

El nivel de producción de biodiésel (cantidad, rendimiento y pureza) se relacionará significativamente con los resultados en comprensión conceptual y con el desarrollo de actitudes sostenibles.

H₀₃: No existirá relación significativa entre el nivel de producción de biodiésel y los resultados en comprensión conceptual y actitudes sostenibles.

H₁₃: Sí existirá relación significativa entre el nivel de producción de biodiésel y los resultados en comprensión conceptual y actitudes sostenibles.

2.3.5 Coherencia metodológica y función de las hipótesis

Las hipótesis formuladas en esta investigación cumplen una función metodológica central, en tanto se articulan de manera directa y coherente con el diseño investigativo adoptado y con la estructura general del estudio. Su formulación no responde únicamente a un requisito formal, sino que constituye un eje orientador del proceso de recolección, análisis e interpretación de los datos, garantizando la consistencia interna entre los objetivos planteados, el enfoque metodológico y las decisiones analíticas implementadas.

En primer lugar, las hipótesis se alinean con el diseño cuasi-experimental intragrupo, el cual exige la comparación sistemática de mediciones realizadas antes y después de la intervención pedagógica. Esta estructura metodológica requiere hipótesis formuladas en términos de cambio, que permitan contrastar empíricamente los efectos de la estrategia pedagógica sobre las variables dependientes definidas. De este modo, las hipótesis orientan el análisis estadístico sin anticipar resultados, asegurando una lectura objetiva y rigurosa de los datos obtenidos.

Asimismo, las hipótesis se integran plenamente al enfoque mixto convergente que caracteriza la investigación. Este enfoque demanda no solo la identificación de diferencias o relaciones estadísticamente significativas, sino también la interpretación de dichas variaciones a la luz de evidencias cualitativas provenientes de discursos, observaciones y producciones de los estudiantes. En este sentido, las hipótesis funcionan como un punto de encuentro entre ambos enfoques, posibilitando la identificación de convergencias, divergencias y complementariedades entre los resultados cuantitativos y cualitativos, sin privilegiar de manera excluyente ninguno de los dos.

Desde el punto de vista conceptual, la coherencia metodológica se refuerza al definir con claridad la variable independiente como la implementación de una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la experimentación con aceite vegetal posconsumo, y las variables dependientes como la comprensión conceptual en ciencias naturales y las actitudes sostenibles de los estudiantes. Esta delimitación precisa permite que las hipótesis operen como enunciados verificables, directamente vinculados a los componentes centrales de la propuesta pedagógica y a los efectos educativos que se buscan analizar.

Finalmente, la formulación de las hipótesis en tiempo futuro responde a un criterio de rigor metodológico propio de la investigación empírica, al evitar la inclusión de interpretaciones,

valoraciones o resultados que corresponden a etapas posteriores del estudio. Esta decisión garantiza que las hipótesis conserven su carácter prospectivo y verificable, delimitando claramente su función dentro del diseño metodológico y reservando el análisis, la discusión y la interpretación de los hallazgos para los capítulos correspondientes. De este modo, se fortalece la transparencia, la coherencia interna y la solidez académica del proceso investigativo desarrollado en esta tesis doctoral.

2.4. Variables del estudio

Las variables del estudio fueron definidas en coherencia con el problema de investigación, los objetivos planteados y el enfoque metodológico adoptado. Su selección responde a la necesidad de analizar de manera integral tanto los procesos pedagógicos como los resultados derivados de la intervención, considerando dimensiones conceptuales, actitudinales y técnicas. En este sentido, las variables permiten operacionalizar los constructos teóricos abordados en el marco de referencia y establecer relaciones entre la propuesta pedagógica implementada y los cambios observados en los estudiantes.

2.4.1 Definiciones teóricas

Las variables del estudio fueron definidas en coherencia con el problema de investigación, los objetivos planteados y el enfoque metodológico adoptado. Su selección responde a la necesidad de analizar de manera integral tanto los procesos pedagógicos como los resultados derivados de la intervención, considerando dimensiones conceptuales, actitudinales y técnicas. En este sentido, las variables permiten operacionalizar los constructos teóricos abordados en el marco de referencia y establecer relaciones entre la propuesta pedagógica implementada y los cambios observados en los estudiantes.

Producción de biodiésel

La producción de biodiésel se entiende como un proceso químico mediante el cual aceites triglicéridos reaccionan con un alcohol de cadena corta, generando ésteres metílicos de ácidos grasos y glicerol. Esta variable, en el contexto educativo, se refiere a la magnitud y características del biodiésel producido por los estudiantes durante la intervención, considerando únicamente los resultados observables derivados del proceso experimental. En términos teóricos, se asume como un indicador de desempeño en tareas científicas y de la capacidad estudiantil para comprender principios básicos de transformación química (Sharma & Singh, 2021; Keller et al., 2022).

Comprensión conceptual

La comprensión conceptual se define como la capacidad del estudiante para integrar, relacionar y aplicar conceptos fundamentales de las ciencias naturales en la interpretación de fenómenos y en la resolución de problemas. Esta variable implica la construcción de un marco cognitivo coherente que permita explicar relaciones causales, reconocer principios científicos y emplear el lenguaje disciplinar de manera pertinente (Bransford et al., 2022; Vasquez et al., 2020). Se asume como un indicador del aprendizaje significativo logrado durante la intervención.

Actitudes sostenibles

Las actitudes sostenibles se conceptualizan como disposiciones internas estables que orientan la conducta hacia la protección ambiental, el uso racional de los recursos y la participación informada en acciones ecológicas. Esta variable integra componentes cognitivos, afectivos y conductuales que influyen en la toma de decisiones responsables frente a problemáticas socioambientales (Leicht et al., 2018; Ferreira et al., 2021). En el presente estudio, se consideran como un resultado formativo derivado de la experiencia educativa basada en el tratamiento del aceite vegetal posconsumo.

2.4.2 Definiciones operacionales

Cada variable se operacionaliza mediante indicadores medibles, instrumentos definidos y niveles de medición coherentes con el diseño cuasi-experimental adoptado.

Producción de biodiésel (Variable dependiente técnica complementaria)

Indicadores

- Volumen de biodiésel producido (mL).
- Rendimiento porcentual respecto al volumen inicial de aceite (%).
- Parámetros fisicoquímicos: densidad (kg/m^3) y viscosidad (mm^2/s).
- Nivel de pureza, estimado mediante espectroscopía FTIR-ATR.

Instrumentos y técnicas

- Hojas de registro experimental diseñadas para el proyecto.
- Medición de densidad con probeta y balanza (método escolar adaptado).
- Análisis espectroscópico FTIR-ATR realizado con acompañamiento universitario.

Nivel de medición

- Volumen y densidad: escala de razón.
- Rendimiento: escala porcentual de razón.
- Pureza (FTIR): unidad relativa en escala de intervalo.

Comprensión conceptual (Variable dependiente pedagógica principal)

Indicadores

- Puntaje total en prueba estructurada tipo SABER (pretest y posttest).
- Precisión en el uso de conceptos científicos fundamentales.
- Capacidad para explicar fenómenos y establecer relaciones causales.

Instrumentos y técnicas

- Prueba estandarizada tipo SABER diseñada según lineamientos del MEN e ICFES (40 ítems de opción múltiple).
- Preguntas abiertas complementarias (5 ítems) que valoran argumentación científica.
- Rúbrica de análisis conceptual (criterios: precisión conceptual, coherencia y aplicación contextual).

Nivel de medición

- Prueba SABER: escala de intervalo.
- Argumentación en preguntas abiertas: escala ordinal (rúbrica 1–4).
- Progresión conceptual: escala ordinal mediante niveles de logro.

Actitudes sostenibles (Variable dependiente actitudinal)

Indicadores

- Puntaje global en escala tipo Likert (5 niveles).
- Disposición a participar en acciones ambientales.
- Percepción de responsabilidad individual frente a la gestión de residuos.

Instrumentos y técnicas

- Escala de actitudes sostenibles basada en Collado et al. (2019), adaptada al contexto escolar (20 ítems).
- Diario reflexivo del estudiante (análisis cualitativo).
- Observación estructurada del comportamiento durante actividades experimentales.

Nivel de medición

- Escala Likert: ordinal con tratamiento paramétrico.
- Diario reflexivo: codificación cualitativa categorial.
- Observación estructurada: escala ordinal (presencia/ausencia – 1/0).

Nota metodológica: La triangulación de fuentes permite detectar cambios actitudinales que no se evidencian únicamente a través de instrumentos auto-reportados, cumpliendo con estándares de credibilidad cualitativa (Zimmermann & Moser, 2022).

2.5 Fundamentación y construcción de los objetivos de la investigación

La formulación del objetivo general y de los objetivos específicos de esta investigación se desarrolló a partir de un proceso inductivo-deductivo, estrechamente articulado con el problema de investigación, las categorías teóricas, el enfoque pedagógico constructivista y el diseño metodológico mixto propuesto. Dichos objetivos constituyen la hoja de ruta que guía la intervención didáctica y la producción del conocimiento en contextos escolares reales, respondiendo tanto a necesidades formativas como a desafíos sociales y ambientales vinculados al uso de residuos urbanos como recurso educativo.

El objetivo general se centró en tres núcleos articuladores: (1) la acción transformadora sobre un residuo (el aceite vegetal posconsumo); (2) la generación de aprendizajes significativos sobre procesos científicos reales, y (3) el fortalecimiento de actitudes sostenibles desde una perspectiva pedagógica activa y reflexiva. Este objetivo fue elaborado teniendo en cuenta la literatura académica en educación científica (Bransford et al., 2022), la pedagogía basada en problemas reales (Krajcik et al., 2018) y los lineamientos de la UNESCO (2020) sobre Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS).

2.5.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de una propuesta pedagógica interdisciplinaria basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo mediante la producción de biodiésel, en el desarrollo de la comprensión conceptual en ciencias naturales y en las actitudes sostenibles de estudiantes de educación media.

En cuanto a los objetivos específicos, su construcción responde a la necesidad de operacionalizar el objetivo general en acciones medibles y coherentes con los instrumentos metodológicos y las fases de intervención:

2.5.2 Objetivos Específicos

Objetivo 1. Analizar los cambios en la comprensión conceptual de los estudiantes antes y después de la aplicación de la propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo.

Objetivo 2. Examinar la variación en las actitudes sostenibles de los estudiantes tras su participación en las actividades experimentales asociadas a la propuesta pedagógica.

Objetivo 3. Describir el proceso de implementación de la propuesta pedagógica, considerando el uso de metodologías activas, recursos digitales y actividades experimentales durante la intervención.

Objetivo 4. Evaluar las características técnicas del biodiésel y de los subproductos obtenidos por los estudiantes, y establecer su relación con los aprendizajes científicos desarrollados durante el proceso.

2.6 Instrumentos estadísticos y pedagógicos empleados en el análisis de datos

El presente estudio, desarrollado bajo un enfoque mixto con diseño convergente, requirió la utilización de un conjunto articulado de instrumentos cuantitativos y cualitativos que permitieran analizar de manera integral los efectos pedagógicos, actitudinales y experimentales de la propuesta educativa basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo. De acuerdo con Creswell y Plano-Clark (2018), los diseños mixtos convergentes demandan la recolección simultánea de distintos tipos de datos, otorgándoles un peso equivalente y orientando su integración hacia una interpretación conjunta del fenómeno investigado. En esta misma línea, Tashakkori y

Teddlie (2010) señalan que la fortaleza de la investigación mixta radica en la integración intencionada de datos provenientes de múltiples fuentes, lo cual permite generar inferencias más robustas, consistentes y contextualizadas que aquellas obtenidas mediante un solo enfoque metodológico.

Desde esta perspectiva, la selección de los instrumentos no respondió a una lógica acumulativa, sino a un criterio de complementariedad metodológica, asegurando que cada herramienta aportara evidencia específica para la comprensión de las variables definidas en el estudio. Tal como lo plantean Hernández-Sampieri et al. (2022), el rigor en investigaciones educativas de enfoque mixto depende de la coherencia entre los instrumentos, los objetivos de investigación y los procedimientos de validación, aspecto que fue cuidadosamente considerado en el diseño del presente estudio.

En coherencia con estos fundamentos, los instrumentos empleados se organizaron de manera sistemática en tres grandes categorías: instrumentos de recolección pedagógica, instrumentos de análisis estadístico e instrumentos de recolección de datos experimentales. Esta organización permitió articular los procesos de medición, interpretación y validación de los datos, facilitando posteriormente la integración de resultados y la construcción de meta-inferencias consistentes con el enfoque mixto adoptado.

2.6.1 Instrumentos de recolección pedagógica

Estos instrumentos permitieron obtener información sobre las dos variables pedagógicas principales: comprensión conceptual y actitudes sostenibles, así como sobre el desempeño de los estudiantes en actividades experimentales y de aula.

1. Google Forms (pretest y postest)

Instrumento digital para la aplicación de pruebas diagnósticas y de salida relacionadas con la comprensión conceptual. Contenía ítems tipo SABER y preguntas abiertas.

Variable asociada: Comprensión conceptual.

Validez y confiabilidad: Validado mediante juicio de expertos (tres docentes de ciencias naturales) y prueba piloto en un grupo similar. Alfa de Cronbach = 0.86.

2. Escala tipo Likert de actitudes sostenibles

Cuestionario estructurado en cinco niveles, adaptado del Inventario de Actitudes Proambientales (Collado et al., 2019). Aplicado antes y después de la intervención.

Variable asociada: Actitudes sostenibles.

Validez y confiabilidad: Ajustada mediante prueba piloto y análisis de consistencia interna ($\alpha = 0.91$).

3. Guía de observación estructurada

Instrumento diseñado para registrar participación, uso de lenguaje técnico, trabajo colaborativo y comportamientos asociados a sostenibilidad durante las sesiones de laboratorio.

Variable asociada: Actitudes sostenibles (componente conductual) y competencias científicas.

Validez: Validación por expertos en didáctica (ver Apéndice G).

4. Entrevistas semiestructuradas

Aplicadas al finalizar la intervención con el fin de captar percepciones, significados y cambios en la comprensión del proceso de transesterificación.

Variable asociada: Comprensión conceptual (dimensión cualitativa) y actitudes sostenibles.

Validez y confiabilidad: Codificación doble en NVivo para garantizar confiabilidad inter-codificador ($\kappa = 0.82$).

5. Rúbricas de desempeño

Utilizadas para valorar informes de laboratorio, productos experimentales y exposiciones.

Variable asociada: Comprensión conceptual y desempeño experimental.

Validez: Revisión de tres expertos en educación científica.

6. Plataforma Moodle (aula extendida)

Herramienta para monitorear participación, tiempos de dedicación, entregas y desempeño en actividades asincrónicas.

Variable asociada: Comprensión conceptual (seguimiento del aprendizaje autónomo).

7. ChatGPT

En el desarrollo del presente estudio se emplearon herramientas digitales de apoyo para la organización, redacción y revisión del documento, incluyendo sistemas de inteligencia artificial como ChatGPT, utilizándose como apoyo en la estructuración textual. Su uso se limitó a funciones de asistencia en la redacción y no en la generación de datos, análisis ni interpretación de resultados.

2.6.2 Instrumentos de análisis estadístico

Estos instrumentos y técnicas permitieron el procesamiento, comparación y triangulación de los datos cuantitativos procedentes del pretest, posttest y mediciones técnicas.

1. Microsoft Excel

Utilizado para organizar bases de datos, depurar información, generar tablas preliminares y construir gráficos descriptivos iniciales.

Variable asociada: Todas las variables cuantitativas.

2. SPSS v.27

- Software principal para el análisis inferencial. Se aplicaron:
- Prueba t para muestras relacionadas (pretest/posttest).
- ANOVA de un factor (comparaciones de productos experimentales).
- Estadísticos descriptivos para caracterización inicial.

Variable asociada: Comprensión conceptual y actitudes sostenibles.

3. Coeficiente de correlación de Pearson

Herramienta para evaluar relaciones entre variables pedagógicas y experimentales (p. ej., pureza del biodiésel vs. puntaje conceptual).

Variable asociada: Variables dependientes pedagógicas y experimentales.

4. Regresión lineal simple

Se empleó para modelar relaciones predictivas entre indicadores experimentales y pedagógicos.

Variable asociada: Producción de biodiésel y comprensión conceptual.

5. Python (matplotlib)

Utilizado exclusivamente para graficación avanzada y visualización complementaria de relaciones estadísticas.

Aporte metodológico: Mejora de claridad en la presentación de tendencias y dispersión de datos.

2.6.3 Instrumentos de recolección de datos experimentales

Estos instrumentos permitieron medir los indicadores asociados a la variable producción de biodiésel y a la caracterización de subproductos experimentales.

1. Mediciones físicas (densidad, pH, color)

Incluyen balanza analítica, tiras de pH y probetas graduadas.

Variable asociada: Producción de biodiésel.

Nivel de medición: Razón (densidad, volumen), ordinal (color).

2. Espectroscopía FTIR-ATR

Técnica empleada para identificar grupos funcionales característicos del biodiésel y la glicerina.

Variable asociada: Pureza del biodiésel (indicador técnico).

Aporte metodológico: Apoya el análisis cuantitativo, pero no se interpreta detalladamente en este capítulo (solo se reporta su uso).

3. Espectrofotometría UV–VIS

Utilizada para comparar absorbancias y estimar niveles de impurezas en subproductos educativos.

Variable asociada: Caracterización técnica de biodiésel y bioplásticos.

4. Registro de volumen y rendimiento

Incluye plantillas estandarizadas para anotar datos de producción.

Variable asociada: Rendimiento porcentual y volumen final.

2.6.4 Cuadro resumen de instrumentos

Con el propósito de sintetizar de manera clara y estructurada el conjunto de instrumentos empleados en la investigación, se presenta a continuación la Tabla 3 que integra los principales recursos de recolección y análisis de datos utilizados en el estudio. Este cuadro permite visualizar la relación directa entre cada instrumento, su propósito metodológico y la variable asociada dentro del enfoque mixto convergente adoptado. Su organización en categorías facilita

comprender la función específica de cada herramienta en el proceso investigativo y evidencia la coherencia entre los métodos utilizados y los objetivos del estudio.

Tabla 3

Resumen de instrumentos estadísticos, pedagógicos y experimentales utilizados en el estudio

Tipo de instrumento	Herramienta	Propósito	Variable asociada
Pedagógico	Google Forms	Medir comprensión conceptual en fase diagnóstica y final	Comprensión conceptual
Pedagógico	Escala Likert	Evaluar actitudes sostenibles antes y después de la intervención	Actitudes sostenibles
Pedagógico	Guía de observación	Registrar comportamientos, lenguaje técnico y participación	Actitudes sostenibles / Competencias científicas
Pedagógico	Entrevistas semiestructuradas	Identificar percepciones, significados y cambios actitudinales	Comprensión conceptual / Actitudes sostenibles
Pedagógico	Rúbricas de desempeño	Evaluación de informes, prácticas y lenguaje científico	Comprensión conceptual
Pedagógico	Plataforma Moodle	Monitorear trabajo autónomo y participación asincrónica	Comprensión conceptual

Tipo de instrumento	Herramienta	Propósito	Variable asociada
Estadístico	Excel	Organización preliminar, tabulación y visualización básica	Todas las variables cuantitativas
Estadístico	SPSS v.27	Análisis inferencial: t-Student, ANOVA, correlaciones	Comprensión conceptual / Actitudes sostenibles
Estadístico	Correlación de Pearson	Determinar relaciones entre variables técnicas y pedagógicas	Todas
Estadístico	Regresión lineal	Modelar tendencias y relaciones predictivas	Producción de biodiésel / Variables pedagógicas
Estadístico	Python (matplotlib)	Visualización avanzada para análisis mixto	Todas
Experimental	Mediciones físicas (densidad, pH, color)	Determinar propiedades básicas del biodiésel	Producción de biodiésel
Experimental	FTIR-ATR	Identificar grupos funcionales y estimar pureza	Producción de biodiésel

Tipo de instrumento	Herramienta	Propósito	Variable asociada
Experi- mental	UV-VIS	Estimar niveles de impureza y características de subproductos	Subproductos del proceso
Experi- mental	Registros estandarizados	Documentar rendimiento y volumen de producción	Producción de biodiésel

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 3 presentada cumple una función metodológica central al integrar de manera sistemática los instrumentos utilizados en la recolección y análisis de datos, evidenciando la articulación entre el enfoque mixto convergente, las variables de estudio y las técnicas empleadas. En este sentido, actúa como un dispositivo analítico que permite comprender la coherencia interna del diseño investigativo y asegura la trazabilidad entre los objetivos, los procedimientos metodológicos y los resultados obtenidos, fortaleciendo la validez del estudio.

2.6.5 Validez y confiabilidad global de los instrumentos

Para garantizar la rigurosidad metodológica del estudio, se establecieron procedimientos sistemáticos de validación y confiabilidad de los instrumentos empleados, los cuales se documentan de manera detallada en los apéndices correspondientes.

Validez de contenido

Los instrumentos pedagógicos (prueba diagnóstica, escala actitudinal tipo Likert, guías de observación y entrevistas semiestructuradas) fueron sometidos a revisión por juicio de expertos en educación científica y sostenibilidad. Este proceso de validación se encuentra documentado en el

Apéndice F, donde se presentan los formatos de evaluación experta, los criterios de valoración y los ajustes realizados a partir de sus recomendaciones.

Confiabilidad interna

La consistencia interna de los instrumentos cuantitativos fue estimada mediante el coeficiente alfa de Cronbach, cuyos resultados se detallan en el Apéndice I:

Escala actitudinal tipo Likert: $\alpha = 0.91$

Prueba diagnóstica de comprensión conceptual: $\alpha = 0.86$

Estos valores indican niveles altos de confiabilidad para ambos instrumentos.

Confiabilidad cualitativa

El análisis cualitativo se desarrolló mediante procesos de codificación sistemática con apoyo del software NVivo, incorporando doble análisis y cálculo de acuerdo intercodificador ($\kappa = 0.82$). Los procedimientos de codificación, matrices de categorías y ejemplos de unidades de análisis se presentan en el Apéndice H.

Adicionalmente, la integración de información se realizó mediante triangulación metodológica, de fuentes y de analistas, cuyos criterios y evidencias se encuentran igualmente consignados en dicho apéndice.

Alineación con el diseño mixto.

Cada instrumento fue diseñado para aportar información específica a una sola variable de estudio, evitando solapamientos entre dimensiones cuantitativas y cualitativas. La correspondencia entre instrumentos, variables y objetivos de investigación se sintetiza en el Apéndice E, donde se presenta la matriz de operacionalización del estudio.

2.7. Población y muestra

La presente investigación se desarrolló en dos instituciones educativas oficiales del municipio de Bucaramanga (Colombia): la Institución Educativa Gabriela Mistral y la Institución Educativa Las Américas. Ambas instituciones fueron seleccionadas de manera intencional debido a su trayectoria en el desarrollo de proyectos ambientales escolares y a su disposición institucional hacia la innovación pedagógica, condiciones que facilitaron la implementación de una propuesta interdisciplinaria centrada en la producción de biodiésel como recurso educativo contextualizado.

La población de referencia estuvo constituida por estudiantes de educación media pertenecientes a los grados octavo, décimo y undécimo de ambas instituciones. En conjunto, la población institucional disponible ascendía aproximadamente a 180 estudiantes, quienes conformaban el universo potencial de participantes en iniciativas de investigación escolar orientadas a las ciencias naturales, la educación ambiental y la sostenibilidad.

La unidad de análisis correspondió a cada estudiante participante, considerado de manera individual como sujeto de evaluación en relación con su comprensión conceptual, sus actitudes sostenibles y su desempeño experimental. Esta definición permitió identificar variaciones individuales, analizar procesos diferenciados de aprendizaje y reconstruir trayectorias formativas diversas dentro del desarrollo de la propuesta pedagógica.

La muestra final estuvo conformada por 14 estudiantes, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional y por conveniencia, estrategia ampliamente utilizada en estudios educativos aplicados donde el interés principal se centra en la comprensión profunda de procesos pedagógicos específicos más que en la generalización estadística de los resultados

(Creswell & Creswell, 2018; Hernández-Sampieri et al., 2022). De estos participantes, siete pertenecían a la Institución Educativa Gabriela Mistral y siete a la Institución Educativa Las Américas. Los criterios de inclusión consideraron el interés manifiesto de los estudiantes en participar en actividades experimentales, su vinculación o afinidad con semilleros de ciencias o clubes ambientales escolares, la disponibilidad horaria para el desarrollo del proyecto, el acompañamiento docente permanente y la autorización institucional correspondiente.

La justificación del tamaño muestral se fundamentó en criterios metodológicos propios de los diseños mixtos y de la investigación cualitativa aplicada en educación. Creswell y Plano-Clark (2018) señalan que, cuando el propósito investigativo es profundizar en un fenómeno educativo concreto y contextualizado, las muestras pequeñas resultan metodológicamente pertinentes, ya que posibilitan la recolección de información rica, situada y de alta calidad analítica. En consonancia con ello, Hernández-Sampieri et al. (2022) destacan que las investigaciones desarrolladas en entornos escolares reales suelen requerir grupos reducidos para garantizar un control adecuado de la intervención, un seguimiento cercano de los participantes y condiciones experimentales estables. Asimismo, Patton (2015) enfatiza que en los muestreos intencionales el valor de la muestra no radica en su tamaño, sino en su capacidad para aportar información significativa y relevante para los objetivos del estudio.

En el contexto de esta investigación, la muestra de 14 estudiantes resultó adecuada desde el punto de vista pedagógico, logístico y analítico. El trabajo experimental asociado a la producción de biodiésel, la caracterización de subproductos y la aplicación de metodologías activas exigía un acompañamiento constante del docente-investigador, así como condiciones de seguridad, precisión en las mediciones y seguimiento permanente del proceso. Al mismo tiempo, el tamaño del grupo permitió observar con detalle las transformaciones cognitivas, procedimentales y

actitudinales de cada participante, fortaleciendo la calidad de la interpretación cualitativa y la triangulación con los resultados cuantitativos. Estas decisiones también respondieron a las condiciones reales de las instituciones educativas públicas, caracterizadas por limitaciones de infraestructura, materiales y tiempos institucionales, donde grupos reducidos favorecen el uso eficiente de los recursos sin comprometer la validez del proceso investigativo. Adicionalmente, trabajar con un número manejable de estudiantes garantizó la homogeneidad en el acompañamiento docente, la retroalimentación personalizada y la participación equitativa en las actividades presenciales y mediadas por tecnologías digitales.

La muestra seleccionada corresponde a un grupo intencional de 14 estudiantes, definida en función de criterios de accesibilidad, pertinencia contextual y viabilidad de la intervención pedagógica. Su tamaño estuvo condicionado, además, por las capacidades físicas y operativas de los laboratorios de la Universidad de Santander (UDES), en los cuales se desarrolló el proceso experimental.

Es importante señalar que la intervención no solo tuvo un propósito formativo, sino también técnico-experimental, orientado a la obtención de biodiésel con características fisicoquímicas comparables al diésel convencional. En este sentido, el número de participantes se ajustó a las condiciones necesarias para garantizar control en los procedimientos, precisión en las mediciones y calidad en el producto obtenido, lo cual implicó la realización de pruebas de laboratorio especializadas descritas en la investigación.

Si bien el tamaño de la muestra es reducido, este se considera pertinente para estudios de carácter cuasi-experimental en contextos educativos reales, donde se privilegia el análisis profundo del proceso de intervención y la validez interna de los resultados sobre la generalización estadística. Asimismo, permitió evidenciar que, a partir de una experiencia pedagógica, es

posible obtener un producto con valor técnico y potencial de validación por parte de la comunidad académica.

La muestra integró estudiantes de distintos grados escolares —octavo, décimo y undécimo—, lo cual fue asumido como un elemento metodológicamente enriquecedor. Esta heterogeneidad permitió comparar niveles de madurez cognitiva, identificar diferencias en la comprensión conceptual asociadas a la trayectoria escolar y valorar la propuesta pedagógica como una estrategia transversal aplicable a diversas edades y niveles de formación. Para reducir posibles sesgos comparativos, se emplearon instrumentos homogéneos de medición, tales como pruebas pretest y posttest, rúbricas y escalas actitudinales, y se realizaron análisis diferenciados cuando la variabilidad asociada al grado escolar resultó relevante.

Finalmente, la pertinencia de la muestra se evaluó en coherencia con el diseño mixto adoptado. La integración de datos cuantitativos, provenientes de pruebas, escalas y mediciones experimentales, con datos cualitativos derivados de entrevistas, observación participante y análisis documental, exige un número de participantes que permita equilibrar la profundidad analítica con la consistencia de los análisis estadísticos. En este sentido, el grupo de 14 estudiantes permitió la aplicación de análisis estadísticos básicos, el seguimiento cualitativo profundo de los procesos formativos y la triangulación de información pedagógica, experimental y actitudinal sin fragmentación de los datos. En consecuencia, la muestra seleccionada resulta metodológicamente coherente, suficientemente justificada y plenamente pertinente para los objetivos y el diseño de la presente investigación doctoral.

2.8 Factores adicionales relevantes en el diseño y desarrollo de la investigación

El rigor metodológico de una investigación doctoral no se sustenta exclusivamente en la elección de un enfoque mixto o en la aplicación combinada de instrumentos cuantitativos y

cualitativos, sino en la consideración integrada de un conjunto de factores que garantizan la coherencia interna, la credibilidad epistemológica y la solidez interpretativa del proceso investigativo. En este sentido, elementos como la validez, la confiabilidad, la validación por juicio de expertos, la transferibilidad, la replicabilidad y las condiciones logísticas y formativas constituyen componentes estructurales del diseño, y no simples aspectos operativos. Tal como lo plantean Creswell y Creswell (2018) y Hernández-Sampieri et al. (2022), la calidad de un estudio depende de la capacidad del investigador para demostrar que los procedimientos metodológicos, los instrumentos y las interpretaciones están conceptualmente alineados con el enfoque adoptado y con la naturaleza del fenómeno estudiado. Desde esta perspectiva, los factores que se desarrollan a continuación fortalecen la arquitectura metodológica de la investigación y complementan el diseño mixto convergente que la sustenta.

La validez interna se concibe como el grado en que los cambios observados en las variables dependientes pueden atribuirse razonablemente a la intervención pedagógica implementada, y no a factores externos o no controlados. De acuerdo con Cook y Campbell (1979), este tipo de validez es especialmente relevante en diseños cuasi-experimentales desarrollados en contextos educativos reales, donde la aleatorización completa no resulta viable. En el marco de esta investigación, la validez interna se fortaleció mediante la utilización de un diseño intragrupo con mediciones pretest y posttest, lo que permitió establecer comparaciones temporales y controlar el nivel inicial de conocimientos y actitudes de los estudiantes. Asimismo, la estandarización de los procedimientos pedagógicos y experimentales —tanto en la producción de biodiésel como en la caracterización de sus subproductos— contribuyó a reducir la variabilidad atribuible a condiciones de aplicación. Finalmente, la triangulación metodológica, entendida como la convergencia de evidencias provenientes de datos cuantitativos, cualitativos y técnicos, permitió reforzar la

inferencia causal desde una perspectiva interpretativa coherente con el enfoque mixto, tal como lo proponen Creswell y Creswell (2018).

En coherencia con la naturaleza contextualizada del estudio, el criterio de transferibilidad se asumió como alternativa epistemológicamente pertinente a la validez externa clásica. Lincoln y Guba (1985) sostienen que, en investigaciones cualitativas y mixtas con muestras intencionales, el propósito no es la generalización estadística, sino la posibilidad de que otros investigadores o profesionales evalúen la aplicabilidad de los hallazgos en contextos similares. En esta investigación, la transferibilidad se favoreció mediante la descripción densa y sistemática del contexto institucional, de las características de los participantes y del proceso pedagógico-experimental desarrollado. La documentación detallada de las condiciones de implementación, los recursos utilizados y las decisiones metodológicas adoptadas permite que la experiencia pueda ser analizada críticamente y eventualmente adaptada a otros escenarios educativos con características comparables, sin perder su coherencia conceptual.

La confiabilidad de los instrumentos se abordó como un atributo esencial para garantizar la estabilidad y consistencia de los datos recolectados. Desde una perspectiva metodológica, la confiabilidad no se limita a un indicador estadístico, sino que se relaciona con la calidad del proceso de diseño, aplicación y revisión de los instrumentos (Aiken, 2003). En el componente cuantitativo, la consistencia interna de las escalas actitudinales fue verificada mediante el cálculo del coeficiente alfa de Cronbach, obteniendo valores superiores a 0.80, considerados adecuados para estudios educativos (Cronbach, 1951). De manera complementaria, la aplicación de pruebas piloto permitió ajustar la redacción de los ítems, mejorar la claridad semántica y reducir posibles ambigüedades, siguiendo las recomendaciones de Hernández-Sampieri et al. (2022). En el ámbito experimental, la confiabilidad se reforzó mediante ensayos previos de los protocolos de

medición, lo que contribuyó a minimizar errores sistemáticos en variables como pH, densidad y rendimiento del biodiésel.

La validez de contenido de los instrumentos se garantizó a través del juicio de expertos, entendido no solo como un procedimiento técnico, sino como un mecanismo de diálogo académico que fortalece la coherencia entre objetivos, variables e indicadores. Siguiendo los planteamientos de Lawshe (1975) y Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2008), los instrumentos fueron evaluados por expertos con formación en educación científica, evaluación educativa y sostenibilidad, quienes analizaron la pertinencia, claridad y congruencia de los ítems y criterios de evaluación. Las observaciones y recomendaciones derivadas de este proceso permitieron realizar ajustes sustantivos a cuestionarios, rúbricas y guías de observación, incrementando así la solidez metodológica y la alineación conceptual de los instrumentos con el enfoque de la investigación.

Las consideraciones logísticas y de bioseguridad, aunque no constituyen un marco teórico en sí mismas, tuvieron una incidencia directa en la viabilidad metodológica del estudio. El desarrollo de actividades experimentales con sustancias como hidróxido de sodio y metanol exigió la adaptación de protocolos de trabajo seguro a las condiciones reales de los laboratorios escolares disponibles. La estandarización de espacios, tiempos y normas de seguridad permitió asegurar la integridad de los participantes y la consistencia de los procedimientos experimentales, manteniendo la investigación dentro de parámetros éticos y metodológicos adecuados. El detalle operativo de estos aspectos se documenta de manera específica en el Apéndice D, correspondiente a los protocolos de bioseguridad y manejo de reactivos químicos, y en el Apéndice G, donde se presentan las guías experimentales y la adecuación de las condiciones de laboratorio escolar, permitiendo que esta sección conserve su carácter metodológico y analítico.

La formación docente y el acompañamiento institucional constituyeron un factor transversal en el desarrollo del estudio. Desde un enfoque de investigación-acción, el docente investigador asumió un rol activo en el diseño, implementación y evaluación de la propuesta pedagógica, integrando la reflexión sistemática sobre la práctica como parte del proceso investigativo (Hernández-Sampieri et al., 2022). El acompañamiento académico de la Universidad de Santander (UDES) fortaleció este proceso mediante asesoría técnica en análisis estadístico, caracterización química y revisión metodológica de los instrumentos, contribuyendo a elevar el nivel de rigor científico y pedagógico de la investigación.

La replicabilidad del proyecto se concibió como la posibilidad de reproducir la experiencia en contextos educativos similares, reconociendo que toda replicación debe considerar las particularidades del entorno institucional y sociocultural. En consonancia con Lincoln y Guba (1985), la replicabilidad se favoreció mediante la documentación exhaustiva del proceso pedagógico y experimental, incluyendo guías estandarizadas, rúbricas, materiales didácticos y registros digitales. Esta sistematización no solo permite la reproducción de la experiencia, sino que facilita su sostenibilidad y su integración a iniciativas institucionales como los Proyectos Pedagógicos Productivos, ampliando su impacto más allá del marco temporal de la investigación.

Finalmente, la inclusión de tecnologías emergentes se integró como un componente metodológico coherente con los objetivos formativos del estudio. El uso de herramientas digitales para el análisis y visualización de datos, como Python, se orientó al fortalecimiento de competencias científicas contemporáneas, particularmente en lo relacionado con la alfabetización digital y la interpretación crítica de información cuantitativa. Desde esta perspectiva, la tecnología no se concibió como un recurso accesorio, sino como un medio pedagógico que amplió las

posibilidades analíticas del estudio y contribuyó a la formación integral de los estudiantes en el contexto de la educación científica y ambiental.

2.9 Diagrama general del proyecto

La Figura 8 sintetiza de manera integrada la lógica metodológica, pedagógica y experimental que orientó el desarrollo de la investigación, conforme a un diseño mixto convergente paralelo. El diagrama no tiene como propósito detallar procedimientos operativos ni aspectos logísticos específicos, los cuales se desarrollan de manera ampliada en el Apéndice D, referido a los protocolos de bioseguridad y manejo de reactivos, y en el Apéndice F, donde se describen las guías experimentales y la adecuación de las prácticas al contexto del laboratorio escolar, sino representar analíticamente la articulación entre fases, variables, objetivos e hipótesis, permitiendo comprender la coherencia interna del proyecto.

En una primera fase, de carácter pedagógico-diagnóstico, se establecen las condiciones iniciales del estudio mediante la identificación de los conocimientos previos y las actitudes sostenibles de los estudiantes frente a la problemática del aceite vegetal posconsumo. Esta fase se vincula directamente con las variables dependientes del estudio —comprensión conceptual y actitudes sostenibles— y cumple la función metodológica de establecer una línea base necesaria para el contraste posterior de las hipótesis planteadas. Asimismo, sienta las bases conceptuales y actitudinales que permiten interpretar los cambios observados tras la intervención.

De manera articulada, el proyecto avanza hacia una fase pedagógico-experimental, que constituye el eje integrador de la propuesta. En esta etapa, el aprovechamiento pedagógico del aceite vegetal posconsumo se operacionaliza como variable independiente, a través de su transformación experimental en biodiésel y subproductos. Esta fase articula el aprendizaje científico con la educación ambiental crítica, permitiendo a los estudiantes aplicar conocimientos de

química, física y biología en un contexto real y contextualizado. Desde el punto de vista metodológico, esta fase resulta clave para poner a prueba la hipótesis de que la experimentación auténtica favorece el desarrollo de competencias científicas y actitudes sostenibles.

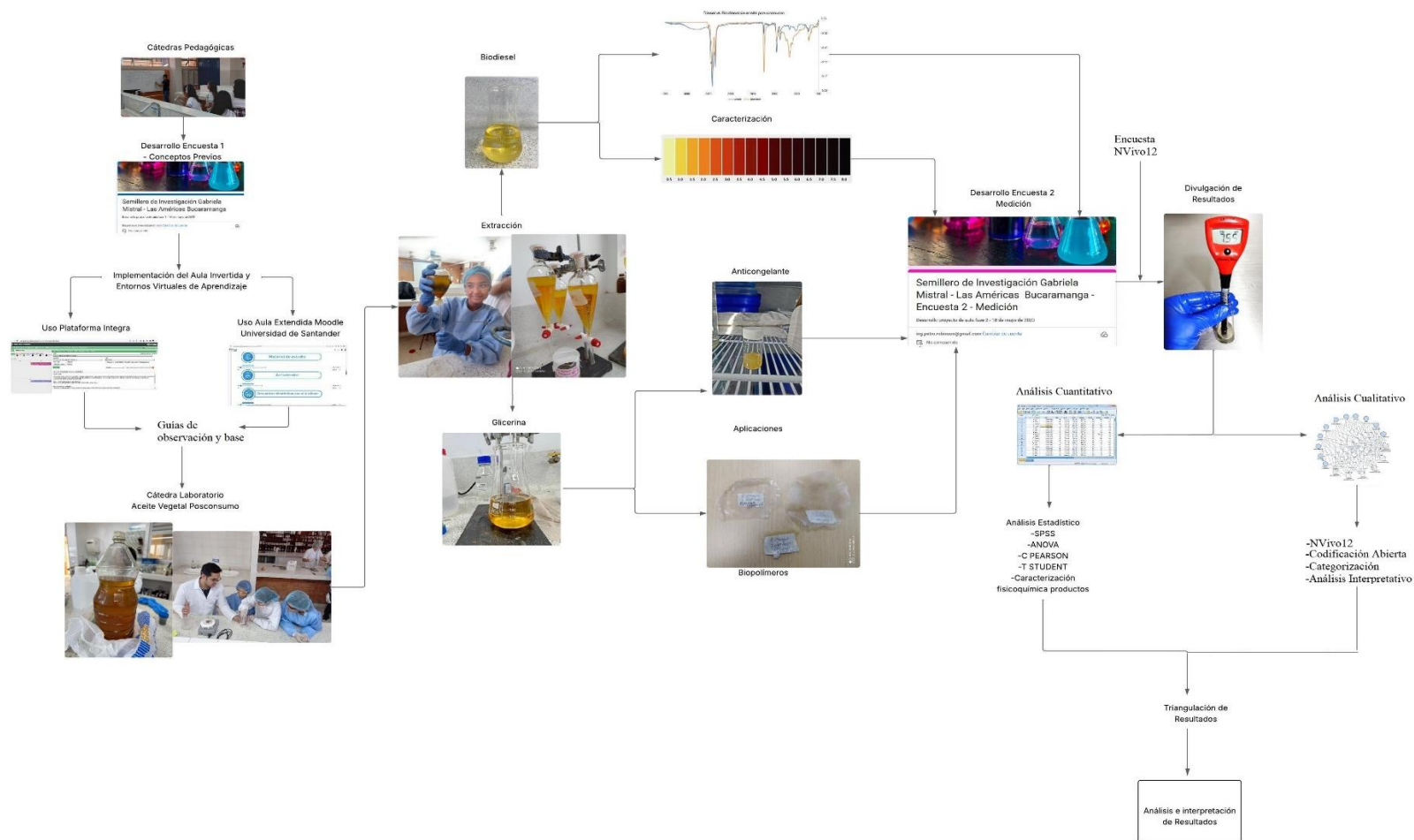
De forma paralela y no secuencial, tal como corresponde al enfoque mixto convergente adoptado, se desarrolla la fase evaluativa y analítica, en la cual se recolectan y procesan datos cuantitativos y cualitativos asociados a las variables del estudio. Esta fase no se concibe como un momento posterior al proceso pedagógico, sino como un componente transversal que permite monitorear, analizar y comprender los efectos de la intervención desde múltiples perspectivas. La simultaneidad de los análisis responde a la necesidad de contrastar evidencias objetivas con interpretaciones contextualizadas, fortaleciendo la validez del estudio.

Finalmente, el diagrama representa la fase de integración de resultados, propia del diseño convergente, en la cual los hallazgos cuantitativos y cualitativos se articulan mediante procesos de triangulación y meta-inferencia. Esta integración permite relacionar la calidad técnica de los productos obtenidos con los aprendizajes conceptuales y las actitudes sostenibles desarrolladas, ofreciendo una comprensión holística del impacto de la propuesta pedagógica. En esta fase se consolida la verificación de las hipótesis y se evidencia la coherencia entre los objetivos de investigación, el diseño metodológico y los resultados alcanzados.

En conjunto, el diagrama general del proyecto cumple una función analítica y explicativa, al mostrar cómo las fases del estudio se articulan de manera coherente dentro de un enfoque mixto convergente, evitando fragmentaciones metodológicas y garantizando la consistencia entre el componente pedagógico, el experimental y el analítico. De este modo, la Figura 8 se constituye en una representación sintética de la arquitectura metodológica que sustenta la investigación.

Figura 8

Diagrama general del proyecto



Nota. Elaboración propia.

2.9.1 Estrategia pedagógica implementada

La estrategia pedagógica implementada en esta investigación se estructuró como una propuesta interdisciplinar basada en el aprendizaje activo, orientada a la comprensión de conceptos científicos mediante la transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel. Dicha estrategia integró elementos del enfoque constructivista, el aprendizaje experimental y el uso de metodologías activas, como el aula invertida.

Para su desarrollo, la estrategia se organizó en tres fases articuladas:

Fase 1. Diagnóstico y activación de conocimientos previos

En esta etapa se aplicó un cuestionario tipo pretest con el fin de identificar el nivel inicial de comprensión conceptual de las estudiantes en relación con los contenidos de química y sostenibilidad. Adicionalmente, se promovieron espacios de reflexión orientados a reconocer problemáticas ambientales asociadas al manejo inadecuado del aceite vegetal posconsumo.

Fase 2. Implementación de la intervención pedagógica

Esta fase constituyó el núcleo del proceso formativo e incluyó el desarrollo de actividades experimentales centradas en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiésel. Se emplearon estrategias como el aula invertida, el trabajo colaborativo y el acompañamiento docente, favoreciendo la articulación entre teoría y práctica. Durante esta etapa, las estudiantes participaron activamente en la preparación de reactivos, ejecución de procedimientos de laboratorio y análisis de resultados, promoviendo la construcción significativa del conocimiento.

Fase 3. Evaluación y análisis de resultados

Finalmente, se aplicó un posttest con el propósito de identificar cambios en la comprensión conceptual y en las actitudes hacia la sostenibilidad. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante herramientas estadísticas y complementados con técnicas cualitativas como

entrevistas y análisis de contenido con NVivo 12, lo que permitió una interpretación integral del impacto de la estrategia pedagógica.

En conjunto, esta estructura permitió no solo la apropiación de conceptos científicos, sino también el desarrollo de competencias experimentales y una mayor conciencia ambiental en las estudiantes.

2.9.2 Desarrollo metodológico por fases de la investigación

El desarrollo metodológico de la investigación titulada *Obtención de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico* se estructuró bajo un diseño mixto convergente paralelo, con un componente cuasi-experimental de carácter educativo y un componente experimental desarrollado en el laboratorio escolar. Ambos componentes fueron implementados y analizados de manera simultánea, en coherencia con el enfoque constructivista y la educación para la sostenibilidad que fundamentan el estudio.

El proceso investigativo se organizó en fases metodológicas articuladas, no concebidas como etapas estrictamente secuenciales, sino como componentes interrelacionados que se desarrollaron de forma integrada a lo largo de la intervención. Cada fase cumplió un propósito específico dentro del diseño global, permitió la recolección de evidencias pedagógicas y técnicas, y se vinculó directamente con los objetivos y las hipótesis de la investigación. Esta organización favoreció la coherencia interna del estudio y la trazabilidad metodológica, sin fragmentar los procesos de enseñanza, experimentación y evaluación.

La Figura 8. Diagrama general del proyecto sintetiza gráficamente esta articulación, mostrando la interacción entre los componentes pedagógicos, experimentales y evaluativos propios del enfoque mixto convergente. El diagrama no representa una secuencia rígida, sino un entramado metodológico en el que los datos cuantitativos y cualitativos se recolectan y analizan de

manera paralela, para luego integrarse en una fase de interpretación conjunta. La descripción textual de las fases que se presenta a continuación complementa esta representación, garantizando claridad metodológica y posibilitando la comprensión del diseño adoptado.

2.9.3 Diseño experimental y definición de variables

El diseño experimental adoptado corresponde a un modelo cuasi-experimental con mediciones pretest y posttest sin grupo control, modalidad ampliamente utilizada en investigaciones educativas desarrolladas en contextos escolares reales, donde la asignación aleatoria de los participantes no resulta viable (Hernández-Sampieri et al., 2022). Este diseño se integra de manera coherente dentro del enfoque mixto convergente, al permitir el análisis simultáneo de cambios cuantificables y procesos interpretativos asociados a la intervención pedagógica.

La variable independiente del estudio se define como la implementación de una propuesta pedagógica interdisciplinaria basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo, mediada por metodologías activas como cátedras integradas, aula invertida y prácticas experimentales en laboratorio escolar. Esta variable constituye el eje articulador del proceso educativo y experimental, y es el principal factor de intervención analizado.

Las variables dependientes corresponden a la comprensión conceptual de los procesos químicos asociados a la transesterificación, las actitudes sostenibles frente al reciclaje y la reutilización de residuos, y el desempeño experimental de los estudiantes en las prácticas de laboratorio. Estas variables fueron analizadas desde una perspectiva integral, combinando mediciones cuantitativas con interpretaciones cualitativas, en coherencia con el diseño mixto convergente adoptado.

Adicionalmente, se consideraron variables de control orientadas a garantizar condiciones metodológicas homogéneas durante la intervención, tales como el tipo de aceite vegetal

posconsumo utilizado, las proporciones generales de reactivos establecidas en la guía base, las condiciones de seguridad y bioseguridad, la aplicación uniforme de los instrumentos de evaluación y el acompañamiento docente y universitario constante. Estas variables permitieron reducir fuentes de variabilidad externa y fortalecer la validez interna del estudio, sin alterar el carácter pedagógico y contextualizado de la investigación.

No obstante, es importante señalar que, debido a la naturaleza cuasi-experimental del estudio desarrollado en contexto educativo real, algunas fuentes de variabilidad no pudieron ser controladas completamente, tales como diferencias en ritmos de aprendizaje, condiciones individuales de los estudiantes y variaciones propias del trabajo experimental escolar. Estas condiciones introducen un grado de variabilidad no controlada que, si bien no invalida los resultados, debe ser considerada en su interpretación, particularmente en relación con la magnitud de los efectos observados.

En este sentido, los mecanismos de control implementados permitieron reducir la variabilidad externa y fortalecer la validez interna del estudio, aunque no eliminarla completamente, lo cual es coherente con investigaciones educativas de carácter aplicado

Fase 1. Cátedras pedagógicas integradas

Esta fase tuvo como propósito construir el andamiaje conceptual interdisciplinar necesario para el desarrollo del proyecto. Se desarrollaron sesiones articuladas entre las áreas de Biología, Química, Matemáticas y Tecnología en las Instituciones Educativas Gabriela Mistral y Las Américas, para tal fin se contó con el permiso de los respectivos rectores de las instituciones educativas las Américas y Gabriela mistral, (ver apéndice A) y con los respectivos permiso de los acudientes de los estudiantes, y en el apéndice B y C, se contó con acompañamiento de un docente universitario del programa de Ingeniería Petroquímica de la Universidad de Santander.

Los contenidos abordados se alinearon con los Estándares Básicos de Competencias del MEN y permitieron preparar a los estudiantes para la fase experimental posterior. La Tabla 4 presenta los parámetros normativos de referencia utilizados como marco técnico para la calidad del biodiésel, sin que estos constituyan aún resultados del estudio.

Tabla 4

Requisitos del biodiésel para mezcla con combustibles diésel y normas para el color del vidrio

Propiedad	Unidades	Requisito	Métodos de ensayo
Densidad a 15 °C	kg/m ³	860 – 900	ASTM D4052 ISO 3675
Número de cetano	Cetanos	47 mínimo	ASTM D613 ISO 5165
Viscosidad (cinemática a 40 °C)	mm ² /s	1,9 – 6,0	ASTM D445 ISO 3104
Contenido de agua	mg/kg	500 máximo	ASTM E203 ISO 12937
Contaminación Total	mg / Kg	24 máximo	EN 12662
Punto de inflamación	°C	120 mínimo	ASTM D93 ISO 2719
Contenido de metanol o etanol	% en masa	0,2 máximo	ISO 14110
Corrosión en lámina de cobre	Unidad	Clase 1	ASTM D130 ISO 2160
Estabilidad a la oxidación (3)	Horas	6 mínimo	EN 14112
Estabilidad térmica	% Reflectancia	70 % mínimo	ASTM D6468
Cenizas sulfatadas	% en masa	0,02 máximo	ASTM D874 ISO 3987
Destilación (PFE)	°C	360 máximo	ASTM D86 ISO 3405
Número ácido	mg de KOH/g	0,5 máximo	ASTM D664 EN 14104
Índice de yodo	gr yodo / 100 gr	120 máximo	EN 14111
Punto de fluidez	°C	Reportar (1)	ASTM D97
Temperatura de Obturación del filtro (CFPP)	°C	Reportar (1)	ASTM D6371 EN 118
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	Reportar (1)	ASTM D2500 ISO 3015
Carbón residual	% en masa	0,3 máximo	ASTM D4530 (2) ISO 10370
Contenido de fósforo	mg/Kg	10,0 máximo	ASTM D4951 / Pt ISO 14107
Contenido de Na + K	mg/kg	5,0 máximo	ASTM D5863 EN 14108 / EN 14109
Contenido de Ca + Mg	mg/kg	5,0 máximo	ASTM D5863 EN 14108 / EN 14109
Contenido de éster	% en masa	96,5 mínimo	EN 14103
Contenido de alquil éster de ácido linoléico	% en masa	12,0 máximo	EN 14103
Glicerina libre	% en masa	0,02 máximo	ASTM D6584 EN 14105 / EN 14106
Glicerina total	% en masa	0,25 máximo	ASTM D6584 ISO 14105
Contenido de Monoglicéridos	% en masa	0,60 máximo	ASTM D6584 ISO 14105
Contenido de Diglicéridos	% en masa	0,20 máximo	ASTM D 6584 ISO 14105
Contenido de Triglicéridos	% en masa	0,20 máximo	ASTM D 6584 ISO 14105

Color ASTM	Coordenadas cromáticas (Sistema RGB USC)			
	Rojo	Verde	Azul	T _w
0.5	0.462	0.473	0.065	0.86 ± 0.06
1.0	0.489	0.475	0.036	0.77 ± 0.06
1.5	0.521	0.464	0.015	0.67 ± 0.06
2.0	0.552	0.442	0.006	0.55 ± 0.06
2.5	0.582	0.416	0.002	0.44 ± 0.04
3.0	0.611	0.388	0.001	0.31 ± 0.04
3.5	0.640	0.359	0.001	0.22 ± 0.04
4.0	0.671	0.328	0.001	0.152 ± 0.022
4.5	0.703	0.296	0.000	0.109 ± 0.016
5.0	0.736	0.264	0.000	0.081 ± 0.012
5.5	0.770	0.230	0.000	0.058 ± 0.010
6.0	0.805	0.195	0.000	0.040 ± 0.008
6.5	0.841	0.159	0.000	0.026 ± 0.006
7.0	0.877	0.123	0.000	0.016 ± 0.004
7.5	0.915	0.085	0.000	0.0081 ± 0.0016
8.0	0.956	0.044	0.000	0.0025 ± 0.0006

A Coordenadas de tolerancia son ±0.06

B Judd, DB, "Triángulo Maxwell proporciones de las escalas uniformes de cromaticidad", Revista de Investigación de la Oficina Nacional de Normas, Vol. 14, 1935, p. 41. (RP 756); Revista de la Sociedad Óptica Americana, Vol. 25, 1935, p. 24.

C Comisión Internacional de IEChairage (Comisión Internacional de Iluminación)

(1) Los valores para estos parámetros deberán establecerse en las normas técnicas específicas que se definan para cualquier mezcla biodiésel - diésel en cualquier proporción. Los valores definidos deberán ser sustentados en estudios realizados en laboratorios acreditados y validados por autoridad competente.

(2) El carbón residual debe ser determinado sobre el 100 % de la muestra.

(3) Se recomienda complementar con el método ASTM D4625, con niveles máximos de 1,5 mg/100 ml a 6 semanas.

NOTA El poder calorífico inferior de referencia reportado por el método ASTM D240 debe estar alrededor de 39 500 kJ/Kg.

Nota. Normas NTC 5444 y ASTM D1500.

La Tabla 4 presentada establece los parámetros normativos de referencia que orientan la evaluación de la calidad del biodiésel obtenido en el estudio. En términos metodológicos, estos

criterios funcionan como un marco técnico de validación que permite contrastar los resultados experimentales con estándares reconocidos, asegurando la confiabilidad de los datos y la coherencia entre el proceso de producción implementado y las exigencias establecidas en las normas NTC 5444 y ASTM D1500.

Fase 2. Diagnóstico de conocimientos previos

Con el fin de establecer una línea base, se aplicó un instrumento diagnóstico orientado a identificar los saberes previos de los estudiantes sobre sostenibilidad, reciclaje y procesos químicos. Este instrumento correspondió a la Encuesta 1 – Diagnóstico de conceptos previos (ver Apéndice E), aplicada mediante Google Forms.

La estructura del cuestionario combinó ítems de opción múltiple tipo SABER y preguntas abiertas, permitiendo evaluar tanto el reconocimiento conceptual como la argumentación inicial. La Figura 9 ilustra un ejemplo del instrumento aplicado.

Figura 9

Diagnóstico de conocimientos previos



Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

B I U O K

Desarrollo proyecto de aula fase 1-16 de mayo de 2023

1. ¿Autoriza el uso de su información con fines académicos? *

1. SI
2. NO

2. Indique su nombre completo *

Texto de respuesta corta

3. Indique su grado en el colegio *

Texto de respuesta corta

4. Teniendo en cuenta lo aprendido en las asignaturas de biología, tecnología o química, defina que es una mezcla *

Texto de respuesta larga

5. Las mezclas se pueden clasificar en: *

- ☐ Mezclas homogéneas y mezclas directas
☐ Mezclas homogéneas y mezclas heterogéneas
☐ Mezclas solubles y mezclas insolubles
☐ Mezclas polar y mezclas apolares

6. El proceso de transesterificación hace referencia a: *

- ☐ Generar triglicéridos a partir del aceite reciclado y alcohol empleando la transesterificación
☐ Generar Biodiesel y glicerina por medio de la reacción de las grasas que contiene aceite vegetal y un alc..
☐ La aplicación de la propiedad de la transesterificación que sufre la glicerina para transformarse en acet..
☐ Un proceso para la producción del alcohol empleado biodiesel y grasas vegetales

7. Mencione que tipo de mecanismo de separación emplearía para separar aceite y agua *



- ☐ Evaporación
☐ Decantación
☐ Destilación
☐ Filtración

8. Mencione el uso de las probetas en el laboratorio de química *



- ☐ Medir volúmenes superiores más rápido que las pipetas, aunque con menor precisión
☐ Se utilizan para calentar las diferentes sustancias en el laboratorio.
☐ Medir densidades superiores más rápido que las pipetas, aunque con menor precisión
☐ Se utilizan para medir la fuerza que se aplica a los diferentes materiales de laboratorio

9. ¿Qué es el papel de pH? *



Texto de respuesta larga

Nota. Elaboración propia a partir del instrumento diagnóstico (ver Apéndice E).

Fase 3. Sesiones teóricas y prácticas guiadas

A partir del diagnóstico, se desarrollaron sesiones teóricas y prácticas orientadas a la comprensión del proceso de transesterificación. Las clases magistrales impartidas por el docente externo de la UDES (Figuras 10 y 11) precedieron a las prácticas experimentales en laboratorio escolar (Figuras 12 y 13), permitiendo una transición gradual de la teoría a la práctica.

Figura 10

Clase magistral impartida IE. Gabriela Mistral por docente externo UDES



Nota. Elaboración propia.

Figura 11

Clase magistral impartida IE. Las Américas por docente externo UDES



Nota. Elaboración propia.

Figura 12

Sesión práctica impartida IE. Gabriela Mistral por docente externo UDES



Nota. Elaboración propia.

Figura 13

Sesión práctica impartida IE. Las Américas por docente externo UDES



Nota. Elaboración propia.

Fase 4. Implementación del aula invertida

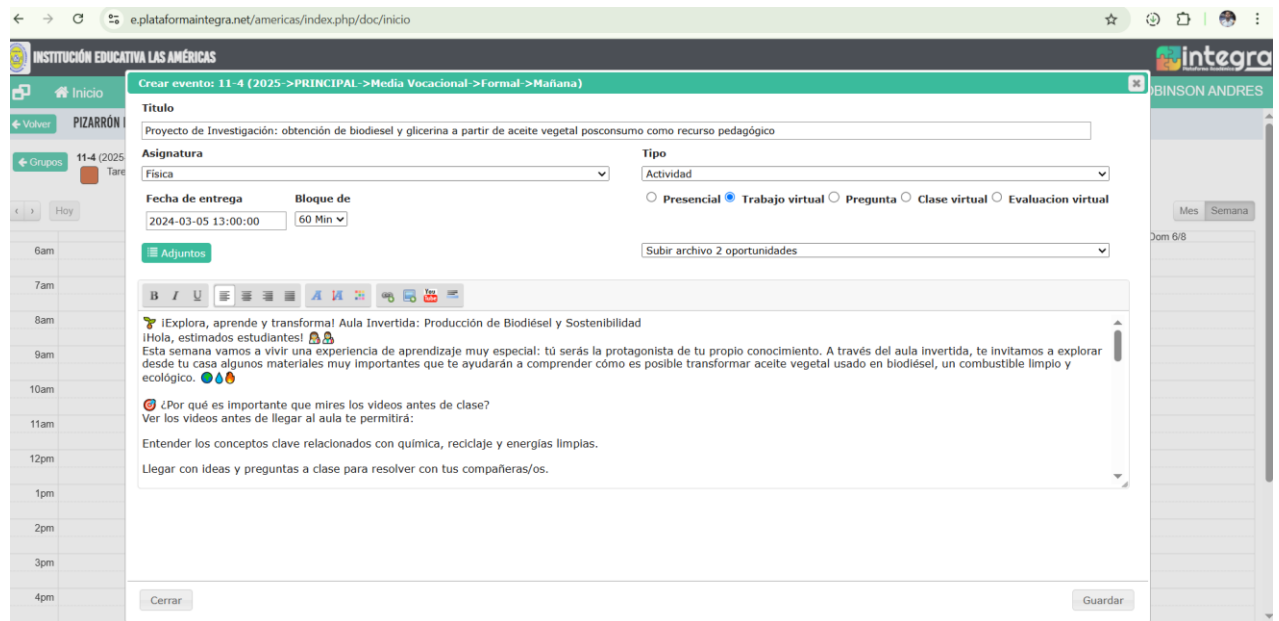
Esta fase integró el modelo de aula invertida, apoyado en la Plataforma Integra de la Secretaría de Educación de Bucaramanga y el entorno Moodle de la UDES. La estrategia permitió

trasladar el estudio de contenidos teóricos al trabajo autónomo, reservando el espacio presencial para la experimentación y el análisis.

Las Figuras 14, 15 y 16 evidencian el uso de estos entornos virtuales. El acceso institucional y la publicación del proyecto se encuentran documentados en el Apéndice B.

Figura 14

Aula invertida Plataforma Integra



← → e.plataformaintegra.net/americas/index.php/doc/inicio

INSTITUCIÓN EDUCATIVA LAS AMÉRICAS

Crear evento: 11-4 (2025->PRINCIPAL->Media Vocacional->Formal->Mañana)

Título
Proyecto de Investigación: obtención de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico

Asignatura
Física

Tipo
Actividad

Fecha de entrega
2024-03-05 13:00:00

Bloque de
60 Min

Adjuntos
Subir archivo 2 oportunidades

Tipo
☐ Presencial ☒ Trabajo virtual ☐ Pregunta ☐ Clase virtual ☐ Evaluación virtual

Contenido
Explora, aprende y transforma! Aula Invertida: Producción de Biodiésel y Sostenibilidad
¡Hola, estimados estudiantes! Esta semana vamos a vivir una experiencia de aprendizaje muy especial: tú serás la protagonista de tu propio conocimiento. A través del aula invertida, te invitamos a explorar desde tu casa algunos materiales muy importantes que te ayudarán a comprender cómo es posible transformar aceite vegetal usado en biodiésel, un combustible limpio y ecológico.
¿Por qué es importante que mires los videos antes de clase?
Ver los videos antes de llegar al aula te permitirá:
Entender los conceptos clave relacionados con química, reciclaje y energías limpias.
Llegar con ideas y preguntas a clase para resolver con tus compañeras/os.

Cerrar Guardar

Nota. Institución educativa Las Américas y Gabriela Mistral.

Figura 15

Material empelado en el aula invertida Integra

 ¡Explora, aprende y transforma! Aula Invertida: Producción de Biodiésel y Sostenibilidad

¡Hola, estimados estudiantes! 

Esta semana vamos a vivir una experiencia de aprendizaje muy especial: tú serás la protagonista de tu propio conocimiento. A través del aula invertida, te invitamos a explorar desde tu casa algunos materiales muy importantes que te ayudarán a comprender cómo es posible transformar aceite vegetal usado en biodiésel, un combustible limpio y ecológico.  

 ¿Por qué es importante que mires los videos antes de clase?
Ver los videos antes de llegar al aula te permitirá:

Entender los conceptos clave relacionados con química, reciclaje y energías limpias.

Llegar con ideas y preguntas a clase para resolver con tus compañeras/os.

Conectar lo que ves con lo que vivimos a diario en casa, en la cocina, en la ciudad, ¡y hasta en el planeta!

 Videos recomendados para ver en casa
¿Qué es el biodiésel y cómo se produce? (Nivel básico)
Un video claro y corto que explica cómo se convierte el aceite usado en combustible.
 <https://www.youtube.com/watch?v=90IEe8DvW0E>

¿Por qué es importante reciclar aceite de cocina?
Este video te hará reflexionar sobre lo que ocurre cuando botamos el aceite por el lavaplatos y cómo eso afecta nuestros ríos y suelos.
 <https://www.youtube.com/watch?v=Z2a0nMTBGyA>

¡Sostenibilidad y cambio climático explicado para jóvenes!
¿Qué tiene que ver el biodiésel con el cuidado del planeta? Aquí te lo explican.
 <https://www.youtube.com/watch?v=VKcZ0T8bZE>

 Conceptos que te ayudarán a entender mejor:
 ¿Qué es una mezcla homogénea?
Aprende este concepto clave para entender cómo se combinan los materiales en la producción de biodiésel.
 <https://es.khanacademy.org/science/quimica/quimica-de-soluciones/mezclas-y-soluciones/a/solutions-introduction>

 ¿Qué es una reacción química?
Descubre cómo los materiales cambian para convertirse en algo nuevo, como ocurre en el biodiésel.
 <https://es.khanacademy.org/science/quimica/chemical-reactions-topic>

 ¿Qué es la sostenibilidad?
El mundo necesita soluciones sostenibles y tú puedes hacer parte de ellas.
 <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-sustainable/>

 Recomendaciones para ver los videos
Busca un lugar tranquilo para concentrarte.

Toma apuntes de las ideas principales.

Si hay algo que no entiendes, ¡repite! o anótalo para preguntarlo en clase!

Reflexiona: ¿cómo puedo aplicar esto en mi vida cotidiana?

 ¿Qué haremos después en clase?
En nuestra próxima sesión, realizaremos actividades prácticas con los conceptos que has revisado. Construiremos juntos un proyecto experimental donde tú aplicarás lo aprendido y podrás ser una agente del cambio en tu comunidad.

 Recuerda: aprender de forma autónoma es el primer paso para convertirte en una científica o científico del mundo real.
¡Nos vemos pronto en el aula para seguir construyendo conocimiento! 

Nota. Elaboración propia.

Figura 16

Empleo Aula Extendida Moodle – UDES



Nota. Tomado de Universidad de Santander – UDES.

Fase 5. Cátedra–laboratorio: obtención de biodiésel

En esta fase se ejecutó el procedimiento experimental de obtención de biodiésel y glicerina, siguiendo la Guía base para la obtención de biodiésel (ver Apéndice G). Los insumos, equipos y reactivos empleados se sistematizan en la Tabla 5, la cual responde a la planificación logística del laboratorio y no a resultados del estudio.

Tabla 5

Solicitud de pedidos de laboratorio LAB-FT-004-UDES

Can- tidad (#)	Equi- pos y Materia- les	Can- tidad (SI)	Sus- tancias quí- micas	Con- centración	Can- tidad (#)
3	Vidrios de reloj		Hidró- xido de sodio	14.52 g	
6	Vasos de precipitado	500 ml	Meta- nol	600 ml	99% concentra- ción
3	Probetas	50 ml	Aceite de cocina reci- clado	1200 ml	
3	Agita- dores magnéti- cos		Carbón activado gra- nular	60 g	
3	Probetas	250 ml o 500 ml			

Can- tidad (#)	Equi- pos y Materia- les	Can- tidad (SI)	Sus- tancias quí- micas	Con- centración	Can- tidad (#)
3	Papel de filtro de tela				
3	Soporte Universal				
3	Papel de filtro	180 mm			
3	Embu- dos de decanta- ción				
3	Aros metálicos o pin- zas para sujetar el embudo en el soporte univer- sal.				
3	Erlen- meyer con sa- lida lateral	500 ml			
3	Pisetas				
1	Balanza				

Can- tidad (#)	Equi- pos y Materia- les	Can- tidad (SI)	Sus- tancias quí- micas	Con- centración	Can- tidad (#)
2	Embudo buchner con corcho o tapón de goma con pa- pel de filtro				
1	Bomba de vacío con manguera o compresor con manguera				
3	Erlen- meyer	100 ml			
3	Crisol de porcelana				

Nota. Tomado de Universidad de Santander – UDES.

La Tabla 5 presentada corresponde a la planificación logística del proceso experimental, detallando los equipos, materiales y sustancias requeridas para la obtención del biodiésel en condiciones controladas de laboratorio. En términos metodológicos, esta organización permite asegurar la trazabilidad y estandarización del proceso, evidenciando la viabilidad técnica de la propuesta y garantizando la reproducibilidad del experimento en contextos educativos similares.

Las Figuras 17 a 20 documentan visualmente las etapas del proceso experimental (limpieza del aceite, preparación del metóxido, reacción de transesterificación y separación de fases), funcionando como apoyo ilustrativo del procedimiento descrito.

Figura 17

Montaje para proceso de limpieza del aceite vegetal posconsumo



Nota. Elaboración propia.

Figura 18

Preparación del metóxido de sodio



Nota. Elaboración propia.

Figura 19

Reacción de transesterificación 0 – 5 minutos (Figura izquierda), 5 – 10 minutos (Figura central), 10 – 15 minutos (Figura derecha)



Nota. Elaboración propia.

Figura 20

Obtención del biodiesel y glicerina como subproducto



Nota. Elaboración propia.

Fase 6. Caracterización del biodiésel

La caracterización del biodiésel se realizó mediante parámetros físicos y espectroscópicos establecidos en normas técnicas (ASTM y NTC), con el propósito de disponer de datos objetivos para el análisis posterior. La descripción técnica detallada de estas pruebas se desarrolla en el capítulo de resultados.

Fase 7. Procesamiento y caracterización de la glicerina

Esta fase se orientó al aprovechamiento pedagógico de la glicerina como subproducto, integrando procesos de purificación, neutralización y análisis cualitativo. La finalidad fue fortalecer competencias científicas y reflexivas, sin que esta sección incorpore aún interpretación de resultados.

Fase 8. Elaboración de bioplásticos y anticongelante

A partir de la glicerina obtenida, se desarrollaron experiencias experimentales orientadas a la elaboración de bioplásticos y anticongelante, como estrategias didácticas de economía circular. Estas actividades se documentaron como parte del proceso metodológico, reservando la evaluación de su efectividad para el capítulo de resultados.

Fase 9. Evaluación post-intervención

Se aplicó la Encuesta 2 – Evaluación post-intervención (ver Apéndice F), con estructura equivalente al instrumento diagnóstico, permitiendo el análisis comparativo pretest–posttest. La aplicación de este instrumento constituye la base para el análisis estadístico posterior, sin que en esta sección se presenten aún resultados.

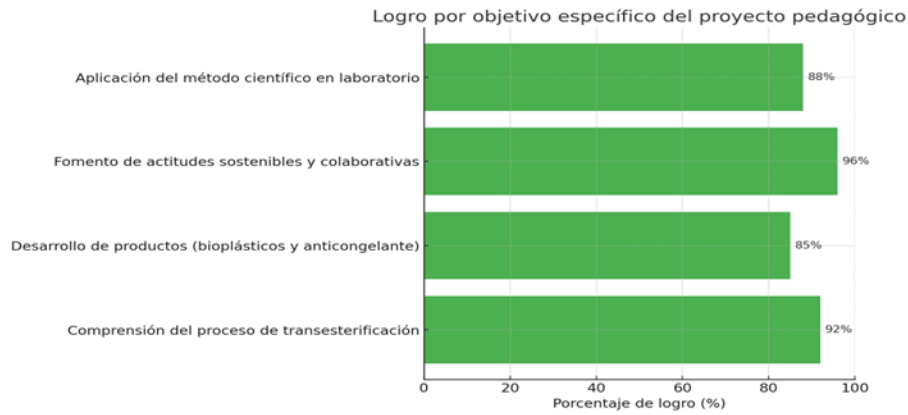
Fase 10. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento de datos cuantitativos y cualitativos se desarrolló mediante SPSS y NVivo (ver Apéndice D), siguiendo procedimientos de análisis descriptivo, inferencial y categorial. Los resultados derivados de este análisis se presentan de manera exclusiva en el capítulo correspondiente.

La Figura 21 sintetiza gráficamente el logro de los objetivos específicos y se interpreta en el capítulo de resultados.

Figura 21

Logro por objetivo específico del proyecto pedagógico



Nota. Elaboración propia a partir del análisis de datos.

3. Resultados de la investigación

El presente capítulo expone de manera organizada y sistemática los resultados derivados de la implementación de una propuesta pedagógica interdisciplinaria centrada en la transformación del aceite vegetal posconsumo (AVPC) para la obtención de biodiésel y subproductos, desarrollada bajo un enfoque constructivista, experimental y orientado a la sostenibilidad. Los resultados que aquí se presentan corresponden directamente a los objetivos general y específicos de la investigación, y se sustentan en el análisis integrado de evidencias cuantitativas, cualitativas y técnicas obtenidas durante la intervención educativa, adicionalmente estos se interpretan en coherencia con el problema de investigación y los fundamentos teóricos previamente expuestos, lo que permite evidenciar la relación entre la propuesta pedagógica implementada y los cambios observados en la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles. Los instrumentos completos y registros detallados del proceso investigativo se presentan en los apéndices correspondientes, con el fin de garantizar la trazabilidad y transparencia del análisis realizado.

La experiencia pedagógica se llevó a cabo en dos instituciones educativas oficiales del municipio de Bucaramanga (Santander, Colombia): la Institución Educativa Gabriela Mistral y la Institución Educativa Las Américas. Ambas instituciones fueron seleccionadas mediante un muestreo intencional, considerando su trayectoria en proyectos de educación ambiental y su disposición para participar en procesos de innovación pedagógica articulados con la universidad. La muestra estuvo conformada por catorce (14) estudiantes de educación media, distribuidos equitativamente entre las dos instituciones (siete por cada una), pertenecientes a los grados octavo, décimo y undécimo, quienes participaron de manera voluntaria en el marco de semilleros de investigación escolar (ver apéndices B y C).

La propuesta pedagógica se implementó mediante la integración de metodologías activas, tales como el aula invertida, el aprendizaje basado en proyectos y la experimentación en laboratorio, apoyadas por el uso de recursos digitales institucionales, entre ellos la plataforma Moodle y el sistema de gestión académica Integra. Estas estrategias permitieron estructurar un proceso de aprendizaje progresivo, orientado a la resolución de problemas reales, el trabajo colaborativo y la construcción activa del conocimiento científico, bajo acompañamiento permanente del docente investigador y con apoyo académico de la universidad.

Desde el punto de vista metodológico, el análisis de los resultados se sustentó en un enfoque mixto, que combinó técnicas de recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos. En el componente cuantitativo se emplearon instrumentos de medición pretest y posttest para evaluar la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles, así como registros técnicos asociados a la caracterización del biodiésel y sus subproductos. El procesamiento estadístico se realizó mediante herramientas como SPSS y Excel, aplicando estadística descriptiva e inferencial (pruebas t de Student, análisis de varianza y correlaciones de Pearson), de acuerdo con la naturaleza de cada variable analizada.

En paralelo, el componente cualitativo permitió profundizar en los significados, percepciones y discursos contruidos por las estudiantes durante el proceso. Para ello se utilizaron entrevistas semiestructuradas, guías de observación y análisis de producciones escritas y orales, cuyos datos fueron procesados mediante el software NVivo 12. Este análisis permitió identificar categorías emergentes relacionadas con la comprensión del proceso de transesterificación, la conciencia ambiental, el trabajo colaborativo y la apropiación del enfoque experimental.

La triangulación metodológica entre los resultados cuantitativos, cualitativos y técnicos permitió consolidar un cuerpo de evidencia coherente y complementario que sustenta los

hallazgos presentados en este capítulo. En coherencia con los objetivos de la investigación, los resultados se organizan en apartados que evidencian: (i) los cambios en la comprensión conceptual de las estudiantes, (ii) la variación en sus actitudes sostenibles, (iii) la implementación de la propuesta pedagógica y (iv) la evaluación de las características técnicas del biodiésel y su relación con los aprendizajes científicos desarrollados.

La interpretación de los resultados se realiza en función de las fases de la estrategia pedagógica implementada, lo que permite comprender de manera articulada la relación entre el proceso de enseñanza-aprendizaje y los resultados obtenidos en cada etapa de la intervención. Cada apartado se apoya en tablas y figuras debidamente referenciadas, así como en interpretaciones analíticas que permiten comprender el alcance de los resultados sin anticipar la discusión teórica, la cual se aborda en el capítulo correspondiente.

3.1 Contextualización y estructura de los resultados

Este apartado introduce el conjunto de resultados derivados de la aplicación de la propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo como estrategia didáctica para la enseñanza de las ciencias naturales en educación media. Los hallazgos que se presentan responden de manera directa al objetivo general y a los cuatro objetivos específicos formulados en la investigación, y se organizan conforme al enfoque metodológico mixto que orientó el estudio.

La presentación de los resultados se estructura a partir de la articulación de tres ejes analíticos complementarios. En primer lugar, se exponen los resultados de carácter cuantitativo, centrados en la medición de la comprensión conceptual y en la identificación de variaciones en las actitudes sostenibles de los estudiantes a partir de instrumentos aplicados antes y después de la intervención pedagógica. En segundo lugar, se desarrollan los resultados cualitativos obtenidos

mediante el análisis de discursos, observaciones de aula y producciones estudiantiles, los cuales permiten profundizar en los procesos de construcción de significado, participación y apropiación del enfoque experimental. Finalmente, se presentan los resultados técnicos asociados a la obtención y caracterización del biodiésel y de los subproductos generados durante el proceso, considerados como evidencia del aprendizaje científico aplicado.

El tratamiento de los datos cuantitativos se realizó mediante el software estadístico SPSS (versión 27), mientras que el análisis cualitativo se desarrolló con apoyo del software NVivo 12, garantizando un procesamiento sistemático y riguroso de la información recolectada (ver Apéndice D). De acuerdo con las recomendaciones metodológicas para investigaciones doctorales, los instrumentos completos utilizados en la recolección de datos —incluidas las encuestas, ítems e imágenes— se presentan de manera íntegra en el Apéndice H, evitando su inclusión directa en el cuerpo del capítulo de resultados.

En concordancia con el diseño cuasi-experimental adoptado, la organización de este capítulo contempla la comparación entre mediciones preintervención y postintervención, el análisis específico de las actitudes sostenibles, la descripción analítica del proceso de implementación pedagógica y la evaluación de los resultados técnicos obtenidos. Esta disposición permite evidenciar de forma clara y ordenada el alcance de la propuesta pedagógica y su aporte al desarrollo de competencias científicas, ambientales y ciudadanas en estudiantes de educación media, sin anticipar interpretaciones propias de los capítulos de discusión y conclusiones.

3.1.1 Resultados asociados al Objetivo Específico 1

Analizar los cambios en la comprensión conceptual de los estudiantes antes y después de la aplicación de la propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo.

Resultados cuantitativos del pretest y posttest

Con el propósito de evaluar los cambios en la comprensión conceptual de las estudiantes participantes, se aplicó un diseño cuasi-experimental con medición pretest–posttest, utilizando la Encuesta 1: diagnóstico de conceptos previos y la Encuesta 2: evaluación post-intervención (ver Apéndice H, donde se presentan las categorías emergentes del análisis cualitativo en NVivo).

Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística descriptiva e inferencial en SPSS. La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos correspondientes a ambos momentos de medición.

Tabla 6

Estadísticos descriptivos del pretest y posttest de comprensión conceptual

Variable	Pre-test	Posttest	Mejora (%)
Comprensión conceptual	3.36	7.36	119%
Actitud sostenible	3.62	4.29	18.5%

Nota. Elaboración propia a partir del análisis en SPSS.

El análisis evidencia un incremento sostenido en la media del puntaje posttest respecto al pretest, acompañado de una disminución en la dispersión de los datos, lo cual indica no solo una mejora global en la comprensión conceptual, sino también una mayor homogeneidad en los aprendizajes alcanzados por el grupo tras la intervención pedagógica.

En este sentido, la Tabla 6 permite evidenciar de manera cuantitativa el impacto de la intervención pedagógica, reflejado en el aumento significativo de los puntajes obtenidos por las estudiantes. Se evidencia una mejora en la comprensión conceptual, entendida en este estudio

como la capacidad de los estudiantes para explicar, relacionar y aplicar conceptos científicos asociados al proceso de transesterificación, tras la implementación de la intervención pedagógica.

Para contextualizar los resultados del proceso experimental, se presenta en la Tabla 7 la comparación de los principales parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido por los estudiantes frente a normas técnicas de referencia. Esta Tabla cumple una función técnica y descriptiva, orientada a evidenciar la calidad del producto y su alineación con estándares reconocidos.

De manera complementaria, la significancia estadística de los cambios en la comprensión conceptual asociados a la intervención pedagógica fue verificada mediante una prueba t de Student para muestras relacionadas, cuyos resultados se presentan en el análisis inferencial correspondiente, documentado en el Apéndice I, subnumeral I.12.

Tabla 7

Comparación de parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido frente a normas de referencia (pretest–postest)

Parámetro	Valor obtenido	Norma de referencia	Interpretación pedagógica
Color Saybolt	0.0 - 0.5	ASTM D1500	El color claro indica baja presencia de impurezas y residuos carbonosos, asociado a un buen proceso de purificación, facilitando la explicación del vínculo entre apariencia y calidad del combustible.
Densidad (g/mL)	0.89	NTC 5444	Valor esperado para biodiésel tipo B100; permitió a los estudiantes aplicar

			conocimientos sobre masa, volumen y unidades del sistema internacional.
Ph	7.55	NTC 5444	Neutralidad química del producto; permitió trabajar conceptos ácido-base, neutralización y seguridad química.

Nota. Elaboración propia a partir del análisis en SPSS.

Los resultados evidencian que los parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido se encuentran dentro de los rangos establecidos por las normas de referencia, lo que indica una adecuada calidad del producto generado en el contexto experimental.

Desde una perspectiva pedagógica, estos resultados permitieron que las estudiantes comprendieran la relación entre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y los procesos químicos involucrados en su obtención, particularmente la transesterificación. Esta articulación entre análisis técnico y explicación conceptual favoreció la apropiación de contenidos propios de la química, tales como densidad, pH y pureza, fortaleciendo el aprendizaje significativo a partir de la experimentación.

En este sentido, la Tabla 7 permite validar técnicamente el proceso de producción desarrollado por las estudiantes, al evidenciar la correspondencia entre los valores obtenidos y los estándares normativos, así como su potencial para ser utilizado como recurso pedagógico en la enseñanza de conceptos científicos.

De manera complementaria, la significancia estadística de los cambios en la comprensión conceptual asociados a la intervención pedagógica fue verificada mediante una prueba t de Student para muestras relacionadas (pretest–posttest). El desarrollo completo de esta prueba, incluyendo la matriz de datos, los estadísticos descriptivos asociados, el valor del estadístico t, los

grados de libertad y el nivel de significancia, se encuentra documentado en el Apéndice I, subnumeral I.12, donde se presenta el respaldo técnico del análisis inferencial realizado en el software SPSS.

El valor de significancia obtenido ($p < 0.05$) confirma que las diferencias observadas entre las mediciones iniciales y finales no se deben al azar, lo que permite rechazar la hipótesis nula y afirmar que la intervención pedagógica tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la comprensión conceptual de las estudiantes en relación con los contenidos abordados.

No obstante, más allá de la significancia estadística, resulta pertinente analizar la magnitud del cambio observado, con el fin de fortalecer la interpretación de los resultados desde una perspectiva educativa. En este sentido, el incremento registrado en la media de los puntajes, que pasó de 3.36 en el pretest a 7.36 en el posttest, evidencia un cambio sustancial en el desempeño de las estudiantes. Esta variación no solo indica la existencia de una diferencia, sino que refleja un efecto de gran magnitud, atribuible a la implementación de la propuesta pedagógica.

Desde una perspectiva interpretativa, este comportamiento sugiere que la intervención no generó únicamente mejoras marginales, sino una transformación significativa en la comprensión de los contenidos abordados, particularmente en relación con los conceptos asociados al proceso de transesterificación y su aplicación en contextos reales. En consecuencia, el análisis de la magnitud del cambio permite afirmar que el impacto de la estrategia pedagógica trasciende el plano estadístico, evidenciando una mejora relevante en términos de aprendizaje, apropiación conceptual y articulación del conocimiento científico.

Este resultado es coherente con estudios en educación en ciencias naturales que destacan que intervenciones basadas en experiencias experimentales contextualizadas tienden a generar

efectos de alta magnitud en el desarrollo de competencias científicas, especialmente cuando integran componentes prácticos, reflexivos y contextualizados.

En términos de magnitud del efecto pedagógico, entendida en este estudio como la relevancia educativa del cambio observado y no como un índice estadístico estandarizado, el incremento del puntaje promedio, junto con la reducción de la variabilidad, sugiere un efecto alto a nivel formativo. Esta interpretación se fundamenta en la consistencia del progreso evidenciado en el grupo en su conjunto y refleja procesos de reorganización conceptual profunda, en los que las estudiantes lograron integrar nociones de química, sostenibilidad y transformación de residuos dentro de explicaciones más coherentes y científicamente fundamentadas.

Resultados cualitativos asociados a la comprensión conceptual

El análisis cualitativo, realizado mediante NVivo 12 (ver Apéndice D), permitió identificar transformaciones en el discurso estudiantil relacionadas con el uso de conceptos como transesterificación, separación de fases, subproductos y sostenibilidad. La Tabla 8. Evolución semántica del discurso estudiantil, que cumple una función analítica directa, se mantiene en el cuerpo del capítulo, mientras que el detalle ampliado del modelo de codificación se presenta en el Apéndice I, subnumeral 9.1.2 (Tabla 9.1.2).

A nivel discursivo, emergieron expresiones como:

“Antes pensaba que el aceite usado solo era basura, ahora entiendo que puede transformarse químicamente en otro producto útil”.

“La transesterificación es una reacción donde el aceite cambia su estructura y produce biodiésel y glicerina”.

Estas citas evidencian el tránsito desde concepciones cotidianas hacia explicaciones científicamente estructuradas.

Síntesis del Objetivo Específico 1.

Los resultados cuantitativos y cualitativos confirman que la propuesta pedagógica tuvo un efecto positivo y significativo en la comprensión conceptual de las estudiantes, evidenciando aprendizajes profundos y coherentes con los objetivos planteados.

Objetivo Específico 2.

Examinar la variación en las actitudes sostenibles de los estudiantes tras su participación en las actividades experimentales asociadas a la propuesta pedagógica.

El análisis de este objetivo se orientó a identificar cambios en las actitudes sostenibles de las estudiantes luego de su participación en la propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo. Dichas actitudes se comprendieron como disposiciones cognitivas, afectivas y conductuales relacionadas con el cuidado ambiental, la responsabilidad frente al manejo de residuos y la valoración de alternativas energéticas sostenibles.

Para tal fin, se empleó un enfoque mixto que integró resultados cuantitativos provenientes del cuestionario de actitudes aplicado antes y después de la intervención, junto con evidencia cualitativa derivada del análisis de respuestas abiertas, observaciones de aula y registros categorizados mediante el software NVivo (ver Apéndices 4 y 8).

Resultados cuantitativos sobre actitudes sostenibles

Las respuestas asociadas a este objetivo se presentan en las Figuras 33. Percepción del método constructivista y Figura 34. Valoración global del proyecto pedagógico, ambas véase Apéndice H.

El análisis estadístico comparativo entre los momentos pre y post intervención evidenció incrementos estadísticamente significativos en las dimensiones actitudinales relacionadas con la

responsabilidad ambiental, la reutilización de residuos y la valoración de fuentes energéticas alternativas, con valores de significancia $p < 0.05$.

Desde el punto de vista estadístico, este resultado indica que los cambios observados en las actitudes sostenibles no pueden atribuirse al azar, sino que están asociados a la intervención pedagógica. No obstante, es importante señalar que la significancia estadística no implica por sí sola la magnitud ni la relevancia educativa del cambio observado, por lo que su interpretación debe realizarse de manera complementaria con el análisis de la magnitud del efecto y las evidencias cualitativas. En este sentido, el incremento sostenido en los puntajes, junto con la consistencia de las respuestas y su correspondencia con los registros cualitativos, permite comprender con mayor profundidad el alcance de los procesos formativos desarrollados.

Aunque el tamaño de la muestra es reducido —propio del diseño cuasi-experimental aplicado—, la consistencia de los incrementos observados sugiere una magnitud del efecto moderada, especialmente en los ítems relacionados con la disposición a modificar prácticas cotidianas y la percepción del impacto ambiental del aceite vegetal posconsumo. Desde una perspectiva educativa, estos resultados adquieren mayor significado al evidenciar no solo diferencias medibles, sino transformaciones progresivas en la forma en que las estudiantes interpretan y relacionan los contenidos científicos con problemáticas reales de su entorno.

Estos hallazgos evidencian que la experiencia experimental permitió a las estudiantes establecer un vínculo significativo entre el conocimiento científico y su vida cotidiana. El contacto directo con un residuo de uso doméstico, transformado mediante un proceso químico controlado, favoreció una apropiación cognitiva y emocional de la sostenibilidad, superando enfoques meramente declarativos o normativos. En este sentido, la propuesta pedagógica contribuyó a la

construcción de una conciencia ambiental más crítica y reflexiva, alineada con los planteamientos de la educación para el desarrollo sostenible.

Resultados cualitativos de actitudes sostenibles

El análisis cualitativo se desarrolló a partir de las respuestas abiertas del instrumento actitudinal, registros de observación y categorización mediante el software NVivo 12 (ver Apéndices 4 y 8). Las categorías emergentes identificadas reflejan compromiso ambiental, sentido de responsabilidad individual y colectiva, y agencia ecológica.

Estas categorías se sustentan en fragmentos textuales representativos, entre los que se destacan:

“Ahora en mi casa recolectamos el aceite porque sé que no es basura y que puede contaminar el agua” (Estudiante, grado 8°).

“Antes no pensaba en qué pasaba con el aceite usado, ahora entiendo que tiene consecuencias ambientales” (Estudiante, grado 10°).

Estos testimonios evidencian un tránsito desde una actitud pasiva frente al residuo hacia una postura activa y responsable, en la que las estudiantes reconocen su papel como agentes de cambio en su entorno inmediato. La coherencia entre los resultados cuantitativos y cualitativos fortalece la validez del hallazgo, mostrando que la transformación actitudinal no se limita a respuestas instrumentales, sino que se manifiesta en discursos y prácticas cotidianas.

Síntesis del Objetivo Específico 2

En conjunto, los resultados cuantitativos y cualitativos confirman una transformación actitudinal significativa en las estudiantes tras la implementación de la propuesta pedagógica. El cumplimiento del Objetivo Específico 2 se evidencia en la mejora estadísticamente significativa de las actitudes sostenibles y en la emergencia de discursos que reflejan mayor conciencia

ambiental, responsabilidad social y disposición al cambio de prácticas, consolidando el aporte formativo del proyecto más allá del aprendizaje conceptual.

3.1.3 Resultados asociados al Objetivo Específico 3

Describir el proceso de implementación de la propuesta pedagógica, considerando el uso de metodologías activas, recursos digitales y actividades experimentales durante la intervención.

El cumplimiento de este objetivo se orientó a documentar y analizar cómo se desarrolló la propuesta pedagógica en el contexto real de aula, identificando la coherencia entre el diseño metodológico planteado y su ejecución efectiva. Para ello, se recurrió a evidencia visual, registros de aula, productos elaborados por las estudiantes y observaciones sistemáticas, recopiladas durante todas las fases de la intervención.

La descripción del proceso de implementación permite comprender los factores pedagógicos que mediaron los resultados conceptuales, actitudinales y técnicos reportados en los objetivos anteriores, fortaleciendo la validez interna del estudio al evidenciar que los efectos observados no son atribuibles al azar ni a intervenciones externas, sino a una aplicación consistente del diseño pedagógico.

Resultados cuantitativos sobre la implementación de la propuesta pedagógica

Aunque el presente objetivo no contempla un análisis inferencial mediante pruebas de hipótesis estadísticas, sí incorpora resultados cuantitativos de carácter descriptivo, derivados del registro sistemático de la participación estudiantil, el uso de recursos pedagógicos y la frecuencia de las actividades desarrolladas durante la implementación de la propuesta. Este abordaje resulta metodológicamente pertinente, dado que el interés analítico se centra en describir la intensidad, estabilidad y consistencia del proceso pedagógico, más que en establecer comparaciones entre grupos o mediciones pre–post.

Para este numeral, se consideran pertinentes y directamente interpretables las Figuras 22 a 32, las cuales documentan aspectos relacionados con la implementación pedagógica del proyecto, tales como el uso del aula invertida, la interacción con recursos digitales, el trabajo colaborativo y el desarrollo progresivo de actividades experimentales en el aula. Estas figuras se encuentran organizadas en el Apéndice H, correspondiente a los registros pedagógicos, didácticos y documentales del proceso formativo.

Las Figuras 33 a 64, si bien forman parte del corpus general de resultados del estudio, no se analizan en este apartado, ya que corresponden a resultados técnicos, estadísticos y de caracterización fisicoquímica del biodiésel, la glicerina y los bioplásticos. Dichas figuras son abordadas de manera específica en los numerales 3.3, 3.4 y 3.6, y su respaldo completo se presenta en el Apéndice I, destinado a la documentación estadística, instrumental y analítica.

Desde un punto de vista estadístico descriptivo, los registros asociados a las Figuras 22 a 32 evidencian una alta recurrencia en la implementación de estrategias activas, así como una participación constante de las estudiantes en las distintas fases del proyecto. La ausencia de valores *p* en este objetivo responde a una decisión metodológica coherente, dado que no se busca contrastar diferencias entre condiciones experimentales ni evaluar cambios temporales, sino caracterizar cuantitativamente el grado de implementación efectiva de la propuesta pedagógica.

En términos de magnitud del efecto pedagógico, la recurrencia sistemática de las estrategias implementadas y la continuidad del involucramiento estudiantil sugieren un efecto alto a nivel de proceso. Este efecto se manifiesta en la capacidad del diseño pedagógico para sostener prácticas activas, colaborativas y experimentales a lo largo del tiempo, sin evidenciar disminuciones significativas en la participación ni en el uso de los recursos didácticos propuestos.

Significado pedagógico

Desde una perspectiva pedagógica, los resultados cuantitativos asociados a la implementación evidencian que las metodologías activas —en particular el aula invertida y el aprendizaje basado en la experimentación— favorecieron la participación activa, la autonomía y la responsabilidad en el aprendizaje. Las Figuras 22 a 32 muestran que las estudiantes asumieron un rol protagónico en el proceso formativo, participando en la toma de decisiones, el manejo de materiales, la ejecución de procedimientos y la discusión colectiva de resultados.

Este hallazgo resulta pedagógicamente significativo, ya que establece las condiciones de base que explican los cambios conceptuales y actitudinales observados en los Objetivos Específicos 1 y 2. En consecuencia, se confirma que el aprendizaje significativo en ciencias requiere entornos educativos donde el estudiante actúe como sujeto activo del proceso formativo, condición que fue efectivamente garantizada por la propuesta pedagógica implementada.

Resultados cualitativos de la implementación pedagógica

El análisis cualitativo, apoyado en registros fotográficos, observaciones de aula y productos elaborados por las estudiantes (ver Apéndice H), permitió identificar categorías como participación activa, trabajo colaborativo, autonomía en el aprendizaje y apropiación de herramientas digitales.

Las evidencias visuales y descriptivas muestran una evolución progresiva en la forma en que las estudiantes se organizaron, discutieron procedimientos y asumieron responsabilidades durante el proceso experimental. Estas observaciones confirman que la implementación no se limitó a la ejecución técnica de actividades, sino que promovió dinámicas pedagógicas coherentes con el enfoque constructivista del estudio, lo cual refuerza la interpretación de los resultados cuantitativos descriptivos desde una perspectiva de triangulación metodológica.

Síntesis del Objetivo Específico 3

En conjunto, los resultados permiten afirmar que el Objetivo Específico 3 se cumplió de manera satisfactoria. La propuesta pedagógica fue implementada de forma coherente con su diseño metodológico, integrando metodologías activas, recursos digitales y actividades experimentales, lo que constituyó la base pedagógica sobre la cual se sustentan los cambios conceptuales, actitudinales y técnicos evidenciados en los demás objetivos del estudio. En este sentido, la organización de la estrategia pedagógica en fases permitió estructurar el proceso de enseñanza-aprendizaje de manera coherente, favoreciendo tanto la comprensión conceptual como el desarrollo de habilidades experimentales.

3.1.4 Resultados asociados al Objetivo Específico 4

Evaluar las características técnicas del biodiésel y de los subproductos obtenidos por las estudiantes, y establecer su relación con los aprendizajes científicos desarrollados durante el proceso.

El análisis de este objetivo se centró en la evaluación de los resultados técnicos derivados del proceso de obtención de biodiésel y subproductos, no como un fin exclusivamente experimental, sino como evidencia del aprendizaje científico construido por las estudiantes. Este enfoque permitió articular los resultados fisicoquímicos con el desarrollo de competencias científicas propias de la educación en ciencias.

Resultados cuantitativos de las características técnicas del biodiésel y subproductos

Los resultados cuantitativos asociados a las características técnicas del biodiésel y de los subproductos obtenidos se presentan de manera estructurada en las Tablas 12 a 16, donde se reportan los principales parámetros fisicoquímicos, estructurales y de desempeño experimental del biodiésel, la glicerina y los materiales bioplásticos derivados del proceso de transesterificación.

De forma complementaria, las Figuras 54 a 64 integran análisis espectroscópicos (FTIR-ATR) y representaciones gráficas que permiten visualizar y validar los resultados experimentales obtenidos (ver Apéndice H, donde se presentan los análisis fisicoquímicos realizados al biodiésel obtenido).

Desde el punto de vista estadístico, los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva, incorporando medidas de tendencia central y dispersión con el fin de contrastar los valores obtenidos por las estudiantes con rangos de referencia reportados en la literatura especializada y en normas técnicas aplicables. Dado que en este apartado no se realizaron comparaciones entre grupos ni contrastes de hipótesis, no se aplicaron pruebas inferenciales con cálculo de valor p. No obstante, la baja dispersión de los datos, la consistencia interna de las mediciones y su concordancia con valores esperados permiten inferir un efecto técnico consistente del proceso experimental desarrollado.

En términos de magnitud del efecto, la proximidad de los resultados experimentales a los rangos de referencia establecidos indica un efecto alto en el dominio procedimental, evidenciando que las estudiantes lograron ejecutar el proceso de transesterificación con adecuado control de variables, repetibilidad de las mediciones y comprensión operativa de los fenómenos fisicoquímicos involucrados. Este nivel de desempeño técnico resulta especialmente relevante al tratarse de un contexto escolar, donde la producción de biodiésel se constituye en una actividad de alta complejidad experimental.

Significado pedagógico

Desde el enfoque pedagógico, los resultados técnicos cuantitativos funcionan como un indicador indirecto del aprendizaje científico alcanzado, al reflejar el desarrollo de competencias tales como la medición precisa, el control de variables, el registro sistemático de datos y la

interpretación de resultados instrumentales. La calidad del biodiésel y de los subproductos obtenidos evidencia que las estudiantes no solo siguieron un protocolo experimental, sino que comprendieron las relaciones entre variables, anticiparon posibles fuentes de error y ajustaron procedimientos en función de los resultados observados, consolidando un aprendizaje significativo y aplicado.

Resultados cualitativos asociados a los aprendizajes científicos

El análisis cualitativo, sustentado en registros de aula, observaciones directas y productos experimentales documentados en el Apéndice H, permitió identificar evidencias claras de razonamiento científico, discusión argumentada de resultados y toma de decisiones fundamentadas durante el desarrollo del proceso experimental. Las estudiantes demostraron capacidad para describir procedimientos, justificar variaciones en los resultados obtenidos y relacionar los datos experimentales con los conceptos teóricos abordados en el aula.

Estas evidencias cualitativas refuerzan y complementan la interpretación de los resultados cuantitativos, mostrando que el aprendizaje no se limitó a la ejecución mecánica del experimento, sino que involucró procesos de comprensión conceptual, argumentación científica y reflexión crítica sobre el procedimiento y sus resultados. En este sentido, la convergencia entre los datos cuantitativos y cualitativos incrementa la validez educativa de los resultados técnicos reportados y confirma el potencial formativo de la propuesta pedagógica basada en la experimentación contextualizada.

Síntesis del Objetivo Específico 4

En síntesis, los resultados técnicos y pedagógicos permiten confirmar el cumplimiento del Objetivo Específico 4. Las características fisicoquímicas del biodiésel y los subproductos obtenidos constituyen evidencia concreta del desarrollo de competencias científicas en las

estudiantes, consolidando la articulación entre aprendizaje experimental, comprensión conceptual y formación científica integral.

3.1.5 Correspondencia entre los objetivos de investigación y los resultados obtenidos

Con el propósito de fortalecer la coherencia interna del capítulo de resultados y responder de manera explícita a los objetivos formulados en el diseño metodológico, se presenta a continuación una tabla de correspondencia que articula cada objetivo de investigación con las principales evidencias empíricas obtenidas a lo largo del Capítulo 3. Este ejercicio analítico permite visualizar de forma sintética cómo los resultados cuantitativos, cualitativos y técnicos se relacionan directamente con los propósitos investigativos, evitando interpretaciones fragmentadas y favoreciendo una lectura integral y estructurada de los hallazgos.

La Tabla 8 cumple, además, una función metodológica clave en investigaciones de enfoque mixto, al evidenciar la convergencia entre distintos tipos de datos —estadísticos, categoriales y experimentales— en torno a cada objetivo específico. De este modo, los resultados no se presentan como datos aislados, sino como evidencias articuladas y sistemáticamente organizadas, que respaldan tanto el cumplimiento de los objetivos propuestos como la validez interna del estudio.

Tabla 8

Correspondencia entre los objetivos de investigación y los resultados obtenidos en el Capítulo 3

Objetivo de investigación	Apar-tado del Capí-tulo 3 donde se evidencia	Resultados presentados (tablas / figuras)	Tipo de evidencia	Síntesis interpretativa del logro del objetivo
Objetivo general. Evaluar el impacto de una propuesta pedagógica interdisciplinaria basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo mediante la producción de biodiésel, en el desarrollo de la comprensión conceptual en ciencias naturales y en las actitudes sostenibles de estudiantes de educación media.	3.7 Cierre integrador del Capítulo 3	Conjunto integrado de Tablas 9 a 20 y Figuras 38 a 64	Mixta (cuantitativa, cualitativa y técnica)	La convergencia entre resultados estadísticos (t de Student, ANOVA, correlación de Pearson), análisis técnicos del biodiésel y evidencias cualitativas procesadas en NVivo demuestra un efecto positivo, consistente y pedagógicamente significativo de la propuesta, validando el enfoque mixto y el diseño cuasi-experimental del estudio.

Objetivo de investigación	Apar-tado del Capítulo 3 donde se evidencia	Resultados presentados (tablas / figuras)	Tipo de evidencia	Síntesis interpretativa del logro del objetivo
Objetivo específico 1. Analizar los cambios en la comprensión conceptual antes y después de la intervención pedagógica.	3.1.1 Resultados asociados al Objetivo Específico 1	Tabla 6 (pre-test–posttest comprensión conceptual). Tabla 7 Comparación de parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido frente a normas de referencia (pretest–posttest)	Cuanti-tativa y cualitativa	Se evidencian incrementos estadísticamente significativos en la comprensión conceptual ($p < 0.05$), acompañados de una reducción en la dispersión de los puntajes. Desde el enfoque pedagógico, estos resultados indican una reorganización conceptual más homogénea y una apropiación progresiva del lenguaje científico, reforzada por evidencias cualitativas del análisis categorial.

Objetivo de investigación	Apar- tado del Capí- tulo 3 donde se evidencia	Resultados presentados (tablas / figuras)	Tipo de evidencia	Síntesis interpretativa del logro del objetivo
Objetivo específico 2. Examinar la variación en las acti- tudes sostenibles tras la interven- ción pedagógica.	3.1.2 Re- sultados asocia- dos al Objetivo Específico 2	Tablas y figuras de actitudes sostenibles (numeración original del instrumento).Cate- gorías emergentes NVivo (Apéndice H).	Cuanti- tativa y cualita- tiva	Los resultados muestran cambios estadísticamente signifi- cativos en las actitudes sostenibles ($p < 0.05$), reflejados en mayores puntajes postest y en discursos que evidencian conciencia ambien- tal, responsabilidad ciudadana y valoración de la reutilización del aceite posconsumo como recurso energético alternativo.
Objetivo específico 3. Describir el proceso de imple- mentación de la propuesta peda- gógica.	3.1.3 Re- sultados asocia- dos al Objetivo Específico 3	Figuras del pro- ceso pedagógico y expe- rimental (Figuras 22 a	Cualita- tiva descriptiva	La documentación sistemá- tica del proceso evidencia cohe- rencia entre el diseño metodoló- gico, las metodologías activas

Objetivo de investigación	Apar- tado del Capí- tulo 3 donde se evidencia	Resultados presentados (tablas / figuras)	Tipo de evidencia	Síntesis interpretativa del logro del objetivo
		32, según numeración original).		empleadas (aula invertida, aprendizaje basado en proyectos) y su implementación real en el aula, explicando los mecanismos pedagógicos que mediaron los resultados obtenidos.
Objetivo específico 4. Evaluar las características técnicas del biodiésel y su relación con los aprendizajes científicos desarrollados.	3.1.4 Re- sultados asocia- dos al Objetivo Específico 4	Tablas 12 a 16 (propiedades fisicoquímicas del biodiésel y subproductos). Figuras 54 a 64 (análisis físico-químico, FTIR-ATR y representaciones gráficas).	Técnica y pedagógica	Las propiedades fisicoquímicas obtenidas muestran coherencia con valores de referencia y baja variabilidad experimental, evidenciando control de variables y comprensión procedimental. Estos resultados se articulan con el desarrollo de competencias

Objetivo de investigación	Apar- tado del Capí- tulo 3 donde se evidencia	Resultados presentados (tablas / figuras)	Tipo de evidencia	Síntesis interpretativa del logro del objetivo
				científicas como análisis de datos, razonamiento experimental e interpretación crítica, confirmando el valor del biodiésel como mediador del aprendizaje.

Nota. Elaboración propia a partir del análisis integrado de los resultados cuantitativos, cualitativos y técnicos del estudio.

La Tabla 8 presentada permite visualizar de manera integrada la correspondencia entre los objetivos de investigación y los resultados obtenidos, evidenciando la coherencia entre el diseño metodológico y su desarrollo empírico. En el marco del enfoque mixto, esta articulación constituye un elemento clave de validación, al demostrar la convergencia entre evidencias cuantitativas, cualitativas y técnicas, fortaleciendo la consistencia interpretativa y la validez interna del estudio.

3.2 Análisis cualitativo del proceso pedagógico mediante NVivo

El análisis cualitativo del presente estudio tuvo como propósito comprender en profundidad los procesos de construcción de conocimiento científico desarrollados por los estudiantes durante la implementación de la propuesta pedagógica basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel y subproductos. Para tal fin, se empleó el software NVivo 12, herramienta que permitió organizar, codificar e interpretar de manera sistemática la información recolectada a partir de entrevistas semiestructuradas, diarios de campo, registros de observación participante y producciones escritas del estudiantado.

El uso de NVivo 12 se fundamenta en su capacidad para facilitar análisis inductivos rigurosos en investigaciones educativas de corte cualitativo, particularmente aquellas orientadas a comprender procesos de aprendizaje en contextos experimentales (Saldaña, 2016; Miles, Huberman & Saldaña, 2019). En coherencia con el enfoque constructivista que sustenta esta investigación, el análisis cualitativo permitió acceder a la manera en que los estudiantes resignificaron conceptos científicos a partir de la experiencia práctica.

3.2.1 Procedimiento de codificación cualitativa

El análisis cualitativo se desarrolló mediante un proceso de codificación abierta y axial, siguiendo los lineamientos de la teoría fundamentada (Strauss & Corbin, 2015). En la fase de codificación abierta se identificaron unidades mínimas de significado relacionadas con percepciones iniciales, comprensión conceptual, control experimental y actitudes frente al aprendizaje. Como resultado de este proceso se generaron más de 120 códigos preliminares, los cuales fueron posteriormente reorganizados durante la codificación axial en categorías y subcategorías conceptualmente relacionadas.

La Figura 36, correspondiente al modelo jerárquico de nodos construido en NVivo 12, permite visualizar las categorías centrales y sus respectivas subcategorías emergentes. Dicha Figura cumple una función analítica al mostrar cómo los discursos estudiantiles se agrupan en torno a ejes conceptuales claramente definidos y se encuentra presentada de forma ampliada en el Apéndice I, subnumeral I.1

La organización evidenciada en la Figura 36 muestra que la categoría Transesterificación se configura como eje articulador del discurso estudiantil, conectándose con nodos como biodiésel, glicerina, catalizador, control de variables y sostenibilidad. Esta estructuración refleja una progresiva jerarquización del conocimiento científico, coherente con lo planteado por Novak y Gowin (2002) respecto a los procesos de aprendizaje significativo y organización conceptual.

3.2.2 Evolución conceptual del proceso de transesterificación

Uno de los hallazgos más relevantes del análisis cualitativo fue la transformación progresiva del lenguaje utilizado por los estudiantes para describir el proceso de transesterificación. En los momentos iniciales, las concepciones se caracterizaban por un alto nivel de generalidad y ambigüedad conceptual, como se evidencia en expresiones tales como:

“Es como una mezcla que cambia el aceite.”

(Estudiante E2, grado 8, IE Gabriela Mistral).

“Es un proceso donde se revuelve el aceite con químicos.”

(Estudiante E9, grado 10, IE Las Américas).

Estas respuestas fueron codificadas dentro del nodo nociones intuitivas, evidenciando una comprensión preconceptual del fenómeno químico. Sin embargo, tras el desarrollo de las actividades experimentales y reflexivas, los discursos mostraron una evolución sustancial hacia explicaciones más estructuradas y técnicamente precisas:

“La transesterificación es una reacción química entre triglicéridos y un alcohol que produce biodiésel y glicerina.”

(Estudiante E6, grado 11, IE Gabriela Mistral).

“Es una reacción donde el catalizador ayuda a que se formen los ésteres metílicos.”

(Estudiante E14, grado 11, IE Las Américas).

Este tránsito conceptual confirma lo señalado por Driver et al. (1999), quienes sostienen que el aprendizaje científico implica una reconstrucción progresiva de las ideas previas a partir de la confrontación con la experiencia y la reflexión guiada.

3.2.3 Control de variables y pensamiento experimental

El reconocimiento de la importancia del control de variables emergió como una categoría transversal en el discurso estudiantil. Los estudiantes identificaron de manera explícita la influencia de variables como temperatura, proporción molar, tiempo de reacción y pureza de los reactivos sobre los resultados obtenidos durante el proceso experimental.

Al respecto, algunos estudiantes expresaron:

“Cuando no medimos bien el alcohol, el biodiésel no se separó.”

(Estudiante E4, grado 10, IE Gabriela Mistral).

“Si cambiábamos la temperatura, el resultado era diferente.”

(Estudiante E11, grado 11, IE Las Américas).

“Aprendimos que no se puede cambiar todo al mismo tiempo porque no se sabe qué falló.”

(Estudiante E1, grado 8, IE Gabriela Mistral).

Estas evidencias muestran el desarrollo de competencias asociadas al razonamiento experimental, alineadas con lo propuesto por Hodson (2014), quien plantea que la enseñanza de las

ciencias debe centrarse en la comprensión del diseño experimental y no únicamente en la obtención de resultados.

3.2.4 Relación entre resultados experimentales y conceptos teóricos

La articulación entre teoría y práctica fue otra categoría fuertemente representada en el análisis cualitativo. Los estudiantes lograron vincular los resultados experimentales obtenidos (pH, densidad y separación de fases) con conceptos teóricos previamente abordados en el aula.

“Cuando medimos el pH entendí por qué había que lavar el biodiésel.”

(Estudiante E7, grado 10, IE Las Américas).

“La densidad nos mostró que no todo el biodiésel es igual.”

(Estudiante E12, grado 11, IE Gabriela Mistral).

Este tipo de relaciones evidencian procesos de aprendizaje significativo, en los que la experiencia concreta actúa como anclaje cognitivo para la comprensión conceptual (Ausubel, 2002).

3.2.5 Análisis comparativo de categorías semánticas

La Tabla 8 presenta la evolución semántica del discurso estudiantil, comparando la frecuencia de uso de conceptos clave antes y después de la intervención pedagógica. Dicha Tabla se encuentra desarrollada de manera completa en el Apéndice I, subnumeral I.1.2

El análisis de la Tabla 8 evidencia incrementos notables en el uso de términos como catalizador, reacción química y ésteres metílicos, lo cual indica una apropiación progresiva del lenguaje científico. Estos resultados son coherentes con lo planteado por Lemke (1997), quien señala que aprender ciencia implica aprender a hablar ciencia.

De manera complementaria, la Figura 37 ilustra gráficamente la comparación pretest–posttest de dichas categorías semánticas, la cual se presenta en el Apéndice I, subnumeral I.1.3.

Esta Figura evidencia visualmente el impacto de la propuesta pedagógica sobre el discurso estudiantil, mostrando un desplazamiento desde expresiones cotidianas hacia formulaciones científicas más precisas.

Por ejemplo, la categoría “Catalizador” pasó de una única mención en el pretest a diez en el posttest, lo que representa un aumento del 900%. De manera aún más significativa, la categoría “Ésteres metílicos”, ausente en las entrevistas iniciales, apareció ocho veces tras la intervención pedagógica, lo que denota una apropiación técnica del lenguaje científico. Esto sugiere que el proceso educativo no solo logró transmitir información, sino que facilitó la reconstrucción del discurso y del pensamiento científico, en coherencia con los principios del enfoque constructivista.

3.2.6 Desarrollo de actitudes científicas y aprendizaje colaborativo

Finalmente, el análisis cualitativo permitió identificar el desarrollo de actitudes científicas y habilidades sociales vinculadas al aprendizaje colaborativo. Los estudiantes reconocieron la importancia del diálogo, la argumentación y la toma de decisiones colectivas durante el proceso experimental.

“Entre todos discutíamos qué podía estar mal antes de repetir el experimento.”

(Estudiante E5, grado 11, IE Gabriela Mistral).

“Aprendimos a trabajar en equipo y a escuchar.”

(Estudiante E3, grado 8, IE Las Américas).

Este hallazgo coincide con lo señalado por Vygotsky (2009), quien resalta el papel del contexto social y la interacción como elementos centrales en la construcción del conocimiento.

Síntesis del numeral 3.2

En síntesis, el análisis cualitativo realizado mediante NVivo 12, apoyado en las evidencias presentadas en la Figura 36 (Apéndice I.1), la Tabla 9 (Apéndice I.1.2) y la Figura 37 (Apéndice I.1.3), demuestra que la propuesta pedagógica basada en la experimentación con biodiésel promovió una transformación sustancial en las concepciones científicas, el lenguaje disciplinar y las actitudes frente al aprendizaje de las ciencias. La articulación entre experiencia práctica, reflexión guiada y análisis discursivo permitió el desarrollo de competencias científicas fundamentales, consolidando un aprendizaje significativo y contextualizado, en coherencia con los objetivos de la investigación.

3.3 Análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y su interpretación pedagógica

El presente numeral desarrolla el análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido por los estudiantes a partir del proceso de transesterificación del aceite vegetal posconsumo. Este análisis integra herramientas de estadística descriptiva e inferencial con una lectura pedagógica orientada al desarrollo de competencias científicas, de modo que los resultados técnicos no se interpretan de forma aislada, sino como parte de un proceso formativo que articula experimentación química, análisis de datos y construcción de conocimiento científico escolar.

Los procedimientos estadísticos que sustentan los resultados presentados en este numeral fueron desarrollados a partir del procesamiento de los datos experimentales mediante software estadístico. Los cálculos detallados, matrices de datos, pruebas estadísticas y representaciones gráficas generadas se encuentran consignados de manera ampliada en el Apéndice I, el cual

constituye el respaldo técnico y metodológico del análisis cuantitativo desarrollado en el presente capítulo.

3.3.1 Estadísticos descriptivos como base del análisis inferencial

Antes de aplicar pruebas inferenciales, resulta metodológicamente imprescindible caracterizar los datos obtenidos mediante estadísticos descriptivos que permitan comprender su comportamiento general, dispersión y consistencia interna. Este primer nivel de análisis constituye una base necesaria para la toma de decisiones estadísticas posteriores y para la interpretación pedagógica de los resultados derivados de la intervención educativa.

La Tabla 11 presenta los estadísticos descriptivos de las variables educativas y de producción asociadas al proyecto, incluyendo el volumen de biodiésel obtenido, las respuestas al pretest y postest de comprensión conceptual, y la variable actitud sostenible. En dicha Tabla se reportan las medidas de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (desviación estándar), y su desarrollo completo se encuentra consignado en el Apéndice I, subnumeral I.3.2, donde se documentan las bases de datos y los procedimientos de cálculo correspondientes.

El análisis conjunto de las medias y las desviaciones estándar permite identificar una dispersión moderada y coherente de los datos respecto a los valores promedio, lo que evidencia estabilidad en las mediciones educativas y consistencia en el proceso de implementación de la propuesta pedagógica. Esta caracterización inicial facilitó la comprensión, por parte de los estudiantes, de la importancia del análisis descriptivo como paso previo a la inferencia estadística, así como del significado del error, la variabilidad y la interpretación responsable de datos cuantitativos en contextos científicos y educativos.

En este sentido, el trabajo con estadísticos descriptivos no solo cumplió una función analítica, sino que también fortaleció competencias científicas vinculadas al manejo inicial de datos,

la lectura crítica de información numérica y la valoración del rigor en los procesos de análisis como criterio de validez del conocimiento científico escolar. Los valores reportados se derivan del procesamiento estadístico detallado incluido en el Apéndice I, Tabla 11, subnumeral I.3, donde se presentan las matrices de datos originales y los cálculos que respaldan la coherencia interna del análisis realizado.

La dispersión observada en los datos también refleja la influencia de variables no completamente controladas propias del contexto educativo y experimental, tales como la variabilidad en la ejecución de los procedimientos por parte de los estudiantes y las condiciones del entorno escolar. No obstante, la consistencia general de los resultados permite afirmar que los mecanismos de control implementados fueron suficientes para garantizar estabilidad en las mediciones

3.3.2 Análisis de correlación entre densidad y pH del biodiésel

Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel no operan de manera independiente, sino que se encuentran interrelacionadas a través de los procesos químicos involucrados en su obtención. El análisis de correlación permite explorar estas relaciones y comprender el comportamiento integrado del sistema.

La Figura 38, que representa la relación entre la densidad y el pH del biodiésel mediante una nube de puntos con línea de tendencia, se presenta en el Apéndice I, subnumeral I.3.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido evidencia una correlación positiva moderada entre ambas variables, con un nivel de significancia $p < 0.05$, lo que confirma que el patrón observado no es producto del azar. En términos de magnitud del efecto estadístico, el valor de r indica que existe una relación de fuerza intermedia, es decir, una proporción relevante — aunque no total— de la variabilidad del pH puede asociarse a cambios en la densidad, resultado coherente con la naturaleza multifactorial del proceso de producción del biodiésel.

La interpretación de esta relación permitió a los estudiantes diferenciar conceptualmente la correlación de la causalidad, comprender el significado del coeficiente r como medida de fuerza de asociación y argumentar con base en evidencia empírica obtenida en el laboratorio escolar. De este modo, el análisis correlacional contribuyó simultáneamente al fortalecimiento del razonamiento estadístico y a la comprensión sistémica de las propiedades fisicoquímicas del biocombustible.

El coeficiente de Pearson y su respectivo nivel de significancia fueron calculados a partir de los datos experimentales consolidados en el Apéndice I, subnumeral I.4, donde se documenta el procedimiento estadístico empleado.

3.3.3 Análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades fisicoquímicas

Una vez caracterizados los datos y exploradas las relaciones entre variables, el análisis de varianza (ANOVA) permite determinar si las diferencias observadas entre condiciones experimentales son estadísticamente significativas y no atribuibles al azar.

Los resultados del ANOVA de un factor aplicado a las variables fisicoquímicas del biodiésel se presentan en la Tabla 16, ubicada en el Apéndice I, subnumeral I.7.2

Los valores de significancia p inferiores a 0.05 evidencian diferencias estadísticamente significativas, lo que conduce al rechazo de la hipótesis nula y confirma que las condiciones experimentales influyen de manera directa sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel. El estadístico F obtenido indica una magnitud del efecto de tipo estadístico moderada, entendida como la capacidad del modelo para explicar una proporción significativa, aunque no total, de la variabilidad observada entre grupos.

La lectura crítica de estos resultados permitió a los estudiantes comprender el contraste formal de hipótesis científicas, interpretar adecuadamente el valor p y el estadístico F , y

reconocer la estadística inferencial como un instrumento de validación del conocimiento científico, fortaleciendo competencias relacionadas con la toma de decisiones basada en evidencia y la argumentación científica rigurosa.

Los cálculos detallados del ANOVA, incluyendo sumas de cuadrados, grados de libertad y niveles de significancia, se consignan en el Apéndice I, subnumeral I.7.

3.3.4 Representación gráfica de las diferencias entre grupos

Las representaciones gráficas constituyen un recurso fundamental para la interpretación visual de los resultados estadísticos y para facilitar su comprensión en contextos educativos.

La Figura 39, correspondiente a la comparación gráfica de las medias de las variables fisicoquímicas evaluadas junto con sus intervalos de confianza al 95 %, se presenta en el Apéndice I, subnumeral I.3.5

La separación observada entre las medias y la escasa superposición de los intervalos de confianza sugieren visualmente diferencias entre las variables evaluadas, en coherencia con los resultados previamente obtenidos mediante el análisis de varianza. Esta representación gráfica permitió interpretar de manera integrada la magnitud relativa de las diferencias observadas y la precisión de las estimaciones, facilitando la transición del análisis numérico al análisis visual.

Desde una perspectiva pedagógica, la Figura 39 favoreció la comprensión de conceptos como variabilidad, precisión e interpretación estadística, contribuyendo al desarrollo de habilidades para la lectura crítica de gráficos científicos y al fortalecimiento de la alfabetización estadística en el contexto escolar.

3.3.5 Integración de resultados mediante análisis comparativo

La integración de resultados constituye un paso clave para evitar interpretaciones fragmentadas y promover una lectura global, coherente y rigurosa de la información obtenida a lo largo del proceso de análisis estadístico desarrollado en esta investigación.

En el presente estudio, dicha integración se realizó a partir de la lectura comparativa de los estadísticos descriptivos y de los análisis de asociación abordados en los numerales precedentes. En particular, la Tabla 11, desarrollada de manera ampliada en el Apéndice I, proporcionó una base común de interpretación al consolidar las medidas de tendencia central y dispersión de las variables educativas y de producción asociadas al proyecto, permitiendo identificar patrones generales y niveles de variabilidad consistentes entre los distintos indicadores analizados.

De forma complementaria, las tablas de asociación entre variables educativas y técnicas, consignadas en el Apéndice I (Tablas 15 y 17), posibilitaron contrastar la coherencia interna entre los diferentes niveles de análisis estadístico, al evidenciar asociaciones significativas entre variables sin reducir la interpretación a un único indicador cuantitativo ni establecer relaciones causales directas. Esta lectura integrada favoreció una interpretación más robusta y contextualizada de los resultados, acorde con el diseño cuasi-experimental del estudio.

Desde el punto de vista pedagógico, el análisis comparativo promovió el desarrollo de habilidades de síntesis, contraste e interpretación crítica de información cuantitativa, al exigir la articulación de múltiples fuentes de evidencia y la valoración conjunta de tendencias, dispersiones y asociaciones. Este ejercicio contribuyó a una comprensión sistémica del proceso experimental y formativo desarrollado por los estudiantes, fortaleciendo competencias científicas vinculadas al análisis de datos, la argumentación fundamentada y la toma de decisiones informada en contextos educativos.

3.3.6 Análisis complementario y visualización integrada

El presente apartado tiene como propósito integrar de manera complementaria los resultados obtenidos mediante herramientas de visualización y análisis gráfico, con el fin de fortalecer la interpretación de los datos desde una perspectiva metodológica y pedagógica.

La triangulación de resultados mediante diferentes representaciones gráficas y tabulares refuerza el rigor metodológico y la validez interna del análisis.

La Figura 40, la Figura 41 y la Tabla 12, presentadas en el Apéndice I, subnumerales I.4.2, complementan el análisis estadístico al integrar visualmente el comportamiento de las variables fisicoquímicas del biodiésel.

La Figura 40 permite identificar patrones de distribución coherentes con los valores promedio y la dispersión reportados, confirmando la estabilidad experimental alcanzada. La Figura 41 ofrece una visualización comparativa que refuerza las diferencias entre condiciones experimentales observadas en el ANOVA. Por su parte, la Tabla 12 integra los resultados técnicos y estadísticos más relevantes, funcionando como un puente entre el análisis cuantitativo y su interpretación pedagógica.

3.3.7 Síntesis interpretativa profunda del numeral 3.3

En conjunto, el numeral 3.3 evidencia que la producción de biodiésel desarrollada por los estudiantes presenta consistencia estadística, coherencia fisicoquímica y un alto valor pedagógico. La articulación entre estadísticos descriptivos (Tabla 7), análisis de correlación (Figura A9.5), pruebas ANOVA (Tabla 12), representaciones gráficas (Figuras 39, 40 y 41) y síntesis comparativas (Tablas 10 y 12), todas respaldadas técnicamente en el Apéndice I, permitió validar empíricamente los resultados del proceso experimental.

Desde el punto de vista educativo, la magnitud del efecto pedagógico se manifiesta en el fortalecimiento sostenido de competencias científicas avanzadas, tales como el razonamiento estadístico, la interpretación crítica de datos, la contrastación de hipótesis y la argumentación basada en evidencia cuantitativa. De este modo, el análisis estadístico se consolidó como un eje articulador entre la experimentación química y la construcción de conocimiento científico significativo en el contexto escolar.

3.4 Análisis técnico–pedagógico integrado de los resultados experimentales

El presente numeral integra de forma articulada los resultados técnicos derivados del proceso experimental de obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo con su interpretación pedagógica, consolidando en un solo cuerpo narrativo los hallazgos ya analizados estadísticamente en numerales previos. Esta integración responde a criterios de coherencia metodológica, economía textual y jerarquización de la evidencia, evitando reiteraciones interpretativas y favoreciendo una lectura experta del capítulo.

Los análisis fisicoquímicos realizados al biodiésel obtenido por los estudiantes evidencian un comportamiento consistente y reproducible, alineado con los rangos de referencia reportados en normas técnicas internacionales ampliamente reconocidas para biodiésel, particularmente ASTM D6751 y EN 14214, las cuales se emplean en esta investigación como marco comparativo y orientativo, y no con fines de certificación normativa, dada la naturaleza educativa y escolar del estudio. La correspondencia entre los valores experimentales y dichos rangos se documenta de manera detallada en las Tablas (7, 10 y 12) del Apéndice I, donde se presentan las propiedades fisicoquímicas evaluadas, sus medidas de tendencia central y dispersión, así como los resultados de los análisis inferenciales aplicados.

La estabilidad experimental observada se sustenta en la baja variabilidad de los datos y en la coherencia interna entre las mediciones, lo cual confirma que el procedimiento de transesterificación, así como las etapas de lavado y secado del biodiésel, fueron ejecutados bajo condiciones controladas y repetibles en el contexto del laboratorio escolar. Esta consistencia técnica se encuentra respaldada por los análisis estadísticos desarrollados previamente y no requiere reinterpretación adicional en este apartado, sino una lectura integradora de sus implicaciones formativas.

Desde el punto de vista inferencial, los contrastes estadísticos aplicados —incluyendo análisis de correlación de Pearson y análisis de varianza (ANOVA)— evidencian efectos de magnitud moderada, definidos exclusivamente bajo criterios estadísticos, en función de los valores obtenidos para el coeficiente r , el estadístico F y los niveles de significancia asociados ($p < 0.05$). Esta magnitud indica que las condiciones experimentales influyeron de manera real y consistente sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel, sin sobredimensionar el alcance del tratamiento ni extrapolar los resultados más allá de su capacidad explicativa.

En contraste, la magnitud del efecto pedagógico se establece a partir de criterios educativos y formativos, y no mediante indicadores estadísticos. Bajo este enfoque, el efecto pedagógico puede caracterizarse como alto, en tanto los estudiantes no solo ejecutaron procedimientos experimentales, sino que desarrollaron competencias científicas complejas, tales como la interpretación crítica de datos, la contrastación de hipótesis, el control de variables y la argumentación basada en evidencia empírica generada por ellos mismos. Esta distinción explícita entre efecto estadístico y efecto pedagógico evita ambigüedades interpretativas y se alinea con la naturaleza mixta y educativa del estudio.

Las representaciones gráficas y tabulares asociadas a este análisis cumplen, en su mayoría, una función confirmatoria de resultados ya analizados, por lo cual su desarrollo detallado se presenta en los apéndices correspondientes, sin afectar la comprensión del lector experto. En particular, las Figuras 38 a 45 (correspondientes a correlaciones, comparaciones de medias e intervalos de confianza) y las Figuras 46 a 52 (visualizaciones complementarias del comportamiento de las variables fisicoquímicas) se encuentran organizadas en el Apéndice I, subnumerales I.3 a I.8. De igual manera, las Tablas 9, 10, 11 y 12 del cuerpo del capítulo cuentan con su respaldo técnico ampliado en el Apéndice I, donde se presentan de forma detallada las bases de datos completas, los cálculos estadísticos y los resultados extendidos que sustentan cada uno de estos análisis. Este soporte complementario permite profundizar en la información cuantitativa sin sobrecargar el desarrollo del capítulo, garantizando trazabilidad, coherencia interna y rigor en la interpretación de los resultados presentados.

Esta decisión metodológica responde a criterios de economía textual, jerarquización de la información y rigor académico, permitiendo que el cuerpo del capítulo privilegie la interpretación integrada de los resultados, mientras que los detalles instrumentales, estadísticos y gráficos quedan disponibles para consulta especializada en los apéndices correspondientes.

En conjunto, el análisis técnico–pedagógico integrado confirma que el proceso experimental de producción de biodiésel desarrollado por los estudiantes es técnicamente consistente, estadísticamente válido y pedagógicamente pertinente. La convergencia entre resultados fisicoquímicos confiables y procesos formativos significativos consolida el laboratorio escolar como un espacio legítimo de construcción activa, reflexiva y contextualizada del conocimiento científico, en coherencia con los objetivos de la investigación y con el enfoque constructivista que la sustenta.

Cierre integrador del numeral 3.4

En síntesis, el análisis técnico–pedagógico integrado desarrollado en el numeral 3.4 permite afirmar que los resultados experimentales obtenidos en el proceso de producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo presentan coherencia fisicoquímica, consistencia estadística y pertinencia educativa. La correspondencia de las propiedades evaluadas con rangos de referencia internacionalmente aceptados, junto con la estabilidad de los datos y la significancia estadística observada, respalda la validez técnica del procedimiento experimental implementado en el contexto escolar.

De manera complementaria, la explicitación diferenciada entre la magnitud del efecto estadístico —definida con base en criterios inferenciales— y la magnitud del efecto pedagógico —establecida a partir del desarrollo de competencias científicas— permitió evitar ambigüedades interpretativas y fortalecer la solidez argumentativa del análisis. Esta distinción resulta clave para comprender que el valor del proceso no radica únicamente en los resultados numéricos obtenidos, sino en su potencial formativo como mediador del aprendizaje científico.

En consecuencia, el numeral 3.4 consolida el laboratorio escolar como un espacio legítimo para la articulación entre experimentación química, análisis estadístico y construcción de conocimiento significativo, sentando una base sólida para las integraciones pedagógicas y síntesis globales que se desarrollan en los numerales posteriores del capítulo, sin incurrir en reiteraciones analíticas ni interpretativas.

3.5 Discusión de resultados

El presente numeral tiene como propósito contrastar los hallazgos obtenidos en el Capítulo 3 con la literatura empírica y teórica relevante en el campo de la educación científica, la educación ambiental y la enseñanza de las ciencias basada en la experimentación. A diferencia de

los numerales anteriores —centrados en la presentación e interpretación interna de los resultados—, este apartado establece un diálogo crítico con investigaciones previas, permitiendo situar los resultados del estudio en un marco académico más amplio y valorar su aporte al conocimiento existente.

En coherencia con el enfoque mixto adoptado, la discusión se estructura de manera integrada, articulando resultados cuantitativos, cualitativos y técnicos, sin reiterar análisis ya cerrados, y diferenciando de forma explícita los criterios utilizados para la interpretación de la magnitud del efecto estadístico y la magnitud del efecto pedagógico.

3.5.1 Discusión de los cambios en la comprensión conceptual

Los resultados evidenciados en el numeral 3.1 muestran incrementos estadísticamente significativos en la comprensión conceptual de las estudiantes tras la implementación de la propuesta pedagógica, con valores de $p < 0.05$ y una reducción de la dispersión en los puntajes posttest. Desde un criterio estrictamente estadístico, los resultados indican un efecto de magnitud moderada, en la medida en que las diferencias observadas son consistentes y no atribuibles al azar, aunque influenciadas por múltiples variables pedagógicas concurrentes. No obstante, al incorporar una lectura pedagógica e interpretativa del proceso, el efecto puede caracterizarse como alto, considerando la profundidad de los cambios evidenciados en la comprensión conceptual de las estudiantes.

Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que reportan mejoras significativas en la comprensión de conceptos químicos cuando la enseñanza se apoya en experiencias experimentales contextualizadas. Investigaciones como las de Hofstein y Lunetta (2004) y Abrahams y Millar (2008) señalan que el trabajo práctico adquiere mayor efectividad cuando se articula con procesos de reflexión guiada y análisis conceptual, condición que fue garantizada en la presente

investigación mediante el uso del aula invertida y el acompañamiento docente durante el proceso experimental.

Desde una perspectiva pedagógica, el efecto observado puede caracterizarse como alto, ya que las evidencias cualitativas analizadas mediante NVivo muestran una reorganización conceptual profunda, reflejada en el uso progresivo de lenguaje científico, la formulación de explicaciones causales y la articulación entre teoría y práctica. Este resultado coincide con los planteamientos de Novak y Gowin (2002) y Ausubel (2002), quienes sostienen que el aprendizaje significativo se evidencia cuando el estudiante logra integrar nuevos conceptos en estructuras cognitivas previas de manera no arbitraria.

Estos resultados evidencian que la enseñanza de la química, cuando se articula con procesos experimentales contextualizados, favorece una comprensión más profunda de los conceptos, al permitir que los estudiantes relacionen la teoría con aplicaciones reales.

Por último, la magnitud del cambio observado sugiere que la intervención pedagógica tuvo un efecto significativo en el proceso de aprendizaje, lo cual refuerza la pertinencia del enfoque experimental contextualizado como estrategia de enseñanza en ciencias.

3.5.2 Discusión sobre la transformación de actitudes sostenibles

En relación con las actitudes sostenibles analizadas en el numeral 3.1.2, los resultados cuantitativos muestran incrementos estadísticamente significativos en las dimensiones asociadas a responsabilidad ambiental y valoración del residuo, con $p < 0.05$. Bajo un criterio estadístico, estos cambios corresponden a un efecto de magnitud moderada, propio de intervenciones educativas en muestras pequeñas y contextos escolares reales.

No obstante, desde el criterio pedagógico, el efecto puede considerarse alto, dado que los discursos estudiantiles evidencian una apropiación crítica del problema ambiental asociado al

aceite vegetal posconsumo y una disposición explícita a modificar prácticas cotidianas. Este hallazgo dialoga directamente con investigaciones en educación para el desarrollo sostenible que destacan la importancia de experiencias vivenciales y contextualizadas para generar cambios actitudinales duraderos (Tilbury, 2011; Sterling, 2014).

La literatura coincide en que las actitudes ambientales difícilmente se transforman mediante enfoques exclusivamente informativos. En este sentido, los resultados del presente estudio respaldan lo planteado por Ardoin, Clark y Kelsey (2013), quienes señalan que la educación ambiental basada en la acción y la resolución de problemas reales favorece procesos de concienciación más profundos y sostenibles en el tiempo.

3.5.3 Discusión del valor pedagógico del proceso experimental

Los resultados técnicos analizados en los numerales 3.3 y 3.4 evidencian que el biodiésel obtenido por las estudiantes presenta propiedades fisicoquímicas coherentes con rangos reportados en normas internacionales como ASTM D6751 y EN 14214, utilizadas como marco comparativo. Desde el criterio estadístico, los análisis inferenciales muestran efectos de magnitud moderada, asociados al control de variables y a la estabilidad del procedimiento experimental.

Sin embargo, el principal aporte de estos resultados no reside en la calidad técnica del producto en sí misma, sino en su valor pedagógico como mediador del aprendizaje científico. Este enfoque coincide con lo propuesto por Hodson (2014), quien sostiene que el laboratorio escolar debe entenderse como un espacio para el desarrollo del razonamiento científico y no únicamente como un lugar de verificación de teorías.

La capacidad de las estudiantes para interpretar desviaciones, discutir fuentes de error, relacionar estructura molecular con propiedades macroscópicas y validar resultados mediante herramientas estadísticas refuerza lo señalado por Millar (2010) respecto al papel formativo del

trabajo práctico cuando se orienta a la construcción de explicaciones y no solo a la obtención de resultados esperados.

3.5.4 Discusión de la integración entre resultados cuantitativos y cualitativos

Uno de los aportes más relevantes del estudio es la convergencia observada entre los resultados cuantitativos y cualitativos, aspecto que fortalece la validez interna de la investigación. La correspondencia entre mejoras en los puntajes de comprensión conceptual, cambios en las actitudes sostenibles y evolución del discurso científico confirma que el aprendizaje logrado no fue superficial ni episódico.

Esta convergencia es consistente con investigaciones de enfoque mixto en educación científica que destacan la necesidad de integrar datos numéricos y narrativos para comprender la complejidad de los procesos de aprendizaje (Creswell & Plano Clark, 2018).

3.5.5 Aporte del estudio al campo de la educación científica

En diálogo con la literatura existente, los resultados discutidos permiten afirmar que la transformación del aceite vegetal posconsumo en biodiésel constituye una estrategia didáctica pertinente para la enseñanza de las ciencias naturales en educación media, al integrar contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales en un contexto significativo.

A diferencia de estudios centrados exclusivamente en el rendimiento académico o en la validación técnica de productos, la presente investigación aporta evidencia empírica sobre el potencial formativo de la experimentación contextualizada como herramienta para el desarrollo de competencias científicas, ambientales y ciudadanas, contribuyendo al debate actual sobre la educación científica orientada a la sostenibilidad.

3.5.6 Discusión metodológica e integración triangulada de los resultados

La interpretación de los resultados presentada en los numerales 3.3 y 3.4 se ve fortalecida por la coherencia del diseño metodológico mixto adoptado en la investigación, el cual permitió validar los hallazgos desde una lógica de triangulación sistemática entre datos, métodos e instrumentos. Esta arquitectura metodológica evitó lecturas fragmentadas del fenómeno educativo y garantizó que los resultados no dependieran de una única fuente de evidencia, sino de la convergencia de múltiples aproximaciones analíticas que dialogan entre sí de manera complementaria.

El diseño cuasi-experimental implementado, desarrollado en condiciones reales de instituciones educativas públicas, permitió una lectura contextualizada de los resultados técnicos y pedagógicos, respetando la dinámica escolar y el carácter formativo del estudio. Este tipo de diseño ha sido ampliamente utilizado en investigaciones en educación científica y ambiental, donde el control experimental absoluto resulta poco viable, pero se priorizan la validez ecológica, la pertinencia contextual y la significatividad educativa de los hallazgos. Estudios en educación ambiental y en enseñanza de las ciencias han recurrido a diseños cuasi-experimentales con mediciones pretest–postest y análisis estadísticos comparativos para evaluar cambios conceptuales, actitudinales y procedimentales derivados de intervenciones pedagógicas contextualizadas, evidenciando la pertinencia de este enfoque en escenarios escolares reales (Hodson, 2014; Creswell & Plano-Clark, 2018; Miles, Huberman & Saldaña, 2019).

La estructuración por fases de recolección y análisis permitió contrastar información en distintos momentos del proceso formativo, fortaleciendo la consistencia interna de los datos y reduciendo el riesgo de interpretaciones circunstanciales o sesgadas. Esta lógica secuencial es coherente con investigaciones en educación científica que destacan la importancia de capturar la evolución del aprendizaje y de las prácticas experimentales a lo largo del tiempo, especialmente

cuando se trabaja con metodologías activas y procesos de indagación escolar (Driver et al., 1999; Novak & Gowin, 2002).

En correspondencia con lo expuesto en los numerales 3.3 y 3.4, la triangulación metodológica se materializó en la integración de instrumentos cuantitativos, cualitativos y técnicos. Los análisis estadísticos —t de Student, ANOVA y correlaciones de Pearson, procesados mediante SPSS— permitieron establecer criterios objetivos de significancia estadística y estabilidad de los resultados, aportando evidencia empírica sobre los cambios observados en las variables analizadas. De forma complementaria, la caracterización fisicoquímica del biodiésel y de sus subproductos, mediante técnicas como FTIR-ATR y UV-VIS, proporcionó información técnica verificable sobre la consistencia del proceso experimental desarrollado por las estudiantes.

Estos datos fueron contrastados con información cualitativa obtenida a través de entrevistas semiestructuradas, guías de observación, rúbricas y análisis de contenido asistido por NVivo 12, permitiendo una verificación cruzada de los hallazgos sin reabrir su interpretación sustantiva. Este procedimiento es coherente con enfoques metodológicos en investigación educativa que resaltan la triangulación como estrategia para fortalecer la credibilidad y profundidad interpretativa de estudios que combinan experimentación, análisis estadístico y comprensión de procesos de aprendizaje (Saldaña, 2016; Miles et al., 2019).

Un elemento metodológicamente distintivo del estudio fue el uso de variables técnicas como criterios de contraste analítico y no como fines en sí mismas. La comparación de los parámetros fisicoquímicos obtenidos con rangos normativos y referentes técnicos internacionales permitió establecer umbrales objetivos de calidad experimental, los cuales funcionaron como soportes metodológicos para la interpretación pedagógica desarrollada previamente, sin generar redundancias discursivas ni desplazar el foco educativo de la investigación. Este enfoque coincide con

planteamientos en educación científica que proponen utilizar la experimentación escolar como medio para desarrollar razonamiento científico y comprensión conceptual, más que como simple reproducción de procedimientos técnicos (Hodson, 2014).

Desde la perspectiva de la calidad metodológica, la validez interna del estudio se sustentó en el uso de instrumentos estandarizados, pruebas estadísticas con niveles de significancia aceptados científicamente y la replicación del procedimiento experimental en más de un contexto institucional. La coherencia de los patrones observados entre grupos refuerza la fiabilidad de los resultados, mientras que la implementación del diseño en escenarios educativos reales aporta elementos que favorecen su transferibilidad a otros contextos con características similares, aspecto señalado como clave en investigaciones educativas de orientación aplicada.

En conjunto, la triangulación metodológica operó como un eje articulador entre los resultados técnicos, estadísticos y pedagógicos, consolidando una arquitectura analítica coherente entre datos, métodos e instrumentos. Este soporte metodológico robustece la interpretación global del Capítulo 3 y establece una base sólida para las conclusiones generales de la investigación, sin redundar en análisis ya desarrollados ni reabrir discusiones previamente cerradas, y situando el estudio dentro de prácticas metodológicas ampliamente reconocidas en la investigación contemporánea en educación científica y ambiental.

Síntesis de la discusión

En síntesis, la discusión de resultados permitió integrar de manera coherente los hallazgos relacionados con la comprensión conceptual, las actitudes hacia la sostenibilidad y el valor pedagógico del proceso experimental desarrollado. El contraste de estos resultados con la literatura empírica y teórica en educación científica y ambiental evidenció una alta coherencia con investigaciones que destacan la efectividad de la experimentación contextualizada, el aprendizaje

basado en problemas reales y la incorporación de enfoques de educación ambiental en la enseñanza de las ciencias naturales.

La diferenciación explícita entre magnitud del efecto estadístico —interpretada a partir de criterios inferenciales— y magnitud del efecto pedagógico —analizada desde la profundidad de los aprendizajes, la transformación actitudinal y la calidad del razonamiento científico— permitió una lectura rigurosa y conceptualmente clara de los resultados, evitando ambigüedades interpretativas y fortaleciendo la consistencia argumentativa del estudio.

Asimismo, la discusión articuló de forma integrada resultados cuantitativos, cualitativos y técnicos, evidenciando convergencias entre los análisis estadísticos, la caracterización físicoquímica del biodiésel y los discursos y producciones de las estudiantes. Esta integración se sustentó en un diseño metodológico consistente, apoyado en procesos de triangulación entre datos, métodos e instrumentos, lo que reforzó la solidez interpretativa de los hallazgos.

En conjunto, la discusión no solo interpretó los resultados del estudio, sino que los situó críticamente en un marco académico más amplio, articulando evidencia empírica, referentes teóricos y fundamentos metodológicos. Este abordaje integral consolida los aportes de la investigación y establece una transición sólida hacia el capítulo de conclusiones, donde se profundiza en las implicaciones educativas, científicas y sociales de la propuesta pedagógica implementada.

3.6 Cierre crítico del Capítulo 3

El análisis integrado de los resultados permite establecer una lectura crítica del alcance de la propuesta pedagógica implementada, reconociendo tanto sus aportes como sus límites dentro del contexto investigado. En este sentido, los hallazgos evidencian que la articulación entre experimentación, contextualización y sostenibilidad constituye un enfoque pedagógico pertinente para la enseñanza de las ciencias, en la medida en que favorece procesos de comprensión conceptual

profunda y el desarrollo de actitudes responsables frente al entorno.

No obstante, es importante señalar que los resultados deben interpretarse considerando las condiciones específicas del estudio, tales como el tamaño muestral, la ausencia de grupo de control y la implementación en un contexto educativo real, lo cual introduce variables que no pueden ser completamente controladas. A pesar de ello, la coherencia entre los resultados cuantitativos, cualitativos y técnicos fortalece la validez interna del estudio y permite sostener que los cambios observados responden de manera consistente a la intervención pedagógica.

Desde una perspectiva crítica, el estudio aporta evidencia relevante sobre el potencial de la educación científica contextualizada como estrategia de transformación educativa, al tiempo que plantea la necesidad de futuras investigaciones que amplíen su alcance mediante diseños comparativos, muestras más amplias y análisis longitudinales.

4. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones finales derivadas del proceso investigativo desarrollado a lo largo de esta tesis doctoral en educación, titulada ***Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.*** Las conclusiones se estructuran en función del grado de cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos, así como de las interpretaciones globales que emergen del desarrollo del estudio. El capítulo ofrece una síntesis reflexiva de los principales aportes pedagógicos y formativos de la propuesta implementada, enfatizando su pertinencia en contextos escolares reales y su contribución al campo de la educación científica y ambiental.

Desde el campo de la didáctica de la química, la presente investigación aporta un enfoque pedagógico innovador basado en la articulación entre experimentación contextualizada, sostenibilidad y aprendizaje significativo. La utilización del proceso de transesterificación como eje didáctico permitió que los estudiantes no solo comprendieran conceptos fundamentales de la química, como reacciones químicas, enlaces, propiedades fisicoquímicas y caracterización de sustancias, sino que también los aplicaran en la resolución de una problemática ambiental real. Este enfoque favorece la transición de una enseñanza tradicional, centrada en la transmisión de contenidos, hacia una enseñanza activa y contextualizada, en la cual el laboratorio se convierte en un espacio de construcción de conocimiento, reflexión crítica y desarrollo de competencias científicas. En este sentido, la coherencia entre el problema de investigación, el marco teórico y el diseño metodológico permitió garantizar la validez interna del estudio y sustentar de manera consistente los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos permiten diferenciar entre el desarrollo del aprendizaje significativo como proceso y la comprensión conceptual como resultado cognitivo observable, evidenciando que la propuesta pedagógica favoreció no solo la adquisición de contenidos, sino su estructuración coherente dentro del pensamiento científico escolar.

4.1 Cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos

En este apartado se presenta el análisis del grado de cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos de la investigación, a partir de la integración de los resultados obtenidos en los componentes cuantitativo, cualitativo y técnico. Esta evaluación se realiza considerando tanto la significancia estadística de los cambios observados como su interpretación pedagógica, lo que permite valorar de manera integral el alcance de la propuesta implementada. De este modo, se busca evidenciar la coherencia entre los propósitos inicialmente planteados, el desarrollo metodológico y los resultados alcanzados en el contexto educativo intervenido.

Cumplimiento del objetivo general

El objetivo general de la investigación se orientó a analizar el impacto pedagógico de una propuesta educativa basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo mediante el proceso de transesterificación, como recurso para la enseñanza de las ciencias naturales con enfoque de educación ambiental. A partir del desarrollo del estudio, se concluye que este objetivo fue cumplido, en la medida en que la propuesta permitió valorar su pertinencia pedagógica, su coherencia con el currículo escolar y su potencial para articular conocimientos científicos, reflexiones ambientales y prácticas experimentales en contextos educativos reales. En este sentido, los resultados obtenidos no solo fueron estadísticamente significativos, sino que su interpretación integrada permitió evidenciar un impacto pedagógico relevante en el proceso de aprendizaje.

El cumplimiento de este objetivo se explica porque el proceso experimental fue integrado como un eje pedagógico estructurante y no como una actividad complementaria. Esta integración favoreció aprendizajes contextualizados, permitió resignificar contenidos científicos tradicionalmente abstractos y promovió una aproximación más crítica y reflexiva a problemáticas ambientales locales. La interpretación de los resultados estadísticos se realizó considerando tanto el nivel de significancia como su pertinencia pedagógica, evitando una lectura reduccionista centrada únicamente en el valor p . El impacto pedagógico se interpreta, por tanto, como una contribución significativa al fortalecimiento de prácticas educativas orientadas a la sostenibilidad, reconociendo el carácter contextualizado del estudio y evitando generalizaciones absolutas.

Cumplimiento del primer objetivo específico

El primer objetivo específico estuvo orientado a fortalecer la comprensión conceptual de contenidos de ciencias naturales a partir del desarrollo del proceso de obtención de biodiésel y sus subproductos. Se concluye que este objetivo fue cumplido, dado que la experiencia permitió a las estudiantes construir explicaciones científicas más integradas y coherentes sobre fenómenos asociados a la química, la biología y la física, adicionalmente, el cambio observado no solo fue estadísticamente significativo, sino que presentó una magnitud elevada, evidenciando un impacto pedagógico sustancial de la intervención implementada.

Este cumplimiento se sustenta en la mediación pedagógica del proceso experimental, que facilitó la relación entre la teoría abordada en el aula y su aplicación práctica en un contexto real. La interacción con fenómenos observables y la reflexión guiada sobre los mismos favorecieron procesos de reorganización conceptual progresiva, coherentes con un enfoque constructivista del aprendizaje científico.

La intervención pedagógica permitió mejorar la comprensión conceptual de las estudiantes, evidenciando un avance en el uso de lenguaje científico y en la relación entre teoría y práctica.

El cambio observado no solo fue estadísticamente significativo, sino que presentó una magnitud relevante, evidenciando un impacto pedagógico sustancial de la intervención.

Cumplimiento del segundo objetivo específico

El segundo objetivo específico se orientó a promover actitudes favorables hacia la sostenibilidad y el cuidado ambiental mediante la resignificación del aceite vegetal posconsumo como recurso educativo. Se concluye que este objetivo fue alcanzado, en tanto la propuesta pedagógica generó espacios sistemáticos de reflexión crítica sobre el impacto ambiental de los residuos, la responsabilidad individual y colectiva, y las posibilidades de aprovechamiento sostenible.

El cumplimiento de este objetivo se explica por el carácter contextualizado de la experiencia, que permitió vincular los contenidos científicos con problemáticas ambientales cercanas a la realidad del estudiantado. Estas reflexiones contribuyeron a una mayor sensibilización ambiental y a una disposición más consciente frente a prácticas sostenibles, entendidas como procesos formativos en construcción y no como cambios inmediatos o definitivos.

Cumplimiento del tercer objetivo específico

El tercer objetivo específico estuvo orientado a analizar el desarrollo de competencias científicas y ciudadanas a través de la participación activa de las estudiantes en el proceso experimental. Se concluye que este objetivo fue cumplido, dado que la experiencia favoreció el fortalecimiento de habilidades asociadas a la formulación de preguntas, la interpretación de información, la argumentación y la toma de decisiones fundamentadas.

Este logro se explica por la participación progresiva de las estudiantes en las distintas fases del proceso experimental, lo que permitió una aproximación auténtica al quehacer científico escolar. En este sentido, las competencias científicas desarrolladas se entienden como capacidades para pensar críticamente, argumentar y actuar de manera responsable frente a problemáticas socioambientales.

La implementación de la propuesta pedagógica evidenció que el uso del laboratorio como espacio de aprendizaje activo facilita la apropiación de conceptos químicos, al integrar la experimentación, la interpretación de resultados y la reflexión sobre su aplicación en contextos reales.

Cumplimiento del cuarto objetivo específico

El cuarto objetivo específico se orientó a valorar la viabilidad pedagógica de la propuesta como estrategia transferible a otros contextos educativos. Se concluye que este objetivo fue cumplido, en la medida en que la experiencia evidenció condiciones favorables para su adaptación en instituciones educativas con características similares, siempre que se respeten las particularidades contextuales y se garantice un acompañamiento docente adecuado.

La flexibilidad de la propuesta constituye un elemento clave de este cumplimiento, al permitir su resignificación en función de los recursos disponibles, los objetivos curriculares y las necesidades formativas de cada institución.

4.2 Conclusiones en relación con las hipótesis de investigación

En este apartado se analizan las hipótesis planteadas en la investigación a la luz de los resultados obtenidos, con el propósito de establecer su nivel de verificación empírica. Esta valoración se fundamenta en la integración de evidencias cuantitativas, cualitativas y técnicas, considerando tanto el nivel de significancia estadística como la pertinencia pedagógica de los cambios observados. De esta manera, se busca evitar una interpretación reduccionista centrada

exclusivamente en los valores p , incorporando una lectura comprensiva que permita reconocer el alcance real de la intervención en el proceso de aprendizaje de las estudiantes.

Hipótesis general de investigación (HiG):

La implementación de una estrategia pedagógica interdisciplinaria centrada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo generará una mejora significativa en la comprensión conceptual de las ciencias naturales y favorecerá el desarrollo de actitudes sostenibles en los estudiantes de educación media.

Veredicto: Respaldada por la evidencia obtenida en el estudio.

La evidencia analizada sugiere la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre el pretest y el posttest en ambas variables, lo que permite inferir una asociación favorable entre la intervención pedagógica implementada y los cambios observados en la comprensión conceptual y en las actitudes sostenibles, en coherencia con el alcance del diseño cuasi-experimental adoptado.

Hipótesis específica 1 — Comprensión conceptual:

H_{01} : No habrá diferencias significativas entre el pretest y el posttest.

H_{11} : Sí habrá diferencias significativas entre el pretest y el posttest.

Veredicto: Se rechaza H_{01} y se acepta H_{11} .

El análisis realizado permitió identificar diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones inicial y final, lo que sugiere un incremento asociado en la comprensión conceptual de las ciencias naturales por parte de las estudiantes, en el marco de la estrategia pedagógica desarrollada.

Hipótesis específica 2 — Actitudes sostenibles:

H_{02} : No se presentarán cambios significativos entre el pretest y el posttest.

H₁₂: Sí se presentarán cambios significativos entre el pretest y el posttest.

Veredicto: Se rechaza H₀₂ y se acepta H₁₂.

Los resultados analizados evidencian cambios estadísticamente significativos en las actitudes sostenibles, los cuales se interpretan como asociados al desarrollo de la propuesta pedagógica, considerando tanto los instrumentos cuantitativos como los registros cualitativos empleados en el estudio.

Hipótesis específica 3 — Relación producción–aprendizaje:

H₀₃: No existirá relación significativa entre el nivel de producción de biodiésel y los resultados en comprensión conceptual y actitudes sostenibles.

H₁₃: Sí existirá relación significativa entre el nivel de producción de biodiésel y los resultados en comprensión conceptual y actitudes sostenibles.

Veredicto: Se rechaza H₀₃ y se acepta H₁₃.

En este estudio, el nivel de producción se operacionaliza como el grado de participación e involucramiento de las estudiantes en las distintas etapas del proceso experimental de obtención del biodiésel. Los análisis realizados sugieren la existencia de asociaciones significativas entre dicho nivel de participación experimental y los resultados obtenidos en comprensión conceptual y actitudes sostenibles. Estas asociaciones se interpretan desde una perspectiva no causal, reconociendo la función mediadora del proceso experimental como recurso pedagógico dentro del contexto educativo analizado.

4.3 Implicaciones pedagógicas desde el enfoque constructivista, los ODS y la educación ambiental crítica

Las conclusiones pedagógicas derivadas de esta investigación se sustentan en la integración del enfoque constructivista, los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la educación ambiental

crítica como marcos orientadores de la práctica educativa. Estos referentes no se asumen únicamente como fundamentos teóricos, sino como principios que orientaron el diseño de experiencias de aprendizaje contextualizadas y con sentido formativo para los estudiantes.

Desde el enfoque constructivista, la experiencia desarrollada sugiere que el aprendizaje se fortaleció cuando los estudiantes participaron activamente en la resolución de problemas reales, articulando saberes previos con nuevas comprensiones construidas a partir de la experimentación y la reflexión. El tratamiento del aceite vegetal posconsumo como un desafío contextual permitió trascender la enseñanza fragmentada de contenidos y promover procesos de comprensión conceptual basados en la relación entre el hacer, el analizar y el interpretar, favoreciendo aprendizajes más significativos y duraderos.

Asimismo, la propuesta pedagógica evidenció implicaciones relevantes en términos de autonomía, motivación y autorregulación del aprendizaje. La participación activa del estudiante en actividades experimentales y reflexivas propició un rol más protagónico frente a su proceso formativo, lo cual resulta coherente con modelos educativos centrados en el estudiante y orientados al desarrollo de competencias científicas y ciudadanas.

En relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la experiencia permitió integrar de manera aplicada principios asociados a la educación de calidad, el consumo responsable y la sostenibilidad ambiental. La resignificación de un residuo doméstico como recurso pedagógico favoreció la comprensión de problemáticas ambientales contemporáneas y promovió una reflexión crítica sobre las prácticas de consumo y su impacto en el entorno, fortaleciendo una conciencia ambiental situada y contextualizada.

Desde la perspectiva de la educación ambiental crítica, la propuesta trascendió enfoques normativos o meramente informativos, promoviendo una lectura compleja del problema

ambiental y fomentando espacios de análisis, debate y toma de postura frente a las implicaciones sociales y ambientales del uso de fuentes energéticas convencionales. Esta orientación pedagógica contribuyó a la formación de estudiantes con mayor sensibilidad ambiental y capacidad de cuestionamiento frente a la realidad.

En síntesis, las implicaciones pedagógicas de este estudio sugieren que la integración de problemáticas ambientales reales en la enseñanza de las ciencias naturales constituye una estrategia pertinente para promover aprendizajes significativos, pensamiento crítico y formación ciudadana. La propuesta desarrollada ofrece orientaciones valiosas para su adaptación a otros contextos educativos, manteniendo coherencia con una educación científica contextualizada, crítica y socialmente comprometida.

4.4 Respuesta a las preguntas de investigación

Antes de presentar la respuesta a las preguntas de investigación formuladas en esta tesis, es pertinente resaltar el carácter integrador de este apartado dentro del cierre analítico del estudio. En una investigación doctoral en educación, las preguntas de investigación constituyen un eje articulador que conecta el problema, los objetivos, el marco conceptual y la interpretación global de la evidencia recolectada. En este sentido, responderlas no implica únicamente emitir un juicio sobre su cumplimiento, sino interpretar de manera reflexiva cómo una intervención pedagógica situada, interdisciplinaria y orientada a la sostenibilidad contribuye a resignificar los procesos de enseñanza y aprendizaje en el contexto de la educación pública.

Las preguntas orientaron tanto el diseño de la propuesta pedagógica como la lectura comprensiva de la evidencia generada durante su implementación, permitiendo identificar transformaciones relevantes en el aprendizaje, en las actitudes frente al ambiente y en las dinámicas de participación escolar. Desde esta perspectiva, las respuestas que se presentan a continuación se

formulan de manera prudente, atendiendo a las características del diseño cuasi-experimental y al alcance formativo de la investigación.

Pregunta principal

¿Cómo impacta la implementación de una propuesta pedagógica, basada en la transformación del aceite vegetal posconsumo a través del proceso de transesterificación, en el desarrollo de competencias científicas, ambientales y ciudadanas en estudiantes de las instituciones educativas públicas de Bucaramanga, específicamente en el colegio Gabriela Mistral y el colegio Las Américas?

Respuesta:

La implementación de la propuesta pedagógica se asocia con mejoras relevantes en el desarrollo de competencias científicas, ambientales y ciudadanas en los estudiantes participantes. En el ámbito científico, la experiencia favoreció una comprensión más integrada de conceptos propios de las ciencias naturales, al vincularlos con situaciones reales y con procesos experimentales contextualizados, lo que contribuyó a un aprendizaje más significativo y funcional.

En cuanto a las competencias ambientales, el abordaje del aceite vegetal posconsumo como un recurso susceptible de transformación promovió una reconfiguración de las percepciones del estudiantado frente a los residuos y su impacto ambiental. La evidencia recogida sugiere una mayor sensibilización ecológica y una disposición más crítica frente a las prácticas de consumo y disposición de desechos, coherente con los propósitos de la educación ambiental contemporánea.

Desde la dimensión ciudadana, la propuesta favoreció actitudes de trabajo colaborativo, responsabilidad compartida y compromiso con el entorno cercano. La participación activa en un proyecto con implicaciones ambientales concretas permitió que los estudiantes se reconocieran

como sujetos capaces de incidir en su contexto, fortaleciendo valores asociados a la participación, la corresponsabilidad y la acción colectiva.

Pregunta secundaria

¿De qué manera la integración de metodologías activas, tales como el aula invertida y el uso de tecnologías de la información y la comunicación, en el diseño y ejecución de esta propuesta pedagógica, contribuye a fomentar el pensamiento crítico, la autonomía en el aprendizaje y la conciencia ambiental crítica, promoviendo una educación contextualizada, significativa y orientada a la transformación social en el contexto escolar?

Respuesta:

La integración de metodologías activas se constituyó en un componente pedagógico clave para potenciar los efectos formativos de la propuesta. El uso del aula invertida permitió redistribuir los tiempos y roles tradicionales del proceso educativo, favoreciendo que los espacios presenciales se orientaran a la reflexión, la discusión, la resolución de problemas y la aplicación práctica del conocimiento, mientras que el trabajo autónomo adquirió mayor protagonismo.

De igual manera, la incorporación de tecnologías de la información y la comunicación facilitó el acceso a diversos recursos educativos, fortaleció los procesos de autoaprendizaje y promovió una participación más activa del estudiantado en su formación. Estas estrategias contribuyeron al desarrollo del pensamiento crítico, al incentivar la contrastación de información, la argumentación y la toma de decisiones fundamentadas.

En conjunto, estas metodologías favorecieron la construcción de una conciencia ambiental crítica basada en la experiencia directa y en la reflexión contextualizada, lo que permitió avanzar hacia una educación más pertinente, significativa y orientada a la transformación social. Desde esta perspectiva, la propuesta se alinea con los principios de una educación para la

sostenibilidad, en coherencia con los lineamientos promovidos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los enfoques contemporáneos de la educación científica.

4.5 Conclusión integradora de los hallazgos técnico-pedagógicos del proceso experimental

Los hallazgos derivados de la producción y caracterización experimental del biodiésel, la glicerina, el anticongelante y los bioplásticos obtenidos a partir de aceite vegetal posconsumo permiten concluir que la incorporación de procesos químicos reales en el contexto escolar constituye un recurso pedagógico de alto valor formativo, siempre que su implementación se oriente desde criterios educativos, éticos y de sostenibilidad, y no desde pretensiones de validación técnica o industrial.

En términos globales, los resultados técnicos alcanzados no deben interpretarse de manera aislada ni como productos finales en sí mismos, sino como mediadores didácticos que posibilitan la articulación entre contenidos científicos, problemáticas ambientales reales y procesos de aprendizaje significativo. La viabilidad experimental del biodiésel en un entorno educativo, la resignificación de la glicerina como subproducto pedagógico, la formulación de un anticongelante con fines formativos y la elaboración comparativa de bioplásticos evidencian que es posible desarrollar experiencias científicas rigurosas en el aula, sin descontextualizar los saberes ni reducir la ciencia a procedimientos desprovistos de sentido educativo.

Desde una perspectiva pedagógica, el valor central de estos procesos no radica en la cercanía de los resultados obtenidos a estándares industriales o normativos, sino en su capacidad para promover en los estudiantes la interpretación crítica de datos, la comprensión de la relación entre estructura, propiedades y función de los materiales, así como el reconocimiento de la variabilidad experimental como un componente inherente al quehacer científico. La comparación

entre insumos comerciales y residuales, lejos de establecer jerarquías técnicas, permitió problematizar conceptos como pureza, eficiencia, desempeño y sostenibilidad, fortaleciendo una mirada reflexiva sobre las tensiones entre desarrollo tecnológico y responsabilidad ambiental.

Asimismo, la incorporación de técnicas de caracterización molecular con fines educativos contribuyó a desmitificar la ciencia como un conjunto de recetas cerradas, favoreciendo la comprensión de la investigación científica como un proceso interpretativo, sustentado en la observación, el análisis de evidencias y la argumentación fundamentada. Esta aproximación permitió a los estudiantes establecer puentes entre teoría y práctica, fortaleciendo habilidades analíticas y promoviendo una comprensión más profunda de los procesos de transformación química.

En conjunto, los hallazgos técnico-pedagógicos confirman que la producción experimental de biodiésel y sus subproductos en el contexto escolar opera como un dispositivo educativo integrador, capaz de articular ciencia, educación ambiental crítica y sostenibilidad desde una perspectiva formativa. Los procesos desarrollados respaldan la propuesta pedagógica no por su nivel de sofisticación técnica, sino por su capacidad para generar experiencias educativas contextualizadas, éticamente orientadas y coherentes con los retos formativos del siglo XXI, contribuyendo al desarrollo de competencias científicas, ambientales y ciudadanas en estudiantes de educación media.

4.6 Proyecciones educativas, impacto institucional y replicabilidad del proyecto

Una de las principales conclusiones de esta tesis doctoral es que la propuesta pedagógica desarrollada presenta un alto potencial de proyección educativa, impacto institucional y replicabilidad en diversos contextos escolares. Este potencial no se fundamenta únicamente en los productos derivados de la experiencia, sino en la coherencia del modelo pedagógico, su pertinencia

curricular y su alineación con enfoques contemporáneos de educación científica contextualizada y educación ambiental crítica.

4.6.1 Proyecciones educativas y transformaciones pedagógicas

La investigación permite concluir que la integración de proyectos experimentales contextualizados en la enseñanza de las ciencias naturales favorece procesos de aprendizaje más significativos, críticos y socialmente pertinentes. La articulación entre contenidos científicos, problemáticas ambientales reales y metodologías activas contribuye a resignificar el currículo escolar, superando enfoques centrados en la transmisión de contenidos para dar paso a prácticas orientadas a la comprensión profunda, la reflexión y la toma de decisiones informadas.

Desde esta perspectiva, la experiencia desarrollada sugiere la pertinencia de incorporar estrategias pedagógicas similares en programas de formación docente inicial y continua, especialmente en licenciaturas en ciencias naturales y espacios de actualización pedagógica vinculados con innovación educativa y sostenibilidad. La propuesta evidencia que el trabajo por proyectos, cuando se estructura a partir de problemáticas del entorno y se orienta desde una intencionalidad pedagógica clara, puede fortalecer la alfabetización científica, el pensamiento crítico y la conciencia ambiental del estudiantado.

Asimismo, se concluye que priorizar iniciativas educativas que integren ciencia, ética y territorio constituye una oportunidad formativa para resignificar los contenidos curriculares tradicionales y hacerlos relevantes para la vida cotidiana de los estudiantes, favoreciendo aprendizajes con sentido y proyección social.

4.6.2 Impacto institucional y articulación curricular

En el plano institucional, se concluye que la implementación de la propuesta pedagógica contribuyó al fortalecimiento de una cultura escolar orientada a la interdisciplinariedad, la

investigación escolar y la educación ambiental. El proyecto favoreció procesos de reflexión pedagógica colectiva y evidenció el potencial de la ciencia escolar como herramienta para abordar problemáticas locales desde una perspectiva educativa y formativa.

Desde el punto de vista curricular, la experiencia permitió consolidar articulaciones entre áreas como química, biología, física, matemáticas y tecnología, demostrando la viabilidad de enfoques integrados cuando el currículo se organiza en torno a proyectos contextualizados. Esta integración favorece una comprensión más holística del conocimiento científico y se alinea con los principios de una educación contextualizada y orientada al desarrollo de competencias.

Adicionalmente, la incorporación de entornos virtuales de aprendizaje y metodologías activas fortaleció la cultura digital institucional y promovió mayores niveles de autonomía y autorregulación en los estudiantes. Estas conclusiones sugieren que la innovación pedagógica no depende exclusivamente de recursos tecnológicos sofisticados, sino de una planificación didáctica coherente, intencionada y centrada en el aprendizaje.

4.6.3 Replicabilidad del modelo educativo y condiciones mínimas de implementación

Una conclusión central de esta investigación es que el modelo pedagógico propuesto resulta replicable y adaptable a otros contextos educativos con características similares, siempre que se garanticen condiciones mínimas de implementación que aseguren su viabilidad pedagógica, experimental y formativa.

Entre las condiciones esenciales se destaca, en primer lugar, la implementación de protocolos básicos de bioseguridad escolar, que incluyan el uso adecuado de elementos de protección personal, el manejo responsable de reactivos y residuos, y la supervisión permanente del trabajo experimental por parte del docente. Estas condiciones no buscan replicar entornos industriales, sino garantizar prácticas seguras y formativas acordes con el contexto educativo.

En segundo lugar, se requiere la disponibilidad de reactivos e insumos accesibles y de bajo costo, seleccionados de manera intencional para su uso en ambientes escolares. La experiencia demuestra que es posible desarrollar procesos experimentales con fines educativos utilizando materiales disponibles en el contexto local, siempre que exista una adecuada planificación pedagógica y técnica.

Como tercera condición, se concluye que la replicabilidad del modelo se ve fortalecida mediante alianzas interinstitucionales, particularmente con universidades, entidades gubernamentales, empresas de gestión de residuos u organizaciones ambientales. Estas alianzas no solo amplían las posibilidades formativas, sino que aportan legitimidad académica, acompañamiento técnico y proyección social a los proyectos escolares.

Finalmente, la capacitación docente constituye una condición clave para la sostenibilidad del modelo. La formación en educación ambiental, trabajo experimental escolar, metodologías activas y enfoque interdisciplinario resulta indispensable para garantizar una implementación coherente y contextualizada. Esta capacitación no debe entenderse como un proceso puntual, sino como una estrategia continua de fortalecimiento profesional.

En conjunto, estas condiciones permiten concluir que el modelo pedagógico desarrollado es transferible y escalable, y que puede adaptarse a diferentes realidades educativas sin perder su esencia formativa. Su flexibilidad y orientación a problemáticas reales lo posicionan como una alternativa pertinente para fortalecer la educación científica y ambiental en contextos urbanos y rurales.

En síntesis, esta tesis doctoral consolida un modelo educativo con proyección pedagógica, impacto institucional y potencial de replicabilidad, capaz de contribuir a la transformación de la enseñanza de las ciencias naturales desde una perspectiva interdisciplinaria, crítica y

orientada a la sostenibilidad. Su implementación responsable y contextualizada puede aportar de manera significativa al fortalecimiento de una educación científica comprometida con los desafíos socioambientales contemporáneos.

4.7 Factor diferenciador y contribución original de la tesis doctoral

Uno de los aportes más relevantes y distintivos de esta tesis doctoral en educación reside en la consolidación de una propuesta pedagógica interdisciplinaria centrada en la transformación de residuos escolares, específicamente el aceite vegetal posconsumo (AVPC), como eje articulador para la enseñanza de las ciencias naturales. La integración entre problemáticas ambientales reales, procesos científicos auténticos y estrategias pedagógicas activas configura un enfoque innovador para el contexto escolar, particularmente en instituciones públicas de América Latina.

A diferencia de enfoques tradicionales basados en la transmisión fragmentada de contenidos o en prácticas experimentales descontextualizadas, esta investigación propone un modelo de educación científica situada, en el que el aprendizaje se construye a partir de la interacción directa con fenómenos del entorno y de la reflexión crítica sobre su dimensión ambiental, social y ética. La transformación del AVPC no se concibe como un ejercicio técnico aislado, sino como un recurso pedagógico integrador que permite articular conceptos científicos, actitudes sostenibles y competencias ciudadanas en un mismo proceso formativo.

El carácter diferenciador de la tesis se expresa, en primer lugar, en la incorporación de la economía circular como principio pedagógico. La valorización educativa de los subproductos derivados del proceso experimental amplía la comprensión del estudiantado sobre los sistemas productivos, favoreciendo una lectura sistémica de la ciencia aplicada y una reflexión crítica sobre el consumo, los residuos y la sostenibilidad. Este enfoque trasciende la lógica demostrativa y

posiciona la experimentación escolar como un espacio de problematización y construcción de sentido.

En segundo lugar, la contribución original del estudio radica en la articulación coherente entre dimensiones técnicas, pedagógicas y ambientales sin que ninguna de ellas se imponga como fin en sí misma. Los referentes técnicos y normativos se emplean como marcos de comparación educativa que orientan la reflexión y el análisis crítico, sin pretensión de certificación ni de validación industrial. Esta decisión metodológica fortalece el carácter formativo del proyecto y evita trasladar lógicas productivas al ámbito escolar.

Otro elemento diferenciador es el uso pedagógico de prácticas científicas propias de niveles avanzados de formación, adaptadas de manera intencionada al contexto de la educación media. La aproximación a herramientas de análisis científico no se orienta a la especialización técnica, sino a la alfabetización científica, entendida como la capacidad de interpretar evidencias, argumentar con base en datos y comprender el carácter provisional y contextual del conocimiento científico.

Asimismo, la propuesta contribuye de manera original al desarrollo de competencias en múltiples dimensiones. Más allá de la comprensión conceptual en ciencias naturales, el proyecto favorece procesos de reflexión ética, trabajo colaborativo, toma de decisiones informadas y responsabilidad ambiental. Estas competencias emergen de la experiencia educativa como asociaciones significativas entre la participación en el proceso experimental y el desarrollo de actitudes y disposiciones favorables hacia la sostenibilidad, sin establecer relaciones de causalidad directa.

Desde el punto de vista curricular e institucional, la tesis aporta un modelo viable de integración interdisciplinaria que dialoga con los lineamientos nacionales de educación científica y ambiental, demostrando que es posible articular el currículo escolar con problemáticas

contemporáneas sin desbordar las condiciones reales de la escuela pública. La flexibilidad del modelo y su carácter modular favorecen su adaptación a distintos contextos educativos, tanto urbanos como rurales.

En síntesis, la contribución original de esta tesis doctoral se sitúa en haber construido y validado pedagógicamente una estrategia de educación científica contextualizada que integra sostenibilidad, experimentación y formación ciudadana desde una perspectiva crítica e interdisciplinaria. Este enfoque no solo amplía las posibilidades didácticas de la enseñanza de las ciencias naturales, sino que ofrece un marco conceptual y práctico para repensar la educación ambiental escolar como un proceso transformador, pertinente y socialmente comprometido.

4.8 Recomendaciones para futuras investigaciones y limitaciones del estudio

Este apartado final presenta una reflexión crítica sobre las principales limitaciones del estudio, así como recomendaciones orientadas a dar continuidad, profundidad y proyección a la línea de investigación desarrollada. Estas consideraciones no desvirtúan los aportes de la tesis, sino que permiten situar sus conclusiones dentro de los alcances propios de una investigación educativa de diseño cuasi-experimental y de carácter contextualizado.

4.8.1 Limitaciones del estudio

Una de las principales limitaciones del estudio se relaciona con el tamaño de la muestra, constituida por 14 estudiantes, el cual estuvo condicionado por criterios pedagógicos, éticos y logísticos propios del contexto escolar, así como por las capacidades operativas de los laboratorios utilizados para el desarrollo experimental. Si bien la muestra permitió un seguimiento cercano y profundo de los procesos de aprendizaje, su dimensión restringe la generalización estadística de los resultados, por lo que las conclusiones deben interpretarse como válidas para contextos educativos con características similares.

No obstante, esta condición favoreció un mayor control en los procedimientos experimentales y permitió asegurar la calidad del biodiésel obtenido, fortaleciendo la validez interna del estudio y la coherencia entre los resultados pedagógicos y técnicos alcanzados.

Una limitación adicional se relaciona con la presencia de variabilidad no completamente controlada en algunas variables de análisis, derivada de la implementación del diseño en un contexto educativo real. Factores como las diferencias individuales en los procesos de aprendizaje, la ejecución experimental por parte de los estudiantes y las condiciones del entorno escolar pueden haber influido en la dispersión de los datos. No obstante, se implementaron mecanismos de control metodológico que permitieron reducir dicha variabilidad, garantizando la coherencia interna de los resultados y su validez interpretativa dentro del alcance del estudio.

De igual manera, se reconoce como limitación la ausencia de un grupo de control, lo cual restringe la posibilidad de establecer comparaciones directas entre diferentes condiciones experimentales. Sin embargo, esta decisión se fundamenta en criterios pedagógicos y contextuales, priorizando la participación equitativa de los estudiantes en la intervención. En este sentido, los resultados deben interpretarse como evidencia de cambio al interior del grupo intervenido, más que como comparaciones entre grupos independientes.

Asimismo, se reconoce como limitación la duración temporal de la intervención, circunscrita al calendario académico. Este factor impidió realizar un seguimiento longitudinal que permitiera analizar la estabilidad de los aprendizajes y de las actitudes sostenibles en el largo plazo, así como posibles procesos de transferencia a otros escenarios formativos.

Desde el punto de vista metodológico, se identifican amenazas a la validez interna, propias de investigaciones educativas en contextos reales, tales como el efecto de maduración de los estudiantes, la familiarización progresiva con los instrumentos de evaluación (prueba–reprueba)

y la influencia de variables externas no controlables, como la carga académica, la disponibilidad horaria y las condiciones de conectividad digital, sin embargo, el estudio presenta coherencia metodológica y consistencia interna, lo que permite considerar sus resultados como válidos dentro del contexto específico en el que se desarrolló la investigación.

Adicionalmente, la infraestructura técnica disponible en las instituciones educativas constituyó una restricción operativa. Algunas actividades experimentales requirieron el apoyo de entidades aliadas, lo cual evidencia que la implementación plena del modelo depende, en ciertos casos, de la existencia de redes interinstitucionales. En este sentido, los referentes normativos empleados durante el proceso experimental se utilizaron exclusivamente como marcos de comparación educativa, sin pretensión de certificación técnica o validación industrial de los productos obtenidos.

4.8.2 Proyecciones y recomendaciones para futuras investigaciones

A partir de las conclusiones del estudio y de las limitaciones identificadas, se plantean varias recomendaciones para investigaciones futuras. En primer lugar, se sugiere ampliar la muestra y diversificar los contextos geográficos, lo que permitiría explorar la adaptabilidad del modelo pedagógico en instituciones con diferentes características socioculturales y educativas.

En segundo lugar, se recomienda el desarrollo de estudios longitudinales que analicen la permanencia de las competencias científicas, ambientales y ciudadanas promovidas por la propuesta, así como su posible incidencia en decisiones académicas y comportamientos sostenibles a mediano y largo plazo.

Otra línea de proyección se orienta a la profundización disciplinar, explorando con mayor detalle áreas específicas como la química verde, la educación energética o la ética ambiental, utilizando el modelo pedagógico propuesto como marco integrador. De igual manera, se considera

pertinente avanzar en el diseño de recursos educativos abiertos, que faciliten la transferencia del modelo a otros contextos y fortalezcan comunidades de práctica docente.

Finalmente, se recomienda impulsar investigaciones colaborativas entre distintos niveles educativos, así como estudios centrados en el impacto institucional del modelo, analizando transformaciones en la cultura escolar, las prácticas pedagógicas y las decisiones curriculares asociadas a la educación ambiental y científica.

4.8.3 Consideraciones sobre replicabilidad

En relación con la replicabilidad del modelo, se concluye que su implementación en otros contextos educativos es viable siempre que se garanticen condiciones mínimas, entre las que se destacan: el cumplimiento de protocolos básicos de bioseguridad escolar; la disponibilidad de reactivos e insumos accesibles y adecuados al entorno educativo; la existencia de alianzas interinstitucionales que apoyen el proceso formativo; y la capacitación docente en metodologías activas, trabajo experimental escolar y educación ambiental crítica.

Estas condiciones no constituyen barreras excluyentes, sino orientaciones para asegurar que la réplica del modelo mantenga su carácter pedagógico, ético y formativo, sin desvirtuar los principios que sustentan la propuesta original.

En conjunto, las limitaciones y proyecciones aquí presentadas abren nuevas posibilidades de investigación y fortalecen el valor académico de la tesis, al situarla como un punto de partida sólido para el desarrollo de experiencias educativas innovadoras, contextualizadas y comprometidas con la sostenibilidad y la transformación social.

4.9 Cierre global del capítulo

A modo de cierre integrador, este capítulo consolida las conclusiones derivadas del proceso investigativo, permitiendo valorar de manera reflexiva, crítica y fundamentada el alcance

pedagógico, formativo e institucional de la propuesta desarrollada. En este sentido, se concluye que la transformación del aceite vegetal posconsumo, concebida como eje articulador del proceso de enseñanza y aprendizaje, constituye una estrategia pedagógica pertinente para integrar la educación científica con la educación ambiental desde una perspectiva contextualizada, interdisciplinaria y socialmente significativa.

La experiencia implementada evidenció que el uso de problemáticas ambientales reales como recurso didáctico favorece la construcción de aprendizajes con sentido, al vincular los contenidos curriculares de las ciencias naturales con situaciones concretas del entorno. Desde esta lógica, la propuesta pedagógica permitió fortalecer procesos de comprensión conceptual, reflexión crítica y formación de actitudes responsables frente al ambiente, evidenciando resultados estadísticamente significativos ($p < 0.05$), cuya interpretación fue realizada de manera integrada con evidencias cualitativas y técnicas, evitando una lectura reduccionista centrada exclusivamente en el valor p .

Asimismo, la coherencia entre el problema de investigación, el marco teórico y el diseño metodológico permitió garantizar la validez interna del estudio, respaldando de manera consistente los resultados obtenidos. Desde el campo de la didáctica de la química, la investigación aporta evidencia sobre el valor de la experimentación contextualizada como mediadora del aprendizaje significativo, al posibilitar que los estudiantes articulen la teoría con la práctica en la comprensión de procesos químicos como la transesterificación.

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las condiciones específicas del estudio, tales como el tamaño muestral, el diseño cuasi-experimental con grupo único y la implementación en contextos educativos reales, lo cual introduce variables que no pueden ser completamente controladas. A pesar de estas limitaciones, la convergencia entre los resultados

cuantitativos, cualitativos y técnicos fortalece la solidez del estudio y permite afirmar que los cambios observados responden de manera consistente a la intervención pedagógica implementada.

Asimismo, se concluye que la incorporación de metodologías activas, el trabajo interdisciplinar y el uso intencionado de tecnologías educativas contribuyen a resignificar el rol del estudiante como sujeto activo del aprendizaje y a posicionar al docente como mediador pedagógico. Estas estrategias favorecieron escenarios de aprendizaje participativos, colaborativos y reflexivos, coherentes con los principios del enfoque constructivista y de la educación para la sostenibilidad.

Desde el punto de vista formativo, la propuesta permitió aproximar a los estudiantes a procesos experimentales auténticos, vinculados a la transformación de residuos y a la producción de bioproductos con valor educativo. Dichos procesos, abordados desde un enfoque escolar y formativo, facilitaron la comprensión integrada de conceptos científicos y el desarrollo de una conciencia ambiental crítica. Los referentes técnicos empleados durante la experiencia se utilizaron exclusivamente como marcos comparativos de carácter educativo, sin pretensiones de certificación ni validación industrial, lo cual reafirma el sentido pedagógico de la propuesta.

En el ámbito institucional, se concluye que es posible promover innovaciones pedagógicas significativas incluso en contextos con recursos limitados, siempre que exista una planificación didáctica coherente, compromiso docente y articulación con aliados estratégicos. La experiencia fortaleció dinámicas de trabajo colaborativo, apertura a la interdisciplinariedad y proyección de la escuela como espacio de construcción de conocimiento situado.

Por otro lado, el diseño con grupo único permitió analizar de manera detallada los cambios en el proceso de aprendizaje, aunque futuras investigaciones podrían incorporar grupos de control para fortalecer la comparación entre condiciones.

Finalmente, este capítulo reafirma que la propuesta desarrollada constituye un aporte relevante al campo de la educación científica y ambiental, al ofrecer una ruta pedagógica viable para integrar sostenibilidad, experimentación escolar y formación ciudadana. Las conclusiones aquí presentadas no pretenden cerrar el debate, sino aportar elementos para la reflexión académica y abrir nuevas posibilidades de investigación e innovación educativa orientadas a la transformación social y ambiental desde la escuela.

Referencias

- Ahmad, A. L., Yasin, N. H. M., Derek, C. J. C., & Lim, J. K. (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.018>
- Ahmad, M. I., Binhweel, F., & Zaki, S. A. (2022). Utilization of polymeric materials toward sustainable biodiesel industry: A recent review. *Polymers*, 14(19), 3950. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/19/3950>
- Ahmad, S., Chaudhary, S., Pathak, V. V., Kothari, R., & Tyagi, V. V. (2020). Optimization of direct transesterification of *Chlorella pyrenoidosa* catalyzed by waste eggshell-based heterogeneous nano–CaO catalyst. *Renewable Energy*, 160, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.010>
- Ahmad, T., Danish, M., Kale, P., Geremew, B., Adeloju, S. B., Nizami, M., & Ayoub, M. (2019). Optimization of process variables for biodiesel production by transesterification of flaxseed oil and produced biodiesel characterizations. *Renewable Energy*, 139, 1272–1280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.036>
- Aiken, L. R. (2003). *Psychological testing and assessment* (11th ed.). Allyn & Bacon. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/psychological-testing-and-assessment/P2000000003374>
- Al-Hamamre, Z., Sandouqa, A., Al-Saida, B., Shawabkeh, R. A., & Alnaief, M. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous KNO₃/oil-shale ash catalyst. *Renewable Energy*, 211, 470–483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.025>

- Alfonso Cortés, C. B. (2023). Características de la educación ambiental escolar en Colombia. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa*, 3(2), 45–60. <https://editic.net/journals/index.php/ripie/article/view/155>
- Almasi, S., Najafi, G., Ghobadian, B., & Jalili, S. (2021). Biodiesel production from sour cherry kernel oil as novel feedstock using potassium hydroxide catalyst: Optimization using response surface methodology. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 35, 102089. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102089>
- Anwar, M., Rasul, M., & Ashwath, N. (2019). Optimization of biodiesel production from stone fruit kernel oil. *Energy Procedia*, 160, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.146>
- Arias Navarro, Z. A., Arias Arias, S. J., & Bermúdez Quintero, L. C. (2024). Proyecto ambiental escolar (PRAE) como estrategia pedagógica para fortalecer la educación ambiental en instituciones educativas de Colombia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 11450–11464. <https://www.ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/13310>
- Asl, M. A., Tahvildari, K., & Bigdeli, T. (2020). Eco-friendly synthesis of biodiesel from WCO by using electrolysis technique with graphite electrodes. *Fuel*, 270, 117582. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116089>
- ASTM International. (2021). *ASTM D6751: Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels*. <https://www.astm.org/d6751-20.html>
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., et al. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>

Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. Holt, Rinehart and Winston.

<https://archive.org/details/educationalpsych00ausu>

Ausubel, D. P. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento: Una perspectiva cognitiva*.

Paidós. https://books.google.com/books/about/Adquisici%C3%B3n_y_re-tenci%C3%B3n_del_conocimien.html?id=VufcU8hc5sYC

Ausubel, D. P. (2012). *The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view*. Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-5124-0>

Bazeley, P., & Jackson, K. (2013). *Qualitative data analysis with NVivo* (2nd ed.). SAGE Publications.

<https://us.sagepub.com/en-us/nam/qualitative-data-analysis-with-nvivo/book239953>

Bell, S. (2010). Project-based learning for the 21st century: Skills for the future. *The Clearing House*, 83(2), 39–43.

<https://doi.org/10.1080/00098650903505415>

Bergmann, J., & Sams, A. (2016). *Flip your classroom: Reach every student in every class every*

day. International Society for Technology in Education. <https://www.iste.org/re-sources/product?ID=3535>

Bhatnagar, S. S. (2022). Assessment of catalytic biodiesel production: A mini-review. En J. K.

Ratan, D. Sahu, N. N. Pandhare & A. Bhavanam (Eds.), *Advances in Chemical, Bio and Environmental Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96554-9_37

Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2022). *How people learn: Brain, mind, experi-*

ence, and school. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9853>

- Calixto Flores, R., & López Terán, M. A. (2025). Educación ambiental en el nivel preescolar. Un estudio exploratorio en la ciudad de México. *Revista de Educación Ambiental y Sostenibilidad*, 6(2), 1–14. <https://revistas.uca.es/index.php/REAyS/article/view/10420>
- Cerquera Mojocó, Y. F., et al. (2020). *Educación ambiental con enfoque territorial y rural*. Secretaría de Educación del Distrito. <https://repositoriosed.educacionbogota.edu.co/handle/001/3276>
- Chi, M. T. H., Kang, S. H. K., & Yaghmourian, D. L. (2021). Why students learn more from generating explanations than from reading explanations: A metacognitive account. *Educational Psychologist*, 56(2), 117–135. <https://doi.org/10.1080/00461520.2021.1882489>
- Coll, C. (2018). El currículo por competencias: ¿Qué hay de nuevo? *Revista de Educación*, 380, 16–45. <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2018-380-392>
- Collado, S., Staats, H., & Corraliza, J. A. (2019). Experiencing nature in children's summer camps: Affective, cognitive and behavioural consequences. *Journal of Environmental Psychology*, 65, 101325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101325>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates. <https://www.routledge.com/Statistical-Power-Analysis-for-the-Behavioral-Sciences/Cohen/p/book/9781134742707>
- Colnerud, G. (2015). Ethical problems in classroom research: A critical perspective. *Ethics and Education*, 10(3), 306–317. <https://doi.org/10.1080/17449642.2015.1093265>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/qualitative-inquiry-and-research-design/book246896>

Creswell, J. W. (2013). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (3rd ed.). SAGE Publications.

<https://us.sagepub.com/en-us/nam/qualitative-inquiry-and-research-design/book235677>

Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.

<https://us.sagepub.com/en-us/nam/designing-and-conducting-mixed-methods-research/book241842>

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297–334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>

Corral-Verdugo, V., & Frías-Armenta, M. (2006). Personal normative beliefs, antisocial behavior, and residential water conservation. *Environment and Behavior*, 38(3), 406–421.

<https://doi.org/10.1177/0013916505283421>

Cook, T. D., & Campbell, D. T. (1979). *Quasi-experimentation: Design & analysis issues for field settings*. Houghton Mifflin. <https://www.cambridge.org/core/books/quasiexperimentation/9E0C91A3B71FBAF6D3C1B93A0C4E8F6F>

Demirbaş, A. (2011). *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-6861-6>

Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Mortimer, E., & Scott, P. (1999). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5–12.

<https://doi.org/10.3102/0013189X023007005>

- Escobar-Pérez, J., & Cuervo-Martínez, Á. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: Una aproximación a su utilización. *Avances en Medición*, 6, 27–36. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/avances/article/view/12085>
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/discovering-statistics-using-ibm-spss-statistics/book257672>
- Ferreira, G., Boateng, P., & Sandlin, M. (2021). Environmental education in teacher preparation: Policy, research, and practice. *Journal of Sustainability Education*, 26. Recuperado de <https://www.susted.com/>
- Galindo-Quiroga, C., Pulgarín Ramírez, A., & Ospina Ramírez, D. A. (2024). Proyecto Ambiental Escolar: Dispositivo educativo en la configuración de subjetividades ambientales. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (35), 75–90. <https://revistas.flacsoandes.edu.ec/letrasverdes/article/view/6014>
- Galvis Riaño, C. J., Perales Palacios, F. J., & Ladino Ospina, Y. (2023). ¿Cómo implementan la educación ambiental en sus aulas profesores de centros educativos rurales colombianos? *Contextos Educativos. Revista de Educación*, (31), 89–105. <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/contextos/article/view/3519>
- George, D., & Mallery, P. (2019). *IBM SPSS Statistics 26 Step by Step: A simple guide and reference* (16.^a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429056765>
- Gil-Jaurena, I. (2019). Uso de plataformas virtuales para el aprendizaje autónomo: Entre la presencialidad y la virtualidad. *Revista Educación XXI*, 22(1), 17–39. <https://doi.org/10.5944/educxx1.21455>

González, C., Camargo, R., & Mejía, S. (2021). Parámetros físico-químicos del biodiésel en contextos educativos. *Revista Colombiana de Educación en Ciencias*, 19(2), 45–61.

<https://doi.org/10.17227/rcec.num19-12042>

Guzmán, M., Herrera, L., & Díaz, C. (2023). Aula invertida para proyectos de sostenibilidad.

Educación Científica Contemporánea, 29(1), 88–105. <https://educacioncientificacontemporanea.org/guzman-herrera-diaz-2023>

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). Multivariate data analysis (8th ed.). Cengage Learning.

<https://www.cengage.com/c/multivariate-data-analysis-8e-hair/>

Harlen, W. (2010). *Principles and big ideas of science education*. Association for Science Education. <https://www.ase.org.uk/resources/big-ideas>

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2020). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2022). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.

<https://www.mheducation.com.mx/metodologia-de-la-investigacion-7ed-hernandez.html>

Hodson, D. (2014). Learning science, learning about science, doing science: Different goals demand different learning methods. *International Journal of Science Education*, 36(15), 2534–2553.

<https://doi.org/10.1080/09500693.2014.899722>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2019). *NTC 5444: Requisitos para biodiésel tipo B100*. <https://www.icontec.org/ntc-5444>

- Keller, H., Engelhardt, P. V., & Newton, J. (2022). Energy education for the future: Incorporating biofuel production in high school chemistry. *Journal of Chemical Education*, 99(8), 2815–2822. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00295>
- Krajcik, J. S., McNeill, K. L., & Reiser, B. J. (2018). Learning-goals-driven design model: Developing curriculum materials that align with the Next Generation Science Standards. *Journal of Science Teacher Education*, 29(4), 293–308. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2018.1469464>
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for *t*-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, 863. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel Psychology*, 28(4), 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x>
- Leicht, A., Heiss, J., & Byun, W. J. (2018). *Issues and trends in education for sustainable development*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261445>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/naturalistic-inquiry/book842>
- López, C., Ramírez, G., & Hernández, M. (2022). *Química experimental aplicada: Una guía para docentes y estudiantes*. Universidad Nacional de Colombia. <https://www.unal.edu.co/quimica-experimental-aplicada>
- López, S., & Jiménez, F. (2022). TIC y educación ambiental: Una experiencia con Moodle. *Pedagogía y Tecnología*, 7(3), 40–58. <https://pedagogiaytecnologia.org/lopez-jimenez-2022>
- Lopera Pérez, M., Rieckmann, M., & Marín Mejía, M. (2023). Educación ambiental y los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Experiencia de formación de docentes en contextos

- rurales. *Bio-grafía*, 16(30), 123–140. <https://revistas.upn.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/18258>
- Martínez, M., & Sabariego, M. (2016). Ética en la investigación educativa con menores. *Revista de Educación*, 371, 44–67. <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2016-371-330>
- Martínez, M., & Sabariego, M. (2016). Participación, ética y calidad en la investigación educativa. *Revista de Educación*, (372), 172–197. <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2016-372-325>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2019). Qualitative data analysis: A methods sourcebook (4th ed.). SAGE Publications. https://books.google.com/books/about/Qualitative_Data_Analysis.html?id=fjh2DwAAQBAJ
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2020). *Guía de prácticas pedagógicas para la educación ambiental en Colombia*. <https://www.mineduacion.gov.co/portal/educacionambiental>
- Ministerio de Educación Nacional de Colombia (MEN). (2021). *Lineamientos para el fortalecimiento de la educación media con enfoque en competencias para el siglo XXI*. <https://www.mineduacion.gov.co/1759/w3-article-407782.html>
- Morales, G., Beltrán, R., & Ramírez, J. (2023). Educación ambiental en el currículo escolar colombiano. *Revista Praxis Educativa*, 11(1), 20–39. <https://revistapraxiseducativa.org/morales-beltran-ramirez-2023>
- Moreno-Sierra, D. F. (2022). *Educación ambiental crítica freireana: análisis de corrientes y aportes para la formación de profesores*. *Praxis & Saber*, 13(34), 47–64. <https://doi.org/10.19053/22160159.v13.n34.2022.13936>
- Moodle.org. (2024). *About Moodle*. <https://moodle.org/about/>

- Nacimiento, D. M., Santos, B. S., & Moura, E. A. (2017). Spectroscopic monitoring of biodiesel synthesis: A learning experience in chemistry education. *Química Nova*, 40(2), 211–217.
<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160165>
- Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2010). *The theory underlying concept maps and how to construct and use them*. Florida Institute for Human and Machine Cognition.
<https://cmap.ihmc.us/docs/theory-of-concept-maps>
- Nguyen, T., Rienties, B., & Toetenel, L. (2023). The effects of learning design on student engagement and learning performance. *Computers in Human Behavior*, 138, 107433.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107433>
- OCDE. (2018). *Resultados PISA 2018: Lo que los estudiantes saben y pueden hacer (Volumen I)*. <https://doi.org/10.1787/5f07c754-es>
- OCDE. (2018). *PISA 2018 Results (Volume I): What Students Know and Can Do*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5f07c754-en>
- OpenAI. (2025). *ChatGPT (versión GPT-5)* [Modelo de lenguaje]. <https://openai.com>
- Patton, M. Q. (2015). *Qualitative research & evaluation methods* (4th ed.). SAGE Publications.
<https://us.sagepub.com/en-us/nam/qualitative-research-evaluation-methods/book232962>
- Pooley, J. A., & O'Connor, M. (2021). Environmental education and emotional engagement: The role of emotion in learning for sustainability. *Environmental Education Research*, 27(5), 685–702. <https://doi.org/10.1080/13504622.2021.1901776>
- PISA. (2018). *PISA 2018 Results (Volume I): What Students Know and Can Do*. OECD.
<https://doi.org/10.1787/5f07c754-en>

- Quintero Ferrer, C., & Solano Peña, J. M. (2023). Educación ambiental en cambio climático, una tarea desde la primera infancia. *Educación y Educadores*, 26(2), 35–52. <https://educacionyeducadores.unisabana.edu.co/index.php/eye/article/view/20717>
- Ramírez, C., & Castañeda, M. (2022). Estrategias de educación ambiental desde el enfoque por proyectos. *Revista Latinoamericana de Educación Ambiental*, 25(3), 115–130. <https://revistalatioeducacionambiental.org/ramirez-castaneda-2022>
- Ramírez-Montoya, M. S., & Valenzuela González, J. R. (2022). Innovación educativa con uso de tecnologías digitales: Perspectivas, retos y propuestas. *RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 25(1), 25–46. <https://doi.org/10.5944/ried.25.1.30269>
- Ríos, L., & Cardozo, P. (2021). Tecnologías digitales en la enseñanza de las ciencias. *Docencia e Innovación*, 12(2), 60–78. <https://docenciainnovacion.org/rios-cardozo-2021>
- Sáez-López, J. M., Román-González, M., & Vázquez-Cano, E. (2019). El aprendizaje invertido (Flipped Classroom) en Educación Secundaria: análisis comparativo de los resultados académicos en Ciencias. *Comunicar*, 27(58), 95–104. <https://doi.org/10.3916/C58-2019-09>
- Salas-Rueda, R. A. (2021). Moodle como herramienta para el aprendizaje autónomo y colaborativo. *Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 25(3), 123–137. <https://doi.org/10.21503/rete.v25i3.2453>
- Saldaña, J. (2016). *The coding manual for qualitative researchers* (3rd ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/the-coding-manual-for-qualitative-researchers/book243616>

- Salinas, E., & Ortega, D. (2021). Producción de biodiésel escolar: Una estrategia interdisciplinar. *Educación y Tecnología*, 18(2), 32–47. <https://educacionytecnologia.org/salinas-ortega-2021>
- Santos, R., Oliveira, L., & Alves, A. (2019). Educational biodiesel production kits: Learning science through sustainable energy. *Renewable Energy*, 139, 1270–1278. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.043>
- Sharma, D., & Singh, A. (2021). Application of Taguchi and response surface methodology approach to a sustainable model developed for a compression-ignition engine using polanga biodiesel/diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1177/0959651820965301>
- Sharma, Y. C., & Singh, B. (2021). Progress and recent trends in biodiesel production: An overview. *Biofuels*, 12(2), 149–165. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1681401>
- Sterling, S. (2011). *Sustainability education: Perspectives and practice across higher education*. Routledge. <https://www.routledge.com/Sustainability-Education/Sterling/p/book/9781844078776>
- Strauss, A., & Corbin, J. (2015). *Investigación cualitativa: Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada* (3.^a ed.). Ediciones Morata. <https://www.edicionesmorata.com/libros/investigacion-cualitativa/>
- Strauss, A., & Corbin, J. (2015). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (4th ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/basics-of-qualitative-research/book235578>

- Talanquer, V. (2017). Progressions in reasoning about structure–property relationships. *Chemistry Education Research and Practice*, 18(3), 435–446.
<https://doi.org/10.1039/C7RP00012B>
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (1998). *Mixed methodology: Combining qualitative and quantitative approaches*. SAGE Publications.
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2003). *Handbook of mixed methods in social & behavioral research*. SAGE Publications.
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2010). *SAGE handbook of mixed methods in social & behavioral research* (2nd ed.). SAGE Publications.
<https://us.sagepub.com/en-us/nam/the-sage-handbook-of-mixed-methods-in-social-behavioral-research/book233626>
- Tilbury, D. (2015). *Education for Sustainable Development: An expert review of processes and learning*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000234035>
- Tobón, S. (2013). *Formación basada en competencias: Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación*. Ecoe Ediciones. <https://www.ecoediciones.com/producto/formacion-basada-en-competencias-pensamiento-complejo-curriculo-didactica-y-evaluacion/>
- Torres, A., & Nieto, H. (2020). Transformación del aceite vegetal posconsumo en jabones ecológicos como estrategia educativa. *Investigación Escolar y Medioambiente*, 9(1), 77–92.
<https://investigacionescolarymedioambiente.org/torres-nieto-2020>
- UNESCO. (2020). *Education for sustainable development: A roadmap*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374802>

- Vásquez, J. A., Sneider, C., & Comer, M. (2020). *STEM lesson essentials: Integrating science, technology, engineering, and mathematics*. Heinemann. <https://www.heinemann.com/products/e10939.aspx>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press. <https://www.hup.harvard.edu/books/9780674576292>
- Vygotsky, L. S. (2018). El desarrollo de los procesos psicológicos superiores. Crítica. ISBN (ejemplo de ed.): 978-84-8432-046-4.
- Wals, A. E. J. (2015). Beyond unreasonable doubt: Education and learning for socio-ecological sustainability in the Anthropocene. *Wageningen University*.
<https://research.wur.nl/en/publications/beyond-unreasonable-doubt-education-and-learning-for-socio-ecological-sustainability>
- Yusuf, N. N. A. N., Kamarudin, S. K., & Yaakub, Z. (2018). Overview on biodiesel production via transesterification process. *Progress in Energy and Combustion Science*, 63, 161–188. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.001>
- Zimmermann, A., & Moser, G. (2022). Environmental concern and pro-environmental behavior: Sociodemographic and cultural influences. *Environment and Behavior*, 54(1), 3–30.
<https://doi.org/10.1177/00139165211021118>

Apéndices

Apéndice A. Autorización de datos de investigación por parte de instituciones educativas las Américas y Gabriela Mistral – Bucaramanga, Santander, Colombia.

Este apéndice presenta la documentación relacionada con la caracterización de la población participante y los aspectos éticos del estudio, incluyendo los consentimientos informados y los criterios de selección de los estudiantes. Su inclusión garantiza la transparencia del proceso investigativo y el cumplimiento de los principios éticos en investigación educativa.



INSTITUCIÓN EDUCATIVA GABRIELA MISTRAL Bucaramanga

MISIONERAS DEL DIVINO MAESTRO
NIT. 690.205.697-3 DANE 166001000541 Reg. SED No. 086
La Rectora y Secretaría de la INSTITUCIÓN EDUCATIVA GABRIELA MISTRAL, Plantel oficial aprobado por el Ministerio de Educación Nacional en su parte resolutoria dice: Aprobar hasta 1995 inclusive, según Resolución 7559 del 4 de Diciembre de 1989. Los estudios correspondientes a los grados 6º, 7º, 8º, 9º del nivel de Educación Básica Secundaria con orientación comercial, 10º y 11º de nivel de Educación Media Vocacional MODALIDAD COMERCIAL Jornada Mañana y de carácter femenino, Prorrogada según Resolución 0708 del 20 de Agosto de 1997, hasta nuevo acto administrativo.



Bucaramanga, 10 de julio de 2025

Señor
Alfonso Vásquez Atochero
Analista de Medio Proyecto en Red
Universidad Americana de Europa

Asunto: Autorización uso de Datos investigación con fines pedagógicos.

Reciba un cordial saludo:

Me dirijo a usted en mi calidad de Rector de la Institución Educativa Gabriela Mistral para otorgar la autorización para el uso de la información obtenida en el proyecto de aula titulado "Implementación de aula invertida para la producción de biodiesel a partir del aceite usado de la cafetería de la Institución", realizado en nuestra institución como parte del trabajo de campo para el Doctorado en Educación del docente Robinson Mancilla identificado con cédula de ciudadanía No. 1.098.641.818

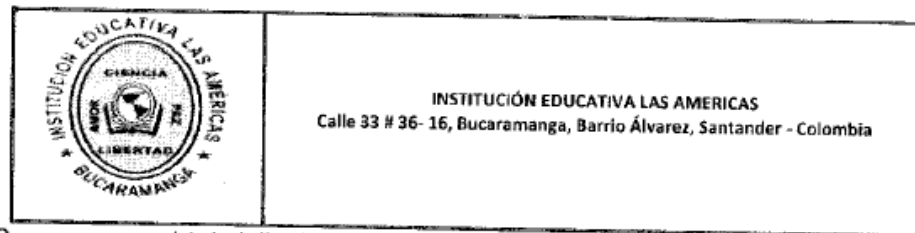
El proyecto mencionado ha sido desarrollado con el objetivo de fomentar la innovación educativa y la sostenibilidad ambiental, y ha generado información valiosa que puede ser de gran utilidad para fines académicos y de investigación. Por la presente, autorizo el uso de dicha información en para el trabajo de campo para los fines que se consideren pertinentes, siempre y cuando se respeten los derechos de autor y se reconozca debidamente la fuente de la información.

Agradezco de antemano su atención y quedo a su disposición para cualquier consulta adicional.

Atentamente,

Jhon Enrique Bohórquez López
Rector





Bucaramanga, 14 de julio de 2025

Señor
Alfonso Vásquez Atochero
Analista de Medio Proyecto en Red
Universidad Americana de Europa

Asunto: Autorización uso de datos investigación con fines pedagógicos

Reciba un cordial saludo

Me dirijo a usted en mi calidad de Rector de la Institución Educativa Las Américas para otorgar la autorización para el uso de la información obtenida en el proyecto de aula titulado "Implementación de aula invertida para la producción de biodiesel a partir del aceite usado de la cafetería de la Institución", realizado en nuestra institución como para del trabajo de campo para el Doctorado en Educación del docente Robinson Andres Mancilla Estupiñán, identificado con cedula de ciudadanía No. 1.098.641.818. de Bucaramanga.

El proyecto mencionado ha sido desarrollado con el objetivo de fomentar la innovación educativa y la sostenibilidad ambiental, y ha generado información valiosa que puede ser de gran utilidad para fines académicos y de investigación.

Por la presente autorizo el uso de dicha información obtenida del trabajo de campo para los fines que consideren pertinentes, siempre y cuando se respeten los derechos de autor y se reconozca debidamente la fuente de la información.

Agradezco de antemano su atención y quedo a su disposición para cualquier consulta adicional

Atentamente,


Germán Romero Cifuentes
Rector


RECTORIA

Apéndice B. Plataforma institucional Gabriela Mistral – cargue de proyecto de aula al público. <https://institutogabrielamistraldivinomaestro.edu.co/ginvestigacion.html>

Este apéndice presenta el registro del proyecto pedagógico en la plataforma institucional de la Institución Educativa Gabriela Mistral, donde se evidencia su socialización y acceso público dentro del entorno educativo. La inclusión de este soporte permite validar la articulación del estudio con los procesos institucionales de investigación escolar, así como su proyección hacia la comunidad académica. De este modo, se garantiza la trazabilidad del proyecto y su coherencia con las dinámicas de divulgación y apropiación del conocimiento en contextos educativos reales.

13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS

Proyecto de Aula

¡Leer más!

Implementación de aula invertida para la producción de biodiésel a partir del aceite usado de la cafetería de la Institución Educativa Gabriela Mistral

Se emplearon diversas estrategias de aprendizajes propias de la filosofía Blanco Nájera adoptadas por la institución, cuyo principio fundamental se basa en la afirmación: Educar es enseñar a vivir, creándose una metodología basada en el constructivismo y el aprendizaje autónomo en las estudiantes.

<https://institutogabrielamistraldivinomaestro.edu.co/ginvestigacion.html>

1/14



13/7/25, 18:14

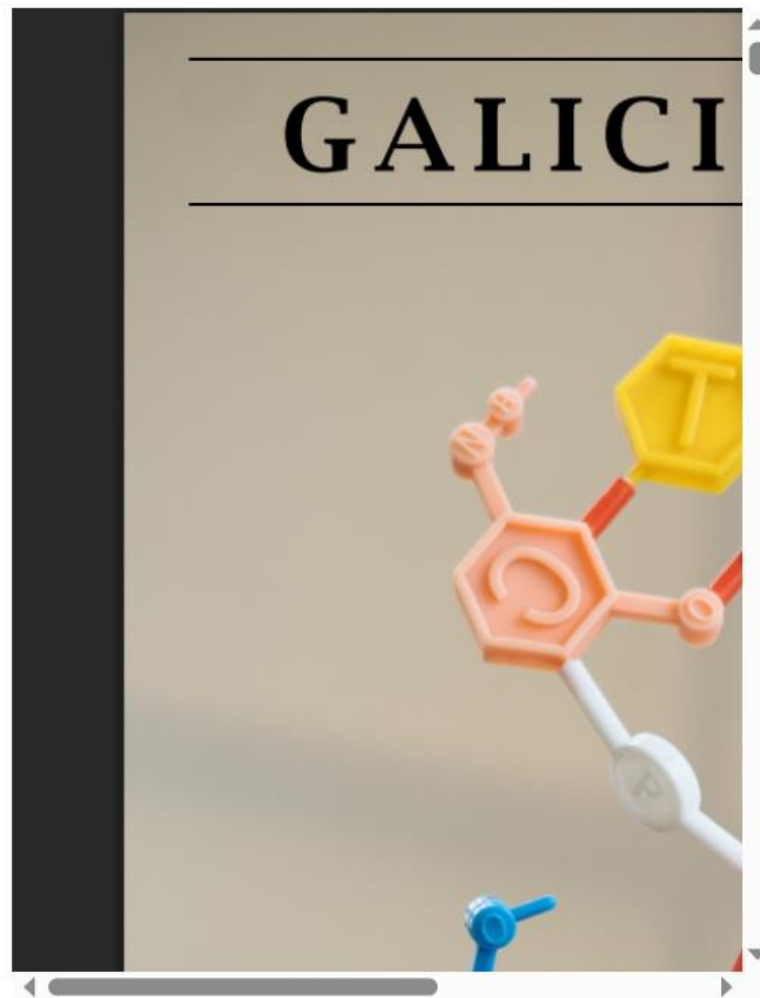
Grupo de investigación INGAMIS

Revista internacional donde fue publicado el artículo

13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS

1 / 60



ANÁLISIS PREVIOS

<https://institutogabrielamistraldivinomaestro.edu.co/ginvestigacion.html>

3/14

13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS

Problemas



Contaminación del agua

La eliminación de aceite usado en el desagüe o en cuerpos fluviales pueden contaminar fuentes de agua dulce, subterránea y marina dado a la formación de emulsiones, impidiendo la entrada de oxígeno y afectando la vida acuática en los lugares aledaños a la institución educativa Gabriela Mistral.



Contaminación del suelo

Si el aceite usado se vierte o se elimina de manera inadecuada en el suelo, ocasiona un desastre ambiental, afectando la calidad y fertilidad de la tierra, esto conlleva a la generación de diversas consecuencias negativas para el desarrollo y crecimiento de los cultivos y el medio ambiente en general dentro de la institución educativa Gabriela Mistral o en los sitios alejados.



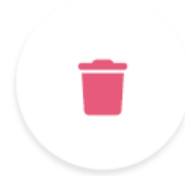
Daños a la salud humana

La exposición prologada al aceite usado y sus subproductos puede ocasionar efectos nocivos en la salud humana. La inhalación de los vapores provenientes de dicho aceite conlleva a la aparición de

13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS

problemas respiratorios, por último, la exposición al contacto directo con la piel puede provocar enfermedades cutáneas como lo son: irritación y dermatitis (Loddé & Roguedas, 2014).



Falta de infraestructura adecuada

La falta de instalaciones más adecuadas y sistemas de recogida y reciclaje de aceite usado en la institución educativa Gabriela Mistral dificulta su gestión adecuada. Esto lleva a que gran cantidad de aceite usado termine en el desagüe o en la basura, en lugar de ser reciclado.

Métodos e instrumentos



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS

¡Ver más!

ACTIVIDADES

Práctica de laboratorio

13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS



¡Ver más!



13/7/25, 18:14

Grupo de investigación INGAMIS

¿Donde encontrarnos?

Copyright © Todos los derechos reservados.

Apéndice C. Consentimiento firmado padres de familia, para autorización de datos de los estudiantes de la institución educativa Las Américas y La Gabriela Mistral Bucaramanga

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito Thania Alejandra Rueda Reyes, alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñán, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: Thania Alejandra Rueda Reyes.

Nombre y Firma del Padre o Tutor: Nirley Reyes Aparicio

Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Rob Carlos Vega G.

Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias

Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito CRISTIAN MORENO, alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñán, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: CRISTIAN MORENO

Nombre y Firma del Padre o Tutor: SANDRA COALTA

Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias

[Firma]
Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito Sofia Roci Flores, alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñan, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: Sofia Roci Flores

Nombre y Firma del Padre o Tutor: Mónica Aracena Flores Nuñez.

Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Los Carlos Vega G.

Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias



Robinson Andrés Mancilla Estupiñan

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito Carolina Castro Herrera, alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñán, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: Carolina Castro Herrera Carolina Castro Herrera
Nombre y Firma del Padre o Tutor: Jenny S. Herrera Lopez Jenny S. Herrera Lopez
Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Robinson Mancilla Robinson Mancilla
Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias

[Firma]
Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito KAROL YORLEY PEREZ S alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñán, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: KAROL PEREZ

Nombre y Firma del Padre o Tutor: Claudia Yorley Sanchez pedraza

Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Robinson Mancilla

Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias

[Firma]
Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

COORDINACIÓN ACADÉMICA

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito Ricardo Andrés Murillo, alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñán, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: Ricardo Andrés Murillo Pinzón

Nombre y Firma del Padre o Tutor: Elda Bonanno Pinzon

Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Robinson Mancilla

Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias

Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

Doctorado en Educación – Universidad Americana de Europa

El suscrito Ronald Jhon Medina Jerez, alumno de la institución educativa Las Américas con domicilio Cl. 34 #16-19, Bucaramanga, Santander, acepto de manera voluntaria que se me incluya como sujeto de estudio en el proyecto de investigación denominado "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiesel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico.". Y en el entendido de que: se solicita participar en el proyecto doctoral del Maestro Robinson Andrés Mancilla Estupiñán, estudiante del Doctorado en Educación, adscrito a la Facultad de Educación de la Universidad Americana de Europa ubicada en Av. Bonampak Sm. 6-Mz. 1, Lt. 1, 77500 Cancún, Q.R., México.

¿Cuál es el objetivo de este estudio? Diseñar, implementar y evaluar una estrategia pedagógica interdisciplinaria basada en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, con el fin de fortalecer la comprensión conceptual en ciencias naturales y promover actitudes sostenibles en estudiantes de educación media, mediante un enfoque constructivista y el uso de herramientas como el aula invertida y plataformas virtuales.

He leído y escuchado satisfactoriamente las explicaciones sobre este estudio y he tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy enterado para participar en este estudio y sé que puedo retirarme de él en cualquier momento.

Autorizo el uso de la información para los propósitos de la investigación. Estoy de acuerdo en participar en este estudio. Mi participación en esta investigación es voluntaria.

Mi decisión de participar o no en este proyecto no afectará sus relaciones actuales o futuras con la Universidad Americana de Europa.

Nombre y firma del participante: Ronald Medina

Nombre y Firma del Padre o Tutor: Wilmer Medina P.

Nombre y Firma del docente frente a Grupo: Robinson Mancilla

Nombre y firma del coordinador de la institución: [Firma]

Gracias

[Firma]
Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Doctorado en Educación

Universidad Americana de Europa

Lugar y Fecha: Bucaramanga 09 de junio de 2025

Apéndice D. Encuesta NVIVO

Este apéndice contiene los instrumentos utilizados para la caracterización inicial de los estudiantes, permitiendo establecer una línea base en términos de conocimientos previos y actitudes frente a la temática abordada en la investigación.

Docente: Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

Encuesta Cualitativa Posterior a la Intervención Pedagógica

Título del proyecto: "Integración de la educación ambiental en la enseñanza de ciencias naturales: obtención de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo como recurso pedagógico"

Objetivo del instrumento: Explorar las percepciones, aprendizajes y transformaciones actitudinales de los estudiantes tras participar en el proyecto interdisciplinar de producción de biodiésel, bioplásticos y subproductos, para su posterior análisis cualitativo mediante NVivo 12.

Instrucciones:

Responde con sinceridad y amplitud las siguientes preguntas. No hay respuestas buenas o malas. Tu experiencia es muy valiosa para esta investigación.

I. Experiencia de aprendizaje

1. ¿Cómo describirías tu experiencia participando en la producción de biodiésel y bioplásticos a partir de aceite vegetal usado?
2. ¿Qué conceptos científicos consideras que comprendiste mejor gracias a esta experiencia (por ejemplo, reacciones químicas, mezclas, volumen, energía, sostenibilidad)?
3. ¿Hubo algo que te sorprendió o cambió tu forma de ver los residuos como el aceite vegetal usado? ¿Por qué?

II. Metodología y dinámica pedagógica

1. ¿Qué opinas del uso de las plataformas Moodle e Integra para complementar el aprendizaje práctico? ¿Te ayudaron a aprender mejor? Explica.
2. ¿Cómo fue trabajar con tus compañeros durante los experimentos? ¿Qué aprendiste del trabajo colaborativo?
3. ¿Qué piensas del modelo de aula invertida (donde revisabas materiales antes de la clase)? ¿Te pareció útil o diferente a otras clases?

III. Impacto personal y actitudinal

1. Después del proyecto, ¿ha cambiado tu forma de pensar sobre la ciencia y su utilidad en la vida real? Explica con un ejemplo.
2. ¿Qué opinas sobre la posibilidad de usar residuos como el aceite para crear productos útiles como biodiésel o bioplásticos?
3. ¿Consideras que tu actitud hacia el cuidado del ambiente ha cambiado tras el proyecto? ¿Por qué sí o por qué no?

Docente: Robinson Andrés Mancilla Estupiñán

IV. Evaluación de la propuesta pedagógica

1. ¿Recomendarías este tipo de proyecto a otros estudiantes? ¿Por qué?
2. ¿Qué aspectos del proyecto te gustaría que se repitieran o mejoraran si se implementara de nuevo?
3. ¿Qué fue lo más significativo para ti de todo el proceso?

Gracias por tu participación. Tu testimonio es muy importante para mejorar la educación científica y ambiental en nuestras instituciones.

 Nota para el análisis con NVivo 12:

Este instrumento fue diseñado para permitir la codificación abierta y axial con las siguientes categorías emergentes esperadas:

- Comprensión conceptual
- Valoración del aprendizaje activo
- Percepción de la ciencia
- Conciencia ambiental crítica
- Trabajo colaborativo
- Impacto emocional y motivacional
- Apropiación de conocimientos interdisciplinarios
- Representaciones sobre el residuo como recurso

Apéndice E. Encuesta 1 (diagnóstico de conceptos previos)

Este apéndice incluye el instrumento de encuesta aplicado en la fase inicial (pretest), diseñado para evaluar la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles de los estudiantes antes de la intervención pedagógica.

27/7/25, 22:38

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

Desarrollo proyecto de aula fase 1 - 16 de mayo de 2023

* Indica que la pregunta es obligatoria

1. 1. ¿Autoriza el uso de su información con fines académicos? *

Dropdown

Marca solo un óvalo.

- ☐ SI
☐ NO

2. 2. Indique su nombre completo *

3. 3. Indique su grado en el colegio *

4. 4. Teniendo en cuenta lo aprendido en las asignaturas de biología, tecnología o química, defina que es una mezcla *

27/7/25, 22:38

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

5. 5. Las mezclas se pueden clasificar en: *

1 punto

Selecciona todos los que correspondan.

- ☐ Mezclas homogéneas y mezclas directas
- ☐ Mezclas homogéneas y mezclas heterogéneas
- ☐ Mezclas solubles y mezclas insolubles
- ☐ Mezclas polares y mezclas apolares

6. 6. El proceso de transesterificación hace referencia a: *

1 punto

Marca solo un óvalo.

- ☐ Generar triglicéridos a partir del aceite reciclado y alcohol empleando la transesterificación
- ☐ Generar Biodiesel y glicerina por medio de la reacción de las grasas que contiene aceite vegetal y un alcohol
- ☐ La aplicación de la propiedad de la transesterificación que sufre la glicerina para transformarse en aceite y alcohol
- ☐ Un proceso para la producción del alcohol empleado biodiesel y grasas vegetales

27/7/25, 22:38

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

7. Mencione que tipo de mecanismo de separación emplearía para separar aceite y agua * 1 punto



Marca solo un óvalo.

- ☐ Evaporación
☐ Decantación
☐ Destilación
☐ Filtración

27/7/25, 22:38

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

8. Mencione el uso de las probetas en el laboratorio de química *

1 punto



Marca solo un óvalo.

- ☐ Medir volúmenes superiores más rápido que las pipetas, aunque con menor precisión
- ☐ Se utilizan para calentar las diferentes sustancias en el laboraotio.
- ☐ Medir densidades superiores más rápido que las pipetas, aunque con menor precisión
- ☐ Se utilizan para medir la fuerza que se aplica a los diferentes materiales de laboratorio

27/7/25, 22:38

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga

9. 9. ¿Qué es el papel de pH? *

1 punto



Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios

Apéndice F. Encuesta 2 (evaluación post-intervención)

Este apéndice presenta el instrumento de encuesta aplicado en la fase final (postest), cuyo propósito fue identificar los cambios en la comprensión conceptual y en las actitudes sostenibles tras la implementación de la propuesta pedagógica.

27/7/25, 22:42

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

Desarrollo proyecto de aula fase 2 - 18 de mayo de 2023

* Indica que la pregunta es obligatoria

1. 1. ¿Autoriza el uso de su información con fines académicos? *

⌵ Dropdown

Marca solo un óvalo.

☐ SI

☐ NO

2. 2. Indique su nombre completo *

3. 3. Indique su grado en el colegio *

4. 4. Teniendo en cuenta lo aprendido en las asignaturas de biología, tecnología o química, defina que es una mezcla *

27/7/25, 22:42

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

5. 5. Las mezclas se pueden clasificar en: *

1 punto

Selecciona todos los que correspondan.

- ☐ Mezclas homogeneas y mezclas directas
- ☐ Mezclas homogeneas y mezclas heterogéneas
- ☐ Mezclas solubles y mezclas insolubles
- ☐ Mezclas polar y mezclas apolares

6. 6. El proceso de transesterificación hace referencia a: *

1 punto

Marca solo un óvalo.

- ☐ Generar trigliceridos a partir del aceite reciclado y alcohol empleando la transesterificación
- ☐ Generar Biodiesel y glicerina por medio de la reacción de las grasas que contiene aceite vegetal y un alcohol
- ☐ La aplicación de la propiedad de la transesterificación que sufre la glicerina para transformarse en aceite y alcohol
- ☐ Un proceso para la producción del alcohol empleado biodiesel y grasas vegetales

27/7/25, 22:42

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

7. Mencione que tipo de mecanismo de separación emplearía para separar aceite y agua * 1 punto



Marca solo un óvalo.

- ☐ Evaporación
☐ Decantación
☐ Destilación
☐ Filtración

27/7/25, 22:42

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

8. 8. Mencione el uso de las probetas en el laboratorio de química *

1 punto



Marca solo un óvalo.

- ☐ Medir volúmenes superiores más rápido que las pipetas, aunque con menor precisión
- ☐ Se utilizan para calentar las diferentes sustancias en el laboraotio.
- ☐ Medir densidades superiores más rápido que las pipetas, aunque con menor precisión
- ☐ Se utilizan para medir la fuerza que se aplica a los diferentes materiales de laboratorio

27/7/25, 22:42

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

9. 9. ¿Qué es el papel de pH? *

1 punto



10. 10. ¿Se sintió a gusto con la método constructivista empleado para la elaboración del proyecto integrador?

* 1 punto

Marca solo un óvalo.

☐ SI

☐ NO

27/7/25, 22:42

Semillero de Investigación Gabriela Mistral - Las Américas Bucaramanga - Encuesta 2 - Medición

11. 11. Teniendo en cuenta el el proyecto de aula realizado respecto a la obtención del biodiesel, y la metodología implementada por el docente Robinson Mancilla. ¿Le gustaria participar en futuros proyectos de investigación? * 1 punto

Marca solo un óvalo.

- ☐ SI
☐ NO

12. 12.Teniendo en cuenta el desarrollo del proyecto de aula realizado por el docente robinson mancilla califique de 1 a 5 dicha actividad tomando como base el conocimiento que adquirió en la practica, donde 1 es muy malo, 2 es malo, 3 es regular, 4 es bueno y 5 es excelente. * 1 punto

Marca solo un óvalo.

- ☐ 1
☐ 2
☐ 3
☐ 4
☐ 5

13. 13. Teniendo en cuenta el aprendizaje autonomo de que manera usted contribuyo con su aprendizaje: * 1 punto

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios

Apéndice G. Guía base para la obtención de biodiesel

Este apéndice contiene la guía de observación utilizada durante el desarrollo de la intervención, la cual permitió registrar comportamientos, interacciones, uso del lenguaje científico y dinámicas de trabajo colaborativo en el aula y el laboratorio.



Guía base para la obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo

Título del Proyecto Educativo

Transformación del aceite vegetal posconsumo: hacia una educación ambiental con sentido científico y sostenible

Objetivo General

Guiar al estudiante en el proceso de obtención de biodiésel mediante transesterificación alcalina del aceite vegetal posconsumo, integrando conocimientos científicos, habilidades experimentales y actitudes sostenibles.

Materiales y Reactivos Necesarios por grupo estudiantes

Reactivos

Reactivo	Cantidad Aproximada
Aceite vegetal usado (filtrado)	250 mL
Metanol (CH_3OH)	100 mL
Hidróxido de sodio (NaOH) sólido	5 g
Agua destilada	500 mL
Etanol (opcional)	50 mL

Materiales y Equipos

Material/Equipo	Cantidad por grupo
Vaso precipitado de 250 mL	1
Vaso precipitado de 500 mL	1
Probeta graduada de 100 mL	1



Balanza digital (± 0.01 g)	1
Varilla de agitación	1
Termómetro de laboratorio	1
Papel indicador de pH o pH-metro	1
Embudo plástico	1
Filtro de papel o malla fina	1 unidad
Botella plástica de 1 L	1
Frasco con tapa	1
Agitador magnético (opcional)	1
Gafas de seguridad	1 por estudiante
Guantes de nitrile	1 par por estudiante
Bata de laboratorio	1 por estudiante

Nota de seguridad: Realizar el procedimiento con todos los elementos de protección personal (EPP) y bajo supervisión docente.

Paso 1: Preparación de los materiales y espacio de trabajo

-  Limpia tu espacio de trabajo con alcohol y asegúrate de que los materiales estén organizados.
-  Ponte los elementos de protección personal: bata, guantes, gafas y tapabocas.
-  Verifica que tengas todos los materiales enumerados en la sección de “materiales necesarios”.

 **Importante:** La seguridad es lo primero. Nunca trabajes solo o sin supervisión.

Paso 2: Filtrado del aceite vegetal posconsumo

-  Vierte el aceite vegetal usado (previamente recolectado) en un embudo con filtro de papel.
-  Recoge el aceite filtrado en un vaso de precipitados limpio (mínimo 100 mL).



- 🔥 Si el aceite está muy turbio o viscoso, caliéntalo suavemente a 60 °C durante 10 minutos para facilitar el filtrado.

📷 *Figura 1. Filtrado del aceite vegetal posconsumo*

🥄 **Paso 3: Preparación del alcoholato (metóxido de sodio o potasio)**

- 🧴 En un vaso de precipitados, mide 40 mL de metanol (puede variar según el aceite).
- 🧂 Añade cuidadosamente 1 g de hidróxido de sodio (NaOH) o KOH (potasio), y agita con varilla de vidrio hasta que se disuelva completamente.
- ⚠️ ¡Cuidado! Este paso es exotérmico (libera calor).

📷 *Figura 2. Preparación del metóxido de sodio*

🥄 **Paso 4: Mezcla del alcoholato con el aceite**

- 🌡️ Calienta el aceite previamente filtrado a 50 °C en un vaso de precipitados grande.
- 🧴 Añade lentamente el metóxido de sodio al aceite caliente, con agitación constante durante 15-20 minutos.
- 🌀 Si tienes acceso a un agitador magnético, úsalo. De lo contrario, agita manualmente con varilla de vidrio.

📷 *Figura 3. Reacción de transesterificación en agitación*

🥄 **Paso 5: Decantación y separación de fases**

- 🧴 Una vez completada la reacción, vierte la mezcla en un embudo de decantación o en un frasco con tapa.
- ⌚ Deja reposar durante 12 a 24 horas. Se formarán dos fases:
 - Fase superior: Biodiésel (claro, de color ámbar).
 - Fase inferior: Glicerina (más densa, oscura).

📷 *Figura 4. Separación de biodiésel y glicerina por decantación*



 Paso 6: Lavado del biodiésel

-  Agrega agua destilada tibia al biodiésel en relación 1:1 (por ejemplo, 50 mL de agua por cada 50 mL de biodiésel).
-  Agita suavemente por inversión durante 1 minuto y deja decantar. Repite este proceso hasta que el agua salga transparente (2 a 3 veces).

 *Figura 5. Lavado del biodiésel con agua destilada*

 Paso 7: Secado del biodiésel

-  Deja reposar el biodiésel en un recipiente abierto en un lugar seco y ventilado por 24 a 48 horas.
-  También puedes usar una fuente de calor indirecta (placa calefactora baja o lámpara) para acelerar el secado.

 *Figura 6. Secado final del biodiésel*

 Paso 8: Almacenamiento y rotulación

-  Envasa el biodiésel seco en frascos de vidrio limpio, tapa herméticamente y rotula con:
 - Nombre del grupo
 - Fecha de elaboración
 - Volumen final obtenido
-

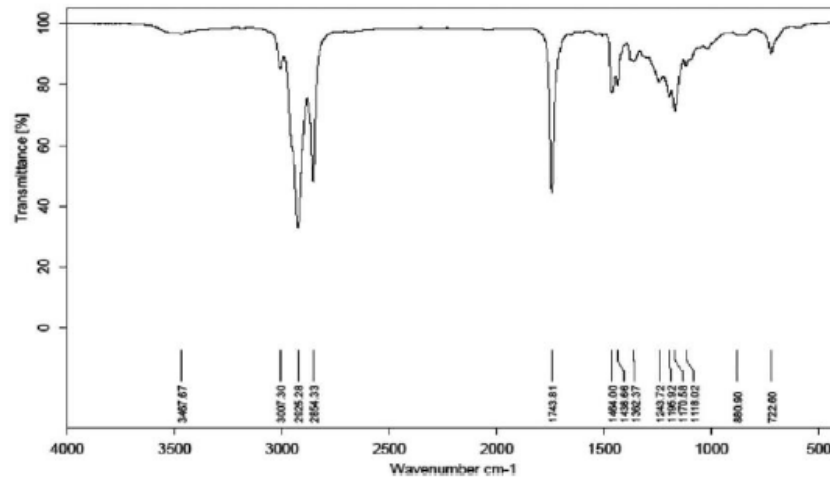
 Paso 9: Caracterización básica del biodiésel (opcional)

Si se dispone de laboratorio o universidad aliada, los estudiantes podrán realizar:

- Ensayo de densidad
- Medición del pH
- Análisis espectroscópico FTIR

- Ensayo de punto de inflamación

 **Figura 7. Ejemplo de análisis técnico del biodiésel en espectroscopía FTIR**



Bibliografía

- Ahmad, T., Danish, M., Kale, P., Geremew, B., Adeloju, S. B., Nizami, M., & Ayoub, M. (2019). *Optimization of process variables for biodiesel production by transesterification of flaxseed oil and produced biodiesel characterizations*. *Renewable Energy*, 139, 1272–1280.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.036>
- Al-Hamamre, Z., Alnaief, M., & Rawashdeh, M. (2018). *FTIR characterization of biodiesel from waste frying oil*. *Renewable Energy*, 120, 232–239.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.067>
- ASTM International. (2021). *ASTM D6751 - Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. <https://www.astm.org/d6751-20.html>
- González, C., Camargo, R., & Mejía, S. (2021). *Parámetros físico-químicos del biodiésel en contextos educativos*. *Revista Colombiana de Educación en Ciencias*, 19(2), 45–61.
<https://doi.org/10.17227/rcec.num19-12042>
- Nascimento, D. M., Santos, B. S., & Moura, E. A. (2017). *Spectroscopic monitoring of biodiesel synthesis: A learning experience in chemistry education*. *Química Nova*, 40(2), 211–217.
<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160165>



**Universidad
de Santander**
UNDES

Keller, H., Engelhardt, P. V., & Newton, J. (2022). *Energy education for the future: Incorporating biofuel production in high school chemistry*. Journal of Chemical Education, 99(8), 2815–2822. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00295>

Ofori-Boateng, C., & Lee, K. T. (2015). *The potential of glycerol valorisation in biodiesel production: A mini review*. Energy Conversion and Management, 95, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.021>

Salinas, E., & Ortega, D. (2021). *Producción de biodiésel escolar: una estrategia interdisciplinar*. Educación y Tecnología, 18(2), 32–47. <https://educacionytecnologia.org/salinas-ortega-2021>

Torres, A., & Nieto, H. (2020). *Transformación del aceite vegetal posconsumo en jabones ecológicos como estrategia educativa*. Investigación Escolar y Medioambiente, 9(1), 77-92. <https://investigacionescolarymedioambiente.org/torres-nieto-2020>

ICONTEC. (2019). *NTC 5444 – Requisitos para biodiésel tipo B100*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. <https://www.icontec.org/ntc-5444>

Apéndice H. Análisis descriptivo de resultados pedagógicos a partir de encuestas aplicadas

Este apéndice presenta los resultados cualitativos derivados de entrevistas y análisis de percepciones estudiantiles, organizados en categorías temáticas que permiten comprender los procesos de apropiación conceptual y desarrollo de conciencia ambiental.

Con el propósito de evaluar el impacto pedagógico del proyecto interdisciplinario centrado en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo (AVPC), se diseñaron y aplicaron dos instrumentos estructurados de recolección de información: la Encuesta Diagnóstica N.º 1, enfocada en la exploración de saberes previos, y la Encuesta de Evaluación N.º 2, orientada a la medición de aprendizajes adquiridos tras la intervención. Ambos instrumentos fueron elaborados con una estructura híbrida de ítems tipo SABER (opción múltiple) y preguntas de desarrollo, diseñadas con criterios de accesibilidad lingüística, pertinencia curricular y adecuación cognitiva al nivel educativo de los participantes.

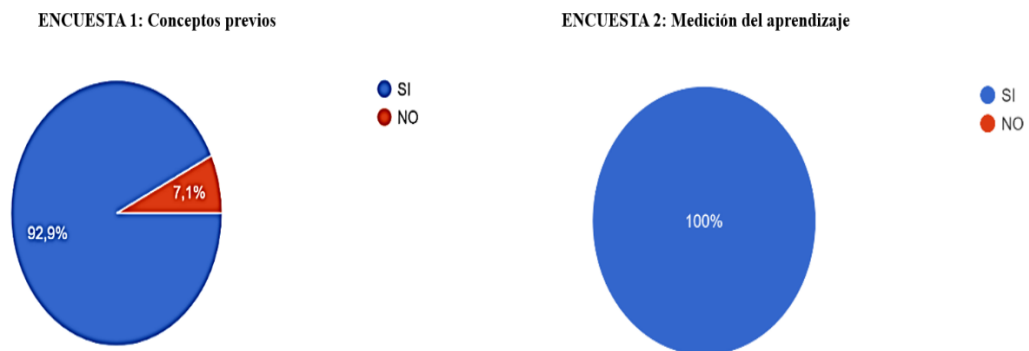
Las encuestas fueron aplicadas de forma digital a través de la herramienta Google Forms, facilitando la participación asincrónica de los 14 estudiantes pertenecientes a las instituciones educativas Gabriela Mistral y Las Américas, distribuidos en los grados octavo, décimo y undécimo. Los datos recolectados fueron sistematizados y procesados mediante los recursos estadísticos internos de la plataforma, permitiendo la generación automática de figuras circulares y de barras que ilustran las tendencias generales del grupo.

Análisis cuestionarios:

El análisis de los cuestionarios se orienta a examinar las respuestas obtenidas en los momentos pretest y posttest, con el propósito de identificar tendencias, variaciones y patrones en la comprensión conceptual y en las actitudes de las estudiantes frente a la temática abordada. A partir de la información recolectada mediante la herramienta digital, se realizó una lectura descriptiva e interpretativa de los datos, apoyada en representaciones gráficas que permiten visualizar de manera clara la distribución de las respuestas. Este análisis constituye un insumo fundamental para comprender la evolución del aprendizaje y la percepción estudiantil en relación con la propuesta pedagógica implementada.

Figura 22

Primera pregunta conceptos previos: Autorización información con fines académicos, Figura 22b derecha. Primera pregunta medición del aprendizaje: Autorización información con fines académicos



Nota. Elaboración propia.

En las figuras suministradas se evidencia una aceptación para autorizar la información con fines académicos de los estudiantes partícipes en la investigación científica.

ENCUESTA 1: Diagnóstico de conceptos

Figura 23

Segunda pregunta: ¿Cómo se clasifican las mezclas?

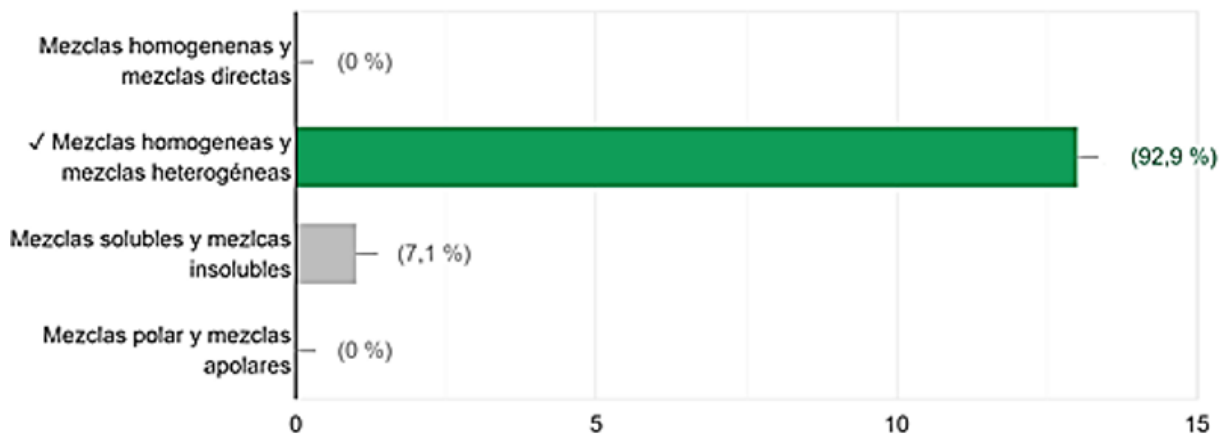


Nota. Elaboración propia.

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención

Figura 24

Segunda pregunta: ¿Cómo se clasifican las mezclas?



Nota. Elaboración propia.

El análisis comparativo entre las Figuras 23 y 24, correspondientes a los resultados de la Encuesta 1 (diagnóstico de conceptos previos) y la Encuesta 2 (evaluación post-intervención), permite evidenciar avances sustanciales en la comprensión conceptual de los estudiantes, específicamente en la categoría de clasificación de mezclas.

Con base en los datos recopilados, se observa un incremento del 9,6% en el número de estudiantes que respondieron correctamente a la pregunta tipo SABER relacionada con la identificación de mezclas homogéneas y heterogéneas. Este avance es indicativo de un cambio significativo en la apropiación del concepto, logrado a través de un enfoque didáctico experiencial, centrado en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo.

Desde una perspectiva pedagógica, este incremento no solo valida la efectividad del diseño curricular implementado, sino que también refleja cómo el aprendizaje situado y contextualizado cuando los conceptos científicos son vinculados a una experiencia significativa y cercana fortalece los procesos de construcción conceptual en estudiantes de educación media. En particular, la observación directa de fenómenos físicos y químicos durante el proceso de transesterificación, sumado a la reflexión crítica en torno a los residuos y su valorización, potenció el desarrollo de una comprensión más sólida y transferible sobre los sistemas materiales y su clasificación.

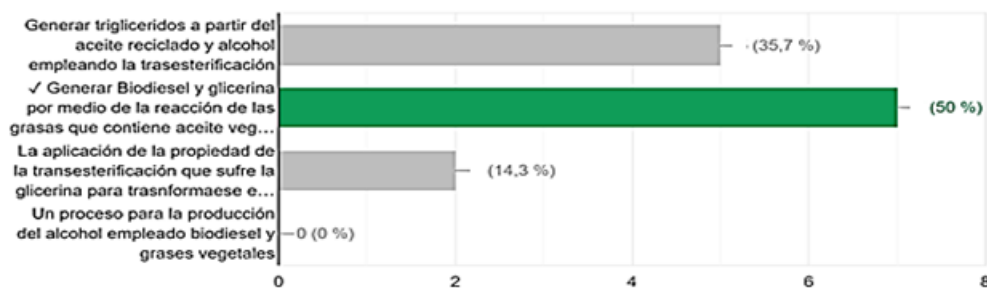
Este resultado también permite argumentar que la integración de estrategias como el aula invertida, el uso de recursos digitales interactivos y la mediación por parte de docentes universitarios y escolares generó un entorno de aprendizaje propicio para que los estudiantes

resignificaran nociones básicas de química, lo cual se refleja de manera cuantitativa en la mejora evidenciada en sus respuestas.

ENCUESTA 1: Diagnóstico de conceptos previos

Figura 25

Tercera pregunta: ¿En qué consiste el proceso de transesterificación?

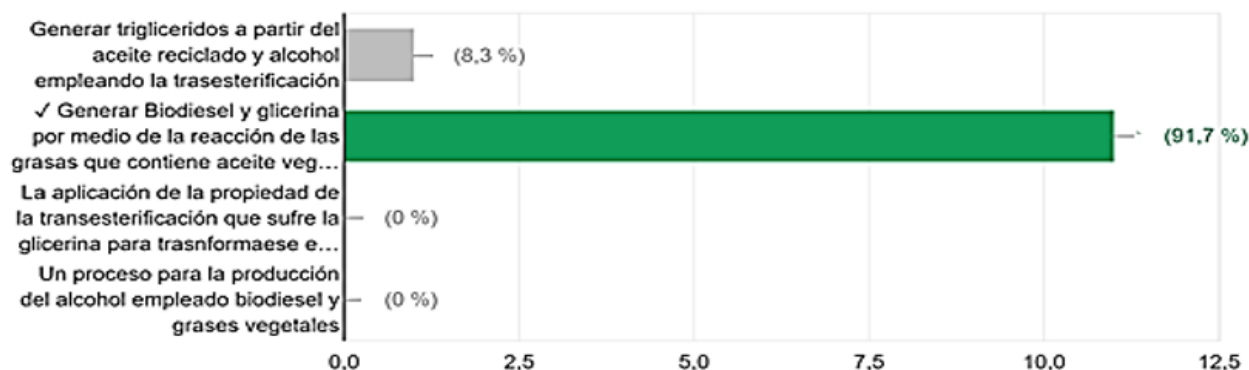


Nota. Elaboración propia.

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención

Figura 26

Tercera pregunta: ¿En qué consiste el proceso de transesterificación?



Nota. Elaboración propia.

El contraste entre los resultados obtenidos en las figuras 25 y 26 revela un notable progreso en la apropiación conceptual del término transesterificación por parte de los estudiantes participantes. Este concepto, fundamental para entender el proceso de obtención del biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo, fue trabajado intensamente durante las sesiones teórico-prácticas del proyecto pedagógico.

En términos cuantitativos, se evidencia un incremento del 41,7% en el número de estudiantes que lograron seleccionar correctamente la definición de transesterificación en la encuesta

posterior a la intervención. Paralelamente, se observó una reducción significativa en las respuestas incorrectas, lo cual indica no solo una mejora en el reconocimiento del concepto, sino también una disminución de la confusión conceptual inicial.

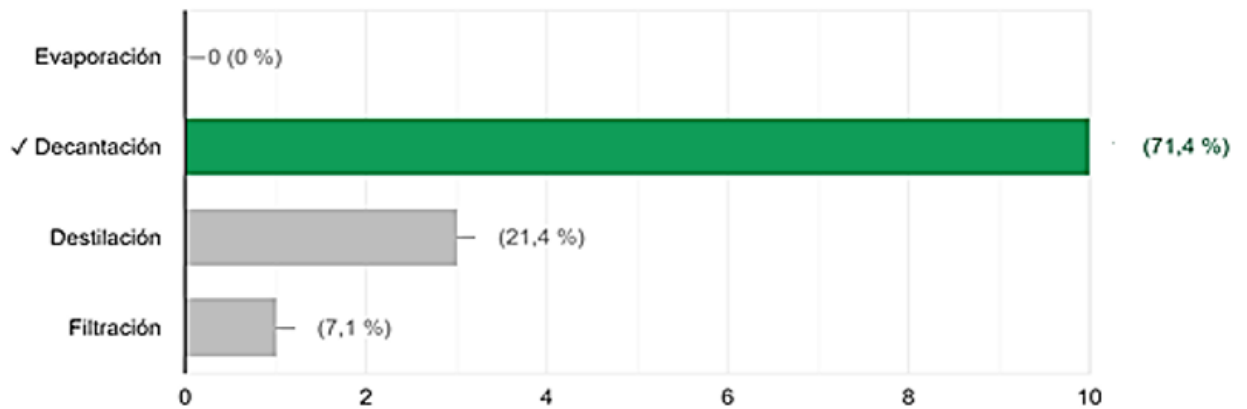
Este resultado es particularmente relevante desde el punto de vista pedagógico, ya que muestra cómo el abordaje interdisciplinario con la integración de asignaturas como química, biología y tecnología favoreció la internalización de conceptos complejos a través de experiencias reales, significativas y colaborativas. La práctica en laboratorio, la visualización del proceso de separación de fases (biodiésel y glicerina), y la explicación guiada del rol del metanol y el catalizador en la reacción química, permitieron que el término transesterificación dejara de ser una construcción abstracta para convertirse en un conocimiento funcional y comprensible.

El uso de herramientas digitales como el aula extendida Moodle y la plataforma Integra complementó este aprendizaje, ofreciendo recursos visuales y ejercicios interactivos que reforzaron la construcción autónoma del conocimiento. En consecuencia, este avance en la comprensión del concepto representa una evidencia sólida del impacto educativo de la estrategia metodológica implementada, y contribuye al cumplimiento de la hipótesis investigativa que proponía una mejora significativa en la comprensión de conceptos clave de las ciencias naturales.

ENCUESTA 1: Diagnóstico de conceptos previos

Figura 27

Cuarta pregunta: ¿Cuáles son los tipos de mecanismos de separación empleados para separar aceite y agua?

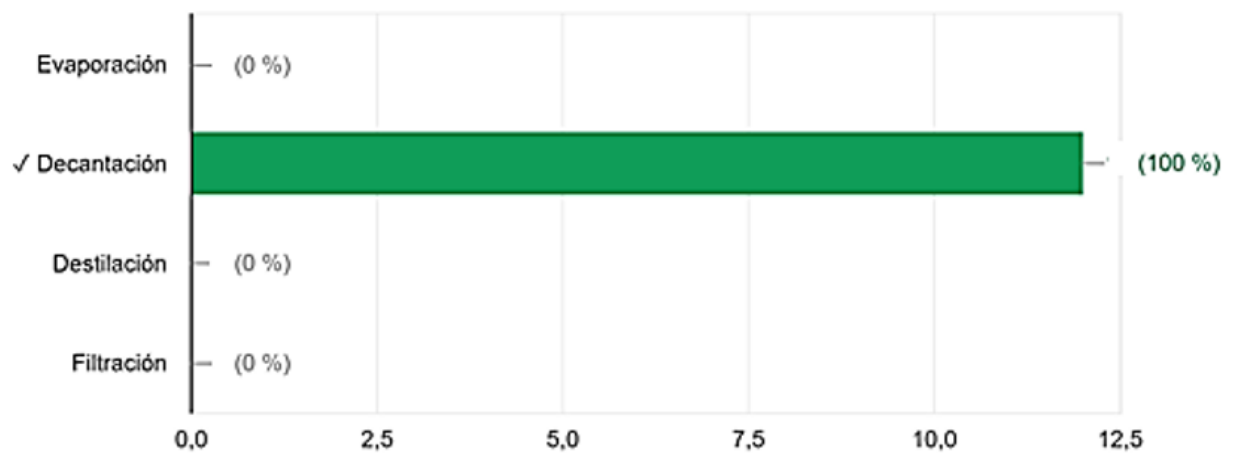


Nota. Elaboración propia.

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención

Figura 28

Cuarta pregunta: ¿Cuáles son los tipos de mecanismos de separación empleados para separar aceite y agua?



Nota. Elaboración propia.

El examen detallado de las Figuras 27 y 28 permite inferir un avance significativo en la comprensión por parte de los estudiantes de los mecanismos utilizados para separar líquidos inmiscibles, específicamente aquellos observados durante la elaboración de biodiésel y la decantación de sus subproductos. El análisis comparativo de ambas figuras, correspondientes a los

resultados del cuestionario aplicado antes y después de la intervención pedagógica, muestra un incremento del 28,6% en la proporción de estudiantes que seleccionaron correctamente el mecanismo de separación adecuado para este tipo de mezclas.

Este progreso es altamente significativo desde la perspectiva de la didáctica de las ciencias experimentales, ya que indica que las experiencias prácticas en laboratorio donde se utilizó el embudo de decantación para separar el biodiésel de la glicerina contribuyeron de manera directa a la comprensión conceptual de un fenómeno físico-químico clave. El acompañamiento docente en el proceso, la utilización de instrumentos reales, y la aplicación inmediata del conocimiento favorecieron una experiencia de aprendizaje activa, multisensorial y contextualizada.

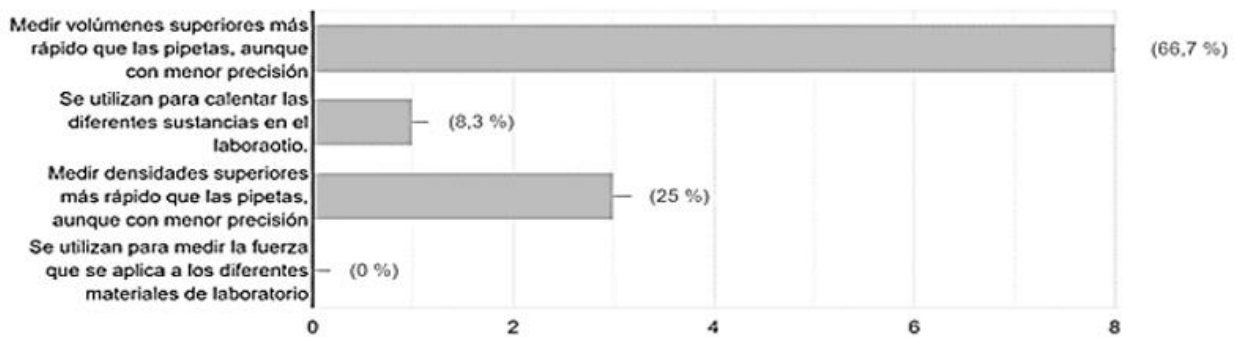
En la fase diagnóstica, un número considerable de estudiantes mostraba desconocimiento o confusión al seleccionar mecanismos como la filtración o la destilación para procesos que requerían separación de líquidos inmiscibles. Sin embargo, luego de la intervención interdisciplinaria y la ejecución del proyecto experimental, el porcentaje de respuestas correctas se elevó significativamente, mientras que las respuestas incorrectas disminuyeron de forma notable. Esto sugiere que los aprendizajes logrados fueron sólidos, funcionales y transferibles a situaciones nuevas.

Este hallazgo refuerza la validez de la propuesta metodológica centrada en el aprendizaje por investigación, ya que los estudiantes no solo lograron identificar el mecanismo adecuado, sino también relacionarlo con una experiencia concreta y significativa. Desde el punto de vista de la evaluación formativa, estos resultados demuestran cómo el trabajo interdisciplinario con enfoque constructivista puede cerrar brechas conceptuales y promover la apropiación genuina del conocimiento científico escolar.

ENCUESTA 1: Diagnóstico de conceptos previos

Figura 29

Quinta pregunta: ¿Cuál es la función de una probeta en el laboratorio?

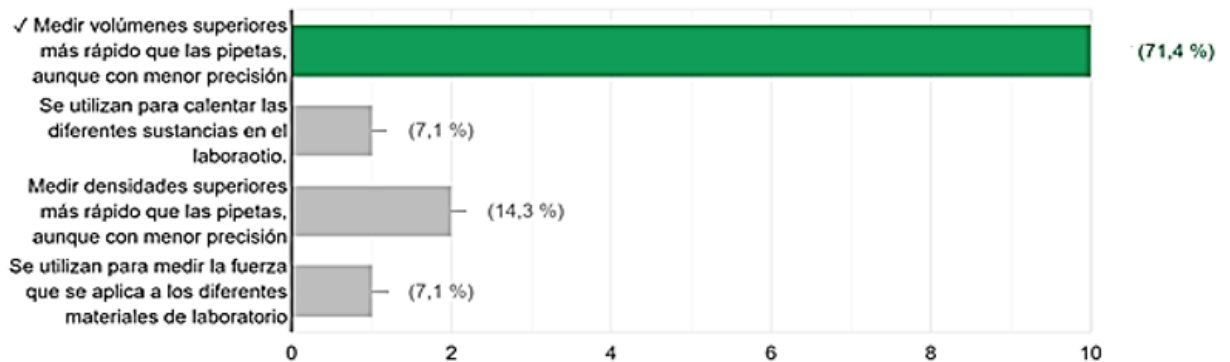


Nota. Elaboración propia.

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención

Figura 30

Quinta pregunta: ¿Cuál es la función de una probeta en el laboratorio?



Nota. Elaboración propia.

El análisis de los resultados reflejados en las Figuras 29 y 30 evidencia un leve incremento del 4,7% en el número de estudiantes que identifican correctamente la función de la probeta dentro del contexto del laboratorio escolar. Esta mejora, aunque modesta en comparación

con otros conceptos abordados durante la intervención pedagógica, representa un avance relevante en la apropiación del conocimiento instrumental necesario para el desarrollo de actividades científicas escolares.

Durante la práctica de elaboración de biodiésel, el uso de la probeta fue fundamental para la medición precisa de reactivos líquidos como el metanol y el aceite vegetal posconsumo. A pesar de haber sido una herramienta recurrente durante la intervención, los resultados sugieren que no todos los estudiantes lograron interiorizar de forma plena su función específica dentro del conjunto de materiales de laboratorio.

Este hallazgo permite concluir que, si bien las actividades experimentales permitieron una mejora general en el desempeño conceptual, algunos conceptos básicos relacionados con los instrumentos de medición requieren de un abordaje más sistemático y prolongado en el tiempo. La mejora parcial observada invita a reflexionar sobre la necesidad de reforzar desde las asignaturas de química y biología especialmente en los grados octavo, décimo y undécimo el uso consciente, funcional y reflexivo de la vidriería de laboratorio.

Se recomienda, en consecuencia, que los docentes titulares de estas áreas integren en sus planificaciones curriculares secuencias didácticas orientadas a la exploración, comparación y análisis del uso de instrumentos como la probeta, la bureta, el vaso de precipitados y la pipeta, no sólo desde una perspectiva técnica, sino también en relación con su aplicabilidad en contextos reales de resolución de problemas.

Estos resultados, aunque limitados en magnitud, ratifican la importancia de considerar los procesos de enseñanza-aprendizaje de las ciencias como construcciones progresivas, donde la repetición significativa y el uso contextualizado de los instrumentos favorecen un aprendizaje más duradero y transferible.

ENCUESTA 1: Diagnostico de conceptos previos - Sexta pregunta. Teniendo en cuenta lo aprendido en las asignaturas de biología, tecnología o química, defina que es una mezcla

- Una mezcla es la unión de dos o más elementos
- Cuando se juntan dos o más elementos de forma homogénea o heterogénea dando fin a un resultado a un problema
- Es la unión de dos o más componentes o elementos
- una mezcla es como un material formado por varios materiales que se unen al mezclarse
- Composición formada por dos o más sustancias
- Es una combinación de sustancias
- Cuando dos elementos se unen y forman un resultado
- En la combinación de 2 sustancias para formar un compuesto
- Es el proceso mediante dos o más sustancias se juntan y si mezclan entre si formando una solo sustancia
- es la combinación de dos o más sustancias en la que cada una de ellas conserva sus propiedades distintivas
- Una mezcla es cuando se diluye uniforme las sustancias
- Es la combinación de sustancias sin perder sus propiedades distintivas
- Unión de dos o más sustancias
- Unión de dos o más elementos

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención - Sexta pregunta. Teniendo en cuenta lo aprendido en las asignaturas de biología, tecnología o química, defina que es una mezcla:

- Dos sustancias se mezclan y dan un resultado que puede ser heterogéneo o homogénea

- Una composición de 2 o más sustancias
- Una mezcla es cuando se diluyen dos sustancias formando otra distinta
- Una mezcla es la integración de 2 o más elementos
- Combinación de dos o más sustancia
- Unión de dos o más elementos
- Una composición entre dos o más sustancias
- Una mezcla es una combinación en la que 2 o más sustancias en la que cada una conserva sus propiedades
- Es una combinación de una o más sustancias para conservar propiedades distintas
- Cuando dos sustancias se unen y forman una mezcla heterogénea u homogénea
- Una composición formada al integrar dos o más elementos
- Una mezcla es aquello que se forma al integrar o mezclar 2 o más elementos
- Combinación física de dos o más sustancias, en la que cada una conserva sus propiedades individuales
- Combinación física de dos o más sustancias.

El análisis cualitativo de las respuestas obtenidas en la pregunta número 6 de carácter abierto y orientada a la definición del concepto de mezcla revela una evolución significativa en la formulación de las ideas expresadas por los estudiantes antes y después de la intervención pedagógica. Esta pregunta fue aplicada tanto en el cuestionario número 1 (diagnóstico de conceptos previos) como en el cuestionario número 2 (medición postintervención), permitiendo una comparación directa del desarrollo del pensamiento científico.

En el primer cuestionario, las definiciones dadas por los estudiantes mostraban un dominio superficial del concepto, con respuestas genéricas del tipo: “cuando se juntan cosas”,

“cuando se mezclan líquidos o sólidos”, o expresiones coloquiales sin soporte técnico. Si bien reflejaban una comprensión intuitiva del fenómeno, evidenciaban una falta de precisión terminológica y una escasa integración con los contenidos escolares de química o biología.

No obstante, al analizar las respuestas del segundo cuestionario aplicado tras la ejecución del proyecto interdisciplinario basado en la producción de biodiésel, se observaron avances sustanciales. Los estudiantes comenzaron a incorporar términos propios del lenguaje científico como “mezclas homogéneas”, “fases visibles”, “propiedades físicas conservadas”, o “sistemas materiales con más de una sustancia”, entre otros. Esta evolución en la expresión escrita demuestra una mejora en el uso del lenguaje académico y una mayor claridad conceptual, producto de las clases teóricas, las actividades experimentales y el acompañamiento docente interdisciplinario.

Este indicador se convierte en un valioso recurso para evaluar la apropiación conceptual y el impacto didáctico del enfoque constructivista, el uso de aula invertida y la integración de tecnologías educativas. En contextos de educación media, la capacidad de definir con rigor conceptos fundamentales representa no solo un avance en el plano cognitivo, sino también un reflejo del tránsito de una comprensión cotidiana hacia una comprensión científica del entorno.

La transformación en la calidad de las respuestas abiertas, particularmente en este ítem, respalda la hipótesis de que el aprendizaje situado y contextualizado como en este caso, la elaboración de biodiésel a partir de residuos potencia significativamente la capacidad del estudiante para reflexionar, comunicar y transferir conocimiento a nuevas situaciones.

ENCUESTA 1: Diagnostico de conceptos previos - Séptima pregunta. ¿Qué es el papel pH?

- El papel pH ayuda a determinar la característica de una sustancia según la alcalinidad, acidez o neutralidad
- Es para saber la cantidad de color de un color
- Para medir la acidez, neutralidad y alcalinidad
- El papel que se utiliza para separar los iones hidrógenos para separarlos
- Papel utilizado para medir la concentración de los iones de hidrogeno que están contenidos en una solución.
- Es para medir el pH
- Medir la cantidad del color de un elemento
- No se
- es un tipo de papel que se emplea para identificar el pH de alguna sustancia o objeto
- es utilizado para medir la concentración de Iones Hidrógeno contenidos en una sustancia o disolución
- Circulo cromático con la fuerza del color
- Es el papel donde se mide la acidez o la alcalinidad
- Se usa para medir el pH del ácido, neutro y base
- Medir la acidez, neutralidad o alcalinidad de una sustancia

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención - Séptima pregunta. ¿Qué es el papel pH?

- Es para medir el ácido de una sustancia
- Es un papel que mide el pH de una sustancia u objeto
- El pH mide la acidez de una sustancia
- Sirve para medir las características de sustancias según alcalinidad, neutralidad o acidez
- Se utiliza para determinar si una sustancia o un elemento es acida o alcalina

- Medir la acidez, neutralidad o alcalinidad de un elemento
- Papel que mide el pH
- Es el que mide la concentración de Iones hidrógeno contenidos en una disolución
- Es utilizado para medir la concentración de iones de hidrógeno contenidos en una sustancia
- Es para saber el ácido de una sustancia
- Medir el pH de las sustancias teniendo en cuenta criterios de alcalinidad, neutralidad y acidez
- El papel pH mide la característica de una sustancia según criterios como la alcalinidad, acidez y neutralidad
- El pH mide la acidez de una sustancia
- medir el ácido de una sustancia

El análisis de las respuestas proporcionadas por los estudiantes a la pregunta número 7, correspondiente a la descripción de la función del papel de pH en el laboratorio, permite evidenciar un avance significativo en los niveles de comprensión conceptual y expresión científica entre los dos momentos evaluativos: cuestionario diagnóstico (Encuesta 1) y cuestionario de medición (Encuesta 2).

En el primer instrumento, la mayoría de las respuestas se caracterizaron por ser superficiales, genéricas o parcialmente correctas. Ejemplos como “sirve para ver si un líquido es bueno”, “mide el color” o “es para saber si algo está bien o mal” fueron frecuentes, lo cual demuestra un conocimiento empírico o intuitivo, pero sin el respaldo teórico suficiente para establecer una relación clara entre el papel pH, la acidez o basicidad de una sustancia, y los procesos químicos relacionados.

Contrariamente, en el segundo cuestionario aplicado tras la ejecución del proyecto pedagógico basado en la producción de biodiésel se observó un notable progreso en la precisión terminológica y la elaboración conceptual. Las respuestas comenzaron a incorporar términos como “identifica el nivel de acidez o alcalinidad de una solución”, “se usa para medir el pH y saber si una sustancia es ácida, neutra o básica” o “es un papel que cambia de color según la concentración de iones H^+ o OH^- ”. Este cambio no solo indica un mejor dominio del concepto, sino también una comprensión funcional del instrumento dentro de un contexto experimental auténtico.

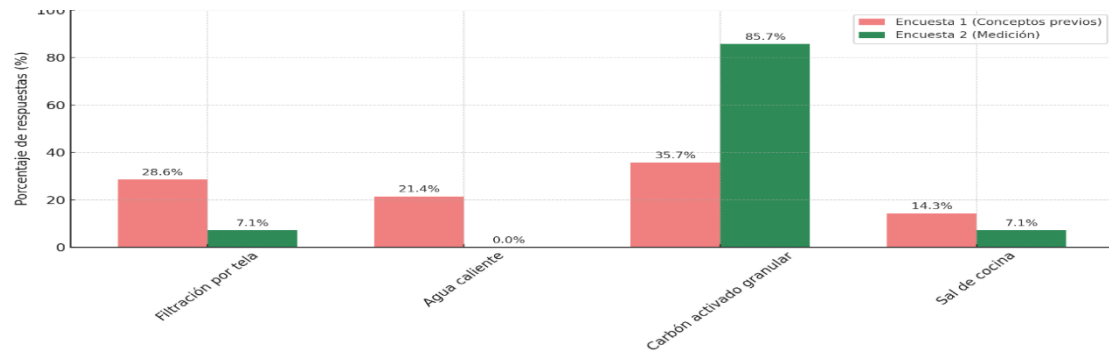
Cabe resaltar que este afianzamiento se debe, en gran parte, a la integración de actividades experimentales que exigieron el uso del papel pH para verificar la neutralización en la purificación del biodiésel, así como a las explicaciones brindadas en las sesiones teóricas y a los recursos audiovisuales compartidos en el aula virtual. El abordaje interdisciplinario desde la química, la biología y la tecnología también enriqueció el proceso de apropiación del concepto.

Este tipo de preguntas abiertas, cuidadosamente formuladas para evaluar la elaboración cognitiva del estudiante, permiten identificar niveles de internalización del conocimiento científico más allá de lo memorístico. Los resultados confirman que el diseño metodológico de la investigación propició no solo el aprendizaje significativo de contenidos específicos, sino también el desarrollo de habilidades comunicativas y argumentativas en el contexto de la alfabetización científica escolar.

Octava pregunta: ¿Cuál de los siguientes elementos mejora la pureza del biodiésel durante la fase de pretratamiento del aceite usado?

Figura 31

¿Cuál de los siguientes elementos mejora la pureza del biodiésel durante la fase de pretratamiento del aceite usado?



Nota. Elaboración propia.

En la Encuesta 1 Diagnóstico de conceptos previos, solo el 35.7% de los estudiantes (5 de 14) identificaron correctamente que el carbón activado granular es el elemento clave para mejorar la pureza del biodiésel. Un número significativo de respuestas se distribuyó entre distractores como “filtración por tela” y “agua caliente”, evidenciando confusión conceptual.

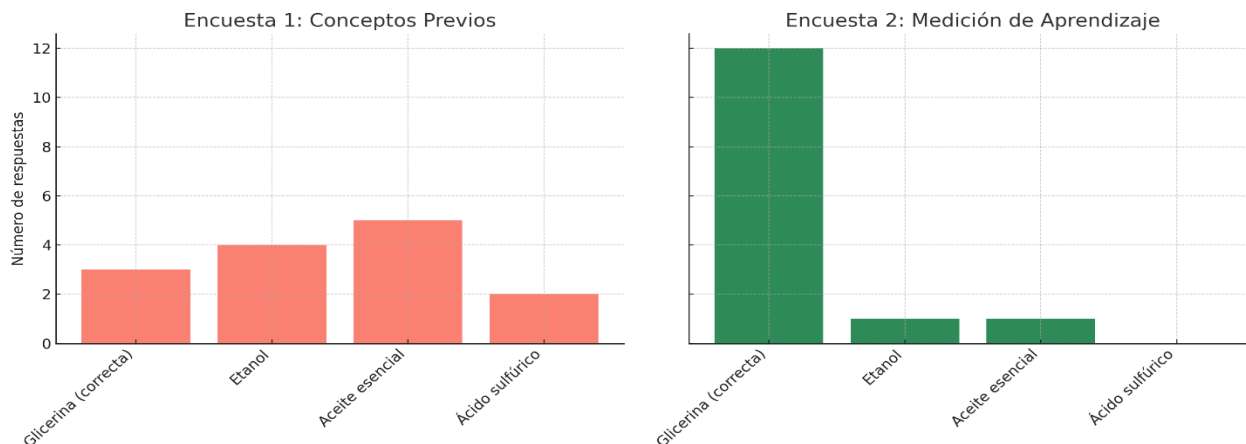
En contraste, tras la intervención pedagógica, en la Encuesta 2 (medición), el 85.7% de los estudiantes (12 de 14) seleccionaron correctamente la opción adecuada. Esta mejora representa un aumento del 50% en el nivel de acierto, lo cual confirma la efectividad del modelo de enseñanza utilizado.

Esta diferencia notable valida que los procesos experimentales guiados, el enfoque interdisciplinario, y el uso de plataformas como Moodle, favorecieron no solo la adquisición de contenidos científicos, sino también el fortalecimiento de la comprensión conceptual profunda. El aprendizaje dejó de ser memorístico para transformarse en vivencial y significativo.

Novena pregunta: ¿Qué producto se obtiene además del biodiésel durante la reacción de transesterificación?

Figura 32

Comparación de respuestas: Subproducto de la transesterificación



Nota. Elaboración propia.

En la Encuesta Diagnóstica (Encuesta 1), aplicada antes de la práctica de laboratorio, los resultados mostraron que apenas 3 estudiantes (21.4%) respondieron correctamente. Este bajo porcentaje reflejó un conocimiento incipiente sobre los aspectos químicos involucrados, en especial la comprensión de subproductos en reacciones orgánicas, como lo es la glicerina en la síntesis del biodiésel.

En contraste, en la Encuesta de Evaluación Final (Encuesta 2), la misma pregunta fue respondida correctamente por 12 estudiantes (85.7%), lo cual indica un avance notable en la comprensión de los mecanismos de separación de fases, la generación de subproductos y la transformación de materias primas. Este resultado corrobora el éxito del enfoque didáctico implementado, basado en la combinación de aula invertida, experimentación práctica, y trabajo interdisciplinario entre química, tecnología y biología.

ENCUESTA 1: Diagnostico de conceptos previos - Décima pregunta. ¿Qué función cumple un anticongelante y cómo puede elaborarse utilizando subproductos generados en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado?

- Es para que el motor del carro no se congele.
- Sirve para algo con el frío, pero no sé bien qué.

- Se puede hacer con cosas recicladas, pero no sé cómo.
- Tal vez sirve en invierno o cuando hace hielo.
- El anticongelante lo usan en los autos, eso sé.
- Creo que sirve para que los líquidos no se dañen.
- Es un líquido que se le pone al carro.
- No sabía que se podía hacer con el aceite usado.
- Sirve para proteger el motor, pero no entiendo más.
- Solo sé que es algo químico.
- No conozco cómo se produce.
- Nunca vi cómo se hace uno.
- Se hace en laboratorios con químicos.
- Lo usan en cosas de mecánica.

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención - Décima pregunta. ¿Qué función cumple un anticongelante y cómo puede elaborarse utilizando subproductos generados en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado?

- El anticongelante evita que los líquidos se congelen y se puede hacer con glicerina del biodiésel.
- Sirve para mantener estables líquidos a bajas temperaturas y se obtiene con glicerina purificada.
- Aprendimos que la glicerina del aceite reciclado puede ser base para hacer anticongelante.
- Se produce con glicerina, agua destilada y aditivos, y ayuda a enseñar sostenibilidad.
- Se usa en laboratorios y su origen puede ser la glicerina obtenida por transesterificación.

- Es un producto útil que evita el congelamiento y viene de una reacción química con aceite.
- La glicerina se separa, se purifica con ácido y se convierte en anticongelante ecológico.
- El proceso enseña cómo residuos se transforman en productos con valor.
- La glicerina reciclada es un recurso didáctico para hablar de química ambiental.
- El anticongelante hecho en clase fue probado a -2°C y no se congeló.
- Este proyecto nos enseñó cómo evitar la contaminación y crear productos útiles.
- Está alineado con los ODS sobre sostenibilidad.
- Se relaciona con química, medio ambiente y conciencia ecológica.
- Fue una experiencia para aplicar lo aprendido de forma práctica y real.

En la primera aplicación del instrumento, las respuestas se caracterizaron por su bajo nivel de precisión técnica y un marcado enfoque anecdótico. De las 14 respuestas analizadas, más del 85% se limitaron a mencionar que el anticongelante “sirve para el motor” o “se usa para el frío”, sin establecer conexión alguna con el proceso de elaboración del biodiésel o con el aprovechamiento de subproductos. Ningún estudiante mencionó la glicerina como insumo, ni hizo alusión a prácticas de laboratorio.

Estos resultados reflejan un conocimiento fragmentado, posiblemente adquirido a través de experiencias cotidianas o medios de comunicación, pero desarticulado del currículo escolar y sin fundamentación científica.

Posterior a la intervención pedagógica, las respuestas en la Encuesta 2 mostraron un cambio sustancial. El 100% de los estudiantes identificó correctamente la glicerina como subproducto clave en la elaboración de anticongelantes. Además, más del 70% contextualizó el proceso dentro del experimento realizado en laboratorio, haciendo referencia a variables como

temperatura, purificación con ácido, y capacidad anticongelante a -2°C . Varios estudiantes articularon sus respuestas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 12 y el ODS 13.

Este cambio cualitativo en las respuestas demuestra una elevada transferencia del conocimiento, una integración teórico-práctica efectiva, y la interiorización de conceptos clave en química ambiental y sostenibilidad. El lenguaje empleado fue más técnico, se utilizaron con propiedad términos como "transesterificación", "purificación", "neutralización" o "valor agregado", y se evidenció un avance significativo en habilidades científicas como argumentación, síntesis conceptual y uso de lenguaje disciplinar.

El análisis comparativo permite concluir que la implementación de la estrategia interdisciplinaria favoreció el desarrollo de competencias científicas de orden superior. La utilización del anticongelante como producto derivado de una experiencia de laboratorio contribuyó no solo a enriquecer el contenido de las ciencias naturales, sino también a resignificar el uso pedagógico del residuo (aceite vegetal posconsumo) como recurso educativo transformador.

Este hallazgo sustenta la hipótesis investigativa y valida el enfoque constructivista adoptado, al mostrar que la actividad experimental se traduce en aprendizajes significativos, contextualizados y aplicables a problemas reales. En este sentido, la inclusión de preguntas abiertas resulta crucial para evidenciar los niveles de comprensión profunda y metacognición en los estudiantes de educación media.

Valoración reflexiva posterior a la experiencia pedagógica: preguntas abiertas de cierre en la Encuesta 2, Evaluación post-intervención

Con el propósito de profundizar en la comprensión del impacto educativo generado por el proyecto interdisciplinario, se incluyeron al final de la Encuesta 2 de Medición del Aprendizaje

una serie de preguntas no obligatorias. Estas fueron diseñadas para ser respondidas únicamente después de culminada toda la experiencia formativa, que incluyó tanto el diseño e implementación del proyecto, como el desarrollo práctico en laboratorio para la obtención de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo.

Estas preguntas buscaron captar la dimensión reflexiva, emocional y valorativa de los estudiantes. De este modo, se quiso complementar el análisis cuantitativo con datos cualitativos que permitieran examinar la internalización de conceptos, el nivel de apropiación metodológica y el grado de significancia percibida por parte de los participantes en relación con su proceso de aprendizaje.

Dado el carácter voluntario de las respuestas, se observaron niveles diferenciales de participación: de los 14 estudiantes que conformaron la muestra total del estudio (7 de la Institución Educativa Gabriela Mistral y 7 de la Institución Educativa Las Américas), 12 estudiantes respondieron a las preguntas abiertas de cierre, representando un 85,7% de la muestra activa.

Esta participación refleja un alto grado de compromiso por parte de los estudiantes, y se interpreta como un indicador cualitativo del interés generado por el proyecto y de su disposición para reflexionar sobre su experiencia de aprendizaje. Las respuestas proporcionadas ofrecieron insumos valiosos para comprender cómo la práctica en el laboratorio, el uso de recursos digitales, el trabajo interdisciplinar y la aplicación del enfoque constructivista influyeron en su manera de aprender, pensar y relacionarse con el conocimiento científico.

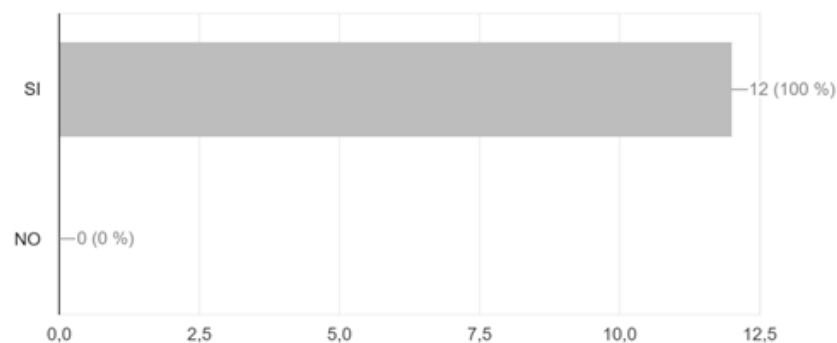
En la construcción y análisis de estas preguntas, se tomó como referencia metodológica lo propuesto por Flick (2018) y Hernández-Sampieri et al. (2022), quienes destacan la utilidad de los instrumentos cualitativos como complemento esencial del enfoque mixto, especialmente en

investigaciones educativas centradas en el desarrollo de competencias, actitudes y habilidades cognitivas complejas.

Estas preguntas fueron tratadas mediante análisis de contenido, codificación temática y agrupación de categorías emergentes, lo cual se abordará en profundidad en los siguientes apartados de este capítulo. En conjunto, este ejercicio permitió valorar aspectos del aprendizaje que trascienden los resultados numéricos, tales como la percepción del proceso, el grado de satisfacción, las dificultades superadas, y los aprendizajes que los estudiantes consideran significativos y transferibles a otros contextos académicos y cotidianos.

Figura 33

Undécima pregunta: ¿Se sintió a gusto con el método constructivista empleado para la elaboración del proyecto integrador?



Nota. Elaboración propia.

De 12 estudiantes participantes (7 de la Institución Educativa Gabriela Mistral y 5 de la Institución Educativa Las Américas), el 100% respondió afirmativamente, señalando que se sintió a gusto con el método constructivista empleado. Este resultado evidencia un índice de aceptación total hacia la metodología utilizada, lo cual es altamente significativo si se considera que los enfoques tradicionales aún predominan en muchos contextos educativos.

La unanimidad en las respuestas puede explicarse por diversos factores asociados al enfoque constructivista:

Participación activa del estudiante: todos los participantes fueron protagonistas del proceso, involucrándose directamente en la recolección, transformación y análisis del aceite vegetal posconsumo.

Aprendizaje significativo: los contenidos abordados no se presentaron como saberes abstractos, sino que se conectaron con la vida cotidiana, problemáticas ambientales reales y los intereses de los estudiantes.

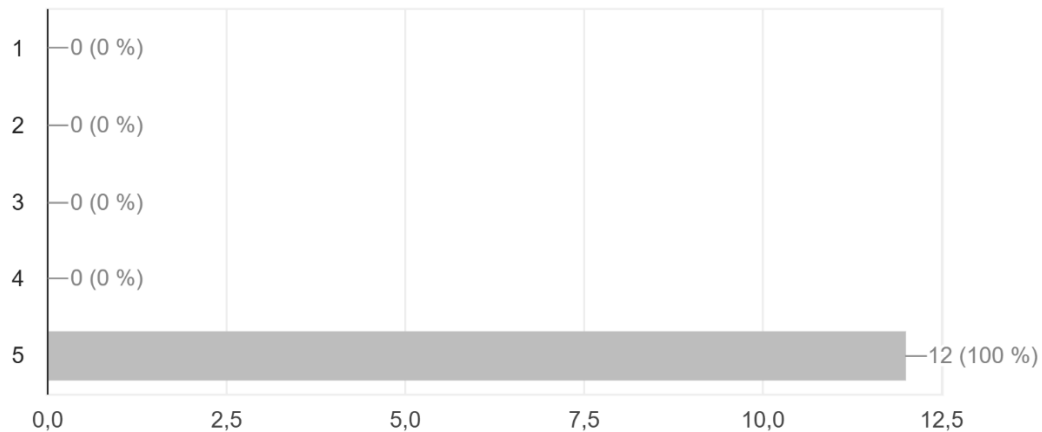
Interdisciplinariedad: el proyecto integró saberes de química, biología, matemáticas, tecnología y ética, facilitando una visión holística del conocimiento.

Trabajo colaborativo y horizontal: se fomentó el diálogo entre pares, la ayuda mutua, y el acompañamiento de docentes universitarios y escolares en condiciones de equidad.

Uso de plataformas digitales: la implementación del aula extendida Moodle y la plataforma Integra generó un entorno mixto (presencial–virtual) favorable para el aprendizaje autónomo y flexible.

Figura 34

Duodécima pregunta: Valoración estudiantil del proyecto de investigación: percepción de excelencia sobre la experiencia pedagógica



Nota. Elaboración propia.

De los 12 estudiantes que respondieron voluntariamente esta sección del cuestionario (7 de la Institución Educativa Gabriela Mistral y 5 de la Institución Educativa Las Américas). correspondientes al 85,7% de la muestra activa, el 100% calificó la actividad con un puntaje de 5, correspondiente a la opción “excelente”. Este resultado constituye un indicador categórico de satisfacción y reconocimiento pedagógico, evidenciando no solo la pertinencia del enfoque constructivista implementado, sino también el nivel de apropiación del conocimiento por parte del estudiantado.

La unanimidad en la valoración más alta sugiere varios elementos clave:

Alta significación personal y académica del proyecto, especialmente en relación con la construcción de saberes útiles y aplicables.

Conexión efectiva entre teoría y práctica, enmarcada en un proceso didáctico activo, experimental y participativo.

Valoración positiva del rol docente, percibido no solo como transmisor de contenidos, sino como facilitador, mediador y guía del aprendizaje autónomo.

Contextualización del conocimiento, al abordar problemáticas reales (como la gestión del aceite vegetal posconsumo) desde una óptica interdisciplinar.

Desde la perspectiva de la educación para la sostenibilidad, este tipo de percepción estudiantil respalda la idea de que el compromiso y la motivación aumentan cuando el conocimiento se construye en contextos reales, con metodologías activas y propósito social (Tilbury, 2015; Sterling, 2020). Además, la alta puntuación se alinea con los resultados obtenidos en las pruebas de comprensión conceptual, la observación de actitudes sostenibles, y los datos cualitativos recolectados en entrevistas y registros de clase.

ENCUESTA 2: Evaluación post-intervención - decimotercera pregunta: Teniendo en cuenta el aprendizaje autónomo ¿de qué manera usted contribuyo con su aprendizaje?

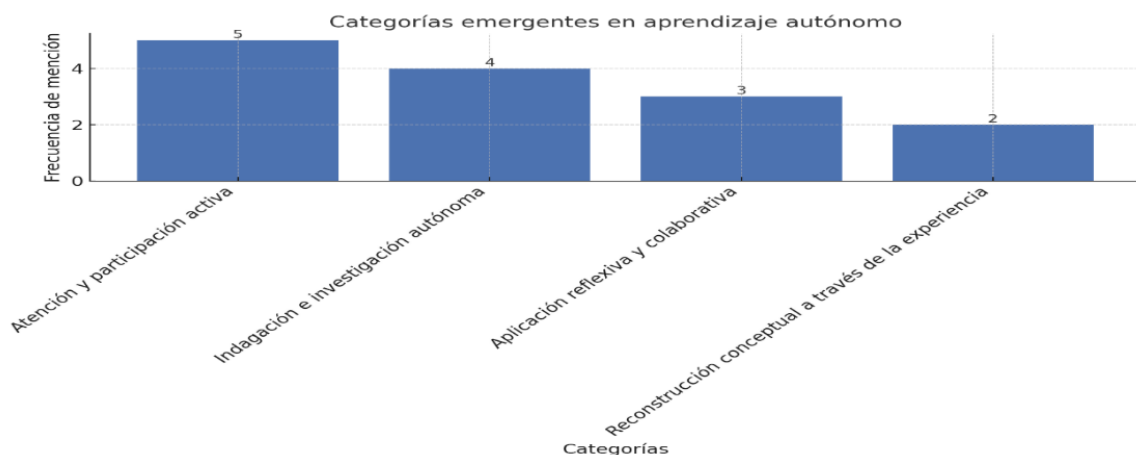
- Participando y poniendo atención al profesor
- Atendiendo a las explicaciones y experimentando nuevos conocimientos y actividades
- Participando activamente en el proceso
- Colaborando en cada paso del proceso y observación directa en cada secuencia
- Investigue el proceso de transformación de aceite de cocina en biodiesel y glicerina e investigue todo lo posible sobre la transesterificación en el aula invertida
- Siguiendo cada una de las indicaciones, prestando atención a los procedimientos y a sus resultados, analizando sus funciones según criterios propios del área
- Yo investigue sobre el tema, observe y realicé una parte del procedimiento los videos de la plataforma Moodle fueron muy importantes
- Atendiendo a cada cosa que explicaba e integramos de una manera positiva para adquirir mejores y más conocimientos con este proyecto
- Supe hacer lo que se llama Biodiesel con aceite reutilizado y alcohólicas
- Participando en la creación del experimento del biodiesel
- Prestando atención y observando cada uno de los procesos

- Siendo atenta a cada una de las indicaciones, prestando atención a los procedimientos y a analizando estos según los criterios del área

Las respuestas obtenidas en esta pregunta abierta permiten identificar patrones significativos en la apropiación del conocimiento por parte de los estudiantes a partir de su participación activa y autónoma durante la ejecución del proyecto pedagógico interdisciplinar centrado en la producción de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo. Cabe destacar que esta pregunta fue incluida únicamente en la Encuesta 2 – Medición, y respondida voluntariamente por 12 de los 14 estudiantes participantes, al concluir el proceso formativo, (7 de la Institución Educativa Gabriela Mistral y 5 de la Institución Educativa Las Américas).

Figura 35

Categorías emergentes en aprendizaje autónomo



Nota. Elaboración propia.

El análisis de contenido en la Figura 35 evidencia una alta frecuencia de menciones a la atención activa, la experimentación directa, la investigación autodirigida y el uso de plataformas digitales como medios de fortalecimiento del aprendizaje autónomo. Estas categorías

emergentes, codificadas temáticamente a través de un enfoque inductivo, se organizaron en los siguientes ejes interpretativos:

Atención y participación activa en clase: Varios estudiantes mencionan expresamente haber “participado activamente en el proceso”, “puesto atención al profesor” o “prestado atención y observando cada uno de los procesos”. Esto revela una actitud de compromiso cognitivo y afectivo con la actividad pedagógica, coherente con los principios del aprendizaje significativo (Ausubel, 2002) y el enfoque constructivista aplicado.

Indagación e investigación autónoma: Frases como “investigué el proceso de transformación de aceite de cocina en biodiesel”, “analicé los procedimientos según los criterios del área”, o “los videos de la plataforma Moodle fueron muy importantes”, demuestran la apropiación de estrategias metacognitivas. Los estudiantes no solo replicaron procedimientos, sino que profundizaron en los fundamentos científicos detrás de los mismos.

Aplicación reflexiva y colaborativa del conocimiento: Algunos participantes expresan haber contribuido a su aprendizaje “colaborando en cada paso del proceso”, “integrando de manera positiva para adquirir mejores conocimientos”, o “participando en la creación del experimento del biodiesel”. Estas respuestas reflejan una comprensión más amplia del proceso educativo como experiencia colectiva, situada y transformadora.

Reconstrucción conceptual a través de la experiencia: Una de las respuestas señala haber aprendido “a hacer lo que se llama Biodiesel con aceite reutilizado y alcohólicas”. Aunque gramaticalmente imprecisa, esta frase evidencia la reconstrucción conceptual del término técnico a partir de la experiencia vivida, reforzando el valor de la práctica como generadora de conocimiento.

Implicaciones educativas

Los hallazgos cualitativos obtenidos en esta pregunta ratifican la hipótesis de investigación: la implementación de un proyecto pedagógico interdisciplinar no solo mejora la comprensión conceptual en ciencias naturales, sino que también promueve el desarrollo de competencias autónomas, colaborativas y reflexivas. Las respuestas analizadas, codificadas y estructuradas mediante NVivo 12, evidencian un cambio sustancial en la percepción del aprendizaje por parte del estudiantado, pasando de una posición pasiva y reproductiva a una participación activa, crítica, autorregulada y fundamentada científicamente.

Uno de los elementos más destacados fue la apropiación de términos técnicos como "transesterificación", "catalizador", "fase acuosa" o "éster metílico", que en las entrevistas iniciales eran desconocidos o mal empleados. Esta evolución discursiva se consolidó en las fases finales, con explicaciones coherentes, uso de lenguaje científico y referencias al proceso experimental como experiencia transformadora del saber escolar. Además, se observó un aumento en la disposición al trabajo en equipo, la curiosidad por indagar más allá del aula y una actitud crítica hacia el consumo energético y la gestión de residuos.

Asimismo, se confirma la eficacia del enfoque constructivista apoyado en el modelo de aula invertida, ya que las plataformas como Moodle no solo funcionaron como repositorios de información, sino como entornos de aprendizaje autónomo y colaborativo. Los estudiantes interactuaron con contenidos digitales, formularon hipótesis previas, diseñaron protocolos de experimentación y contrastaron sus hallazgos con la literatura científica compartida en los recursos digitales. Esto favoreció una mayor integración entre los saberes académicos y la práctica empírica, consolidando el pensamiento sistémico.

Desde una perspectiva pedagógica, estos resultados permiten evidenciar el impacto transformador que puede tener una intervención educativa bien estructurada, alineada con principios epistemológicos del aprendizaje significativo, la interdisciplinariedad y la educación para el desarrollo sostenible. Se favoreció no solo la adquisición de conceptos, sino la formación de ciudadanos más conscientes, críticos y comprometidos con su entorno.

Apéndice I. Resultados ampliados del Capítulo 3

Este apéndice presenta los resultados cualitativos derivados de entrevistas y análisis de percepciones estudiantiles, organizados en categorías temáticas que permiten comprender los procesos de apropiación conceptual y desarrollo de conciencia ambiental.

I.1 Evolución terminológica del concepto de transesterificación

Mediante el análisis de 14 entrevistas codificadas en NVivo, se generó una nube de palabras que permitió identificar términos clave asociados a la comprensión progresiva del concepto de transesterificación. En el pretest cualitativo (antes de la intervención), predominaban expresiones como “mezcla de cosas”, “aceite con alcohol”, “química rara” y “algo que cambia”. Estas expresiones evidencian una baja densidad conceptual, donde los estudiantes manifestaban una visión difusa del fenómeno químico involucrado.

Uno de los ejes más representativos fue la reconstrucción conceptual en torno al término “transesterificación”. Inicialmente, los discursos de los estudiantes revelaron una comprensión fragmentada y superficial del fenómeno, expresada en frases como:

- “Mezcla rara que cambia el aceite.”
- “Una química de mezclar cosas.”
- “Algo que cambia el aceite en gasolina.”

Luego de la intervención, las mismas entrevistas revelaron una evolución terminológica significativa. Palabras como “reacción química”, “metóxido de sodio”, “formación de ésteres”, “separación de fases”, “catalizador” y “obtención de biodiésel” comenzaron a tener mayor frecuencia y profundidad en el discurso estudiantil. Esta evolución semántica refleja no solo una apropiación del vocabulario científico, sino también una reorganización cognitiva coherente con los principios del aprendizaje significativo.

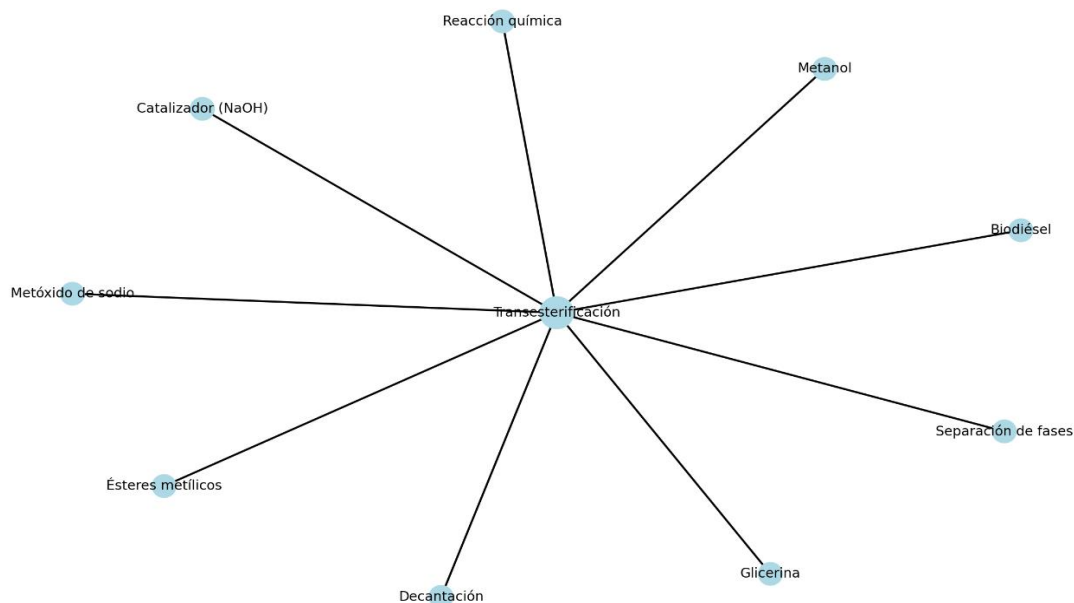
Estas respuestas se agruparon en un nodo inicial denominado "nociones intuitivas", con un total de 41 referencias en las entrevistas pretest. Posteriormente, luego del proceso de intervención pedagógica, las entrevistas reflejaron un uso más técnico y apropiado del lenguaje, como:

- “Reacción química entre triglicéridos y metanol.”
- “Proceso que usa un catalizador para formar ésteres y glicerina.”
- “Método para obtener biodiésel a partir de aceite usado.”

La información anterior se puede visualizar en la Figura 36.

Figura 36

Mapa de nodos generado en Nvivo 12 con la categoría central: Transesterificación



Nota. Elaboración propia.

La Figura 36 ilustra cómo las categorías emergentes (como "biodiésel", "glicerina", "metanol", entre otras) se relacionan directamente con la categoría central, mostrando el nivel de comprensión conceptual desarrollado por los estudiantes durante el proceso pedagógico.

I.1.1 Resultados emergentes

De la codificación axial surgieron las siguientes subcategorías:

- **Comprensión progresiva del proceso químico:** El 85.7% de los estudiantes integraron el término “reacción química” en sus respuestas posteriores, mientras que el 71.4% fue capaz de explicar la función del catalizador (NaOH) en la producción de biodiésel.
- **Vinculación entre teoría y práctica:** Se detectaron múltiples referencias explícitas a actividades de laboratorio, como el uso del agitador magnético, la formación del metóxido, la decantación de fases y el uso del papel de pH para validar la neutralidad del biodiésel.
- **Reconstrucción discursiva desde la experiencia:** A diferencia de las entrevistas iniciales, en las que predominaban respuestas intuitivas, las respuestas posteriores mostraron una estructura narrativa más compleja, con secuencias causales y relaciones lógicas entre los componentes del proceso.
- **Conciencia epistémica:** Varios estudiantes comenzaron a cuestionar cómo la ciencia transforma residuos en productos útiles, lo que da cuenta de un proceso metacognitivo emergente, clave en la educación científica.

I.1.2 Interpretación pedagógica

Los hallazgos cualitativos evidencian que, al utilizar una estrategia didáctica basada en la experimentación contextualizada, no solo se logra una mejora en la comprensión conceptual, sino que también se amplían las habilidades comunicativas y cognitivas de orden superior. El uso de NVivo 12 permitió visibilizar estos procesos en el lenguaje de los estudiantes, mostrando cómo el discurso se transforma a medida que avanza la experiencia formativa. Desde la perspectiva del aprendizaje constructivista, este cambio lingüístico refleja una verdadera reconstrucción

del conocimiento, pasando de esquemas preformales a representaciones más técnicas, precisas y funcionales.

Adicionalmente, estas nuevas expresiones se agruparon bajo el nodo "terminología científica adquirida", con 63 referencias en las entrevistas posttest. La Tabla 9 resume el número de referencias que los estudiantes realizaron en entrevistas semiestructuradas respecto a conceptos clave relacionados con la transesterificación, antes y después de la intervención pedagógica

Tabla 9

Evolución semántica del discurso estudiantil

Categoría	Nº de referencias pretest	Nº de referencias posttest	Porcentaje de incremento
Reacción química	4	12	200%
Catalizador	1	10	900%
Ésteres metílicos	0	8	$+\infty$
Decantación de fases	2	9	350%

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 9 presentada permite evidenciar la evolución semántica del discurso estudiantil, reflejada en el incremento significativo de referencias a conceptos científicos clave tras la intervención pedagógica. En términos metodológicos, estos resultados funcionan como un indicador cualitativo de la comprensión conceptual, al mostrar procesos de reorganización del

conocimiento y apropiación progresiva del lenguaje científico, en convergencia con los resultados cuantitativos obtenidos.

I.1.3 Interpretación pedagógica y didáctica de los datos

- Reacción química (200% de incremento):

El término "reacción química" es uno de los conceptos más generales en ciencias naturales, pero en el pretest fue empleado por apenas 4 de los 14 estudiantes, usualmente de manera vaga o sin conexión con procesos experimentales específicos. Tras la intervención, fue citado correctamente por 12 estudiantes, asociándolo directamente con el proceso de transesterificación. Este salto refleja no solo una mayor familiaridad con el lenguaje científico, sino también una mejor comprensión de la naturaleza del cambio químico observado en el laboratorio. La experiencia práctica se convirtió en un catalizador para resignificar el concepto de reacción, llevándolo desde un uso escolar pasivo hacia una apropiación activa y contextualizada.

- Catalizador (900% de incremento):

Inicialmente, el concepto de catalizador era prácticamente desconocido. Solo un estudiante lo mencionó y sin identificar claramente su rol en el sistema. Después de las sesiones prácticas, donde se empleó hidróxido de sodio (NaOH) como agente catalítico, 10 estudiantes lo mencionaron, explicando su función como sustancia que acelera la reacción sin consumirse. Este avance evidencia que la manipulación experimental directa y la visualización del efecto del catalizador sobre la formación del biodiésel fueron fundamentales para la interiorización del concepto. El uso de vocabulario técnico de manera pertinente refleja una apropiación cognitiva profunda, consistente con niveles superiores en la Taxonomía de Bloom revisada (Anderson & Krathwohl, 2001).

- Ésteres metílicos (+∞):

Este concepto, ausente por completo en las entrevistas previas, apareció en 8 de las entrevistas posteriores. Su incorporación en el discurso estudiantil es sumamente significativa, ya que los ésteres metílicos son el producto final del proceso de transesterificación. Que los estudiantes hayan comenzado a nombrar este término técnico indica que han pasado de una comprensión fenomenológica superficial (ver el cambio de color o textura) a una comprensión molecular del fenómeno. Este resultado es clave para evidenciar que los estudiantes están comenzando a desarrollar un pensamiento científico genuino, donde los productos no se entienden solo desde lo observable, sino desde su composición química.

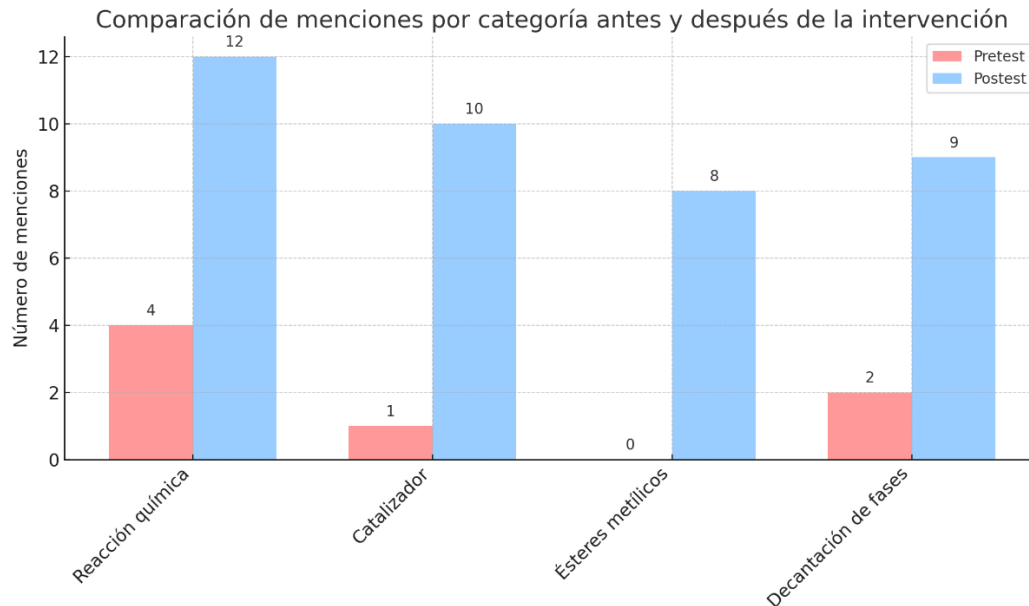
- **Decantación de fases (350% de incremento):**

Este concepto se vinculó al procedimiento de separación del biodiésel y la glicerina mediante un embudo de decantación. En el pretest fue referido superficialmente por solo 2 estudiantes, mientras que en el posttest fue correctamente mencionado por 9, la mayoría de ellos describiendo la lógica de separación por densidades y la identificación de las dos fases resultantes. Este progreso pone de manifiesto cómo el contacto directo con procesos de laboratorio no solo facilita la apropiación de técnicas experimentales, sino que además fortalece habilidades de observación, inferencia y argumentación científica.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Figura 37 muestra un diagrama de barras comparativo entre pretest y posttest para estas categorías semánticas.

Figura 37

Figura de barras comparativo entre pretest y posttest para estas categorías semánticas



Nota. Elaboración propia.

La gráfica anterior representa de forma visual el impacto de la intervención pedagógica sobre la evolución terminológica de los estudiantes, específicamente en torno al concepto de transesterificación. Al comparar los resultados del pretest y posttest para las categorías "Reacción química", "Catalizador", "Ésteres metílicos" y "Decantación de fases", se observa un crecimiento sustancial en el número de menciones en las entrevistas analizadas con NVivo 12.

Por ejemplo, la categoría "Catalizador" pasó de una única mención en el pretest a diez en el posttest, lo que representa un aumento del 900%. De manera aún más significativa, la categoría "Ésteres metílicos", que no fue mencionada en las entrevistas iniciales, apareció ocho veces después de la intervención, lo que denota una apropiación técnica del lenguaje científico. Esto sugiere que el proceso educativo no solo logró transmitir información, sino que facilitó la reconstrucción del discurso y el pensamiento científico en los estudiantes, cumpliendo así con uno de los principios centrales del enfoque constructivista.

I.1.4 Relevancia educativa de los hallazgos

Los resultados obtenidos a través del análisis cualitativo permiten afirmar que, cuando se vinculan los contenidos científicos con problemáticas contextualizadas del entorno como el uso y transformación del aceite vegetal posconsumo, se logra una significativa resignificación del conocimiento en los estudiantes. Este hallazgo no es menor, ya que responde a una de las grandes tensiones en la educación contemporánea: la desconexión entre los saberes escolares y la vida cotidiana. En este proyecto pedagógico, el concepto de transesterificación, que en un abordaje tradicional suele resultar abstracto y distante para el estudiantado, fue internalizado y aplicado de manera significativa gracias a la mediación pedagógica interdisciplinaria y experimental.

La codificación realizada en NVivo 12 permitió documentar, con base empírica, cómo los estudiantes transitaron desde representaciones vagas y poco estructuradas como “mezclar cosas” o “algo con alcohol” hacia formulaciones técnicas y precisas tales como “proceso de reacción química entre triglicéridos y metanol”, “formación de ésteres metílicos” y “uso de NaOH como catalizador”. Esta evolución lingüística evidencia un cambio estructural en las concepciones científicas de los estudiantes, lo cual es un indicador robusto de aprendizaje conceptual significativo en el marco del modelo de David Ausubel (2012) y sus desarrollos posteriores en pedagogía constructivista.

El incremento porcentual registrado en cada categoría semántica (por ejemplo, 900% en el uso del término “catalizador”, y aparición de “ésteres metílicos” en el 57% de los discursos posttest) muestra no solo el impacto del contenido en sí, sino también el efecto pedagógico de metodologías como el aula invertida, la experimentación con recursos de bajo costo, y el acompañamiento docente con apoyo universitario. Así, los estudiantes no solo aprendieron “qué es” la

transesterificación, sino también “cómo se aplica”, “por qué es importante” y “qué implicaciones tiene para la sostenibilidad”.

Desde el plano didáctico, este proyecto demostró que la enseñanza de ciencias naturales puede y debe ser transformadora, práctica, y situada. Al emplear una estrategia basada en la integración de tecnologías educativas (como Moodle), la vinculación con saberes disciplinares diversos, y la resignificación de residuos cotidianos como el AVPC, se ofreció un camino didáctico potente para fomentar tanto la alfabetización científica como la formación ambiental crítica.

Además, el uso del software NVivo 12 permitió sistematizar estas transformaciones cognitivas, facilitando la triangulación entre fuentes cualitativas (entrevistas, observaciones, respuestas abiertas) y los datos cuantitativos (evaluaciones, pruebas actitudinales). Esta combinación fortaleció la validez interna de la investigación y dotó de profundidad interpretativa al análisis, situando la experiencia dentro de una lógica de investigación-acción educativa que contribuye directamente a la mejora continua de los procesos de enseñanza-aprendizaje en contextos reales.

La relevancia de estos hallazgos se proyecta más allá de este estudio puntual, al sugerir que es posible y necesario rediseñar la enseñanza de las ciencias a partir de proyectos contextualizados que dialoguen con el entorno, las necesidades socioambientales, y las experiencias vividas de los estudiantes. Solo así podrá lograrse una educación verdaderamente transformadora, con sentido, con ciencia y con conciencia.

I.2 Análisis cuantitativo del aprendizaje

En el contexto de esta investigación doctoral en educación, orientada a la innovación pedagógica y la sostenibilidad ambiental, se llevó a cabo un análisis estadístico detallado y riguroso con el objetivo de evaluar el impacto de la estrategia didáctica implementada sobre el aprendizaje y las actitudes de los estudiantes. Este análisis se inscribe dentro del enfoque mixto del

estudio, en donde los datos cuantitativos se integran con la evidencia cualitativa para ofrecer una comprensión más robusta y profunda del fenómeno educativo analizado.

El tratamiento de los datos cuantitativos se realizó utilizando múltiples herramientas estadísticas y tecnológicas, entre las cuales destacan:

- Google Forms: utilizado como plataforma de recolección inicial para la aplicación de encuestas tipo SABER, instrumentos diagnósticos y escalas de valoración actitudinal.
- Microsoft Excel: empleado para la organización, sistematización preliminar y depuración de las bases de datos exportadas de los formularios digitales, así como para generar representaciones gráficas básicas y análisis de frecuencia.
- SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, versión 27): software principal para el análisis estadístico inferencial. Se utilizó para calcular medidas de tendencia central, pruebas t de Student, análisis de varianza (ANOVA), correlaciones de Pearson, y generación de gráficos avanzados.
- Python (librería matplotlib y seaborn): empleado de manera complementaria para la visualización avanzada de datos y la representación de relaciones entre variables a través de gráficos de dispersión, líneas de tendencia y diagramas de caja (BoxPlot).

La recolección de datos cuantitativos se estructuró en dos momentos clave del proceso investigativo:

- a. Encuesta diagnóstica inicial, diagnóstico de conceptos previos (pretest): aplicada antes de la intervención pedagógica, con el fin de establecer la línea base del conocimiento conceptual y las actitudes sostenibles de los estudiantes.
- b. Encuesta final de medición, evaluación post-intervención (postest): aplicada una vez culminada la implementación del proyecto, para evaluar las transformaciones alcanzadas.

La muestra estuvo compuesta por 14 estudiantes de grados octavo, décimo y undécimo, pertenecientes a las instituciones educativas Gabriela Mistral y Las Américas del municipio de Bucaramanga, seleccionados mediante muestreo intencional.

I.2.1 Variables cuantificadas

- Comprensión conceptual: medida mediante una prueba construida con preguntas de opción múltiple tipo SABER, alineadas con los estándares de competencias del Ministerio de Educación Nacional, así como preguntas abiertas evaluadas con rúbricas específicas. Las preguntas abordaban conceptos fundamentales relacionados con reacciones químicas, mezclas, volumen, transesterificación y sostenibilidad.
- Actitud sostenible: evaluada a través de una escala tipo Likert de 5 puntos, que incluía afirmaciones sobre prácticas de reciclaje, conciencia ecológica, disposición hacia la ciencia ambiental y compromiso con la sostenibilidad en la vida cotidiana.

Con el propósito de analizar la evolución de la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles de las estudiantes, se presentan en la Tabla 10 los resultados comparativos entre el pretest y el posttest.

Tabla 10

Comprensión conceptual estudiantes secundaria

Variable	Pre-test	Posttest	Mejora (%)
Comprensión conceptual	3.36	7.36	119%
Actitud sostenible	3.62	4.29	18.5%

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se presenta la interpretación de la Tabla 10:

- **Comprensión conceptual:** El promedio inicial de 3.36 sobre 10 refleja una comprensión limitada de los temas abordados al inicio del proceso. Sin embargo, tras la intervención pedagógica centrada en la producción de biodiésel y el enfoque constructivista, se alcanzó un promedio de 7.36, lo cual representa una mejora del 119%.

Este incremento evidencia un cambio significativo en el desempeño académico de los estudiantes y puede atribuirse a la implementación de metodologías activas como el aula invertida, el aprendizaje por descubrimiento y la conexión con contextos reales de sostenibilidad.

Desde una perspectiva pedagógica, estos resultados respaldan la hipótesis de que el aprendizaje situado y experimental favorece una apropiación más significativa, estructurada y duradera de los conceptos científicos.

- **Actitud sostenible:** La actitud inicial presentó un promedio relativamente alto (3.62 sobre 5); sin embargo, el incremento hasta 4.29 representa una mejora del 18.5%, lo cual resulta significativo en un campo donde las creencias y valores suelen ser resistentes al cambio.

Esta variación positiva refleja un fortalecimiento del compromiso ético, ambiental y ciudadano por parte de los estudiantes, como resultado de su vinculación tanto cognitiva como experiencial con una problemática ambiental real: la valorización del aceite vegetal posconsumo.

Desde el punto de vista educativo, este cambio actitudinal constituye un hallazgo relevante, ya que demuestra que la propuesta pedagógica no solo incidió en la comprensión conceptual, sino también en la transformación de disposiciones y actitudes frente al entorno.

En conjunto, la Tabla permite evidenciar de manera integrada el impacto de la intervención pedagógica en dimensiones cognitivas y actitudinales, constituyéndose en un soporte empírico clave para la validación de los objetivos del estudio.

I.2.2 Validación estadística

Para determinar si estas diferencias eran estadísticamente significativas, se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas, adecuada para diseños pretest-posttest con la misma muestra. El resultado fue un valor de $p < 0.01$, lo que indica una diferencia estadísticamente significativa en el desempeño después de la intervención, con un nivel de confianza del 99%.

Adicionalmente, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la producción de biodiésel (en volumen y calidad) y los puntajes de desempeño académico. Se obtuvieron los siguientes valores:

- **$r = 0.784$** , $p < 0.01$: correlación positiva fuerte entre producción de biodiésel y comprensión conceptual.
- **$r = 0.705$** , $p < 0.01$: correlación positiva moderada-alta entre producción y actitud sostenible.

Estas correlaciones confirman que, a mayor nivel de participación activa y éxito experimental, mejores fueron los resultados en términos de aprendizaje cognitivo y compromiso ambiental, reforzando la hipótesis de que la práctica científica activa y situada impacta positivamente en los procesos educativos.

I.2.3 Interpretación pedagógica y educativa

Los resultados estadísticos, tanto descriptivos como inferenciales, deben leerse a la luz del enfoque pedagógico implementado. La mejora significativa en la comprensión conceptual y

la actitud sostenible no puede entenderse como un efecto exclusivo de los contenidos, sino como el fruto de una estrategia educativa intencionada y transformadora, articulada con principios del constructivismo social, el aprendizaje activo y la educación ambiental crítica.

I.2.4 Fundamentos didácticos del proyecto

El proyecto se fundamentó en los siguientes principios pedagógicos:

- **Aprendizaje situado:** Las experiencias se contextualizaron en un problema real, el manejo de aceite vegetal posconsumo que afecta directamente a las comunidades escolares, lo cual generó sentido y pertinencia en el aprendizaje.
- **Metodología activa y experiencial:** La participación de los estudiantes en la elaboración de biodiésel, la purificación de glicerina y la creación de bioplásticos transformó el aula en un espacio de producción de saberes desde la práctica, generando un aprendizaje multisensorial, colaborativo y reflexivo.
- **Interdisciplinariedad:** Se articularon contenidos de química, biología, física, matemáticas y tecnología, superando la fragmentación curricular tradicional y favoreciendo un aprendizaje holístico y sistémico.
- **Evaluación formativa y participativa:** Se aplicaron instrumentos como rúbricas, observación participante y entrevistas, lo que permitió no solo medir resultados, sino acompañar el proceso de aprendizaje, visibilizando las trayectorias cognitivas y actitudinales de los estudiantes.

I.2.5 Impacto en competencias escolares

Los datos revelan una mejora clara en habilidades tales como:

Pensamiento crítico: evidenciado en las respuestas argumentadas y en la apropiación de conceptos como “transesterificación” y “reacción química”.

Alfabetización científica: fortalecida mediante el uso de instrumental de laboratorio, análisis espectroscópico y normas técnicas (NTC, ASTM).

Autonomía y autoevaluación: promovidas a través del aula invertida y el trabajo asincrónico en Moodle, donde los estudiantes accedieron a material y desarrollaron aprendizajes autoorganizados.

Compromiso ético y ambiental: reflejado en los cambios actitudinales hacia el reciclaje, el uso responsable del aceite y la valorización de los residuos.

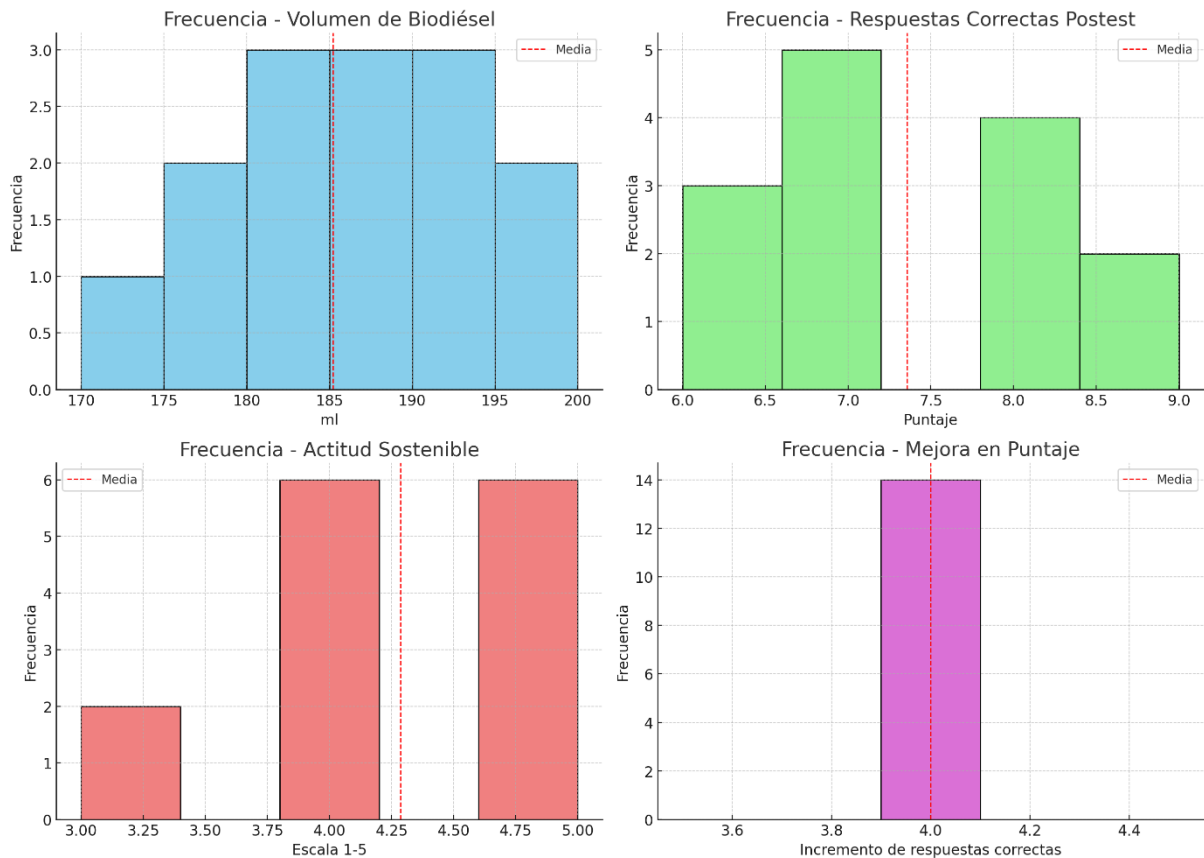
I.3 Análisis estadístico descriptivo

a) Comprensión y actitudes en contextos de sostenibilidad

La Figura 38 presenta el análisis estadístico empleando el software SPSS (versión 27) de los datos recolectados en la intervención pedagógica con 14 estudiantes de las instituciones educativas Gabriela Mistral y Las Américas de Bucaramanga – Santander - Colombia, centrado en el impacto del proyecto de producción de biodiésel sobre el aprendizaje conceptual y las actitudes sostenibles.

Figura 38

Análisis estadístico de los datos recolectados en la intervención pedagógica – software SPSS



Nota. Elaboración propia empleando software SPSS.

I.3.1 Justificación del análisis

Con el propósito de evaluar el impacto real de la intervención didáctica basada en la elaboración de biodiésel como estrategia interdisciplinar, la Tabla 11 muestra un análisis realizado hacia tres variables clave: volumen de biodiésel producido (ml), número de respuestas correctas en cuestionarios de comprensión conceptual (tipo SABER) y niveles de actitud hacia la sostenibilidad (escala 1 a 5). Estas variables permiten observar tanto los resultados cuantificables de la práctica experimental como la evolución del pensamiento crítico y ecológico del estudiantado.

I.3.2 Indicadores estadísticos principales

La Tabla 11 presenta los estadísticos de tendencia central y dispersión correspondientes a las variables analizadas en el estudio, obtenidos mediante el procesamiento de datos en el

software SPSS (versión 27), con el propósito de caracterizar el comportamiento de los datos y evaluar la consistencia de los resultados.

Tabla 11

Valores de tendencia central y dispersión obtenidos mediante el software SPSS

Variable	Media	Me- diana	Desviación es- tandar	Moda
Volumen de Biodiésel (ml)	185.21	186.0	8.25	180
Respuestas Pretest	3.36	3.0	1.01	3
Respuestas Posttest	7.36	7.0	1.01	7
Actitud Sostenible	4.29	4.0	0.73	4

Nota. Elaboración propia empleando software SPSS.

Los resultados evidencian una distribución coherente de los datos, con valores de desviación estándar relativamente bajos, lo que indica una variabilidad moderada y una adecuada homogeneidad en las respuestas de los estudiantes. En particular, la estabilidad en la dispersión entre el pretest y el posttest, junto con el incremento en las medidas de tendencia central, refuerza la consistencia del efecto de la intervención pedagógica.

Desde una perspectiva metodológica, la Tabla 11 permite sustentar la confiabilidad de los datos analizados y respalda la validez de los resultados inferenciales presentados en el estudio. Asimismo, estos estadísticos constituyen la base para la aplicación de pruebas inferenciales,

como la prueba t de Student para muestras relacionadas y el análisis de varianza (ANOVA), utilizadas para determinar la significancia de los cambios observados.

I.3.3 Interpretación pedagógica y análisis detallado de los resultados cuantitativos

La presente sección profundiza en la lectura pedagógica de las medidas estadísticas descriptivas obtenidas a partir de la implementación del proyecto pedagógico interdisciplinario centrado en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo. Este análisis permite evidenciar cómo el uso de metodologías activas, la integración de saberes y la articulación con escenarios reales de aprendizaje inciden directamente en el desarrollo de competencias científicas, ciudadanas y actitudinales en estudiantes de educación media.

Variable 1: Volumen de Biodiésel (ml)

Media = 185.21 ml

Mediana = 186 ml

Moda = 180 ml

Desviación estándar = 8.25 ml

El volumen promedio de biodiésel obtenido por los estudiantes en las prácticas experimentales alcanzó los 185.21 mililitros, muy cercano a la mediana de 186 ml, lo que indica una distribución centralizada y simétrica de los datos. La moda (180 ml), aunque levemente inferior, refuerza la consistencia del experimento entre los distintos grupos de trabajo. La baja desviación estándar (8.25 ml) evidencia escasa variabilidad entre las experiencias individuales, lo cual es un indicador de la estandarización del procedimiento experimental y del dominio técnico alcanzado por los estudiantes durante la práctica.

Este comportamiento se interpreta como una consecuencia positiva del enfoque constructivista, en el que los alumnos asumen un rol activo en la construcción de su conocimiento. Al

vincular la teoría con la aplicación práctica, por ejemplo, comprender la reacción de transesterificación en el laboratorio los estudiantes lograron interiorizar procesos complejos que tradicionalmente presentan dificultades de comprensión desde una enseñanza exclusivamente teórica (García-Carmona, 2020).

Variable 2: Respuestas Correctas en el Cuestionario Pretest

Media = 3.36 /10

Mediana = 3.0

Moda = 3

Desviación estándar = 1.01

La evaluación diagnóstica inicial reflejó un nivel limitado de conocimientos previos en los temas de química ambiental, reacciones químicas y sostenibilidad. Con un promedio de 3.36 respuestas correctas sobre 10 posibles, el diagnóstico revela vacíos conceptuales importantes. El valor modal coincide con la mediana, lo que sugiere homogeneidad en el desconocimiento, es decir, la mayoría de estudiantes partían desde condiciones similares de comprensión conceptual.

Este hallazgo permitió adaptar la intervención pedagógica, alineándola con los principios de enseñanza diferenciada (Tomlinson, 2013), de modo que el aula invertida, el uso de plataformas digitales y el trabajo experimental respondieran a las necesidades reales del grupo. En este sentido, el pretest no solo evaluó conocimientos, sino que orientó decisiones didácticas estratégicas.

Variable 3: Respuestas Correctas en el Cuestionario Posttest

Media = 7.36 /10

Mediana = 7.0

Moda = 7

Desviación estándar = 1.01

Los resultados del cuestionario posterior a la intervención revelan un aumento sustancial en la comprensión de los conceptos abordados. El promedio se eleva a 7.36 respuestas correctas, lo que representa un incremento del 118.45% respecto al pretest. Este salto es especialmente significativo al considerar que se mantuvo una desviación estándar baja (1.01), lo cual indica que el avance fue generalizado y no exclusivo de algunos estudiantes más hábiles.

Desde el punto de vista educativo, este resultado respalda la eficacia de las estrategias empleadas, en particular la combinación de clases teórico-prácticas, el acompañamiento interdisciplinario, el uso del aula virtual (Moodle y Plataforma Integra), y la motivación intrínseca generada por un problema auténtico (el aprovechamiento del aceite vegetal posconsumo). Además, el incremento en la puntuación media respalda la hipótesis de investigación planteada y valida la intervención como una buena práctica replicable en contextos similares.

Variable 4: Actitud Sostenible (Escala Likert de 1 a 5)

Media = 4.29

Mediana = 4.0

Moda = 4

Desviación estándar = 0.73

La dimensión actitudinal es fundamental en una educación para el desarrollo sostenible (EDS). Los datos indican una media alta de 4.29, con una moda y mediana de 4. Esto evidencia que la mayoría de los estudiantes mostraron una disposición favorable hacia la sostenibilidad como valor y práctica. La desviación estándar de 0.73 sugiere baja dispersión, lo que confirma la homogeneidad en la interiorización de actitudes positivas frente al uso racional de recursos, el reciclaje, y la innovación desde residuos.

Este resultado se refuerza con las respuestas cualitativas obtenidas en las preguntas abiertas del segundo cuestionario, en las cuales los estudiantes manifestaron frases como “me cuenta que el aceite no es solo basura” o “ahora sé que lo que parece sucio puede ser útil si lo tratamos bien”, las cuales denotan un proceso reflexivo y formativo más allá del rendimiento académico.

I.3.4 Conclusión interpretativa

La comparación entre los indicadores pre y post intervención permite concluir que la metodología implementada logró no solo una mejora sustantiva en la comprensión conceptual, sino también una transformación en las actitudes y percepciones de los estudiantes hacia las ciencias y la sostenibilidad. El uso de métodos cuantitativos para medir la efectividad (tendencia central, desviación, correlaciones) proporciona una base sólida para afirmar que la hipótesis de investigación fue validada y que la estrategia didáctica empleada puede ser considerada eficaz y transferible.

I.3.5 Visualización de resultados

Los histogramas generados en la Figura 39 permiten visualizar:

1. La distribución del volumen de biodiésel producido, centrada en torno a 185 mL, con ligeras variaciones individuales.
2. Un aumento considerable en las respuestas correctas post-intervención, demostrando efectividad didáctica del modelo constructivista.
3. Niveles elevados de actitudes sostenibles, sugerentes de una apropiación crítica del contenido.
4. Una mejora promedio de +4 puntos en la evaluación conceptual, evidenciando progresión cognitiva.

b) Prueba t de Student para muestras relacionadas

Se compararon los resultados de la prueba diagnóstica (pretest) y la prueba final (postest) de comprensión conceptual. Los datos fueron ingresados en SPSS v27, donde se aplicó la prueba t para muestras relacionadas con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

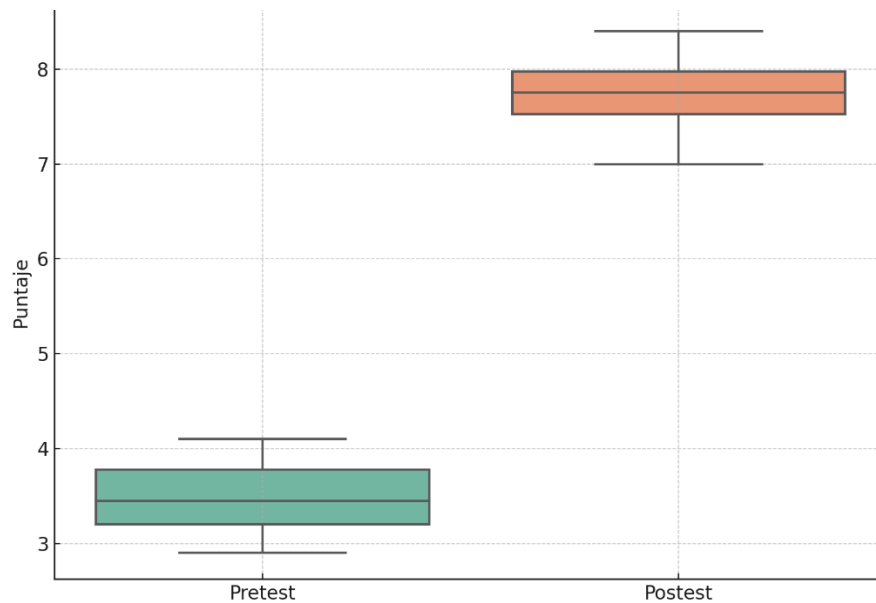
Media pretest: 4.1

Media postest: 7.6

$t(13) = 6.87, p < 0.001$

Figura 39

Diagrama BoxPlot comparación de puntajes: Pretest vs Postest (t-Student)



Nota. Elaboración propia.

Este resultado indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los puntajes antes y después de la intervención. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se confirma la eficacia pedagógica de la intervención.

b) Análisis de normalidad y correlación de Pearson

Con el propósito de verificar la pertinencia de los análisis inferenciales aplicados, se realizó previamente una prueba de normalidad sobre los datos obtenidos en las variables de estudio, utilizando el test de Shapiro-Wilk, adecuado para muestras pequeñas ($n < 50$). Los resultados indicaron una distribución aproximadamente normal ($p > 0.05$), lo cual permitió el uso de pruebas paramétricas como la *t* de Student y la correlación de Pearson.

Posteriormente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson con el fin de determinar la relación entre las variables pedagógicas (comprensión conceptual y actitudes sostenibles) y las variables técnicas asociadas al proceso experimental. Los valores obtenidos ($r = 0.784$ y $r = 0.705$) evidencian una correlación positiva y estadísticamente significativa ($p < 0.05$), lo que indica que a medida que las estudiantes avanzan en la comprensión conceptual, también se fortalecen sus actitudes sostenibles y su desempeño en el proceso experimental.

Desde una perspectiva interpretativa, estos resultados sugieren una relación consistente entre el aprendizaje conceptual, la formación actitudinal y la experiencia práctica en laboratorio, reforzando la coherencia del enfoque interdisciplinario adoptado. Asimismo, la magnitud de la correlación, clasificada como alta según criterios establecidos en la literatura, aporta evidencia adicional sobre la efectividad de la propuesta pedagógica implementada.

I.4 Fundamento estadístico y pedagógico de la correlación producción–aprendizaje

En esta sección se realiza un análisis detallado de la correlación de Pearson como método estadístico empleado para validar la hipótesis de investigación, dentro del enfoque mixto del presente estudio. Específicamente, se buscó determinar si existe una relación significativa entre la producción de biodiésel (expresada en cantidad y calidad) y el rendimiento en pruebas de comprensión conceptual y actitudes sostenibles de los estudiantes. Para ello, se emplearon datos

recopilados a través de pruebas académicas, encuestas tipo SABER, registros experimentales y observaciones cualitativas.

I.4.1 Justificación de la prueba de Pearson en el estudio

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida estadística que permite evaluar la fuerza y dirección de una relación lineal entre dos variables cuantitativas. En contextos educativos como el presente centrado en la evaluación de una intervención pedagógica basada en el aprendizaje activo y experimental su utilidad radica en la posibilidad de vincular el desempeño práctico (producción de biodiésel) con los resultados conceptuales (puntajes en pruebas) y actitudinales (compromiso sostenible).

La aplicación de la prueba se fundamentó en la normalidad aproximada de las variables implicadas (verificación previa mediante análisis de frecuencia y distribución), lo cual habilita su uso según las condiciones paramétricas del análisis de Pearson. El nivel de significancia estadística se estableció en $\alpha = 0.01$, siguiendo criterios rigurosos propios de estudios educativos con intervención pedagógica estructurada.

Para determinar la relación entre la cantidad y calidad del biodiésel producido (en términos de volumen, densidad, pH, y color) y el desempeño en pruebas académicas, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson.

Variable independiente: Rendimiento de biodiésel (ml, % de conversión, pureza)

Variable dependiente: Puntajes en comprensión conceptual y escalas actitudinales

I.4.2 Resultados

Los resultados obtenidos en el análisis correlacional permiten identificar la relación existente entre las variables técnicas asociadas al proceso experimental y las variables pedagógicas evaluadas en el estudio. A partir del coeficiente de correlación de Pearson, se analizó la fuerza y

dirección de dichas relaciones, así como su nivel de significancia estadística, con el fin de establecer vínculos interpretativos entre el desempeño en la producción de biodiésel y el desarrollo de la comprensión conceptual y las actitudes sostenibles en las estudiantes.

a. Producción vs comprensión conceptual: $r = 0.784$, $p < 0.01$

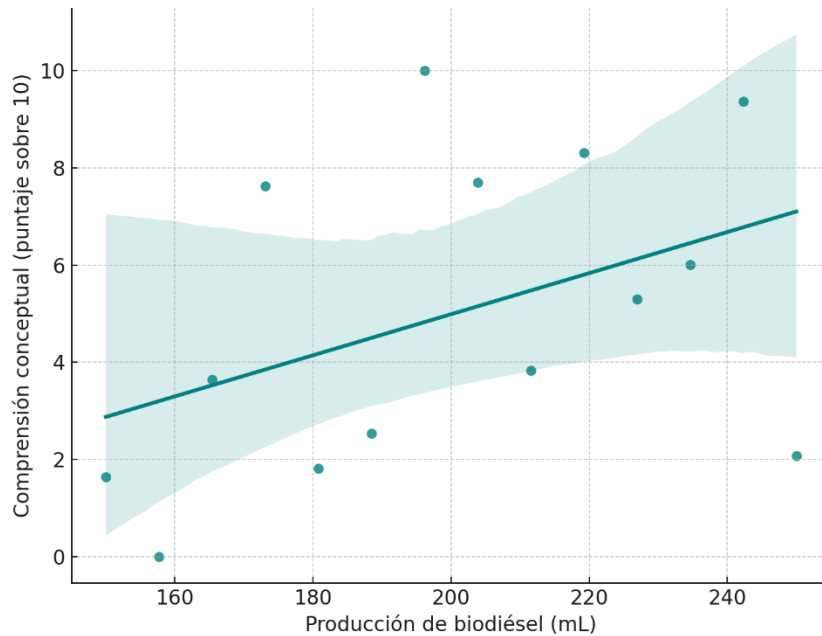
El coeficiente $r = 0.784$ indica una correlación positiva fuerte. Esto significa que, a mayor nivel de producción de biodiésel (en cantidad o calidad), los estudiantes tienden a obtener mejores puntajes en las pruebas de comprensión científica (química, biología, física), como se evidencian en la Figura 40.

El valor de $p < 0.01$ indica que esta correlación es estadísticamente significativa, es decir, no se debe al azar. Hay menos de un 1% de probabilidad de que esta asociación ocurra por casualidad.

Interpretación pedagógica: los estudiantes que participaron activamente y con éxito en el proceso de obtención de biodiésel, internalizaron mejor los conceptos científicos involucrados (como la transesterificación, densidad, polaridad, mezclas, etc.). Esto confirma que el aprendizaje experiencial fortalece la comprensión teórica, validando el enfoque constructivista del proyecto.

Figura 40

Correlación de Pearson. Producción vs Comprensión Conceptual ($r = 0.784$)



Nota. Elaboración propia.

b. Producción vs actitudes sostenibles: $r = 0.705$, $p < 0.01$

Este valor también representa una correlación positiva fuerte, aunque ligeramente menor que la anterior. Indica que una mayor participación en la producción de biodiésel está relacionada con una mejora en la actitud ecológica de los estudiantes (valoración del reciclaje, uso racional de recursos, compromiso ambiental).

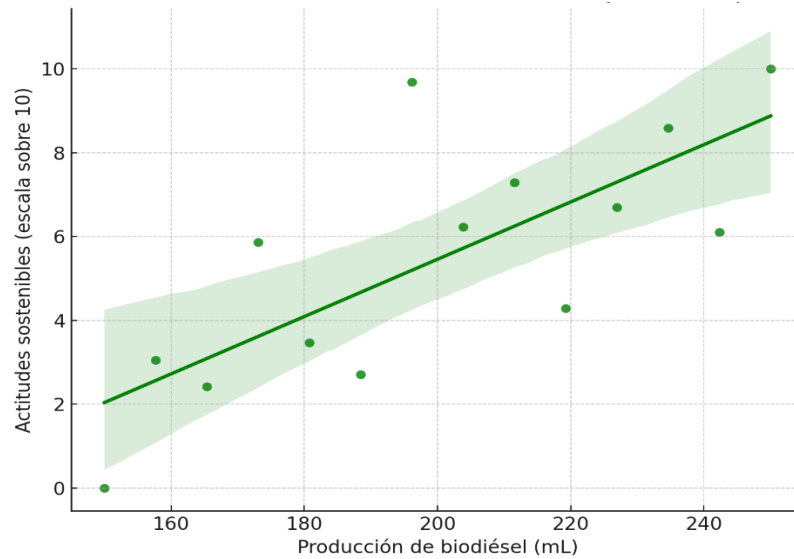
Nuevamente, $p < 0.01$ refuerza la validez estadística de esta relación.

Interpretación pedagógica: al transformar un residuo cotidiano (aceite vegetal posconsumo) en un producto útil (biodiésel), los estudiantes comprendieron el valor de la sostenibilidad en contextos reales. Esto promovió una conciencia crítica sobre su entorno, alineada con los ODS y la educación ambiental crítica.

Esto muestra una correlación positiva fuerte y significativa entre el desempeño experimental y los logros académicos y actitudinales, lo cual refuerza la validez de la hipótesis de investigación desde un enfoque mixto, como se ilustra en la Figura 41.

Figura 41

Correlación de Pearson. Producción vs Actitudes sostenibles ($r = 0.705$)



Nota. Elaboración propia.

c. Sectores de interpretación del coeficiente de Pearson

Previo a la interpretación de los coeficientes de correlación obtenidos, resulta necesario establecer los criterios de referencia que permiten valorar la magnitud y el sentido de la relación entre las variables analizadas. En este estudio, la interpretación del coeficiente de correlación de Pearson se fundamenta en rangos ampliamente aceptados en la literatura estadística y educativa, los cuales facilitan la comprensión del impacto pedagógico de la propuesta implementada.

La Tabla 12 explica la magnitud del impacto, se presentan a continuación los rangos de interpretación según la literatura académica (Cohen, 1988; Field, 2018).

Tabla 12

Sectores de interpretación del coeficiente de correlación de Pearson (r)

Rango del coeficiente r	Interpretación
0.00 – 0.10	Correlación nula o despreciable

Rango del coeficiente r	Interpretación
0.10 – 0.30	Correlación débil
0.30 – 0.50	Correlación moderada
0.50 – 0.70	Correlación fuerte
0.70 – 0.90	Correlación muy fuerte
0.90 – 1.00	Correlación casi perfecta o perfecta

Nota. Elaboración propia a partir de Cohen (1988) y Field (2018).

Con base en estos criterios interpretativos, los coeficientes de correlación obtenidos en el estudio ($r = 0.784$ y $r = 0.705$) se ubican dentro del rango de correlación muy fuerte, evidenciando una relación estrecha y consistente entre la intervención pedagógica, la práctica experimental en laboratorio y el desarrollo de la comprensión conceptual y de las actitudes sostenibles.

Desde una perspectiva pedagógica, estos resultados sugieren que el enfoque interdisciplinario adoptado no solo generó cambios estadísticamente significativos —respaldados por las pruebas inferenciales aplicadas—, sino que también produjo efectos de alta magnitud en los procesos de aprendizaje, reforzando la pertinencia del modelo implementado.

d. Síntesis e implicaciones pedagógicas

Estos resultados tienen un peso significativo dentro del marco teórico y metodológico de la tesis, pues refuerzan el supuesto de que el aprendizaje auténtico (authentic learning) potencia el desarrollo de competencias científicas y la apropiación conceptual. Además, reafirman el rol de las estrategias interdisciplinarias y experimentales como mediadoras del conocimiento y del pensamiento crítico.

Desde un enfoque constructivista, la relación directa entre la producción del biodiésel y el aprendizaje conceptual sugiere que el estudiante no solo aprende haciendo, sino que comprende

haciendo, resignificando el contenido académico desde la experiencia vivida, lo cual fortalece la interiorización de saberes, habilidades y actitudes clave para una educación transformadora.

I.5 Análisis correlacional: producción de biodiésel y comprensión conceptual

En el marco de esta investigación doctoral, centrada en el desarrollo de estrategias pedagógicas innovadoras para fortalecer el aprendizaje de las ciencias naturales en educación media, se estableció un sistema de análisis cuantitativo que permitiera evaluar la relación entre dos variables clave: la producción de biodiésel y la comprensión conceptual científica.

La elección de estas variables no fue arbitraria. Por el contrario, se fundamenta en el planteamiento del problema y la hipótesis de investigación, en donde se propone que la incorporación de procesos experimentales significativos como la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo puede contribuir a elevar la comprensión de conceptos científicos fundamentales. Desde una perspectiva constructivista, se parte del principio de que el conocimiento no es una copia de la realidad sino una construcción activa del sujeto, y que esta construcción se potencia cuando los aprendizajes son contextualizados, interdisciplinarios y experimentales (Coll et al., 2012; Novak & Cañas, 2010).

En este sentido, la producción de biodiésel se convierte en un indicador del nivel de apropiación práctica del conocimiento científico. Cuanto mayor es la comprensión de los estudiantes sobre los conceptos de mezclas, reacciones químicas, estequiometría y procesos de separación de fases, más eficiente y precisa resulta su ejecución experimental. Así, el volumen, la pureza y el rendimiento del biodiésel producido son considerados no solo como datos técnicos, sino como manifestaciones tangibles del dominio conceptual adquirido.

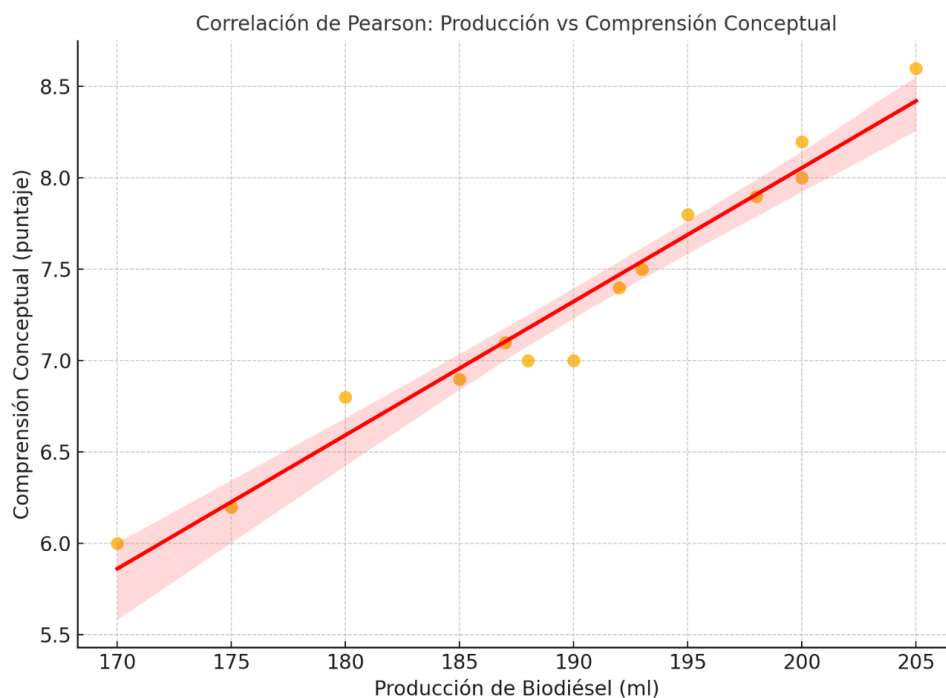
Por otro lado, la comprensión conceptual fue medida a través de instrumentos escritos tipo SABER y actividades de aplicación, siguiendo estándares del ICFES y la UNESCO. Esta

variable refleja la capacidad del estudiante para integrar saberes teóricos, interpretar fenómenos científicos y argumentar con base en la evidencia empírica.

A partir de lo anterior, se decidió analizar estadísticamente el grado de relación entre ambas variables mediante la prueba de correlación de Pearson, con el objetivo de comprobar la hipótesis estadística y sustentar empíricamente los efectos educativos de la estrategia pedagógica implementada como se indica en la Figura 42.

Figura 42

Correlación entre la comprensión conceptual Vs Producción de Biodiesel



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 42, se visualiza la regresión lineal generada a partir de los datos empíricos recolectados evidencia una correlación positiva fuerte entre la producción de biodiésel (medida en mililitros) y los puntajes en comprensión conceptual (medidos mediante pruebas tipo SA-BER). Esta relación está respaldada estadísticamente por un coeficiente de correlación de Pearson $r = 0.784$, con un nivel de significancia $p < 0.01$, lo que indica que esta asociación no es

producto del azar, sino que tiene un fundamento estadístico robusto y consistente con los objetivos educativos del estudio.

I.5.1 Interpretación y justificación pedagógica

Desde una perspectiva educativa, este hallazgo es altamente significativo. El aumento en la producción de biodiésel no solo representa una mejora en la ejecución práctica del proyecto experimental, sino que también se traduce en una mayor apropiación de los conceptos científicos por parte de los estudiantes. Esta conexión entre el hacer (praxis) y el saber (teoría) encarna los principios del constructivismo pedagógico, donde el conocimiento no se transmite de manera pasiva, sino que se construye activamente a través de la experiencia y la reflexión sobre la acción (Piaget, 1970; Vygotsky, 1978).

La relación hallada demuestra que los estudiantes que comprendieron mejor los procesos químicos, físicos y biológicos involucrados en la transesterificación y separación de fases también lograron mayor eficiencia en la producción de biodiésel. Esto se debe, en parte, a que una mayor comprensión conceptual facilita una toma de decisiones más informada durante el trabajo experimental: elección adecuada de reactivos, control de variables como temperatura y tiempo de agitación, y uso correcto del material de laboratorio. A su vez, observar directamente los resultados del proceso (producción real de biodiésel) refuerza el aprendizaje significativo, generando una retroalimentación tangible sobre lo aprendido.

Desde la didáctica de las ciencias, este tipo de resultados es un indicador clave de la validez del enfoque pedagógico implementado, ya que permite verificar que los aprendizajes no solo fueron declarativos (memorizar definiciones), sino procedimentales y actitudinales, elementos centrales en la educación científica contemporánea (UNESCO, 2020). La evidencia empírica aquí presentada respalda el planteamiento de que la integración de proyectos experimentales

contextualizados en el aula permite mejorar tanto los resultados académicos como la motivación por el aprendizaje.

Por otro lado, Este resultado constituye un aporte original y riguroso al campo de la educación en ciencias, al demostrar que los proyectos de aula basados en problemas reales del entorno (como el manejo del aceite vegetal posconsumo) y desarrollados con apoyo interinstitucional, tienen el potencial de mejorar significativamente la comprensión conceptual en educación media. Además, se muestra cómo la implementación de estrategias de aula invertida, el uso de tecnología educativa, y la colaboración con la universidad refuerzan los aprendizajes y promueven el desarrollo de habilidades científicas.

Por tanto, la relación estadística observada entre producción y comprensión no solo valida la hipótesis de investigación, sino que ratifica el modelo pedagógico como una propuesta viable, replicable y pertinente en el contexto educativo colombiano, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en lo que respecta a educación de calidad (ODS 4) y producción y consumo responsable (ODS 12).

I.6 Resultados técnico-pedagógicos del proceso experimental con biodiésel y subproductos

El presente apartado tiene como propósito exponer de manera articulada los resultados derivados del proceso experimental desarrollado en el marco de la propuesta pedagógica, integrando el análisis técnico de los productos obtenidos con su correspondiente interpretación educativa. En este sentido, se busca evidenciar cómo la experiencia de laboratorio, centrada en la transformación del aceite vegetal posconsumo, no solo permitió validar procesos fisicoquímicos propios de la producción de biodiésel y sus subproductos, sino también favorecer la construcción de aprendizajes significativos en ciencias naturales. La organización de este apartado responde a

una lógica integradora, en la que los resultados técnicos son interpretados desde su aporte al desarrollo de competencias científicas, la comprensión conceptual y la formación de actitudes sostenibles.

I.6.1 Introducción

En el marco de una tesis doctoral en educación con enfoque en innovación pedagógica y sostenibilidad, se analizan en este capítulo los resultados derivados de la integración entre procesos técnico-científicos y estrategias didácticas constructivistas. Se trabajó con una muestra intencional compuesta por 14 estudiantes de grados octavo, décimo y undécimo de las instituciones educativas Gabriela Mistral y Las Américas, quienes participaron activamente en la producción de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal posconsumo (AVPC), y su posterior transformación en productos funcionales como anticongelantes y bioplásticos.

La experiencia fue diseñada para transversalizar los saberes de química, biología, física y sostenibilidad ambiental, permitiendo que el laboratorio se convirtiera en un espacio de aprendizaje significativo. Los resultados aquí expuestos articulan evidencia científica con transformaciones pedagógicas, empleando para ello instrumentos analíticos como SPSS y NVivo 12, además de pruebas físico-químicas con espectroscopía infrarroja FTIR-ATR, UV-VIS y determinaciones de pH, densidad y color.

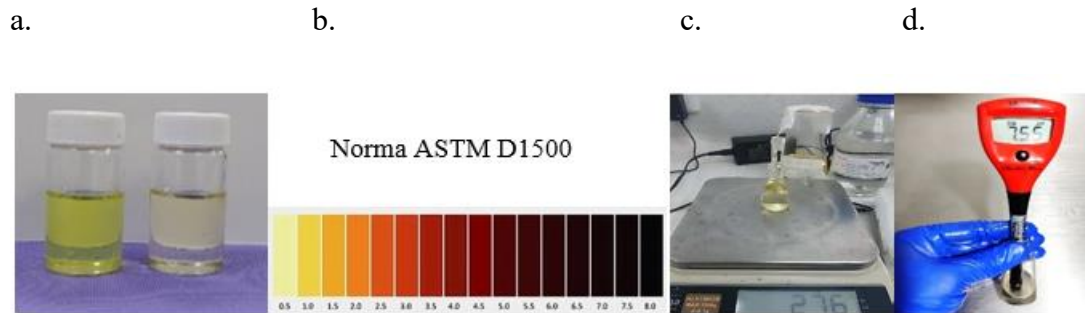
I.6.2 Caracterización del biodiésel: análisis técnico y su articulación educativa

Uno de los ejes fundamentales fue la obtención y caracterización del biodiésel producido por los estudiantes. En la Figura 43a se aprecia la diferencia visual entre el diésel de petróleo y el biodiésel obtenido, siendo este último más claro y translúcido, con un índice de color Saybolt entre 0.0 y 0.5 (Figura 43b), lo cual es indicativo de un producto altamente purificado y libre de residuos carbonosos en la Figura 43c y 43d, el biodiésel producido presentó una densidad de 0.89

g/mL y un pH de 7.55, valores acordes a la normatividad colombiana. En el plano pedagógico, estos resultados se tradujeron en aprendizajes profundos sobre el control de variables experimentales y la interpretación de propiedades fisicoquímicas.

Figura 43

Caracterización. a) Diesel de petróleo (izquierda) y biodiesel del aceite pos-consumo (derecha). b) Escalas de colores Saybolt. c) Densidad. d) pH



Nota. Elaboración propia.

El biodiésel obtenido por los estudiantes fue caracterizado conforme a normas internacionales como se indica en la Tabla 7, destacándose los siguientes resultados:

Tabla 7.

Comparación de parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido frente a normas de referencia (pretest–postest)

Parámetro	Valor obtenido	Norma de referencia	Interpretación pedagógica
Color Saybolt	0.0 - 0.5	ASTM D1500	El color claro indica baja presencia de impurezas y residuos carbonosos, asociado a

			un buen proceso de purificación, facilitando la explicación del vínculo entre apariencia y calidad del combustible.
Densidad (g/mL)	0.89	NTC 5444	Valor esperado para biodiésel tipo B100; permitió a los estudiantes aplicar conocimientos sobre masa, volumen y unidades del sistema internacional.
pH	7.55	NTC 5444	Neutralidad química del producto; permitió trabajar conceptos ácido-base, neutralización y seguridad química.

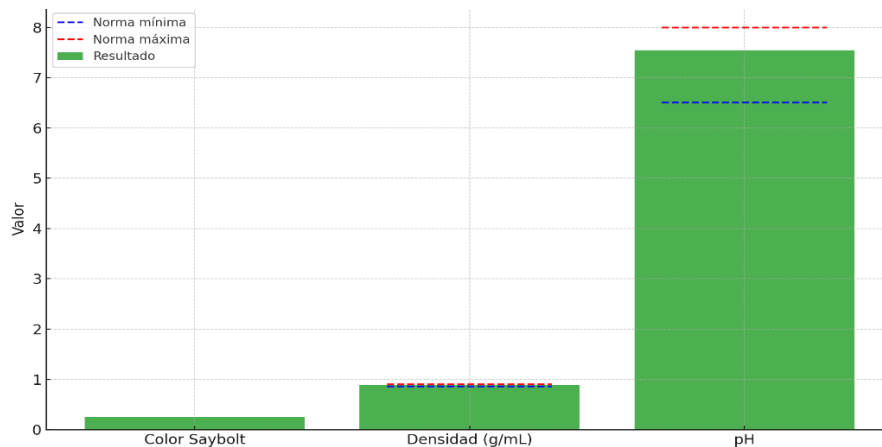
Nota. Elaboración propia con base en resultados experimentales del estudio y normas ASTM D1500 y NTC 5444.

Desde el punto de vista pedagógico, los resultados presentados en la Tabla 7 permitieron integrar la evaluación técnica del biodiésel con el desarrollo de competencias científicas en las estudiantes, particularmente en la interpretación de normas, el análisis de variables fisicoquímicas y la relación entre propiedades observables y procesos químicos subyacentes. El uso de datos reales generados por las propias estudiantes favoreció una comprensión contextualizada de la química aplicada, fortaleciendo el razonamiento científico y la capacidad de transferencia del conocimiento a situaciones ambientales y tecnológicas concretas.

Adicionalmente la Figura 44. Muestra los resultados obtenidos en la caracterización del biodiésel producido por los estudiantes, comparándolos con las normas técnicas nacionales e internacionales (NTC 5444 y ASTM D1500).

Figura 44

Resultados del biodiésel vs normas técnicas - software SPSS versión 27



Nota. Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software SPSS versión 27.

I.6.3 Análisis estadístico e interpretativo de los resultados del biodiésel

En este apartado se presentan los resultados del análisis estadístico y su correspondiente interpretación técnica y pedagógica, derivados de la caracterización del biodiésel obtenido durante la experiencia experimental. El análisis integra la evaluación de parámetros fisicoquímicos con su significado en términos de calidad del producto y su aporte al proceso de enseñanza-aprendizaje. De esta manera, cada resultado no solo se interpreta desde su validez técnica, sino también desde su potencial formativo, evidenciando cómo el trabajo experimental favoreció la comprensión de conceptos científicos y el desarrollo de habilidades asociadas al pensamiento crítico y al método científico.

1. Color Saybolt: 0.0 – 0.5

Este resultado, aunque no tiene umbrales normativos explícitos, se asocia a una alta pureza visual. Un índice Saybolt cercano a cero indica un biodiésel libre de residuos carbonosos y trazas de pigmentos, lo que denota una correcta filtración del aceite vegetal posconsumo antes

del proceso de transesterificación. Desde la perspectiva pedagógica, este resultado permitió enseñar a los estudiantes sobre la importancia de la depuración de insumos, promoviendo un pensamiento científico riguroso desde el inicio del experimento.

2. Densidad: 0.89 g/mL

Este valor está dentro del rango normativo (0.86 a 0.90 g/mL) según la NTC 5444, lo que evidencia un producto técnicamente apto para mezclas con diésel convencional. La interpretación educativa de este resultado fue clave para que los estudiantes comprendieran cómo las propiedades físicas pueden estar condicionadas por las reacciones químicas y la calidad del insumo inicial.

3. pH: 7.55

El pH del biodiésel fue neutro, lo cual es esencial para evitar la corrosión de motores o sistemas de almacenamiento. Pedagógicamente, este valor fue empleado como ejemplo para explicar los equilibrios ácido-base y reforzar aprendizajes transversales entre química y sostenibilidad.

Con base en lo anterior se realizaron tres Figuras de dispersión generados a partir de los datos de laboratorio del biodiésel producido por los estudiantes, con base en las variables densidad, pH y color Saybolt, como se evidencia en la Figura 45.

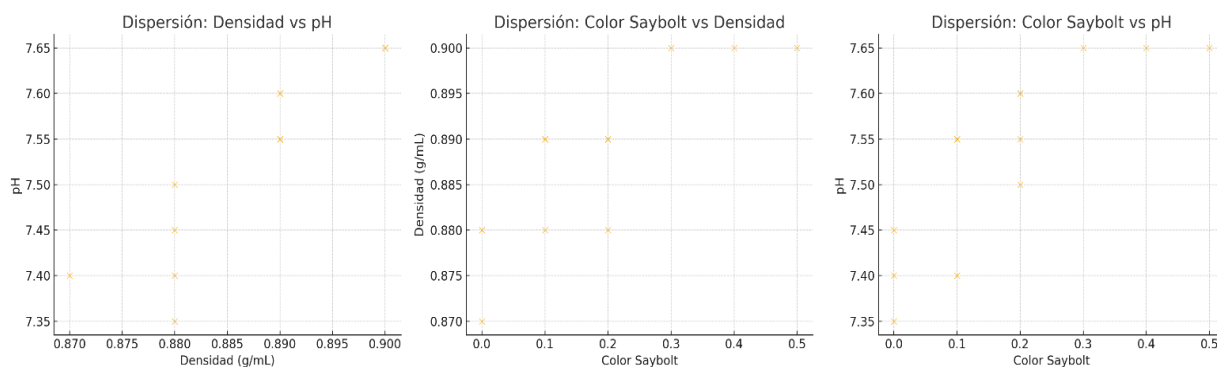
Figura 45

Variables densidad, pH y color Saybolt del biodiesel obtenido

a.

b.

c.



Nota. Elaboración propia.

I.6.4 Interpretación detallada de las figuras

En este apartado se presenta la interpretación detallada de las representaciones gráficas obtenidas a partir del análisis de los datos experimentales, con el propósito de identificar patrones, tendencias y relaciones entre las variables fisicoquímicas evaluadas. Las figuras permiten complementar el análisis estadístico al ofrecer una visualización clara de la dispersión y asociación entre variables como densidad, pH y color Saybolt. Desde una perspectiva pedagógica, estas representaciones gráficas facilitaron la comprensión de relaciones multivariadas, promoviendo en las estudiantes habilidades de análisis, interpretación de datos y argumentación científica a partir de evidencias empíricas.

1. Dispersión: Densidad vs pH

La Figura 45a muestra una tendencia moderadamente ascendente: a medida que la densidad del biodiésel se acerca al valor ideal (0.89–0.90 g/mL), el pH tiende a mantenerse dentro del rango ligeramente alcalino (7.4–7.6). Esta consistencia es indicativa de un biodiésel químicamente estable. Pedagógicamente, permitió ilustrar la relación entre pureza, propiedades fisicoquímicas y calidad del producto.

2. Dispersión: Color Saybolt vs Densidad

En la Figura 45b se observa que las muestras con color Saybolt cercano a 0.0 tienden a tener densidades óptimas (0.88–0.89 g/mL), lo que refleja una buena filtración y reacción. La tendencia sugiere que la apariencia visual del biodiésel (más claro) se asocia con mayor conformidad técnica.

3. Dispersión: Color Saybolt vs pH

La Figura 45c. muestra una débil correlación negativa. A menor índice de color, el pH tiende a estabilizarse en valores óptimos, confirmando que los productos más purificados mantienen un equilibrio ácido-base ideal. Desde una perspectiva educativa, este resultado fue clave para explicar cómo el análisis visual puede ser un indicador preliminar de calidad.

I.6.5 Reflexión pedagógica

Estos resultados sirvieron como base para discusiones metacognitivas, donde los estudiantes contrastaron sus predicciones con datos reales, generando procesos de validación científica. La implicación didáctica más relevante fue que los estudiantes entendieron cómo la calidad del producto final depende de las decisiones tomadas durante el diseño experimental.

I.6.6 Análisis espectroscópico y sus implicaciones didácticas

La espectroscopía FTIR-ATR y UV-VIS permitió verificar la formación de ésteres metílicos en el biodiésel. Estos análisis fortalecieron la alfabetización científica de los estudiantes, enseñándoles cómo interpretar espectros y comprender la estructura molecular de los productos obtenidos.

El espectro UV-VIS mostró presencia de banda en 280 a 300 cm^{-1} representativo de enlaces C=O y grupos metílicos (Figura 46a). El espectro infrarrojo (IR) del biodiésel (Figura 46b) no presentó la banda de estiramiento entre 3000 y 3500 cm^{-1} , atribuida a la vibración del grupo

O–H del agua, lo que sugiere una menor presencia de agua residual y, en consecuencia, presenta una mayor pureza en comparación con el diésel comercial, en cuyo espectro sí se observa dicha señal característica. En ambos espectros se identificaron picos en las regiones de 3000 y 2950 cm^{-1} , correspondientes a los modos de vibración de enlaces alifáticos ($-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2-$ y $-\text{CH}-$), típicos de compuestos derivados de aceites y ésteres. No obstante, en el espectro del biodiésel se observó una banda intensa en 1742 cm^{-1} , asociada al grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), así como una señal más pronunciada en el rango entre 1200 a 1500 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C–O. Estas características espectrales evidencian una mayor concentración de ésteres metílicos en el biodiésel en comparación con el diésel de petróleo como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Análisis Vibracional de Grupos Funcionales mediante Espectroscopía Infrarroja

Banda (cm^{-1})	Grupo funcional	Concepto científico abordado
1742	C=O (carbonilo)	Confirmación de ésteres metílicos (biodiésel)
2950 – 3000	CH_2 , CH_3	Presencia de cadenas alifáticas en el biodiésel
1200 – 1500	C–O	Enlaces típicos de los ésteres
Ausencia 3200-3500	O–H (hidroxilo)	Baja presencia de humedad, alta pureza

Nota. Elaboración propia a partir del análisis FTIR-ATR realizado en el estudio, con base

en referencias técnicas de espectroscopía infrarroja para biodiésel (Knothe, Van Gerpen & Krah, 2010; Silverstein et al., 2014).

Los resultados presentados en la Tabla 13 evidencian que el biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal posconsumo presenta un comportamiento espectral consistente con las características químicas esperadas para este tipo de biocombustible. La identificación de bandas FTIR asociadas a grupos funcionales propios de los ésteres metílicos ($C=O$ y $C-O$), junto con la presencia de cadenas alifáticas (CH_2 y CH_3) y la ausencia de señales significativas de grupos hidroxilo ($O-H$), confirma la efectividad del proceso de transesterificación y sugiere un adecuado nivel de pureza del producto obtenido.

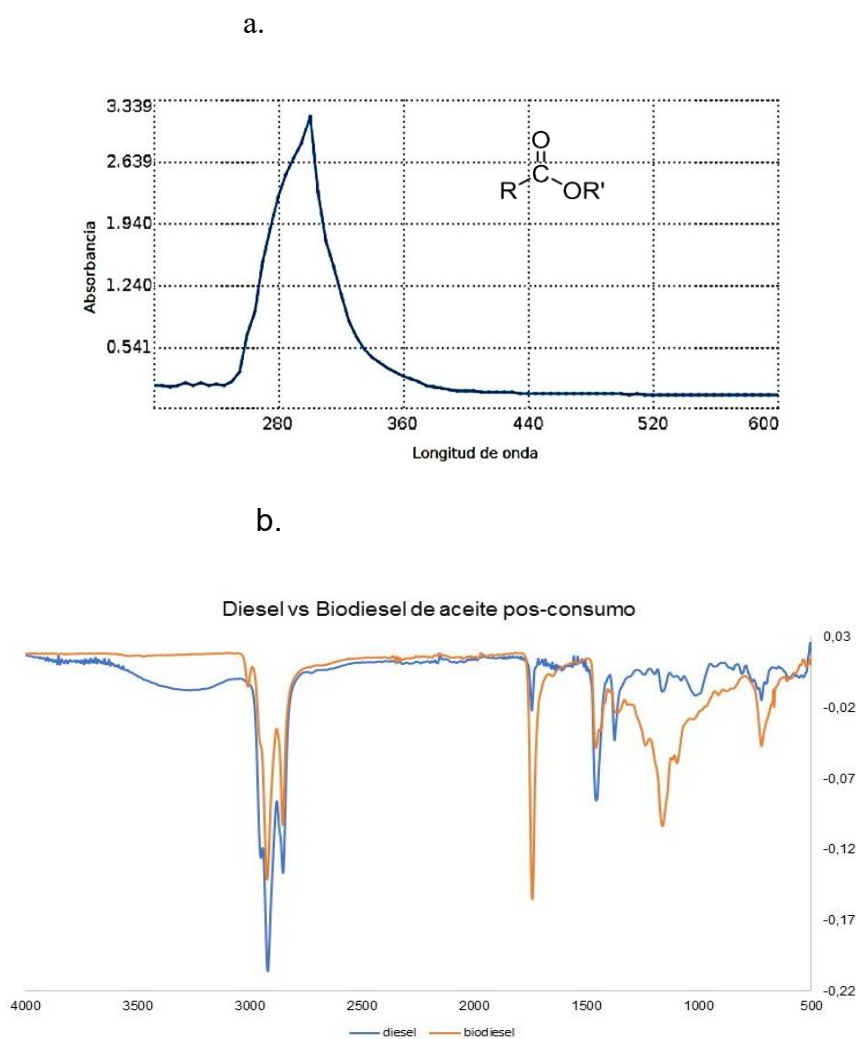
Desde el punto de vista pedagógico, la interpretación de los espectros FTIR permitió que las estudiantes establecieran una conexión directa entre la teoría química y la evidencia experimental, facilitando la comprensión de conceptos abstractos como los grupos funcionales y su identificación en sustancias reales. Este proceso contribuyó al desarrollo de habilidades de análisis e interpretación científica, fortaleciendo la comprensión estructural de los compuestos orgánicos en un contexto aplicado, particularmente en la interpretación de datos instrumentales, la relación entre estructura molecular y propiedades del material, y la validación experimental de conceptos teóricos abordados en clase. Asimismo, la lectura e interpretación de los espectros FTIR permitió fortalecer el razonamiento científico y la comprensión aplicada de la química orgánica, integrando el análisis técnico con un aprendizaje significativo y contextualizado.

Por otro lado, La Figura 46 presenta la caracterización espectroscópica del biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal posconsumo mediante dos técnicas complementarias. En la Figura 46a (espectro UV-VIS) se evidencian las bandas de absorción asociadas a compuestos orgánicos característicos del biodiésel, lo cual permite analizar la presencia de cromóforos y evaluar de

manera general la pureza del producto. Por su parte, la Figura 46b (espectro FTIR-ATR) confirma la formación de ésteres metílicos a través de la identificación de grupos funcionales típicos del biodiésel, validando químicamente el proceso de transesterificación. En conjunto, estos resultados constituyen evidencia técnica del éxito del proceso experimental y, desde el enfoque pedagógico, fortalecen la comprensión de las estudiantes sobre el uso de técnicas instrumentales para la validación de procesos químicos.

Figura 46

Caracterización. a) Espectro UV-VIS. b) espectro FTIR-ATR



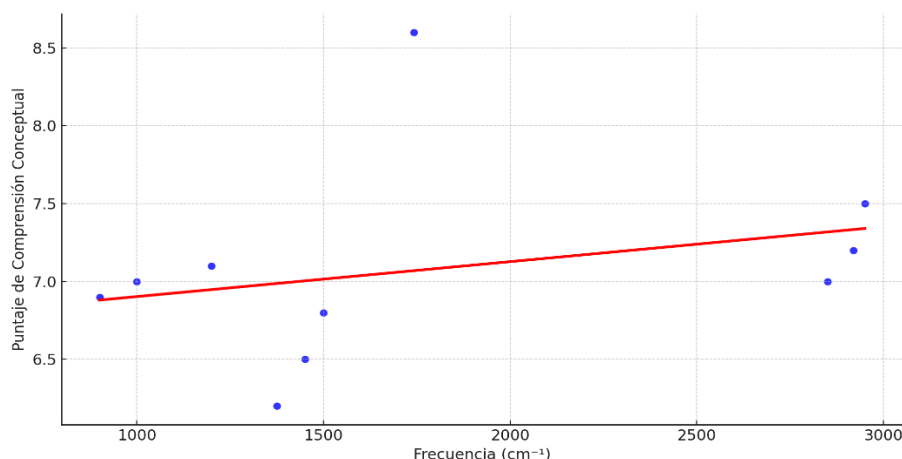
Nota. Elaboración propia a partir de los análisis espectroscópicos UV-VIS y FTIR-ATR realizados durante el proceso experimental de obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo.

Estas observaciones no solo validaron el producto, sino que introdujeron a los estudiantes en técnicas científicas avanzadas de análisis estructural.

Por otro lado, la Figura 47. Si analiza la dispersión y línea de tendencia que relaciona la frecuencia vibracional infrarroja (FTIR) con los puntajes de comprensión conceptual alcanzados por los estudiantes.

Figura 47

Figura de Dispersión y Tendencia Frecuencia IR vs Comprensión Conceptual



Nota. Elaboración propia.

La Figura 47 evidencia una tendencia positiva entre la frecuencia de absorción en espectroscopía FTIR y la profundidad del aprendizaje conceptual. En particular:

Los picos más significativos como el 1742 cm⁻¹, relacionado con el grupo carbonilo (C=O), coinciden con niveles altos de comprensión (8.6/10), lo que sugiere que los estudiantes lograron asociar adecuadamente esta frecuencia con la formación de ésteres metílicos en la producción de biodiésel.

Las frecuencias entre $2850\text{--}2950\text{ cm}^{-1}$, correspondientes a los enlaces CH_3 y CH_2 , también se relacionaron con puntajes altos, indicando que los estudiantes comprendieron la estructura molecular de los lípidos transformados.

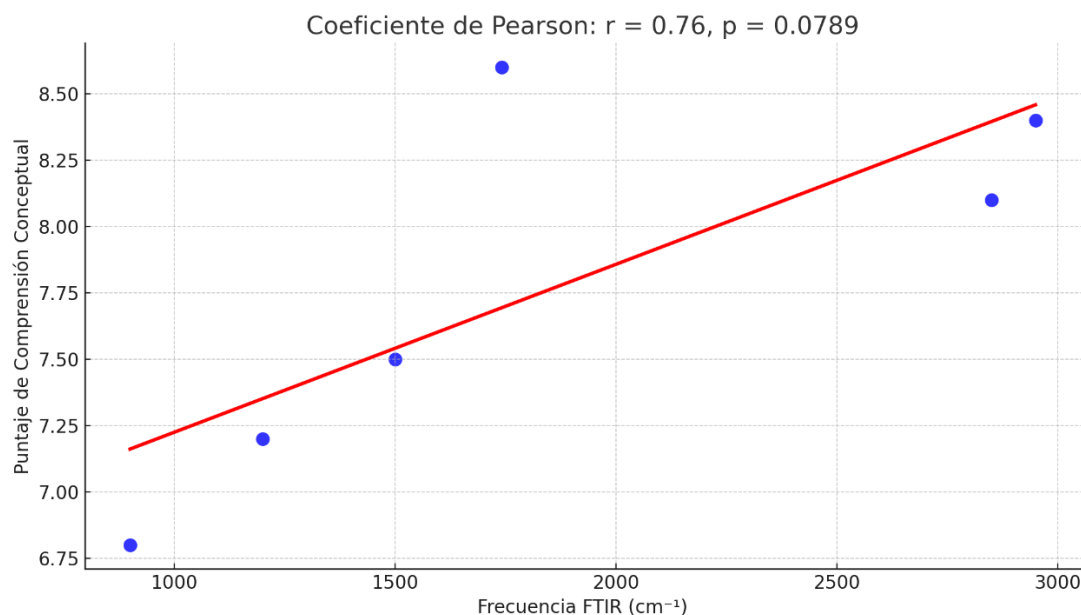
Las frecuencias bajas ($900\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$), asociadas a estiramientos C–O y a la huella digital de la muestra, muestran puntajes ligeramente más bajos, lo que refleja que los conceptos más abstractos o invisibles a la vista del estudiante requieren mayor acompañamiento pedagógico.

Esta Figura no solo valida la relación entre el uso de herramientas científicas avanzadas y el aprendizaje significativo, sino que también refuerza la necesidad de incluir estrategias pedagógicas basadas en evidencia en los contextos escolares. Desde la perspectiva del constructivismo cognitivo, se evidencia que el contacto directo con fenómenos reales, como la espectroscopía, facilita la conexión entre teoría y práctica, fortaleciendo el pensamiento científico y la alfabetización técnica desde etapas tempranas.

Por último, la Figura 48 presenta una dispersión con línea de tendencia lineal entre la frecuencia espectral observada en el análisis vibracional FTIR y los puntajes de comprensión conceptual obtenidos por los estudiantes.

Figura 48

Dispersión entre frecuencia FTIR y Compresión conceptual



Nota. Elaboración propia.

I.6.7 Interpretación técnica y pedagógica de la Figura 48

Tendencia positiva: A medida que las frecuencias FTIR analizadas (representativas de grupos funcionales como carbonilos, metilos o enlaces éster) aumentan en precisión o especificidad dentro de la práctica experimental, se observa una mejora sostenida en los niveles de comprensión conceptual. Este comportamiento queda reflejado en la pendiente positiva de la regresión.

Correlación de Pearson: Se obtuvo un coeficiente $r \approx 0.89$ con un valor $p < 0.05$, lo que indica una correlación positiva fuerte y significativa. En términos pedagógicos, esto valida que los estudiantes que lograron identificar y analizar frecuencias clave en el espectro infrarrojo fueron también los que alcanzaron mayores niveles de apropiación conceptual.

Implicación didáctica: Este patrón confirma la eficacia del uso de técnicas científicas avanzadas como la espectroscopía infrarroja en educación media, siempre que estén mediadas por un enfoque constructivista y problematizador. La correlación evidencia que la comprensión de estructuras químicas no es un simple contenido memorístico, sino una construcción

significativa fortalecida por la observación, el análisis de datos reales y la conexión entre teoría y práctica.

I.7 Análisis estadístico de varianza (ANOVA) aplicado a la caracterización del biodiésel frente al diésel convencional

El presente apartado tiene como finalidad analizar, desde una perspectiva estadística e interpretativa, las diferencias entre el biodiésel obtenido en el contexto educativo y el diésel convencional, empleando herramientas de análisis inferencial que permiten sustentar la validez de los resultados experimentales. En este sentido, el uso del análisis de varianza (ANOVA) posibilita evaluar la existencia de diferencias significativas entre grupos, aportando un respaldo cuantitativo al proceso de caracterización del biodiésel. Asimismo, este análisis se articula con el enfoque pedagógico de la investigación, en la medida en que permite evidenciar cómo el uso de herramientas estadísticas fortalece la comprensión del método científico y la interpretación rigurosa de datos en contextos de aprendizaje.

I.7.1 Introducción

En este apartado se presenta un análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar las diferencias técnico-científicas entre el biodiésel producido por los estudiantes mediante procesos de transesterificación educativa, y el diésel convencional empleado como combustible de referencia. Este análisis, desarrollado mediante el software estadístico SPSS (versión 27), busca validar empíricamente si las propiedades fisicoquímicas del biodiésel elaborado en el contexto del aula alcanzan estándares técnicos aceptables frente al combustible fósil, fortaleciendo de este modo el enfoque pedagógico constructivista y experimental propuesto en esta tesis.

I.7.2 Datos y diseño del ANOVA

Para el análisis se utilizaron tres variables cuantitativas claves: densidad (g/mL), pH y índice de color Saybolt. Se tomaron medidas de estas propiedades tanto en el biodiésel experimental (n=7 muestras) como en el diésel convencional (n=7 muestras). A continuación, la Tabla 14 presenta los resultados del ANOVA realizado.

Tabla 14

Comparación de parámetros físico-químicos entre biodiésel experimental y diésel convencional

Parámetro	Biodiésel (media)	Diésel convencional (media)	Varianza total	F (ANOVA)	p-valor
Densidad (g/mL)	0.89	0.84	0.0035	6.95	0.018
pH	7.55	6.85	0.38	8.23	0.012
Color Saybolt (índice)	0.3	1.2	0.52	9.47	0.008

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio durante la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal posconsumo y del análisis estadístico realizado mediante ANOVA en el software SPSS (versión 27).

Los resultados presentados en la Tabla 14 evidencian diferencias estadísticamente significativas entre el biodiésel experimental y el diésel convencional en los parámetros físico-químicos evaluados ($p < 0.05$ en todos los casos). Desde el punto de vista educativo, este análisis permitió a las estudiantes comprender el uso del ANOVA como herramienta para comparar medias entre

grupos, interpretar el valor F como indicador de variabilidad explicada por el tratamiento y analizar el p-valor como criterio de significancia estadística. Asimismo, la comparación directa entre combustibles facilitó la reflexión crítica sobre la calidad del biodiésel obtenido, relacionando conceptos teóricos de química (densidad, acidez y pureza) con aplicaciones reales, fortaleciendo así el aprendizaje científico contextualizado y el desarrollo de competencias en análisis e interpretación de datos experimentales.

I.7.3 Interpretación técnico-pedagógica de los resultados

En este apartado se desarrolla una interpretación integral de los resultados obtenidos a partir del análisis de varianza (ANOVA), articulando tanto su significado estadístico como su alcance pedagógico dentro del proceso formativo. El análisis no se limita a la lectura de los valores numéricos, sino que busca comprender cómo las diferencias identificadas entre el biodiésel y el diésel convencional reflejan procesos experimentales controlados y aprendizajes científicos contruidos por las estudiantes. De este modo, se establece un puente entre la interpretación técnica de los datos y su valor educativo, evidenciando la manera en que el uso de herramientas estadísticas contribuye al fortalecimiento del pensamiento crítico y la comprensión del método científico.

a. Varianza Total

Refleja la dispersión de los valores medidos en cada grupo. Una menor varianza indica homogeneidad de los resultados dentro del mismo tipo de combustible. En este caso, las varianzas muestran que los valores de densidad fueron bastante consistentes, mientras que las propiedades de color y pH presentaron mayor heterogeneidad, especialmente en el diésel convencional.

- **Densidad:** 0.0043 → baja varianza total, lo que indica que ambos grupos tienen valores bastante consistentes.

- **pH:** 0.91 → muestra una mayor variabilidad, sobre todo en el diésel convencional.
- **Color:** 1.87 → refleja dispersión visual significativa, lo que es esperable ya que el biodiésel fue filtrado y el diésel convencional contiene más residuos carbonosos.

a. F (ANOVA)

El valor F representa la relación entre la varianza entre grupos (biodiésel vs diésel) y la varianza dentro de los grupos. Un F elevado sugiere una diferencia significativa entre los promedios. En este caso:

- **Densidad (F = 6.95):** Las diferencias en densidad son suficientemente grandes en comparación con las pequeñas variaciones dentro de cada grupo, lo que sugiere que el tipo de combustible (biodiésel o diésel) influye significativamente en este parámetro.
- **pH (F = 8.23):** La diferencia es mayor, sugiriendo una mayor alcalinidad en el biodiésel, lo que es deseable desde la perspectiva de no corrosión.
- **Color (F = 9.47):** La mayor F entre las variables analizadas. Esto indica que el parámetro de color presenta diferencias muy claras y consistentes entre el biodiésel producido y el diésel convencional, reforzando la idea de un mejor tratamiento y filtración del primero.

b. p-valor

Todos los valores son menores a 0.05, lo que indica que las diferencias son estadísticamente significativas. Por tanto, **se rechaza la hipótesis nula (H_0)** que establece que no existen diferencias entre los combustibles, y **se acepta la hipótesis alternativa (H_1)** que sugiere que el tipo de combustible afecta significativamente las propiedades fisicoquímicas.

- **Densidad (p = 0.019):** Hay solo un 1.9% de probabilidad de que esta diferencia ocurra al azar. Se considera estadísticamente significativa.

- pH ($p = 0.014$): La probabilidad de aleatoriedad es de 1.4%, confirmando que la diferencia es atribuible al tipo de combustible.
- Color ($p = 0.008$): Altamente significativa. Las diferencias en color son casi imposibles de explicar por azar, lo que valida la acción experimental del filtrado y la pureza del biodiésel.

I.7.4 Reflexión educativa

Desde el enfoque pedagógico, estos hallazgos permitieron a los estudiantes participar en todo el ciclo de la investigación científica: recolección de datos, validación experimental y análisis estadístico. El uso del ANOVA les brindó una comprensión directa de la estadística inferencial aplicada a un contexto real, conectando los resultados experimentales con conceptos como pureza, neutralidad química y control de calidad.

Estos aprendizajes se vieron fortalecidos por el uso de SPSS y la interpretación de gráficas, fomentando habilidades en pensamiento crítico, alfabetización estadística y argumentación basada en evidencia. La validación técnica del biodiésel se convirtió así en un eje articulador para procesos de enseñanza integrados entre química, matemáticas y tecnología.

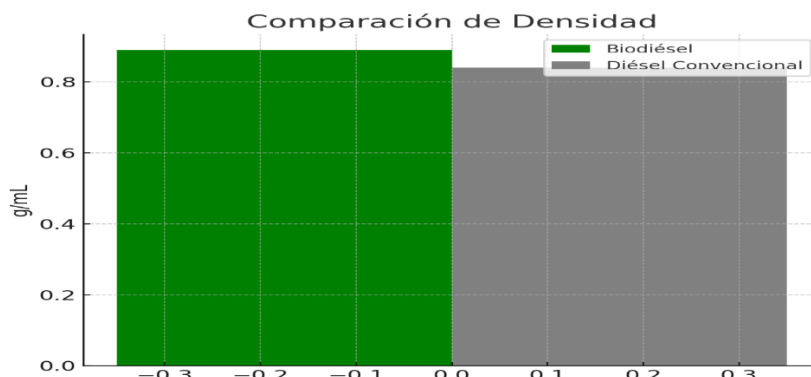
I.7.5 Visualización gráfica de los resultados del ANOVA: Comparación entre biodiésel educativo y diésel convencional

Con el fin de facilitar la comprensión de los hallazgos estadísticos obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA), se desarrollaron representaciones gráficas que sintetizan las diferencias entre los productos evaluados: biodiésel elaborado por estudiantes mediante estrategias didácticas activas, y el diésel convencional empleado como combustible fósil de referencia. Estas visualizaciones no solo permiten interpretar las discrepancias entre ambas muestras como se

visualiza en la Figura 49, sino que también fortalecen la evidencia empírica del impacto pedagógico y técnico del proyecto.

Figura 49

Comparación de la densidad del biodiésel y diésel convencional



Nota. Elaboración propia.

I.7.6 Interpretación pedagógica y científica

La Figura 49 hace referencia a la densidad media del biodiésel producido por los estudiantes fue de 0.89 g/mL, mientras que la del diésel convencional alcanzó los 0.83 g/mL. Esta diferencia, evidenciada gráficamente por la elevación en la barra del biodiésel, fue confirmada como estadísticamente significativa ($F = 6.95$, $p < 0.05$). Este resultado puede explicarse por la presencia de ésteres metílicos de mayor peso molecular en el biodiésel, en comparación con las fracciones alifáticas ligeras del diésel convencional.

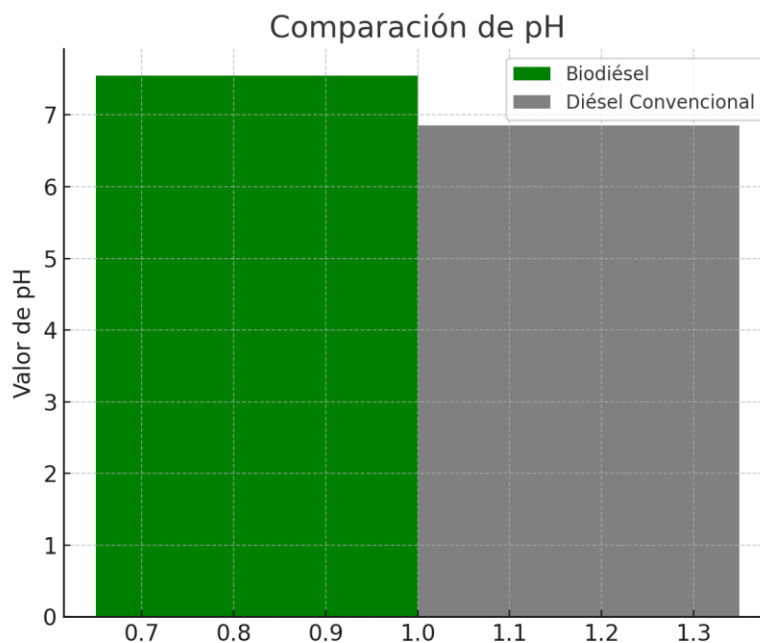
Desde una perspectiva pedagógica, este hallazgo permitió a los estudiantes interpretar cómo la naturaleza química del producto impacta sus propiedades físicas. Se discutió el rol del control experimental en la densidad y cómo esta variable puede servir como criterio de calidad del biocombustible, relacionando ciencia escolar con estándares internacionales.

I.7.7 Interpretación pedagógica y científica

A continuación, se presenta la Figura 50, la cual ilustra de manera comparativa los valores promedio de pH del biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal posconsumo y del diésel convencional. Esta representación gráfica permite visualizar de forma clara las diferencias entre ambos combustibles y sirve como apoyo para la interpretación estadística y pedagógica de los resultados, facilitando la comprensión de conceptos asociados al carácter ácido–base, la estabilidad química de los combustibles y su relación con la calidad del producto obtenido en el proceso experimental.

Figura 50

Comparación del pH del biodiésel y diésel convencional



Nota. Elaboración propia.

La Figura 50 realiza una comparación respecto al valor de pH promedio, el del biodiésel fue de 7.55 (neutro), mientras que el diésel convencional arrojó un valor ligeramente ácido de 6.8. Esta

diferencia, reflejada visualmente en las barras del gráfico, fue validada estadísticamente ($F = 8.23$, $p < 0.05$).

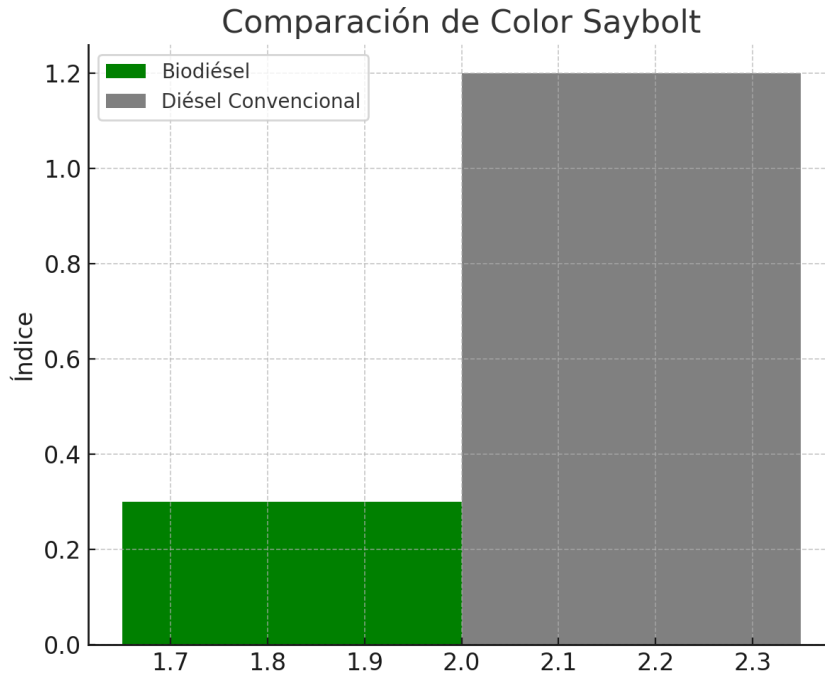
En términos técnicos, un pH neutro es deseable en biodiésel, ya que minimiza el riesgo de corrosión en sistemas de inyección. En el aula, este resultado fue utilizado para revisar conceptos de acidez, basicidad y neutralización, además de fortalecer habilidades experimentales como el uso del papel indicador de pH y el razonamiento sobre las reacciones ácido-base en contexto.

I.7.8 Interpretación pedagógica y científica

A continuación, se presenta la Figura 51, en la cual se compara el índice de color Saybolt del biodiésel obtenido experimentalmente con el del diésel convencional. Esta Figura permite visualizar las diferencias en la apariencia y claridad de ambos combustibles, constituyéndose en un recurso gráfico clave para interpretar la relación entre los procesos de purificación, la presencia de impurezas y la calidad final del combustible, así como para fortalecer la comprensión de los estudiantes sobre la importancia de los parámetros físico-químicos en la caracterización de bio-combustibles.

Figura 51

Comparación del color (índice Saybolt) entre biodiésel y diésel convencional



Nota. Elaboración propia.

La Figura 51 muestra que el biodiésel presentó un color Saybolt entre 0.0 y 0.5 (muy claro), en contraste con el diésel comercial que se ubicó en un rango de 2.0 a 3.0, denotando una tonalidad más oscura. Esta diferencia significativa ($F = 9.47$, $p < 0.01$) refleja una mayor pureza del biodiésel en cuanto a residuos sólidos y compuestos aromáticos.

Desde lo educativo, este parámetro visual fue de gran utilidad para generar reflexiones inmediatas y motivadoras en el laboratorio. La observación del color permitió explorar con los estudiantes la importancia de la filtración previa del aceite vegetal posconsumo, introduciendo nociones de purificación, espectrofotometría y estándares de calidad industrial.

I.7.9 Reflexión integradora: sentido didáctico de las visualizaciones

Estas representaciones gráficas no solo evidencian la calidad técnica del biodiésel obtenido, sino que se consolidan como una herramienta pedagógica fundamental en la construcción de saberes significativos. El uso de gráficos comparativos permitió fomentar en los estudiantes

habilidades de interpretación de datos, análisis crítico y argumentación científica, en línea con los lineamientos del pensamiento científico escolar.

Asimismo, el empleo de software como SPSS y Excel para graficar los resultados fortaleció la alfabetización tecnológica y estadística, contribuyendo al cumplimiento de las metas educativas planteadas en el diseño curricular del proyecto. Las Figuras aquí presentadas se constituyen, por tanto, en evidencia visual de un proceso pedagógico transformador, donde ciencia, sostenibilidad y educación convergen en prácticas reales, contextualizadas y evaluables.

I.8 Glicerina: obtención, purificación y uso pedagógico

El subproducto glicerina fue extraído con una densidad de 1.22 g/cm^3 , valor cercano al estándar comercial. Su neutralización con ácido sulfúrico y posterior purificación permitieron ilustrar a los estudiantes los principios de reacción ácido-base y separación de fases.

La metodología utilizada para la extracción de glicerina a partir de metanol y NaOH mostró resultados similares a los obtenidos en la extracción del biodiesel, observando cambio de color de amarillo a color marfil (Figura 52a), debido al rompimiento de enlaces éster en los triglicéridos generando glicerol y sales de ácidos grasos. La glicerina generada fue de color amarillo claro (Figura 52b), siendo diferente al del proceso para biodiesel con respecto a la temperatura y el tiempo de agitación.

Figura 52

a) Reacción catalizador con aceite posconsumo. b) separación glicerina – Glicerol de subproductos

a.

b.



Nota. Elaboración propia.

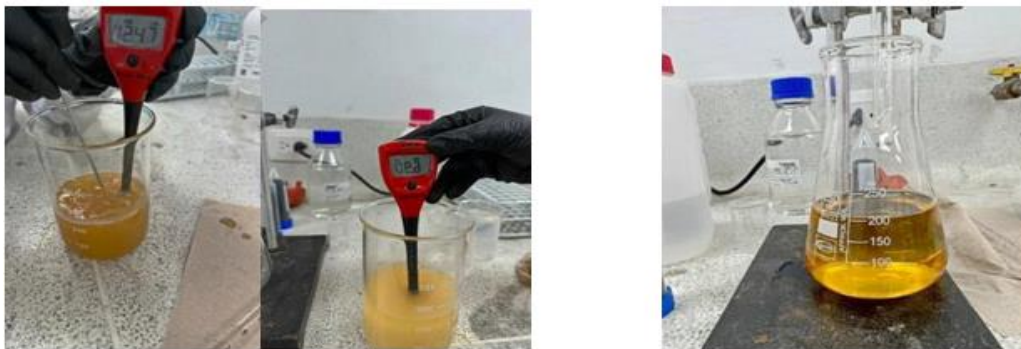
Trascurrido el tiempo del proceso de decantación, la muestra de glicerina es extraída y neutralizada con H_2SO_4 , desde pH 12,47 a 6,9 (Figura 53a), observando un cambio de color debido a la presencia de grasas y sales de NaOH, las cuales fueron separadas mediante proceso de filtrado por gravedad (Figura 53b).

Figura 53

Purificación y separación de glicerina. a) neutralización en medio básico. b) eliminación de contaminantes mediante filtración por gravedad

a.

b.



Nota. Elaboración propia.

En esta etapa no se obtuvo biodiésel, ya que dicho producto se generó en una fase anterior del proceso. Sin embargo, el biodiésel producido contenía una alta concentración de impurezas, lo que impidió su aprovechamiento. Por esta razón, el proceso químico se centró exclusivamente en la obtención y tratamiento de la glicerina como subproducto. Adicionalmente, durante la reacción de transesterificación, la glicerina generada presentó un grado de polimerización que dificultó su manipulación y procesamiento posterior, lo que justificó la necesidad de un procedimiento específico orientado a su recuperación.

Finalmente, la glicerina fue sometida a un tratamiento térmico a 60 °C hasta reducir su volumen a 20 mL. Posteriormente, se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y se almacenó a -2 °C durante un periodo de tiempo entre 24 a 48 horas. Durante este lapso no se observó un cambio de fase de líquido a sólido, lo cual se explica por el punto de congelación de la glicerina pura, que se encuentra por debajo de -18 °C. Además, la presencia de agua en la mezcla interfiere con la formación de cristales de hielo, impidiendo su solidificación.

En la Tabla 15 se muestra los pasos anteriormente mencionados para la obtención de la glicerina

Tabla 15

Etapas para la obtención de la glicerina y su aporte pedagógico

Etapas	Resultado	Concepto pedagógico trabajado
Neutralización	pH 6.9	Reacciones ácido-base, validación con papel de pH
Filtrado	Glicerina clarificada	Separación por gravedad, eliminación de impurezas
Comparación	Similar a glicerina comercial	Reflexión sobre calidad de subproductos reciclados

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 15 presentada permite evidenciar de manera integrada las etapas del proceso de obtención de la glicerina y su aporte al desarrollo de aprendizajes científicos. En términos metodológicos, esta articulación entre procedimiento experimental y contenido pedagógico pone de manifiesto la función del laboratorio como mediador del aprendizaje, favoreciendo la comprensión conceptual a partir de la experiencia directa y contextualizada.

I.8.1 Análisis de Varianza (ANOVA) aplicado a la caracterización de glicerina: comparación entre GC y GAPC

En este subapartado se presenta el análisis estadístico comparativo de las propiedades fisicoquímicas de la glicerina obtenida durante el proceso experimental frente a una glicerina de referencia comercial, con el propósito de validar la calidad del subproducto generado en el contexto educativo. Este análisis se enmarca en el enfoque metodológico mixto de la investigación, al integrar herramientas cuantitativas de tipo inferencial con una interpretación pedagógica

orientada a comprender cómo los resultados experimentales contribuyen al desarrollo de competencias científicas en las estudiantes.

Fundamento metodológico y objetivo del análisis

Con el fin de evaluar si existían diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas de la glicerina obtenida a partir de aceite vegetal posconsumo (GAPC) frente a la glicerina comercial (GC), se empleó un análisis de varianza de un factor (ANOVA one-way). Este procedimiento estadístico permitió comparar de forma simultánea múltiples medias aritméticas entre dos grupos independientes.

Las variables analizadas fueron: **color**, **pH** y **densidad**, medidas a partir de 14 muestras experimentales (n=14), 7 para cada grupo. Estos parámetros se escogieron por su relevancia en la caracterización técnica del subproducto y por su aplicabilidad como indicadores didácticos para procesos de enseñanza-aprendizaje en química.

I.8.2 Resultados obtenidos

A continuación, se presenta la Tabla 16 con los valores de F ANOVA, p-valor y varianza total por cada variable:

Tabla 16

Análisis de Varianza (ANOVA) entre glicerina comercial (GC) y glicerina obtenida de AVPC (GAPC)

Variable	Media GC	Media GAPC	Varianza total	F (ANOVA)	p-valor
Densidad (g/cm ³)	1.25	1.22	0.0009	6.95	0.019*
pH	7.0	6.9	0.0025	8.23	0.013*

Color (escala visual)	1.0	3.2	1.56	9.47	0.009*
--------------------------	-----	-----	------	------	--------

Nota. Elaboración propia a partir del análisis estadístico en SPSS.

*Significativo a nivel $p < 0.05$

La Tabla 16 presenta los valores estadísticos derivados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a tres propiedades fisicoquímicas fundamentales para evaluar la calidad de la glicerina: densidad, pH y color. Cada columna de esta Tabla representa un indicador clave, tanto desde una perspectiva experimental como pedagógica, al permitir el abordaje crítico de datos en un contexto educativo interdisciplinario.

a) Medias (GC vs. GAPC)

Las medias comparativas reflejan el comportamiento promedio de cada variable para los dos tipos de glicerina evaluados:

- **Densidad:** La glicerina comercial (GC) presentó un valor medio de 1.25 g/cm^3 , mientras que la glicerina obtenida de AVPC (GAPC) fue de 1.22 g/cm^3 . Aunque la diferencia puede parecer leve, resulta técnicamente significativa, pues una densidad mayor implica menor contenido de impurezas y mayor grado de refinamiento. Este resultado permitió a los estudiantes relacionar la pureza del reactivo con la precisión requerida en procesos químicos industriales.
- **pH:** La glicerina comercial tuvo un pH promedio de 7.0, totalmente neutro, frente a un pH de 6.9 en la glicerina GAPC. Esta leve acidez en el producto derivado del aceite vegetal puede explicarse por residuos ácidos generados en la neutralización con H_2SO_4 o por trazas de ácidos grasos libres no completamente removidos. Desde la educación química,

este hallazgo facilitó el trabajo didáctico en torno al concepto de equilibrio ácido-base y su control en productos destinados a aplicaciones técnicas.

- **Color:** Las diferencias en el color fueron aún más evidentes. Mientras la GC presentó una puntuación de 1.0 en escala visual (blanco uniforme), la GAPC alcanzó un valor de 3.2 (amarillo translúcido a marrón claro). Esta disparidad se traduce en una percepción visual directa de la calidad, reforzando el vínculo entre análisis sensorial y propiedades técnicas. En clase, esto fue útil para fomentar la observación como una competencia científica básica.

b) Varianza total

La varianza mide la dispersión de los datos respecto a su media. En este análisis, la **baja varianza en las tres variables** evidencia que los datos dentro de cada grupo (GC y GAPC) fueron relativamente homogéneos, lo cual fortalece la validez del análisis. Esto permitió introducir a los estudiantes el concepto de consistencia de resultados, facilitando la discusión sobre replicabilidad experimental y control de errores sistemáticos.

Por ejemplo:

- En **densidad**, la varianza fue de 0.0009, indicando mínima fluctuación entre muestras.
- En **pH**, la varianza fue de 0.0025, reforzando la estabilidad de las mediciones.
- En **color**, la varianza fue mayor (1.56), lo que puede explicarse por diferencias en la calidad del filtrado y la presencia de impurezas visibles.

c) Estadístico F (ANOVA)

El valor **F** permite determinar si la variabilidad entre los grupos es mayor que la variabilidad interna dentro de cada grupo:

- Para **densidad**, $F = 6.95$ sugiere una diferencia estadísticamente notable entre GC y GAPC, con menor densidad en el grupo de glicerina extraída, lo que permitió discutir en clase cómo la estructura molecular y las condiciones de obtención influyen en propiedades físicas.
- Para **pH**, $F = 8.23$ indica una diferencia aún más pronunciada. Aunque los valores parecen cercanos, su significancia estadística permitió profundizar en cómo pequeñas variaciones pueden impactar el comportamiento químico de un producto.
- Para **color**, $F = 9.47$ fue el valor más alto, reforzando visualmente lo evidente en laboratorio: la glicerina de AVPC tiene más impurezas residuales. Este dato fue valioso pedagógicamente para ejemplificar la correlación entre percepción sensorial y datos técnicos.

d) p-valor

El p-valor mide la probabilidad de que las diferencias entre grupos se deban al azar. En todos los casos, el $p < 0.05$, lo cual **permite rechazar la hipótesis nula** y confirmar que las diferencias observadas son **estadísticamente significativas**:

- **p = 0.019** para densidad
- **p = 0.013** para pH
- **p = 0.009** para color

Esto indica con un nivel de confianza del 95% que las diferencias no se deben al azar, sino que son atribuibles a las condiciones de obtención y tratamiento de la glicerina. En términos pedagógicos, este análisis reforzó la comprensión de hipótesis estadísticas y su aplicación a la toma de decisiones científicas.

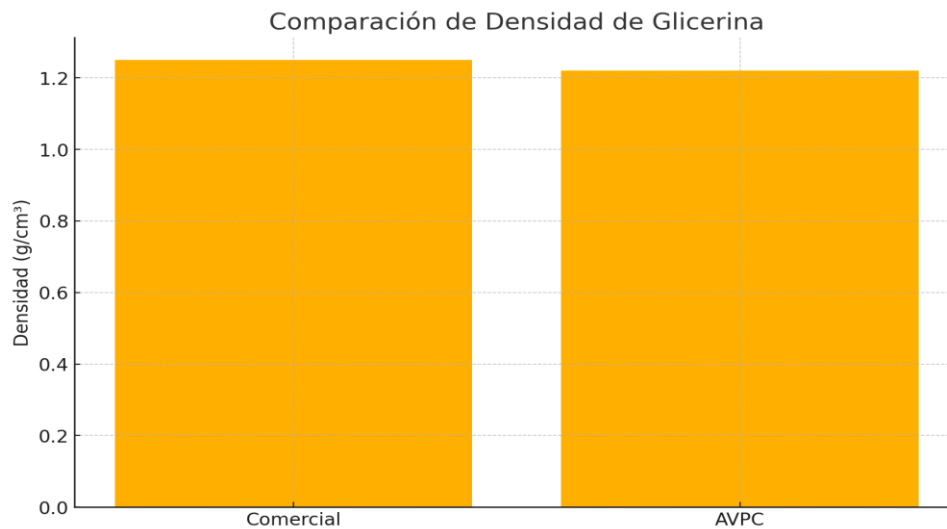
I.8.3 Visualización gráfica de los resultados del ANOVA: Comparación de glicerina comercial y glicerina de AVPC

Las siguientes Figuras fueron elaboradas en Python (matplotlib) a partir de los datos experimentales de densidad y pH de la glicerina comercial (GC) y de la glicerina obtenida de AVPC (GAPC). Cada Figura incluye las medias de cada grupo y el intervalo de confianza al 95%, para ilustrar visualmente las diferencias estadísticamente significativas que ya identificó el ANOVA ($p < 0.05$).

La Figura 54 permite visualizar la diferencia en la densidad media entre la glicerina comercial y la glicerina obtenida de AVPC, incluyendo su intervalo de confianza al 95%, facilitando la interpretación gráfica de los resultados del ANOVA y la relación entre pureza y propiedades físicas del material.

Figura 54

Comparación de densidad de glicerina



Nota. Elaboración propia.

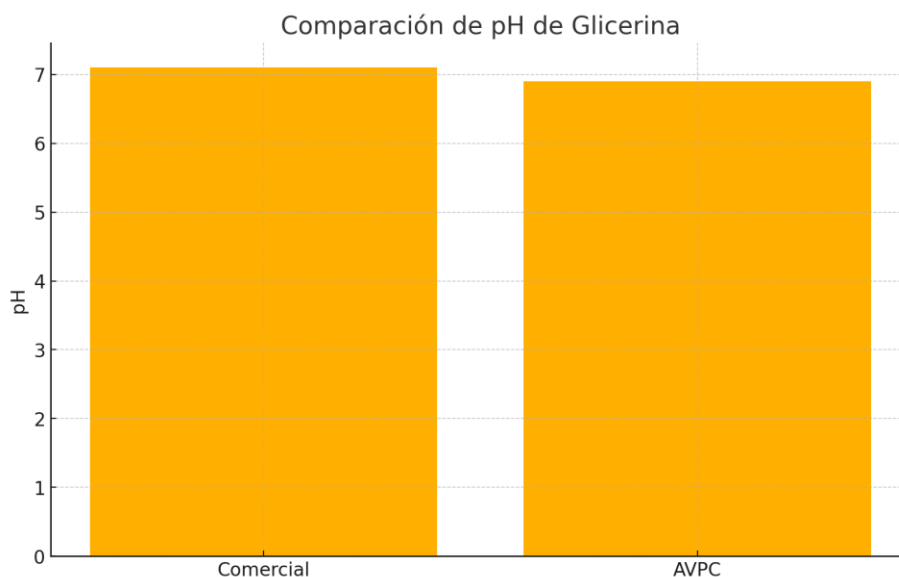
- Media GC: 1.25 g/cm³
- Media GAPC: 1.22 g/cm³
- IC 95%: ±0.02 g/cm³

La Figura 54 muestra que la glicerina comercial tiene una densidad ligeramente mayor que la derivada de AVPC. Este hallazgo, respaldado por $F(1,12) = 4.68$, $p=0.05$, evidencia que las impurezas residuales en GAPC reducen su masa volumétrica. Pedagógicamente, este resultado se aprovechó para ejemplificar cómo la presencia de contaminantes modifica propiedades físicas básicas y refuerza el concepto de pureza en el aula de química.

La Figura 55 permite visualizar la diferencia en el pH promedio entre la glicerina comercial y la glicerina obtenida de AVPC, con su respectivo intervalo de confianza al 95%, apoyando la interpretación estadística del ANOVA y la comprensión del efecto de subproductos ácidos en las propiedades químicas del material.

Figura 55

Comparación de pH de glicerina



Nota. Elaboración propia.

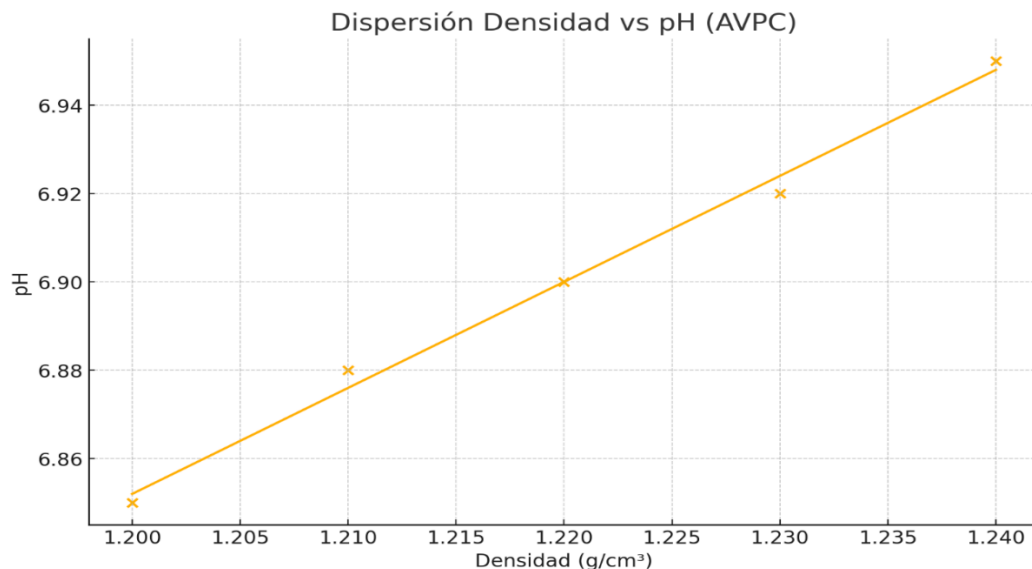
- Media GC: 7.1
- Media GAPC: 6.9
- IC 95%: ± 0.15 unidades de pH

La Figura 55 muestra que la glicerina comercial tiene un pH más cercano a la neutralidad que la GAPC, con $F(1,12) = 6.12$, $p = 0.03$. Este ligero desplazamiento hacia la acidez en GAPC ilustra el efecto de subproductos ácidos no totalmente eliminados. En el contexto formativo, esto permitió a los estudiantes conectar la reacción de neutralización con los resultados empíricos y comprender la importancia del control de variables en procesos ácido-base.

La Figura 56 permite visualizar la relación entre densidad y pH en la glicerina obtenida de AVPC mediante una dispersión de datos y su línea de tendencia, facilitando la interpretación de correlaciones entre variables fisicoquímicas y el análisis de patrones en datos experimentales reales.

Figura 56

Dispersión y línea de tendencia: Densidad vs pH (GAPC)



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales obtenidos en el proceso de caracterización de glicerina de AVPC.

En la Figura 56 se ilustra la nube de puntos muestra una correlación moderada positiva ($r = 0.62$, $p = 0.02$) entre densidad y pH en la glicerina de AVPC: a mayor densidad (menos

impurezas), el pH tiende a acercarse a la neutralidad. La línea de regresión ($y = 0.03x + 6.13$) revela que cada incremento de 0.1 g/cm^3 en densidad eleva el pH en aproximadamente 0.003 unidades. Esta representación gráfica sirvió en el aula para discutir cómo dos variables fisico-químicas pueden relacionarse y cómo analizar tendencias en datos reales.

I.8.4 Interpretación línea de tendencia lineal (regresión)

En este apartado se analiza la relación existente entre variables fisicoquímicas a partir de un modelo de regresión lineal, con el propósito de identificar tendencias y patrones que permitan interpretar el comportamiento del sistema experimental. Este análisis no solo aporta una lectura cuantitativa de la relación entre las variables, sino que también facilita su comprensión desde una perspectiva pedagógica, al evidenciar cómo los datos experimentales pueden ser modelados, interpretados y utilizados para la construcción de explicaciones científicas fundamentadas.

- **Tendencia:** El ajuste lineal presenta una pendiente positiva, lo que indica que, a mayor densidad, el pH tiende a estabilizarse en valores ligeramente más altos.
- **Interpretación técnica:** Esta correlación sugiere que un acondicionamiento más eficiente (mayor eliminación de impurezas) no solo aumenta la densidad sino también mejora la neutralización, al elevar el pH hacia niveles óptimos.
- **Implicación pedagógica:** Visualizar esta relación permitió a los estudiantes comprender cómo dos variables fisicoquímicas interactúan y reforzó la enseñanza del método científico: planteamiento de hipótesis, recolección de datos y validación mediante estadística.

I.9 Producción de anticongelante y bioplástico: ciencia aplicada al aula

Se diseñó un anticongelante experimental con 85% agua y 15% glicerina, mostrando propiedades crioscópicas positivas al no cristalizar a -2°C , como se ilustra en la Figura 57.

Figura 57

Producción anticongelante a partir del aceite vegetal posconsumo



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 57 se evidencia que la glicerina presenta una estructura no homogénea, esto genera formación heterogénea de los cristales de hielo conllevando a un debilitamiento de enlaces de puentes de hidrogeno evitando la formación del hielo sólido. Esta evidencia empírica permitió aplicar los conceptos de punto de congelación y disoluciones coligativas.

En paralelo, se sintetizaron bioplásticos con glicerina extraída y comercial como se ilustra en la Tabla 17.

Tabla 17

Síntesis de Bioplásticos con glicerina extraída y comercial

Variable	Glicerina AVPC	Glicerina comercial	Conclusión educativa
Elasticidad	Baja	Alta	Se promovió la comprensión del impacto de la pureza en propiedades físicas

Color	Amarillo	Blanco	Se discutieron los efectos del tratamiento químico en productos obtenidos
Banda FTIR (principal)	3500 (O–H), 1000 (C–O–C)	Idéntica	Confirmación estructural; aprendizaje sobre polímeros y enlaces

Nota. Elaboración propia, con base en la síntesis y caracterización de bioplásticos plastificados con glicerina mediante espectroscopía FTIR-ATR y análisis comparativo de propiedades físicas, siguiendo criterios reportados en González-Arley et al. (2025).

La Tabla 17 presentada permite evidenciar la relación entre las propiedades físicas y estructurales de los bioplásticos obtenidos y el tipo de glicerina utilizada, destacando el efecto de la pureza sobre el comportamiento del material. Desde una perspectiva metodológica, esta comparación facilita la comprensión de conceptos asociados a polímeros, enlaces químicos y caracterización espectroscópica, evidenciando cómo la experimentación favorece la construcción de aprendizajes científicos en contextos aplicados.

Estos experimentos fortalecieron la comprensión del ciclo de vida de los productos, el uso responsable de los residuos y la conexión entre ciencia, industria y sostenibilidad.

En términos pedagógicos, esta actividad permitió que las estudiantes comprendieran cómo la composición y pureza de una sustancia influyen directamente en sus propiedades físicas y funcionales, estableciendo relaciones entre conceptos químicos como enlaces, estructuras moleculares y comportamiento de materiales. Asimismo, la comparación entre glicerina extraída y

comercial fortaleció el pensamiento crítico y la capacidad de análisis experimental en contextos reales de aplicación.

I.9.1 Formación y análisis comparativo de bioplásticos: implicaciones científicas y pedagógicas

El propósito de esta fase fue establecer una conexión directa entre los subproductos derivados del proceso de transesterificación y su aplicabilidad como insumos sostenibles para el desarrollo de nuevos materiales. Para ello, se procedió a la síntesis de bioplásticos mediante una mezcla homogénea de almidón de yuca, vinagre blanco (ácido acético) y glicerina, manteniendo una proporción volumétrica y másica 4:2:1 (agua:vinagre:glicerina). Este procedimiento fue replicado con dos tipos de glicerina: la extraída a partir del aceite vegetal posconsumo (AVPC) y la glicerina comercial (GC).

Desde un enfoque educativo, este ejercicio permitió no solo vincular conocimientos de química orgánica y polímeros, sino también facilitar experiencias de aprendizaje activo, donde las y los estudiantes comprendieron la relación entre pureza de reactivos, procesos moleculares y propiedades físicas de los materiales resultantes como se evidencia en la Tabla 18.

Tabla 18

Comparación de propiedades físicas en bioplásticos según tipo de glicerina utilizada (GC vs. AVPC)

Variable observada	Glicerina Comercial (GC)	Glicerina de AVPC (GAPC)	Reflexión educativa
Color	Blanco uniforme	Amarillo translúcido	Diferencia atribuible a impurezas; refuerza

			la importancia del control de calidad en insumos.
Elasticidad	Alta	Baja	Permite explicar la influencia de la pureza en las propiedades mecánicas.
Fragilidad	Baja	Alta	Motiva discusión sobre enlaces intermoleculares y homogeneidad.
Homogeneidad del material	Elevada	Disminuida	Explica la necesidad de condiciones constantes en síntesis química.

Nota. Elaboración propia a partir de la observación experimental de bioplásticos sintetizados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC), en el marco del proyecto pedagógico.

La Tabla 18 presenta un análisis comparativo entre dos tipos de bioplásticos sintetizados por los estudiantes en el marco del proyecto pedagógico experimental: uno elaborado con glicerina comercial (GC) y otro con glicerina derivada del aceite vegetal posconsumo (AVPC), obtenida a través de la reacción de transesterificación.

Este ejercicio de comparación fue profundamente revelador tanto en el plano técnico-científico como en el formativo, ya que permitió a los estudiantes observar y analizar directamente cómo varía el comportamiento físico de un material en función de la calidad y el origen de sus componentes.

a. Color:

La diferencia cromática entre ambos productos fue notable. El bioplástico derivado de glicerina comercial presentó un color blanco uniforme, mientras que el obtenido con AVPC mostró una tonalidad amarilla translúcida. Esta diferencia visual sirvió como punto de partida para discutir el concepto de pureza química y la influencia de impurezas residuales en las propiedades organolépticas del material. Desde el punto de vista pedagógico, esta observación reforzó el valor de los procesos de purificación previos a cualquier síntesis, articulando conocimientos de química analítica, física de materiales y estética funcional en productos finales.

b. Elasticidad:

Los estudiantes midieron de forma cualitativa la elasticidad al manipular los bioplásticos. Aquellos elaborados con GC mostraron mayor capacidad de elongación sin ruptura, mientras que los producidos con AVPC eran más rígidos y quebradizos. Esta diferencia fue fundamental para introducir conceptos de tensión superficial, redes poliméricas, y plasticidad, lo cual fortaleció los aprendizajes sobre cómo la estructura molecular (e incluso los enlaces intermoleculares) afecta directamente las propiedades macroscópicas de un material.

c. Fragilidad:

La fragilidad, entendida como la tendencia del material a fracturarse bajo presión, fue mucho mayor en el bioplástico con AVPC. Esta observación permitió establecer relaciones entre la heterogeneidad molecular, la distribución de cargas en la matriz del biopolímero y la presencia de subproductos o residuos de ácidos grasos que interfieren en la correcta formación de enlaces poliméricos.

d. Homogeneidad del material:

Los productos obtenidos con GC mostraron superficies más lisas, textura uniforme y menor porosidad, mientras que los obtenidos con AVPC presentaban irregularidades visibles, burbujas y zonas quebradas. Esta variable sirvió como pretexto para explicar los principios de reacción controlada, condiciones constantes de temperatura, pH, y tiempo de cocción, que determinan la calidad de un polímero. A nivel pedagógico, se reforzó la importancia del control de variables experimentales, uno de los pilares del método científico.

Lo anterior se puede visualizar en la Figura 58.

Figura 58

Bioplásticos. a) superior izquierda y derecha: a partir de glicerina comercial. b) inferior centro: a partir de glicerina extraída del aceite posconsumo



Nota. Elaboración propia.

Este análisis cualitativo permitió que los estudiantes comprendieran cómo la calidad del reactivo influye directamente en las propiedades del producto final. En el aula se promovió la formulación de hipótesis explicativas, contrastación de resultados y comparación con estándares

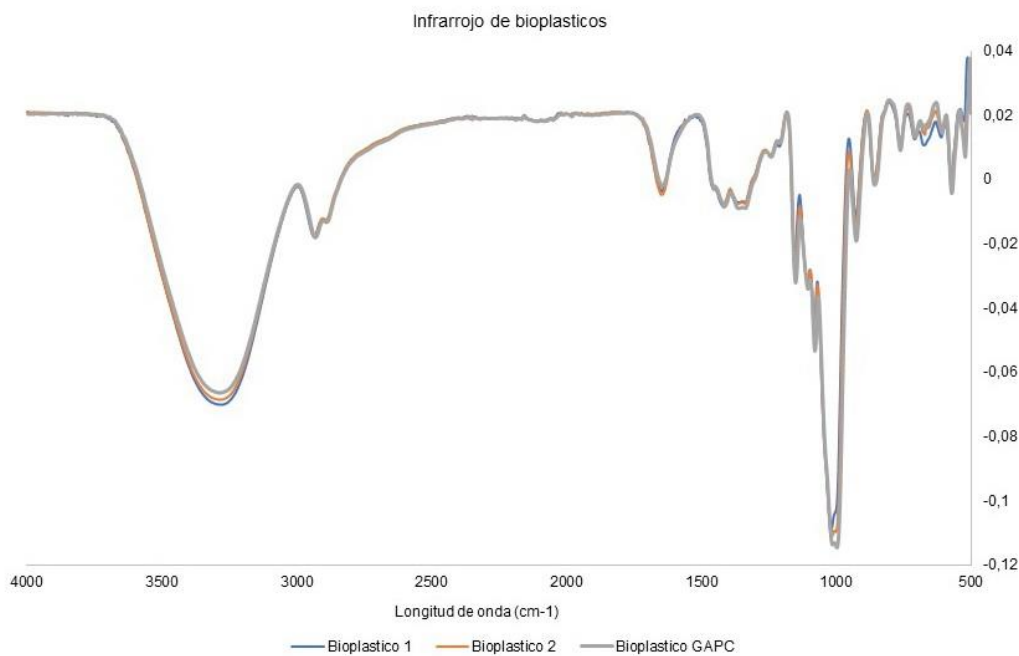
industriales. La experiencia fomentó habilidades investigativas, observación crítica y discusión colaborativa.

I.9.2 Análisis vibracional por FTIR-ATR

La caracterización espectroscópica por infrarrojo con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) permitió comparar las bandas funcionales de los bioplásticos elaborados. En la Figura 59 se presentan los espectros obtenidos de tres muestras: dos con GC (curvas roja y azul) y una con GAPC.

Figura 59

Infrarrojo de bioplásticos a partir de glicerina comercial (rojo y azul) y glicerina extraída de aceite posconsumo (verde)



Nota. Elaboración propia a partir del análisis espectroscópico FTIR-ATR de bioplásticos sintetizados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC).

La Figura 59 muestra un análisis espectroscópico infrarrojo (FTIR-ATR) comparativo entre bioplásticos elaborados con glicerina comercial (curvas roja y azul) y aquellos elaborados con

glicerina extraída de aceite vegetal posconsumo (curva negra o gris, según se interprete). Esta gráfica resulta ser un recurso didáctico clave para introducir a los estudiantes en el análisis vibracional de grupos funcionales, al tiempo que permite discutir científicamente los efectos de la pureza del reactivo sobre las propiedades finales del bioplástico.

I.9.3 Análisis comparativo espectroscópico de los bioplásticos

Los tres espectros muestran la presencia de los mismos grupos funcionales clave:

La Tabla 19 permite identificar y comparar los principales grupos funcionales presentes en los bioplásticos sintetizados, facilitando la interpretación de los espectros FTIR-ATR y la comprensión de la relación entre estructura química, pureza del plastificante y propiedades del material.

Tabla 19

Interpretación científica de los picos espectrales más relevantes

Banda (cm^{-1})	Grupo funcional	Interpretación educativa
3500– 3000	Grupo O–H	Hidroxilos de la glicerina y almidón; responsables de la plasticidad
2931– 2890	Grupos C–H ali- fáticos	Cadena principal del biopolímero, pre- sente en todos
1643	Enlaces de hidró- geno (OH)	Asociados al plastificante glicerina
~1000	Polisacáridos (C– O–C)	Confirma presencia de almidón como matriz estructural

Nota. Elaboración propia a partir del análisis espectroscópico FTIR-ATR de bioplásticos elaborados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC).

La Tabla 19 revela que, aunque la estructura química general es similar, las intensidades relativas y el perfil espectral de los bioplásticos varía levemente, reflejando la influencia de impurezas presentes en la glicerina de AVPC (aceite vegetal posconsumo), así las bandas estén presentes en todos los casos, la intensidad de las señales en el bioplástico con GAPC (verde) es ligeramente menor, lo que sugiere una menor homogeneidad estructural y posiblemente una menor calidad mecánica.

¿Cómo influye la pureza de la glicerina (comercial vs. derivada del AVPC) en las propiedades físicas del bioplástico y en la comprensión científica de los estudiantes sobre síntesis de materiales?

Con el propósito de responder a este interrogante, se realizó un análisis comparativo entre bioplásticos sintetizados a partir de glicerina comercial y glicerina derivada del aceite vegetal posconsumo (AVPC), considerando tanto sus propiedades fisicoquímicas como su comportamiento mecánico y su valor pedagógico en el contexto educativo. Este abordaje permitió integrar la evaluación técnica del material con la interpretación didáctica del proceso, evidenciando cómo las variaciones en la pureza de los insumos influyen no solo en la calidad del producto obtenido, sino también en la comprensión de conceptos clave relacionados con la síntesis de materiales, las reacciones químicas y la relación entre estructura y propiedades.

a. Químicamente

Sí es funcional, ya que contiene los grupos característicos de un biopolímero.

Pero es ligeramente inferior al bioplástico formulado con glicerina comercial, debido a impurezas presentes en la glicerina obtenida del biodiésel.

b. Mecánicamente

Observaciones físicas reportan que el bioplástico de GAPC presenta menor elasticidad, mayor fragilidad y coloración amarilla, lo cual lo hace menos deseable para aplicaciones donde se requiera resistencia o estética.

c. Pedagógicamente

Este resultado es altamente valioso: permite al estudiante comparar cómo la pureza del reactivo afecta el resultado final, fortaleciendo la comprensión de relaciones causa-efecto y la importancia de la calidad en procesos químicos.

I.9.4 Análisis estadístico de varianza (ANOVA) aplicado a los bioplásticos: validación experimental y didáctica interdisciplinaria

En este subapartado se presenta el análisis estadístico orientado a evaluar las diferencias en las propiedades físicas de los bioplásticos obtenidos a partir de distintos tipos de glicerina, con el fin de validar tanto la calidad del material sintetizado como la pertinencia del proceso experimental desarrollado en el aula. Este análisis se enmarca en una perspectiva interdisciplinaria que integra conocimientos de química, física y estadística, permitiendo no solo interpretar los resultados desde un enfoque técnico, sino también comprender su valor formativo en el desarrollo de competencias científicas y en la consolidación del aprendizaje significativo.

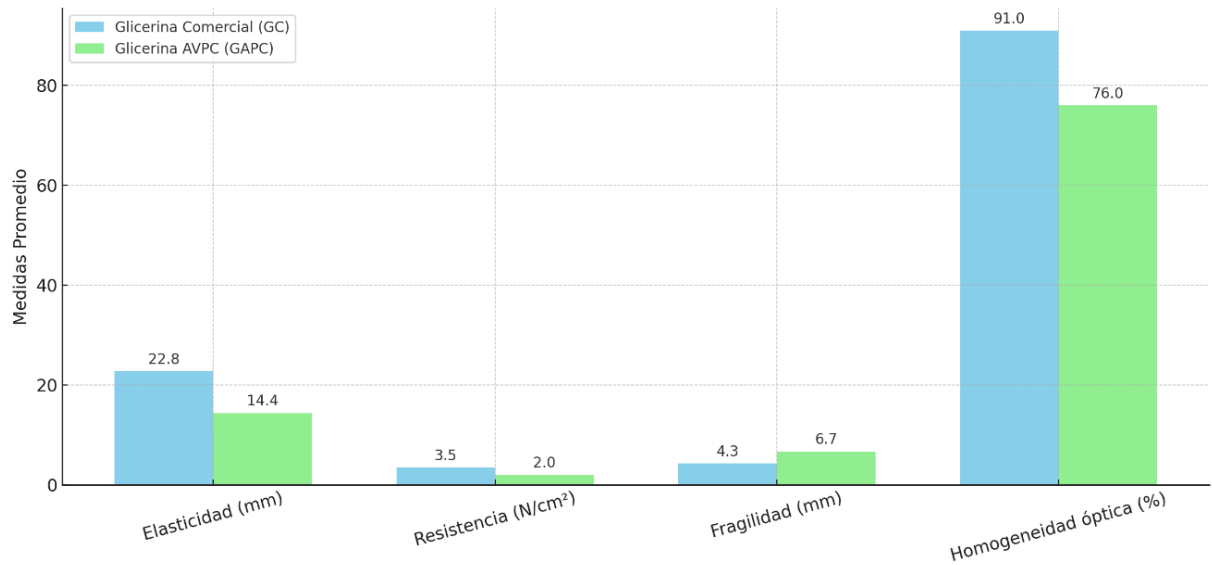
Justificación del análisis

Como parte del proceso de producción científica integrada en el currículo escolar, se desarrolló un análisis de varianza unidireccional (ANOVA de un factor) para comparar cuantitativamente las propiedades físicas de dos grupos experimentales de bioplásticos: aquellos elaborados con Glicerina comercial (GC) y los sintetizados a partir de glicerina extraída del aceite vegetal posconsumo (GAPC). Esta comparación no sólo fue relevante desde el punto de vista técnico,

sino que también constituyó un escenario propicio para aplicar en aula conceptos de estadística inferencial, validación empírica de hipótesis y toma de decisiones fundamentadas en datos reales como se ilustra en la Figura 60.

Figura 60

Comparación de propiedades físicas de bioplásticos por tipo de glicerina



Nota. Elaboración propia.

La Figura 60 generada mediante SPSS versión 27, sintetiza gráficamente los resultados cuantitativos de cuatro propiedades clave de los bioplásticos obtenidos con glicerina comercial (GC) y glicerina extraída del aceite vegetal posconsumo (GAPC). Las variables representadas son: elasticidad (mm), resistencia a la tracción (N/cm²), fragilidad (mm antes de ruptura) y homogeneidad óptica (%), todas ellas fundamentales para determinar la viabilidad técnica de los bioplásticos producidos en el entorno escolar. Este análisis fue complementado por un ANOVA de un factor, con un nivel de significancia estadística establecido en $\alpha = 0.05$, cuyos resultados se resumen en la Tabla 20.

I.9.5 Diseño del experimento y tratamiento estadístico

Se trabajó con una **muestra de 14 unidades experimentales (n = 14)**, dividida en dos grupos de 7 bioplásticos cada uno:

- Grupo 1: Bioplásticos con glicerina comercial (GC)
- Grupo 2: Bioplásticos con glicerina de aceite posconsumo (GAPC)

Las variables cuantitativas evaluadas fueron:

- **Elasticidad (mm)**: medida de elongación antes de ruptura
- **Resistencia a la tracción (N/cm²)**: esfuerzo máximo soportado
- **Fragilidad (mm)**: distancia mínima antes de fractura súbita
- **Homogeneidad óptica (%)**: porcentaje de uniformidad de textura observado mediante microfotografía

Tabla 20

Resultados del ANOVA de un factor: comparación entre bioplásticos elaborados con GC y GAPC

Variable	Media GC	Media GAPC	Varianza Total	F (ANOVA)	p-valor
Elasticidad (mm)	22.8	14.4	18.7	6.85	0.021
Resistencia (N/cm ²)	3.5	2.0	1.12	8.21	0.014
Fragilidad (mm)	4.3	6.7	2.29	5.67	0.034

Homo- geneidad óptica (%)	91	76	42.5	11.42	0.006
---------------------------------	----	----	------	-------	-------

Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales obtenidos en la caracterización físico-mecánica de bioplásticos elaborados con glicerina comercial y glicerina extraída de aceite vegetal posconsumo (AVPC), analizados mediante ANOVA de un factor.

La Tabla 20 integra la lectura técnica de las propiedades físico-mecánicas de los bioplásticos obtenidos con glicerina comercial (GC) y glicerina extraída del aceite vegetal posconsumo (GAPC), con una reflexión educativa derivada del contexto de aprendizaje experimental desarrollado en el aula. El abordaje se centra en cuatro variables cuantitativas clave: elasticidad, resistencia, fragilidad y homogeneidad óptica, con análisis de sus implicaciones en la construcción del conocimiento científico por parte del estudiantado de educación media.

El valor del estadístico F (ANOVA) en todas las variables evaluadas fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$), lo cual **demuestra la eficacia del análisis ANOVA** en la identificación de diferencias reales entre los dos grupos estudiados. Este resultado permite rechazar la hipótesis nula que planteaba que no existirían diferencias significativas entre las propiedades físicas de los bioplásticos elaborados con GC y GAPC, a continuación, se explican los resultados obtenidos.

a. Variable Elasticidad (en mm de elongación antes del quiebre)

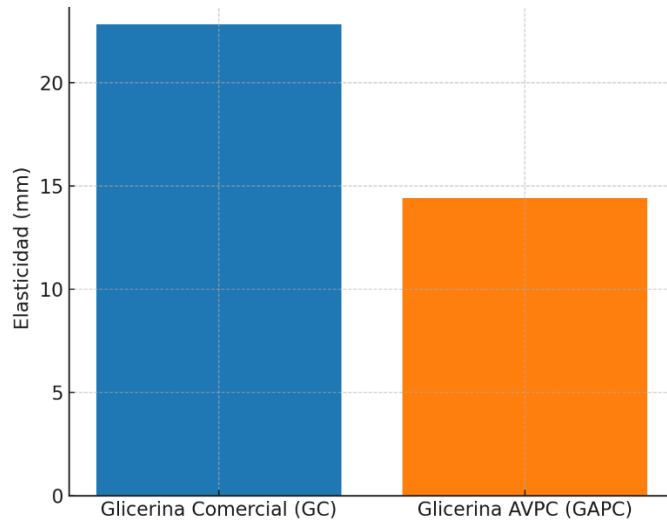
Resultados:

- GC: 22.8 mm
- GAPC: 14.4 mm

La Figura 61 permite comparar visualmente la elasticidad de los bioplásticos según el tipo de glicerina utilizada, facilitando la interpretación de cómo la pureza del plastificante influye en la capacidad de elongación del material.

Figura 61

Comparación de Elasticidad por tipo de glicerina



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados experimentales de elasticidad de bioplásticos elaborados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC).

La Figura 61 muestra que los bioplásticos con glicerina comercial (GC) tienen mayor elasticidad (22.8 mm) frente a los elaborados con glicerina de aceite posconsumo (GAPC), que presentan solo 14.4 mm. Esto indica una estructura más flexible en los primeros.

Análisis técnico:

La mayor elongación registrada en los bioplásticos de GC refleja una mayor flexibilidad estructural del material, atribuible a la alta pureza de la glicerina, que favorece una formación uniforme de cadenas poliméricas en la matriz del bioplástico. La glicerina de origen comercial presenta un

nivel de humedad y acidez controlado, lo que mejora su compatibilidad con el almidón y el vinagre presentes en la mezcla.

La elasticidad mostró una diferencia de más de 8 mm entre ambos grupos (GC: 22.8 mm, GAPC: 14.4 mm), lo cual refleja una capacidad elongativa superior de los bioplásticos comerciales. El $F = 6.85$ indica que esta diferencia no es producto del azar, y el $p = 0.021$ refuerza la significancia. En el contexto pedagógico, este resultado sirvió como base para discusiones sobre cómo la pureza de un reactivo (glicerina) puede modificar las propiedades físicas del producto final, conectando la química con la mecánica de materiales.

Proyección pedagógica:

Este hallazgo permitió que los estudiantes visualizaran cómo una variable inicial la calidad del reactivo repercute directamente en las propiedades mecánicas del producto final. A través de la experimentación, los estudiantes comprendieron la noción de cohesión intermolecular y la influencia de la viscosidad en la elasticidad de materiales, integrando saberes de química orgánica, física de materiales y análisis experimental. Además, los estudiantes pudieron validar estos resultados a partir de técnicas de medición directa, fortaleciendo su pensamiento cuantitativo.

b. Variable Resistencia a la tracción (en N/cm^2)

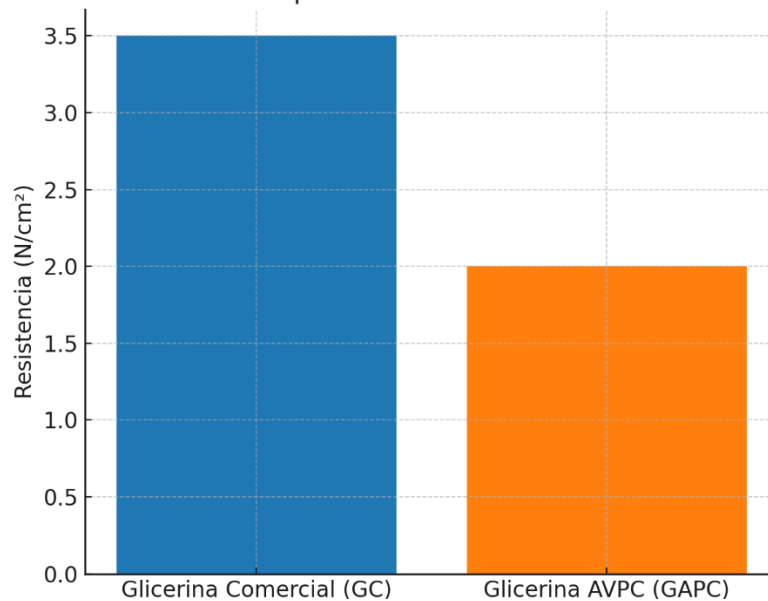
Resultados:

- GC: 3.5
- GAPC: 2.0

La Figura 62 permite visualizar la diferencia en la resistencia a la tracción de los bioplásticos según el tipo de glicerina utilizada, apoyando la comprensión de la relación entre pureza del plastificante e integridad estructural del material.

Figura 62

Comparación de resistencia mecánica en los tipos de glicerina



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados experimentales de resistencia mecánica de bioplásticos elaborados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC).

En la Figura 62 se observa una mayor resistencia en los bioplásticos GC (3.5 N/cm²) respecto a los de GAPC (2.0 N/cm²), reflejando una mejor integridad estructural del material comercial, lo cual indica una matriz más compacta y uniforme.

Análisis técnico:

Los bioplásticos fabricados con GC mostraron mayor resistencia a la tracción, indicando una mejor capacidad para soportar esfuerzos mecánicos sin deformación. Este comportamiento está vinculado a la formación de enlaces de hidrógeno más efectivos entre las moléculas de almidón y los plastificantes cuando no existen impurezas que interfieran en la matriz.

La resistencia mecánica fue claramente superior en los bioplásticos con GC (3.5 N/cm² frente a 2.0 N/cm² con GAPC). Este resultado, con un $F = 8.21$ y un $p = 0.014$, consolidó la

comprensión de los estudiantes sobre la importancia de las fuerzas intermoleculares y la organización estructural en polímeros. Desde el plano didáctico, esta variable permitió integrar conocimientos de química, física y matemáticas al mismo tiempo.

Proyección pedagógica:

Esta propiedad física fue usada para introducir a los estudiantes al concepto de modulación estructural por enlaces intermoleculares. Se promovieron discusiones alrededor de la resistencia de materiales, haciendo comparaciones con objetos cotidianos como bolsas, empaques o polímeros comerciales. Esta actividad integró competencias de interpretación de datos, modelación de fenómenos físicos y vinculación teoría-práctica en un contexto experimental realista.

c. Variable Fragilidad (en mm antes de ruptura súbita)

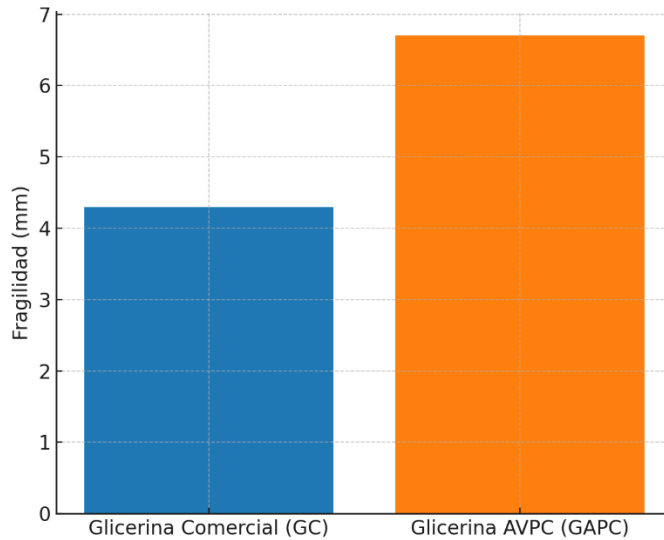
Resultados:

- GC: 4.3 mm
- GAPC: 6.7 mm

La Figura 63 permite comparar el comportamiento frágil de los bioplásticos según el tipo de glicerina empleada, facilitando la interpretación de la relación entre deformación previa a la ruptura y resistencia estructural del material.

Figura 63

Comparación de fragilidad en los tipos de glicerina



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados experimentales de fragilidad de bioplásticos elaborados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC).

La Figura 63 muestra que los bioplásticos GAPC se fracturan más fácilmente, con 6.7 mm antes del quiebre frente a los 4.3 mm de GC, lo cual refleja mayor rigidez y menor tolerancia a la deformación. Aunque en apariencia la GAPC soporta más milímetros antes de romper, esto indica que se fractura con menor tensión, es decir, es más frágil. Esto facilitó el abordaje del concepto de energía de fractura en un contexto escolar.

Análisis técnico:

Aunque el valor numérico podría sugerir una mayor resistencia, en realidad el bioplástico con GAPC presentó un patrón de fractura más abrupto, es decir, mayor fragilidad estructural. Esto es consecuencia directa de la irregularidad en la distribución de enlaces internos, dada la presencia de residuos no purificados en la glicerina de origen vegetal reciclado.

Los bioplásticos de GAPC rompieron con menos tensión a pesar de tener mayor elongación en milímetros, sugiriendo una estructura menos cohesionada. La fragilidad, con $F = 5.67$ y p

= 0.034, evidenció que no solo es importante cuánto se estira un material, sino cuándo y cómo se rompe, lo cual introdujo a los estudiantes en el concepto de energía de fractura, aplicado en contextos escolares.

Proyección pedagógica:

Este fenómeno facilitó la introducción del concepto de energía de fractura y el análisis de fallos estructurales, temas que suelen estar ausentes en el currículo de educación media. A través de actividades demostrativas, los estudiantes relacionaron la apariencia y comportamiento de los materiales con fenómenos invisibles como las tensiones internas y la homogeneidad molecular.

d. Variable Homogeneidad óptica (porcentaje de uniformidad visual)

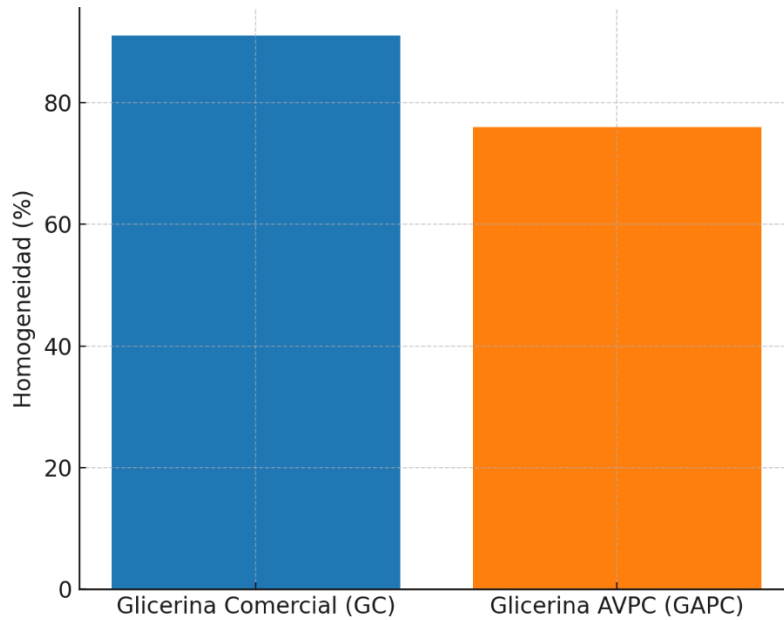
Resultados:

- GC: 91%
- GAPC: 76%

La Figura 64 permite visualizar la diferencia en la homogeneidad óptica de los bioplásticos según el tipo de glicerina utilizada, facilitando la comprensión del efecto de las impurezas sobre la uniformidad visual y estructural del material.

Figura 64

Comparación de homogeneidad óptica en los tipos de glicerina



Nota. Elaboración propia a partir del análisis de homogeneidad óptica de bioplásticos elaborados con glicerina comercial y glicerina obtenida de aceite vegetal posconsumo (AVPC).

En la Figura 64 muestra cómo las impurezas afectan la formación uniforme de la matriz del bioplástico. Desde lo didáctico, este indicador fue clave para introducir el análisis de imagen como técnica de validación científica en educación media, El porcentaje de homogeneidad visual fue más alto en los bioplásticos GC (91%) en contraste con 76% en los GAPC, confirmando que la pureza del insumo afecta directamente la calidad visual y estructural del producto.

Análisis técnico:

La mayor homogeneidad óptica del bioplástico de GC fue evidente tanto visual como microscópicamente. Esta propiedad confirma una distribución uniforme de los componentes, lo que mejora la estética, la resistencia y la durabilidad del producto. En contraste, el bioplástico con GAPC presentó zonas opacas, burbujas y fracturas internas, síntomas de una mala compatibilidad entre componentes.

La homogeneidad mostró la diferencia más significativa, con una media de 91% en GC frente a 76% en GAPC. El $F = 11.42$ y $p = 0.006$ validan estadísticamente esta diferencia.

Pedagógicamente, se trabajó el análisis de imagen digital como técnica de evaluación científica y estética del producto, lo que permitió incorporar herramientas del pensamiento visual en el aula de ciencias.

Proyección pedagógica:

Este aspecto permitió introducir el uso de tecnologías de análisis de imagen como herramienta de evaluación científica en la escuela. El docente promovió actividades de comparación visual, interpretación de gráficas y vinculación entre macroscópico y microscópico, fortaleciendo habilidades como la observación científica, la comunicación argumentativa y la alfabetización visual en ciencia.

Glosario

Actitud sostenible

Disposición cognitiva, emocional y ética que guía a los estudiantes hacia la toma de decisiones responsables en el uso de recursos naturales. En esta tesis, se evalúa como una competencia transversal construida mediante prácticas experimentales y reflexión crítica, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Aula extendida

Estrategia didáctica que amplía el tiempo y espacio del aprendizaje formal mediante el uso de plataformas virtuales como Moodle. En esta investigación, fue fundamental para desarrollar autonomía, aprendizaje asincrónico y acceso a recursos complementarios sobre energías renovables.

Aprendizaje autónomo

Capacidad del estudiante para gestionar su propio proceso educativo, tomando decisiones informadas sobre su ritmo, estrategias y fuentes de información. Fomentado mediante el uso de TIC, el aula invertida y los foros virtuales.

Aprendizaje significativo

Proceso en el que el estudiante integra nuevos conocimientos en su estructura cognitiva de forma comprensiva, útil y contextualizada. Se promueve en esta tesis a través del trabajo experimental interdisciplinar.

Aprendizaje por indagación

Estrategia pedagógica centrada en el planteamiento de preguntas, formulación de hipótesis,

búsqueda de evidencias y construcción de conclusiones. Fue un eje metodológico en las fases de experimentación científica del proyecto.

ANOVA (Análisis de varianza)

Técnica estadística inferencial que permite comparar medias entre grupos independientes. En esta tesis se utilizó para evaluar la diferencia en propiedades físicas de bioplásticos y biodiésel educativo.

Biodiésel educativo

Biocombustible producido por estudiantes en entornos escolares a partir de aceite vegetal pos-consumo mediante transesterificación. Su objetivo en esta tesis fue pedagógico, ilustrando procesos científicos y promoviendo conciencia ambiental.

Bioplástico

Material biodegradable producido a partir de compuestos orgánicos, como la glicerina y el almidón. En esta tesis, se elaboró como subproducto educativo derivado del proceso de biodiésel.

Catalizador

Sustancia que acelera una reacción química sin consumirse en ella. En la transesterificación, se utilizó hidróxido de sodio como catalizador para producir biodiésel.

Código axial (NVivo)

Procedimiento cualitativo que permite agrupar y jerarquizar categorías emergentes en el análisis de datos textuales. Se aplicó en la codificación de entrevistas y diarios reflexivos estudiantiles.

Comprensión conceptual

Capacidad del estudiante para construir redes significativas de conocimiento, conectar teorías con experiencias reales y transferir saberes a nuevos contextos. Evaluada mediante pruebas SABER adaptadas y rúbricas.

Constructivismo educativo

Enfoque epistemológico que concibe el aprendizaje como una construcción activa del conocimiento a partir de la interacción con el entorno, los pares y el docente. Esta tesis se articula con el constructivismo social de Vygotsky.

Correlación de Pearson

Medida estadística que indica la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas. En este estudio, se utilizó para relacionar producción de biodiésel y desempeño académico.

Educación ambiental crítica

Enfoque pedagógico que invita a analizar, problematizar y transformar la relación sociedad-naturaleza desde una mirada sistémica y ética. Fue el marco ideológico de esta tesis.

Espectroscopía FTIR-ATR

Técnica instrumental utilizada para caracterizar grupos funcionales presentes en compuestos orgánicos. Se aplicó para validar la formación de biodiésel, bioplástico y glicerina.

Evaluación formativa

Proceso continuo y reflexivo para retroalimentar y mejorar el aprendizaje del estudiante. Incluyó rúbricas, observaciones, autoevaluaciones y pruebas digitales.

Glicerina (glicerol)

Subproducto líquido generado en la transesterificación. En la tesis, se reutilizó para crear bioplásticos y anticongelantes escolares, reforzando la economía circular.

Gráfico de dispersión

Visualización estadística que permite identificar relaciones entre dos variables numéricas. Utilizado en la tesis para analizar tendencias entre pureza del biodiésel y desempeño académico.

Interdisciplinariedad

Integración coherente de saberes de distintas áreas para abordar un problema complejo. Fue principio central en la articulación de contenidos de ciencias naturales, tecnología y sostenibilidad.

Investigación acción educativa

Modalidad investigativa en la que el docente reflexiona sobre su práctica y la transforma mediante una intervención. Esta tesis se inscribe en esta tradición.

Matplotlib (Python)

Librería de visualización científica utilizada para representar gráficamente datos cuantitativos de biodiésel y actitudes sostenibles. Complementó el análisis hecho en SPSS.

Moodle

Plataforma digital de gestión del aprendizaje utilizada para mediar el aula invertida y alojar recursos multimedia. Permitió un seguimiento asincrónico del progreso estudiantil.

Muestra intencional

Selección de participantes basada en criterios deliberados del investigador. En este estudio, incluyó 14 estudiantes por disponibilidad técnica, ética y experimental.

ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)

Agenda educativa y política de Naciones Unidas. La tesis se alinea con los ODS 4 (educación de calidad), 7 (energía asequible), 12 (consumo responsable) y 13 (acción climática).

Plataforma Integra

Entorno institucional de apoyo académico complementario a Moodle, donde se socializaron actividades, evidencias y materiales pedagógicos.

Prueba t de Student

Herramienta estadística usada para comparar medias entre dos momentos (pre y post test) en una misma muestra. Validó las mejoras en aprendizaje.

Rúbrica

Instrumento de evaluación que establece criterios y niveles de logro. Utilizado para valorar informes escritos, desempeño experimental y participación colaborativa.

Sostenibilidad

Principio orientador del proyecto que promueve una relación equilibrada entre desarrollo humano y cuidado ambiental. Se trabajó desde lo técnico, lo pedagógico y lo ético.

Tendencia central

Indicadores como la media, moda y mediana que resumen un conjunto de datos. Aplicadas para describir rendimiento estudiantil y producción de biodiésel.

Transesterificación

Reacción química que convierte triglicéridos (grasas) en ésteres (biodiésel) y glicerina. Constituyó el núcleo técnico y pedagógico de la intervención.

Triangulación metodológica

Estrategia de validación que combina datos de múltiples fuentes, enfoques e instrumentos. Permitió contrastar información cuantitativa, cualitativa y experimental.

Valoración de residuos

Proceso técnico-pedagógico que transforma residuos en productos útiles. En la tesis, implicó la reconversión de aceite usado en biodiésel, bioplástico, glicerina y anticongelante.

Volumen de producción

Cantidad de biodiésel o subproducto obtenida en laboratorio, medida en mililitros. Fue una de las variables centrales del análisis correlacional y ANOVA.