

**APRENDIZAJE BASADO EN INDAGACIÓN GUIADA Y USO DE NADES PARA EL
DESARROLLO DE LA HABILIDAD DE INDAGACIÓN EXPERIMENTAL EN
PROFESORES DE QUÍMICA EN FORMACIÓN**

Jorge Enrique Parada Restrepo

Paula Natalia Vanegas Olarte

Trabajo de grado para optar al título de Licenciado en Química

Directora: Blanca Florinda Rodríguez Hernández

Codirector: Diego Alexander Blanco Martínez

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología, Licenciatura en Química
Bogotá D.C., Colombia
2026

Agradecimientos

El recorrido de la vida no solamente se establece en las diferentes metas propuestas o cumplidas, sino en el gran camino que se atraviesa día a día. Este trabajo no solo representa el final de un proceso educativo, sino un articulado de experiencias, conocimientos, iras, dudas, sueños y tiempos compartidos. Como dice un viejo refrán: “Si quieres llegar rápido, ve solo, pero si quieres llegar lejos, ve acompañado”. Una fraternidad formada desde un primer día de clases crea un vínculo que el día de hoy brilla como un sol saliente, donde nos vimos crecer como personas, amigos y profesionales.

Reconocer a aquella persona que, sin ocupar un lugar en estas páginas, ocupa uno muy especial en nuestra historia. Una ansiosa presencia que compartió con nosotros aulas, proyectos, encuentros y tantos momentos que trascendieron lo académico; quien estuvo presente en nuestras alegrías, en nuestros días difíciles y también en esos momentos que hicieron de la universidad algo más que una carrera.

Recordar a la voz de la sabiduría y la experiencia que fortaleció nuestro espíritu y creyó siempre en nosotros. Un sabio guía que nos direccionó en los momentos más turbios y hoy recordamos con cariño: a la memoria del profesor Royman Pérez Miranda, quien dejó una huella que recordaremos en nuestro camino y cuyas enseñanzas permanecen en nuestra manera de comprender la ciencia, la educación y la vida.

A nuestros compañeros, quienes compartieron con nosotros aulas, laboratorios, preguntas, risas, viajes, cansancios y sueños. Gracias por caminar a nuestro lado y por hacer de este trayecto no solo un camino académico, sino también uno profundamente fraternal.

Desde el corazón y la hoguera del hogar, a quienes día a día vivieron este esfuerzo y acompañaron con palabras de aliento, apoyo y comprensión. Pues la familia es un pilar que sostiene los sueños, que nos enseña a creer, a luchar y a resistir. Este logro también les pertenece.

Las oportunidades y la confianza que nos brindaron aquellos que dieron forma a la senda que transitamos, cuyas enseñanzas nos impulsaron a ser diferentes y a mejorar en cada paso, donde cada peldaño que caminamos estuvo acompañado de esas charlas después de clase, esos abrazos de consuelo, el tintico de motivación y consejos que buscaron aportar su granito en nuestra vida. Para aquellos que nos enseñaron a pensar y fueron inspiración en nuestra formación.

Y a cada persona cuya presencia fue esencial para poder llegar a este punto específico, donde aportó y, de una u otra manera, nos construyó como profesionales y como seres humanos, porque ningún camino se construye a solas; detrás de cada meta alcanzada habitan las voces, las manos y las huellas de quienes alguna vez caminaron con nosotros.

Hay personas que no solo caminan a nuestro lado, sino que hacen que el camino tenga más sentido.

Jorge Enrique Parada Restrepo y Paula Natalia Vanegas Olarte

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
2.1. Pregunta de investigación.....	8
3. JUSTIFICACIÓN.....	8
4. OBJETIVOS.....	10
4.1. Objetivo general.....	10
4.2. Objetivos específicos.....	10
5. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN.....	11
5.1. Desde el laboratorio de química y las prácticas experimentales orientadas a la indagación.....	11
5.2. Desde la indagación en la enseñanza de las ciencias y de la química.....	12
5.3. Desde la indagación en la formación inicial de profesores de ciencias y química.....	13
5.4. Desde la extracción de compuestos fenólicos por medio de NADES.....	13
6. MARCO TEÓRICO.....	15
6.1. Formación inicial del profesorado de química.....	15
6.1.1. Sentido y finalidad de la formación inicial docente.....	15
6.1.2. Particularidades de la formación del profesorado de química.....	15
6.1.3. El laboratorio como eje de la identidad profesional docente.....	16
6.1.4. Formación técnica vs. formación indagativa en la docencia.....	16
6.2. Prácticas experimentales indagativas en la enseñanza de la química.....	17
6.2.1. El trabajo experimental en la enseñanza de la química.....	17
6.2.2. Tipologías de prácticas experimentales: de la demostración a la investigación	17
6.2.3. Prácticas experimentales tipo “receta”.....	17
6.2.4. Características de las prácticas experimentales indagativas.....	18
6.3. Habilidad de indagación.....	18
6.3.1. Habilidad de indagación experimental en la formación del profesorado de química.....	19
6.3.1.1 Aprendizaje basado en indagación.....	19
6.3.1.2. Indagación guiada y trabajo experimental en química.....	20
6.3.1.3. Rol del docente y del estudiante en la indagación guiada.....	20
6.3.1.4. Componentes de la habilidad de indagación experimental.....	21
6.4. Fases del ciclo de indagación.....	22
6.5. Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES).....	22
6.5.1. Delimitación conceptual de los NADES.....	22
6.5.2. NADES y Química Verde.....	23
6.5.3. Puntos críticos a evaluar con el uso de NADES.....	23
6.6. Matriz y compuesto de interés.....	24
6.6.1. Avena sativa como cereal y matriz de interés.....	24
6.6.1.1. Tratamiento hidrotermal en la avena.....	24
6.6.2. Analito de interés: Ácido ferúlico.....	24
6.6.2.1. Actividad biológica del ácido ferúlico.....	25

6.6.3. Métodos actuales de extracción de ácido ferúlico y su impacto ambiental.....	26
6.6.4. Técnicas de extracción.....	27
6.6.4.1. Extracción con técnica de batelada.....	27
6.6.4.2. Extracción asistida por ultrasonido.....	27
7. MARCO METODOLÓGICO.....	27
7.1. Enfoque y diseño de la investigación.....	27
7.2. Contexto y participantes del estudio.....	28
7.3. Variables de la investigación.....	28
7.4. Indicadores de evaluación de la habilidad de indagación experimental.....	28
7.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	30
7.6. Producciones grupales de los estudiantes.....	31
7.7. Técnicas de análisis de datos.....	31
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
8.1. Intervención.....	34
8.1.1. Diseño experimental del sistema NADES–salvado de avena y estrategia analítica para la evaluación semicuantitativa del ácido ferúlico.....	38
8.1.1.1. Preparación de las formulaciones NADES.....	39
8.2. Prueba piloto del sistema experimental.....	41
8.3. Resultados de la prueba piloto.....	42
8.3.1. Curva de calibración para ácido ferúlico.....	42
8.3.2. Preparación para lectura en HPLC.....	44
8.3.3. Lectura cromatográfica de los extractos obtenidos en la prueba piloto.....	45
8.3.4. Decisiones metodológicas derivadas de la prueba piloto.....	46
8.4. Validación de los instrumentos.....	48
8.5. Pretest y posttest.....	48
8.6. Prueba de rangos con signos de Wilcoxon.....	50
8.7. Tendencia de los niveles de desempeño.....	52
8.8. Productos y evidencias de los participantes.....	56
8.8.1. Resultados HPLC de los grupos.....	58
8.8.1.1. Contraste entre las respuestas de los participantes y la evidencia experimental.....	59
8.9. Análisis cualitativo de contenido: codificación por nodos.....	60
8.10. Triangulación de datos.....	61
8.10.1. Análisis por indicador triangulado.....	62
9. CONCLUSIONES.....	64
9.1. Limitaciones y proyecciones.....	66
10. REFERENCIAS.....	67
11. ANEXOS.....	74
Anexo A. Documento de validación del trabajo de grado.....	74
Anexo B. Consentimiento informado.....	95
Anexo C. Paquete de material complementario.....	96

Anexo D. Planeación de las intervenciones.....	101
Anexo E. Cromatogramas de la curva de calibración.....	118
Anexo F. Cromatogramas de las extracciones de la prueba piloto.....	121
Anexo G. Pretest.....	124
Anexo H. Postest.....	129
Anexo I. Formato de indagación para el diseño del laboratorio.....	134
Anexo J. Rúbrica.....	148
Anexo K. Productos/evidencias de los participantes.....	151
Anexo L. Áreas cromatográficas de cada grupo reportadas por el equipo de HPLC.....	154
Anexo M. Sistema de códigos y matriz de codificación del análisis cualitativo.....	158

1. INTRODUCCIÓN

En la formación inicial del profesorado de química, las actividades experimentales de laboratorio constituyen uno de los espacios privilegiados para el aprendizaje de conceptos, procedimientos y formas de razonamiento, y través de estos espacios, los futuros docentes no solo entran en contacto con fenómenos químicos, sino que construyen concepciones sobre la naturaleza del conocimiento científico, el papel de la experimentación y las formas legítimas de producir y validar saberes en el espacio de clase (Marín, 2021).

Sin embargo, diversas investigaciones han señalado que, en muchos contextos de formación docente, las prácticas de laboratorio se continúan implementando bajo esquemas tradicionales de carácter prescriptivo, centrados en la reproducción de protocolos previamente establecidos y en la obtención de resultados esperados (Hernández-Millán et al., 2012). Este tipo de prácticas, comúnmente denominadas “prácticas tipo receta”, si bien permiten el desarrollo de destrezas técnicas y procedimentales, limitan las oportunidades para problematizar fenómenos, indagar, formular hipótesis, tomar decisiones experimentales y reflexionar sobre lo que se está haciendo (Castillo, 2021).

De acuerdo con Villamizar (2023) esta situación resulta un poco problemática en la formación del profesorado de química, dado que las experiencias vividas durante la formación inicial tienden a reproducirse posteriormente en la práctica docente, y con ello también se continúa un modelo de enseñanza centrado en la transmisión de contenidos y ejecución mecánica de procedimientos, en detrimento del desarrollo de habilidades investigativas y del pensamiento crítico (Aguar, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, al incorporar prácticas experimentales de carácter indagativo e investigativo, se le apuesta a la transformación del papel del laboratorio en la formación docente (López y Tamayo, 2012). Así, estas prácticas, en las que se plantean problemas abiertos, el introducir incertidumbre experimental y demandar la toma de decisiones fundamentadas, permiten situar a los estudiantes (profesores en formación) en un rol activo y consciente, favoreciendo la movilización e integración de habilidades (Machado, Montes de Oca y Mena, 2008).

Con ello, el Aprendizaje Basado en Indagación, conocido en inglés como Inquiry Based Learning, surge aquí como un enfoque didáctico acorde con las necesidades formativas de la educación superior en general, y de la formación del profesorado de química, en particular. Por lo cual, desde esta perspectiva, se proyecta que el aprendizaje no se conciba como la recepción y asimilación de conocimientos, sino como un proceso activo de indagación en el que se pueda aprender química mientras se está investigando, reflexionando y construyendo explicaciones sustentadas en evidencias (Pedaste et al. 2015).

En este marco de ideas, si se llevan los escenarios experimentales indagativos y no rutinarios a un contexto asociado a la extracción de compuestos de origen alimenticio mediante Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES) se constituye un escenario que introduce a la complejidad, la variabilidad y la ausencia de soluciones únicas, las cuales son características que convierten a los solventes NADES en un recurso didáctico con el potencial para promover procesos de indagación y reflexión, más allá de que se dirccione hacia un objeto de validación química.

Los NADES, por su parte, son un tema de interés creciente en el ámbito de la química en general y de la química verde en particular. En el contexto educativo de la Universidad

Pedagógica Nacional, Ibáñez y Román (2026) presentan un antecedente reciente en el que los NADES se incorporan dentro de una propuesta formativa orientada al fortalecimiento de habilidades investigativas. Sin embargo, resulta pertinente profundizar en su utilización como contexto didáctico desde una perspectiva específicamente orientada al desarrollo de la habilidad de indagación experimental. En este sentido, resulta necesario investigar de qué manera la implementación de una intervención didáctica basada en indagación guiada, contextualizada en la preparación y uso de NADES, incide en el desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación, lo que da origen al presente trabajo de investigación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la formación inicial del profesorado de química, las prácticas experimentales de laboratorio ocupan un lugar central como espacios destinados al aprendizaje de conceptos, procedimientos y formas de razonamiento propias de la disciplina (Hernández-Millán et al., 2012), pero están organizados bajo esquemas prescriptivos, centrados en la reproducción de protocolos y en la obtención de resultados ya previstos, lo que reduce la participación del profesor en formación en la toma de decisiones metodológicas.

Con esto, autores como Hofstein y Lunetta (2004) señalan que el verdadero valor educativo del laboratorio depende de las actividades que se proponen y de las oportunidades que ofrecen para investigar fenómenos, interpretar datos y construir explicaciones, más allá de la manipulación de materiales o equipos, lo cual es lo que más se evidencia en muchas instituciones de educación pública.

Esta situación también se presenta en la educación superior, particularmente en la formación inicial de profesores de química, donde el predominio de prácticas orientadas a la verificación de contenidos y al seguimiento de instrucciones puede limitar el desarrollo de habilidades asociadas con la indagación. En contraste, Hernández Prieto, Chinome Cipagauta y Martínez Pérez (2020), a partir de situaciones problemáticas experimentales desarrolladas con profesores en formación inicial, reportaron un fortalecimiento de los procesos indagatorios y de los niveles de capacidad indagatoria, lo que evidencia la pertinencia de generar experiencias experimentales que involucren activamente al futuro profesor en el proceso de indagación.

En este sentido, a partir de la síntesis realizada por Minner, Levy y Century (2010) y del metaanálisis de Furtak et al. (2012), se coincide en que las propuestas pedagógicas de tipo de indagación tienden a mostrar resultados más favorables cuando se estimula el pensamiento activo y se cuenta con apoyos docentes suficientes para sostener el proceso. En este contexto, el mayor reto no radica en el hecho de que haya prácticas experimentales tradicionales, sino en la escasez de propuestas didácticas que se orientan al desarrollo de la habilidad de indagación experimental.

En este sentido, hay un enfoque específico que es el aprendizaje basado en indagación (ABI), en el cual autores como Pedaste et al. (2015) hacen una revisión sistemática de la literatura y con ello proponen un ciclo de indagación compuesto por cinco fases: orientación, conceptualización, investigación, conclusión y discusión.

Asimismo, tomando como contexto los espacios académicos de ciencias en general y de química en particular, cuando el tiempo es reducido y el laboratorio debe mantenerse metodológicamente viable, es necesario desarrollar intervenciones concretas y acotadas.

Por lo cual, la presente investigación se sitúa precisamente en esta problemática, con el propósito de trascender las prácticas experimentales de tipo “receta” y favorecer el desarrollo de la habilidad de indagación experimental (Vo y Simmie, 2025). Por lo tanto, para efectos de esta investigación, y a partir de los procesos asociados con la indagación científica descritos en la literatura, esta habilidad se entiende como la capacidad de formular preguntas experimentales pertinentes, planificar procedimientos comparativos, identificar y controlar variables relevantes, ejecutar procedimientos de manera sistemática, registrar e interpretar datos y evidencias, reconocer dificultades o limitaciones metodológicas y realizar ajustes justificados a partir de los resultados obtenidos (Chinn y Malhotra, 2002).

En este sentido, el Aprendizaje Basado en Indagación (ABI) resulta pertinente para favorecer el desarrollo de la habilidad de indagación experimental, dado que sitúa al estudiante en actividades que demandan indagar. Las fases propuestas por Pedaste et al. (2015) ofrecen una estructura didáctica en la que pueden movilizar articuladamente los componentes definidos para esta habilidad. Por lo tanto, en esta investigación el ABI se asume como el enfoque didáctico que genera oportunidades para favorecer su desarrollo.

A partir de esta delimitación, se articula las intervenciones con una modalidad de indagación guiada y con un contexto químico como lo es la extracción de ácido ferúlico a partir de *Avena sativa* empleando NADES. Esto porque la avena es una matriz alimentaria compleja y el ácido ferúlico es uno de sus compuestos fenólicos de interés asociado a componentes en la pared celular, lo que vuelve metodológicamente relevante el tratamiento de la muestra, el medio de extracción y la comparación entre técnicas y modos de operación. A su vez, con solventes como los NADES se introduce a discusiones sobre alternativas de extracción y sostenibilidad.

Con esto, se formula la siguiente pregunta de investigación.

2.1. Pregunta de investigación

¿Cómo incide una intervención didáctica basada en el Aprendizaje Basado en Indagación (ABI), desarrollada mediante una modalidad de indagación guiada y contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con NADES, en el desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación?

3. JUSTIFICACIÓN

Desde la didáctica de las ciencias, autores como Hofstein y Lunetta (2004) señalan que el laboratorio favorece la comprensión conceptual, el trabajo con evidencia y la interpretación de fenómenos, esto a partir del tipo de experiencia intelectual que se promueva, y el aprendizaje emerge cuando supera las actividades de seguimiento de instrucciones, cuando los estudiantes participan en la formulación de preguntas, la producción de datos y la elaboración de conclusiones, y no cuando la práctica se limita a confirmar resultados que ya se conocen.

Desde esta perspectiva, el presente trabajo de investigación se justifica didáctica, metodológica, formativa e institucionalmente. Primero, didácticamente, en el sentido en que propone una serie de intervenciones de indagación guiada orientada a desplazar el laboratorio como un espacio de repetición hacia un espacio de toma de decisiones metodológicas. Además, la elección de una habilidad en específico a desarrollar (habilidad de indagación

experimental), permite alinear con mayor precisión el problema, la secuencia de actividades, la evaluación y el análisis.

Ya desde una posición metodológica, esta investigación se justifica porque propone un buen desarrollo de la variable dependiente y focaliza una sola habilidad reflejada en la formulación preguntas experimentales pertinentes, planificación de procedimientos comparativos, control de variables relevantes, ejecución sistemáticamente de las prácticas, registro de datos y evidencias, reconocimiento de dificultades metodológicas, y la realización de ajustes metodológicos justificados. También se justifica en el sentido de que la efectividad de la enseñanza basada en indagación depende, entre otros factores, del equilibrio entre exigencia cognitiva y la guía docente Furtak et al. (2012).

Ahora, desde una posición formativa, esta investigación se justifica porque la formación inicial de profesores de química requiere más que el dominio conceptual y la destreza técnica; también demanda el desarrollo de una dimensión investigativa que permita a los futuros docentes problematizar, analizar y tomar decisiones frente a situaciones propias de la enseñanza y de la actividad científica (Franco Moreno, Gallego Badillo y Pérez Miranda, 2017). En este sentido, se requiere que los futuros profesores comprendan el laboratorio como un espacio de producción e interpretación de evidencia, para que en su ejercicio profesional no reproduzcan modelos de enseñanza centrados únicamente en protocolos cerrados y resultados previstos, dado que la indagación produce mejores resultados cuando no se limita al seguimiento de instrucciones (Fernández Marchesi, 2018).

Por su parte, institucionalmente se justifica en el sentido de que se implementa en un espacio académico donde el laboratorio y el análisis de matrices alimentarias ya forman parte del trabajo curricular, específicamente en lo que respecta al tema de “cereales”, lo que favorece la implementación de una secuencia de indagación guiada sin desarticular los propósitos formativos del curso “Énfasis didáctico I: Alimentos bajo la lupa”. Esta articulación entre laboratorio, contexto alimentario y desarrollo de habilidades cuenta además con antecedentes en la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, donde Rodríguez-Cepeda, Casas-Mateus y Martínez-Cárdenas (2020) emplearon trabajos experimentales contextualizados en química de alimentos para favorecer habilidades de pensamiento crítico en estudiantes del programa.

Esto se articula con el programa de Licenciatura en Química, donde el valor del laboratorio no debería limitarse sólo al aprendizaje técnico o procedimental, sino ampliarse hacia formas de trabajo experimental más cercanas a la toma de decisiones fundamentadas.

Asimismo, con el contexto que se plantea se permite articular contenidos disciplinares, discusiones ambientales y desarrollo metodológico dentro de un mismo componente, y así se ofrece un referente para pensar formas más integradas y viables de trabajo experimental en la formación inicial de profesores de química.

Este trabajo de investigación se justifica también por la pertinencia científica y contextual del sistema experimental seleccionado, ya que avena es un cereal de reconocido interés alimentario por su valor nutricional y por la presencia de compuestos bioactivos como β -glucanos y fenoles, entre ellos el ácido ferúlico.

La literatura indica que este ácido fenólico suele encontrarse en fracciones de cereales en forma libre y, sobre todo, que está ligada a componentes de la pared celular, lo que hace que su recuperación depende tanto del solvente como de la accesibilidad de la matriz (Liu et

al., 2022). Esta característica convierte a la extracción de ácido ferúlico de la *Avena sativa* en una buena situación experimental y didáctica.

Desde el punto de vista aplicado, el ácido ferúlico es de interés por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias y por su potencial uso en formulaciones alimentarias, biomédicas y farmacéuticas (Zduńska, et al., 2018).

Así mismo, la comparación entre métodos de extracción y sistemas solventes no se plantea como una búsqueda de la “mejor” tecnología, sino como una oportunidad para discutir decisiones metodológicas, sostenibles ambientalmente y viables experimentalmente.

En este marco de ideas, los Solventes Eutécticos Profundo Naturales (NADES) ofrecen una alternativa para formular medios de extracción con características como baja volatilidad y composición ajustable (Hikmawanti et al., 2021), solo que la literatura reciente también advierte que estas características ambientales no pueden asumirse sin matices, debido a que involucran limitaciones como la viscosidad, contenido de agua, recuperación y evaluaciones toxicológicas específicas (Bragagnolo et al., 2024).

Precisamente por ello, el uso de NADES se implementa en este trabajo de investigación, no porque resuelva el problema de métodos de extracción sostenible, sino porque permite poner al estudiante ante una decisión experimental actual y discutible.

Finalmente, con la inclusión de un proceso de pretratamiento como el hidrotérmico suave a la matriz y la comparación entre técnicas de extracción por batelada, calentamiento-agitación y la asistida por ultrasonido, ofrecen una situación donde el procedimiento no está completamente cerrado ni definido, y exige que los participantes seleccionen y justifiquen opciones metodológicas bajo condiciones reales de laboratorio.

4. OBJETIVOS

De acuerdo con el problema planteado, se formulan los siguientes objetivos de investigación.

4.1. Objetivo general

Evaluar la incidencia de una propuesta didáctica a partir del aprendizaje basado en indagación guiada sobre el desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación, contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES).

4.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el nivel inicial de desempeño de los profesores de química en formación en la habilidad de indagación experimental, antes de la implementación de la intervención didáctica.
2. Diseñar e implementar una intervención didáctica de indagación guiada, contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con NADES, orientada al desarrollo de la habilidad de indagación experimental.
3. Analizar los cambios en el nivel de desempeño de los profesores de química en formación respecto a los indicadores de la habilidad de indagación experimental, asociados con la implementación de la propuesta didáctica de indagación guiada, a partir de la integración de evidencias cuantitativas y cualitativas obtenidas antes, durante y después de la intervención.

5. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

En el marco de cumplir con los objetivos que se establecen en esta investigación y de hacer una delimitación del estado de arte actual del conocimiento respecto a las temáticas que se abordan, se sustentan y organizan los antecedentes en cuatro ejes temáticos: (i) el laboratorio de química y las prácticas experimentales orientadas a la indagación, (ii) la indagación en la enseñanza de las ciencias y de la química, (iii) la indagación en la formación inicial del profesorado de ciencias y química, y (iv) la extracción de compuestos fenólicos y el uso de NADES como contexto experimental. De esta manera, se permite establecer una relación entre los estudios previos y el problema de investigación que se aborda.

5.1. Desde el laboratorio de química y las prácticas experimentales orientadas a la indagación

La literatura clásica sobre laboratorio en educación científica ha mostrado que su valor formativo no depende simplemente de la manipulación de materiales o del seguimiento de procedimientos, sino del tipo de razonamiento y de decisiones que la actividad experimental exige al estudiante. En una revisión ampliamente citada, Hofstein y Lunetta (2004) sostienen que el laboratorio puede favorecer la comprensión conceptual, el trabajo cooperativo, la interpretación de datos y el entendimiento de la naturaleza de la ciencia, pero también mencionan que esos aportes se debilitan cuando las prácticas se organizan como experiencias cerradas y confirmatorias.

Otras revisiones han reforzado esta lectura y han mostrado que el trabajo práctico de laboratorio debe analizarse no solo por su formato material, sino por su nivel de apertura, por el tipo de decisiones que permite y por la naturaleza de la evidencia que demanda (Caamaño, 2004).

Rönnebeck, Bernholt y Ropohl (2016), en una revisión de investigaciones empíricas sobre actividades de indagación científica, señalan que existe una gran variabilidad en la forma en que la “indagación” se implementa y estudia, lo que dificulta comparaciones simples y exige describir con precisión qué componentes de la actividad investigativa se ponen realmente en juego, en este sentido, el aprendizaje se vuelve pedagógicamente más potente cuando se aproxima a formas de investigación orientadas por preguntas y evidencia.

Esto es relevante para la presente investigación, porque justifica delimitar con claridad la habilidad de indagación experimental que se busca desarrollar en vez de asumir que toda práctica de laboratorio abierta promueve automáticamente la indagación.

En el caso de la química, esta discusión adquiere un matiz particular porque el laboratorio ocupa un lugar central en la enseñanza de la misma. La revisión de Jegstad (2024) sobre educación química basada en indagación muestra que buena parte de la literatura del área se ha concentrado en el diseño de enfoques de enseñanza, entornos de aprendizaje y prácticas de laboratorio que buscan aumentar la participación del estudiantado en procesos de pregunta, exploración, explicación y argumentación. Sin embargo, la misma revisión sugiere que el campo sigue siendo heterogéneo en objetivos, niveles educativos y definiciones de indagación, lo que vuelve especialmente importante especificar con precisión el foco didáctico de cada estudio.

En el contexto de la Universidad Pedagógica Nacional, Rodríguez-Cepeda, Casas-Mateus y Martínez-Cárdenas (2020) desarrollaron una propuesta de laboratorio

contextualizada en química de alimentos con estudiantes de la Licenciatura en Química, mediante trabajos experimentales estructurados como miniproyectos orientados a la resolución de problemas. Los autores reportaron un favorecimiento en el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, particularmente a partir de actividades que exigían interpretación, argumentación y análisis de situaciones asociadas con la composición de alimentos. Este antecedente resulta pertinente para la presente investigación porque evidencia, en un contexto institucional cercano, el potencial del laboratorio de química contextualizado para trascender la ejecución procedimental y favorecer habilidades de pensamiento mediante situaciones experimentales vinculadas con problemas específicos.

5.2. Desde la indagación en la enseñanza de las ciencias y de la química

De acuerdo con la literatura, la enseñanza basada en indagación ha sido uno de los enfoques más estudiados en educación científica durante las últimas décadas, así Minner, Levy y Century (2010), realizaron una síntesis que incluye 138 estudios y con ellos identificaron una tendencia positiva respecto a la indagación sobre el aprendizaje de las ciencias cuando en las sesiones se exigía pensamiento activo y construcción de conclusiones a partir de datos.

A partir de esto, Furtak et al. (2012), afinaron la anterior conclusión y con ello mostraron que la efectividad de la indagación depende tanto de sus rasgos cognitivos como también del grado de guía ofrecido por el docente. En este sentido, estos trabajos sugieren que la indagación tiene potencial formativo, pero también depende de cómo se estructura didácticamente.

Por su parte, autores como Pedaste et al. (2015) propusieron una de las síntesis más influyentes del aprendizaje basado en indagación, que está organizada en cinco fases: orientación, conceptualización, investigación, conclusión y discusión. Esto permite comprender la indagación como un proceso no lineal que incluye la formulación de preguntas, experimentación, interpretación y comunicación. A partir de esto, para este trabajo de investigación, esta referencia es clave porque permite justificar una serie de intervenciones centradas en la indagación.

En el ámbito específico de la enseñanza de la química, antecedentes recientes muestran un interés creciente por la indagación, entre ellos está la revisión sistemática de Jegstad (2024) que incluyó 102 artículos publicados entre 2000 y 2020, en ella se agrupó la investigación en educación química basada en indagación en cuatro ejes: 1) enfoques o modelos de enseñanza, 2) entornos de aprendizaje, 3) aprendizaje de conceptos y 4) competencias o resultados del estudiantado.

Este estudio nos indica que la indagación en la química ha sido abordada ampliamente, pero también que sigue existiendo la necesidad de estudios más focalizados, especialmente cuando se trata de intervenciones de corta duración en contextos concretos.

Por otro lado, también se ha destacado el impacto de las preguntas de los estudiantes dentro de la indagación, de modo que Herranen y Aksela (2019) revisaron específicamente la indagación basada en preguntas de los estudiantes y encontraron que estas preguntas cumplen funciones relevantes en la planificación, la orientación y la apropiación del proceso investigativo. A su vez, también mostraron que el papel del docente es importante desde la fase de diseño, lo cual refuerza la pertinencia de la modalidad de indagación guiada.

5.3. Desde la indagación en la formación inicial de profesores de ciencias y química

En una revisión sistemática de 142 estudios empíricos publicados entre el periodo de 2000-2022, los autores Strat, Henriksen y Jegstad (2023) analizaron el uso de la enseñanza de ciencias basada en indagación en la formación inicial de profesores, además distinguieron investigaciones en las que los futuros docentes participan como aprendices de indagación e investigaciones en las que se preparan para enseñarla. Así, esta revisión muestra que la indagación influye en la formación docente, ya que las experiencias formativas de los futuros docentes influyen en sus concepciones sobre cómo enseñar ciencias.

Por otro lado y más específicamente, hay un estudio de Zemel, Shwartz y Avargil (2021) desarrollado en un laboratorio de química basado en indagación con profesores en formación, en el cual se analizó cómo la guía incidía en la evaluación formativa de informes de laboratorio. Esa investigación, aunque tiene otro enfoque, aporta una evidencia importante la cual es que la guía pedagógica explícita no elimina la complejidad de la tarea, sino que puede ayudar a hacerla visible y a profundizarla.

En cuanto al contexto de la Universidad Pedagógica Nacional, Hernández, Chinome y Martínez (2020) diseñaron e implementaron una estrategia didáctica basada en situaciones problemáticas experimentales y en la enseñanza de las ciencias basada en indagación con profesores en formación inicial, empleando como componente experimental el análisis de hierro en diferentes alimentos. Los autores reportaron un fortalecimiento de los procesos indagatorios y de los niveles de capacidad indagatoria de los participantes.

De manera más reciente, Gómez y Rodríguez (2024) desarrollaron con estudiantes de décimo semestre de la Licenciatura en Química una propuesta de indagación guiada contextualizada en el potencial antimicrobiano del extracto de semillas de uva, orientada al fortalecimiento de habilidades investigativas como observar, describir, analizar, sintetizar e interpretar.

Estos antecedentes son relevantes para la presente investigación porque evidencian, dentro del contexto institucional de la UPN, la pertinencia de articular la formación inicial del profesorado de química con experiencias experimentales orientadas por la indagación, no obstante, este trabajo de investigación focaliza específicamente la habilidad de indagación experimental y su análisis mediante indicadores relacionados con la formulación de preguntas, la planificación experimental, el control de variables, el registro de evidencia y la revisión de decisiones metodológicas.

5.4. Desde la extracción de compuestos fenólicos por medio de NADES

En un plano químico, los NADES han dado lugar a una literatura creciente, iniciando la idea desde hace unos 15 años (Choi et al., 2011) y tomando más fuerza en los últimos 2 a 3 años como solvente.

En cuanto a la extracción de compuestos fenólicos y otros compuestos bioactivos con los NADES, se consideran sobre todo en su formulación como solvente, su rendimiento de extracción, la estabilidad del extracto y las posibles aplicaciones en alimentos, farmacéutica y nutracéutica. La revisión de Hikmawanti et al. (2021) analizó críticamente el uso de NADES para mejorar la extracción de metabolitos vegetales y discutió su papel no solo en extractabilidad, sino también en estabilidad, solubilidad y bioactividad. Más recientemente,

Bragagnolo et al. (2024) revisaron el uso de los NADES como medios de extracción y como sistemas de uso directo, destacando tanto su potencial como sus limitaciones operativas.

Estos antecedentes permiten reconocer que el campo químico y tecnológico de los NADES presenta un desarrollo amplio en términos de extracción; sin embargo, su incorporación en contextos educativos continúa siendo un campo menos explorado en comparación con sus aplicaciones químicas y tecnológicas.

En el ámbito educativo, Ibáñez y Román (2026) constituyen un antecedente reciente de la Universidad Pedagógica Nacional en el uso de NADES dentro de una propuesta formativa. Las autoras desarrollaron un Objeto Virtual de Aprendizaje orientado al fortalecimiento de habilidades investigativas en auxiliares de enfermería e incorporaron una fase experimental basada en la extracción de compuestos bioactivos de *Curcuma longa* mediante un sistema NADES, complementada con caracterización fitoquímica, espectroscopia infrarroja y análisis por HPLC. Este antecedente muestra la posibilidad de articular los NADES con procesos educativos y experimentales; no obstante, su propósito y población difieren de la presente investigación, centrada específicamente en la habilidad de indagación experimental de profesores de química en formación.

En paralelo, la literatura sobre ácido ferúlico en cereales y sobre extracción de compuestos fenólicos en matrices vegetales, muestra que la recuperación del compuesto depende fuertemente de su estado libre o ligado, del pretratamiento aplicado a la matriz y del método de extracción elegido (Pyrzynska, 2024). Así pues, se selecciona la *Avena sativa* como matriz y el ácido ferúlico como compuesto de interés.

Además del interés que hay de los NADES como medios de extracción, éstos también podrían verse como un contexto emergente para la enseñanza de la química, así, a partir de contenidos contextualizados, el aprendizaje de la química mejora cuando se relacionan de forma explícita los niveles disciplinar, meta-disciplinar y cotidiano, de manera que el aprendizaje no se reduzca a definiciones no relacionadas a situaciones relevantes (Parga-Lozano y Piñeros-Carranza, 2018).

Desde esta perspectiva, asumiendo un sistema experimental como la extracción de ácido ferúlico de una matriz de *Avena sativa* por medio de NADES, permite vincular contenidos químicos como interacciones intermoleculares, puentes de hidrógeno, polaridad, viscosidad, selección de solventes y sostenibilidad, con una problemática o situación experimental concreta de interés alimentario y ambiental (dos Santos-Fernandes y Fernandes-Campos, 2014).

A su vez, como mencionan Parga-Lozano y Piñeros-Carranza (2018) los enfoques basados en situación-problema han mostrado potencial para promover la movilización de conocimientos químicos, la toma de decisiones y la construcción de explicaciones en contextos de enseñanza, lo que refuerza la pertinencia de asumir los NADES no solo como objeto químico, sino como mediación didáctica para la indagación experimental en la formación inicial de profesores de química.

Y es justo ahí donde se sitúa el aporte potencial de este trabajo de investigación. La revisión de la literatura recuperada muestra una amplia producción sobre indagación en ciencias, una línea consolidada de estudios sobre educación química basada en indagación y un campo creciente de investigaciones sobre extracción mediante NADES. Asimismo, en el contexto de la Universidad Pedagógica Nacional se identifican antecedentes relacionados con

procesos indagatorios en la formación inicial de profesores (Hernández, Chinome y Martínez, 2020), propuestas de indagación guiada orientadas al fortalecimiento de habilidades investigativas en profesores de química en formación (Gómez y Rodríguez, 2024) y experiencias recientes que incorporan NADES en contextos formativos (Ibáñez y Román, 2026). Sin embargo, no se identificaron antecedentes que integren simultáneamente la indagación guiada, el desarrollo y evaluación de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación y un contexto de laboratorio centrado en la extracción de ácido ferúlico de Avena sativa mediante NADES.

En consecuencia, el vacío que orienta este trabajo de investigación no corresponde a la falta o ausencia de conocimiento en cada uno de estos componentes, sino a su articulación específica dentro de una propuesta didáctica viable y consistente.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Formación inicial del profesorado de química

6.1.1. Sentido y finalidad de la formación inicial docente

La formación inicial del profesorado constituye una etapa crítica en la construcción de la identidad profesional docente, en la cual no solo se adquieren conocimientos disciplinares y pedagógicos, sino que se configuran concepciones profundas sobre qué es enseñar, qué es aprender y cómo se produce el conocimiento en el aula (Estrada et al., 2018).

Hoy en día, la formación docente no tiene por qué reducirse a la transmisión de contenidos ni al entrenamiento en técnicas de enseñanza, sino que debe orientarse al desarrollo de capacidades reflexivas, críticas, indagativas e investigativas que permitan al futuro profesor comprender y transformar su práctica pedagógica (Martínez y Márquez, 2014). En el contexto específico de la formación inicial de profesores de química de la Universidad Pedagógica Nacional, Franco, Gallego y Pérez (2017) destacan la dimensión investigativa como un componente de los procesos formativos del programa, vinculada con los fundamentos pedagógicos, didácticos, históricos y epistemológicos que orientan la formación del licenciado en química.

Finalmente, es esencial que el docente en formación sea consciente de su propia práctica, que la analice y problematice los fenómenos educativos y científicos, y pueda tomar decisiones basadas en evidencias, lo cual exige que el desarrollo de diferentes habilidades esté inmerso de manera transversal en el currículo de formación inicial (Machado et al. 2008).

6.1.2. Particularidades de la formación del profesorado de química

En la formación inicial de profesores de química se presentan particularidades específicas que derivan de la naturaleza epistemológica y metodológica de la disciplina en sí, así como también hay desafíos respecto a la abstracción y complejidad de la misma, la cual suele percibirse como distante de la vida cotidiana (García et al., 2025). Por ende, al tomar la química desde una perspectiva de ciencia experimental, entre otras cosas, se articulan modelos teóricos abstractos con fenómenos observables, lo cual exige del docente una comprensión profunda de la relación entre la teoría, la experimentación y la modelización (Estrada et al., 2018).

De esta manera, el ideal sería que el profesor de química no sólo domine conceptos y procedimientos propios de la disciplina, sino que también comprenda cómo se construye el conocimiento químico y experimental, cómo se re-presentan y validan los modelos científicos y cómo se comunican los resultados (García et al., 2025).

Sin embargo, hay estudios que señalan que en la formación inicial del profesorado de química hay una separación entre el aprendizaje de contenidos y el desarrollo de habilidades y competencias, lo que lleva a un proceso de enseñanza enfocado en la transmisión conocimientos y en la reproducción de prácticas experimentales rutinarias (Hernández et al., 2012 y Castillo, 2021).

6.1.3. El laboratorio como eje de la identidad profesional docente

El laboratorio es uno de los espacios formativos más influyentes en la formación de profesores de ciencias y es allí donde se materializan las concepciones sobre la ciencia, el conocimiento y la enseñanza que los futuros profesores internalizan durante su formación inicial (Del Carmen, 2011).

Por el contrario, cuando el laboratorio se configura como un espacio de indagación y experimentación, en el que se plantean problemas abiertos, se formulan hipótesis y se analizan resultados inciertos, el estudiante comienza a construir una identidad profesional como docente-investigador, capaz de comprender la ciencia como un proceso dinámico y contextualizado (Fernández Marchesi, 2018), potenciando así habilidades asociadas a la indagación, la toma de decisiones y la reflexión crítica (Aguilar, 2011) y limitando perspectivas de la ciencia como un conjunto de verdades acabadas y procedimientos infalibles (Castillo, 2021).

6.1.4. Formación técnica vs. formación indagativa en la docencia

La formación técnica se caracteriza por el énfasis en la correcta ejecución de procedimientos, el uso adecuado de instrumentos y el cumplimiento de protocolos establecidos, esto genera una tendencia hacia la mecanización de la enseñanza y por tanto del aprendizaje (Villamizar, 2023). Aunque estas competencias son necesarias, resultan insuficientes para formar docentes capaces de promover procesos de indagación científica en el aula (Fernández Marchesi, 2018).

Por su parte, la formación en habilidades de investigación e indagación, tiende a implicar el desarrollo de habilidades para identificar problemas, formular preguntas relevantes, diseñar estrategias de exploración, analizar datos y reflexionar crítica y argumentativamente sobre los resultados (Aguilar et al. 2021). Esto no se adquiere de manera espontánea, sino que requieren de contextos formativos que las demanden explícitamente y de estrategias didácticas que sitúen al estudiante en un rol activo (Martínez y Márquez, 2014).

Desde esta perspectiva, no es que una formación sustituya a la otra, sino que la complementa, permitiendo que los procedimientos experimentales adquieran sentido dentro de procesos de indagación más amplios y contextualizados.

6.2. Prácticas experimentales indagativas en la enseñanza de la química

6.2.1. El trabajo experimental en la enseñanza de la química

En la ciencia y principalmente en la química, el trabajo experimental es considerado como un esencial componente en el proceso formativo, ya que permite integrar la teoría y la práctica para el entendimiento de fenómenos (Cañal de León et al., 2011).

Pero, desde una perspectiva didáctica, el valor formativo de los ejercicios prácticos dependen del tipo de actividad propuesta, del grado de participación del estudiante en su diseño y ejecución, y de la intencionalidad pedagógica que orienta la experiencia (Caamaño, 2003). En este sentido, Martins et al. (2007) advierten que una gran parte de las prácticas experimentales empleadas en las enseñanzas de las ciencias se limitan al simplemente verificar información teórica y reproducir el conocimiento, lo que restringe el potencial investigativo de los estudiantes.

6.2.2. Tipologías de prácticas experimentales: de la demostración a la investigación

En su obra, Caamaño (2004) propone una clasificación que es ampliamente reconocida de los trabajos prácticos en ciencias, permite distinguir los diferentes niveles de complejidad y profundidad cognitiva:

1. Experiencias o experimentos ilustrativos, cuyo objetivo principal es mostrar un fenómeno o confirmar una explicación teórica, generalmente mediante demostraciones realizadas por el docente.
2. Ejercicios prácticos, en los que los estudiantes siguen un protocolo previamente establecido con el fin de adquirir destrezas técnicas o verificar resultados conocidos.
3. Investigaciones, caracterizadas por la presentación de problemas abiertos, la ausencia de procedimientos cerrados y la necesidad de que los estudiantes tomen decisiones, formulen hipótesis y construyan explicaciones a partir de los datos obtenidos.

Esta clasificación pone de manifiesto que no todas las prácticas experimentales promueven los mismos tipos de aprendizajes ni desarrollan las mismas habilidades (Caamaño, 2004). Mientras que las experiencias ilustrativas y los ejercicios prácticos tienden a favorecer aprendizajes de carácter reproductivo, las prácticas de indagación demandan un involucramiento cognitivo más profundo y una participación activa del estudiante en el proceso de construcción del conocimiento científico (Fernández Marchesi, 2018).

6.2.3. Prácticas experimentales tipo “receta”

Las prácticas experimentales de tipo “receta”, se caracterizan por la presencia de instrucciones detalladas como un paso a paso, variables previamente controladas y resultados esperados conocidos tanto por el docente como por el estudiante (Martins et al. 2007). Aunque este tipo de prácticas facilita la organización del laboratorio y el control de riesgos, diversos autores señalan que su uso sistemático limita el desarrollo de habilidades asociadas a la indagación científica (Hernández et al., 2012 y Castillo, 2021).

En estas prácticas, el estudiante no necesitaría comprender detalladamente el fenómeno que estudia ni justificar las decisiones experimentales que toma, ya que la actividad se mide en función del cumplimiento del procedimiento y la obtención de un resultado esperado, por lo que como consecuencia, se favorece una concepción de la ciencia

como un conjunto de pasos a seguir, más que como un proceso dinámico de construcción de conocimiento basado en la resolución de problemas (Aguilar, 2011).

6.2.4. Características de las prácticas experimentales indagativas

En las prácticas experimentales indagativas está involucrado el desarrollo de habilidades que le exigen al estudiante articular niveles de representación, interpretación de resultados experimentales abiertos o inciertos y argumentarlos a partir de los principios teóricos y sus evidencias empíricas, siempre y cuando estas prácticas están diseñadas con una intencionalidad pedagógica explícita (Fernández Marchesi, 2018).

Este tipo de prácticas se diferencian de las tradicionales en el sentido de que sitúan al estudiante en el rol activo de investigador, enfrentándolo a situaciones-problema abiertas que requiere integrar conocimientos conceptuales, procedimentales y actitudinales. De acuerdo con Caamaño (2004) y Martínez y Márquez (2014), este tipo de prácticas se caracterizan por:

- La formulación de preguntas o problemas abiertos.
- La necesidad de diseñar o adaptar procedimientos experimentales.
- La toma de decisiones respecto a variables, materiales y condiciones experimentales.
- El análisis e interpretación de resultados inciertos o no ideales.
- La argumentación y comunicación de conclusiones fundamentadas en evidencias.

Un apoyo conceptual para esta delimitación lo ofrece el National Research Council (2012), que identifica “Planning and Carrying Out Investigations” como una de las prácticas científicas esenciales de la educación en ciencias. En ese marco de ideas, el planificar y llevar a cabo investigaciones implica decidir qué se va a medir y también qué se va a observar, cuáles variables deben controlarse, qué datos son necesarios, los instrumentos a usar y cuántas observaciones o ensayos se requieren para producir evidencia que sea confiable.

Asimismo, los autores Duschl y Bybee (2014) profundizan esta idea ya que proponen que el planificar y llevar a cabo investigaciones debe entenderse como una conexión de componentes que el estudiante necesita, cómo: decidir qué observar, cómo medir, qué mantener constante, cómo comparar condiciones y cómo revisar el diseño cuando el comportamiento del sistema o la calidad y pertinencia de los datos lo exigen. Por esa razón, la habilidad de indagación se expresa a partir de decisiones metodológicas concretas, y no a partir de formulaciones generales.

6.3. Habilidad de indagación

La indagación se aproxima más a que las personas tomen decisiones sobre qué investigar, cómo hacerlo, qué datos producir y cómo interpretar los resultados, y no se centra en la transmisión de contenidos o en la ejecución de protocolos cerrados (Pedaste et al., 2015).

Así, en educación en ciencias, este enfoque ha sido trabajado como una forma de aproximar las experiencias a prácticas propias de la actividad científica, sin la necesidad de ser un método fijo o lineal (National Research Council [NRC], 2012).

Entonces en sí, la habilidad de indagación se pueden clasificar como un conjunto de destrezas cognitivas y procedimentales que permiten a las personas explorar situaciones concretas, reflexionar, analizar, plantearse preguntas, investigar fenómenos y, a partir de ello,

empezar a construir nuevos conocimientos de manera más estructura, argumentada y crítica (Pedaste et al., 2015).

Asimismo, Rönnebeck, Bernholt y Ropohl (2016) plantean que las experiencias orientadas a la indagación científica integran la formulación de preguntas, el diseño de estrategias experimentales, la observación, el procesamiento de resultados y la validación de inferencias a partir de evidencias empíricas. Por lo tanto, de acuerdo con estos autores, estas capacidades no se manifiestan como componentes aislados, sino que se entrecruzan con el abordaje de problemas.

6.3.1. Habilidad de indagación experimental en la formación del profesorado de química

En el contexto de la educación superior, los docentes no solamente deben tener la capacidad de investigar fenómenos de carácter científico, sino que reflexionen sobre su propia práctica a partir de un criterio pedagógico, además de proponer procesos de investigación, y con ello, indagación en sus estudiantes (Machado y Montes de Oca, 2009). Sin el desarrollo de esta habilidad, se limita la capacidad del futuro docente para poder diseñar propuestas innovadoras, y así superar los modelos tradicionales de enseñanza que se centran únicamente en la transmisión de contenidos (Martínez y Márquez, 2014).

Junto con lo anterior, Fernández Marchesi (2018) menciona que las actividades prácticas de laboratorio adquieren un carácter formativo cuando promueve a los estudiantes a que diseñen procedimientos, interpreten resultados y argumenten sus explicaciones, en lugar de limitarse a seguir instrucciones preestablecidas, es por ello que, la habilidad de indagación experimental implica mucha autonomía, toma de decisiones, construcción y explicaciones argumentadas en evidencias durante el proceso investigativo (Windschitl, Thompson y Braaten, 2008).

En coherencia con el enfoque de aprendizaje basado en indagación adoptado en esta investigación, Pedaste et al. (2015), a partir de una revisión sistemática de la literatura, sintetizan el aprendizaje basado en indagación en cinco fases generales: orientación, conceptualización, investigación, conclusión y discusión, desde esta perspectiva, la indagación no se entiende como una secuencia rígida de pasos, sino como un proceso orientado por preguntas, iterativo y susceptible de reajustes conforme se obtiene evidencia.

6.3.1.1 Aprendizaje basado en indagación

Los autores Minner, Levy y Century (2010), en su publicación hacen una síntesis de 138 estudios, y encontraron una tendencia positiva general a favor de las prácticas de enseñanza basadas en indagación, especialmente cuando estas involucran pensamiento activo y elaboración de conclusiones a partir de datos. Solo que también señalaron que la indagación no puede definirse por la sola presencia de actividades prácticas, sino también por el tipo de participación cognitiva que se le exige al estudiante durante el proceso.

Por otra parte, Furtak et al. (2012) hacen una diferencia entre los rasgos cognitivos propios de la indagación y el grado de guía ofrecido por el docente, y con ello muestran que no toda actividad denominada “indagativa” tiene el mismo potencial formativo. De modo que, el meta análisis que hicieron indica que la efectividad de la indagación depende no solo de abrir problemas, sino de estructurar apoyos que permitan a los estudiantes sostener la construcción de significado y la toma de decisiones.

Así, desde esta perspectiva, la indagación no se opone a la guía docente, sino que por el contrario, puede requerirla para que el estudiante participe de manera productiva en prácticas científicas.

6.3.1.2. Indagación guiada y trabajo experimental en química

Para este trabajo de investigación se seleccionó una modalidad de indagación guiada porque atiende factores tanto teóricos como metodológicos, debido a que Furtak et al. (2012) muestran que las experiencias de indagación con apoyo docente tienden a producir mejores resultados que aquellas en las que la apertura del problema no está acompañada por una estructura pedagógica clara.

Esto viene a ser relevante en el contexto de la formación inicial de profesores, pues el objetivo no es tener a los estudiantes con una incertidumbre total de lo que se hace, sino a favorecer decisiones metodológicas dentro de un entorno experimental acotado y que también formativamente sea productivo.

Ahora, llevando esto al laboratorio de química, autores como Hofstein y Lunetta (2004) advierten que los beneficios de escenarios como el laboratorio dependen del tipo de actividad que se propone; por ejemplo, cuando el laboratorio se reduce a seguir instrucciones para obtener un resultado previsto, su potencial formativo disminuye. Desde esta perspectiva, la indagación guiada permite desplazar el laboratorio desde una lógica de reproducción técnica hacia una lógica de construcción de evidencia y toma de decisiones. En el contexto de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, Gómez y Rodríguez (2024) desarrollaron una propuesta de indagación guiada articulada con trabajo práctico de laboratorio y un contexto experimental asociado al extracto de semillas de uva, orientada al fortalecimiento de habilidades investigativas en estudiantes de educación superior.

6.3.1.3. Rol del docente y del estudiante en la indagación guiada

En el aprendizaje basado en indagación, el rol del docente no consiste en transmitir un conocimiento o procedimiento que deba ser replicado de forma mecánica, sino en diseñar condiciones didácticas para que el estudiante pueda formular preguntas, sostener comparaciones experimentales y revisar sus decisiones metodológicas a partir de la evidencia, es cómo asumir un rol de “mediador” (Fernández Marchesi, 2018). Esto es importante en la indagación guiada, porque la calidad de la guía influye en la profundidad de la participación cognitiva de los estudiantes y en la posibilidad de que la actividad experimental trascienda el nivel operativo (Furtak et al., 2012).

Por su parte, el estudiante asume un rol activo en la construcción del proceso experimental: debe interpretar la situación planteada, formular preguntas, seleccionar o justificar condiciones de comparación, ejecutar el procedimiento, registrar información y decidir si es necesario introducir ajustes metodológicos, por lo que esta participación no equivale a una autonomía absoluta, sino a una autonomía progresiva apoyada por la estructura didáctica (Strat et al., 2023).

En consecuencia, el docente delimita y orienta, mientras que el estudiante decide y actúa dentro de ese marco, así, este equilibrio es importante en una propuesta de laboratorio, donde la falta total de guía puede dispersar el proceso y la sobredirección puede anular el carácter indagativo de la experiencia (Hofstein y Lunetta, 2004).

6.3.1.4. Componentes de la habilidad de indagación experimental

La indagación guiada es un concepto diferente a la habilidad de indagación experimental, ya que la indagación guiada corresponde a la modalidad didáctica mediante la cual se estructura la intervención, y se caracteriza por una orientación docente que delimita el contexto y proporciona apoyos sin sustituir la toma de decisiones del estudiante. Por su parte, la habilidad de indagación experimental constituye el objeto de desarrollo y evaluación de esta investigación, y se manifiesta en las capacidades que el estudiante participante pone en juego al formular preguntas experimentales, planificar procedimientos, controlar variables, ejecutar la práctica, registrar evidencias, reconocer dificultades y realizar ajustes metodológicos justificados.

Por lo cual, no se consideran conceptos equivalentes ni uno se asume como componente del otro, sino que la indagación guiada funciona como el marco didáctico dentro del cual se busca favorecer el desarrollo de la habilidad de indagación experimental.

En consecuencia, en esta investigación se asume una sola habilidad de indagación experimental, entendida como una capacidad compleja e integrada que se manifiesta mediante diferentes componentes; por tanto, los indicadores no se consideran habilidades independientes, sino componentes observables de la misma habilidad.

Los autores Herranen y Aksela (2019) destacan la importancia de la capacidad para formular preguntas propias como punto de partida de la investigación científica escolar, mientras que Orosz et al. (2023) muestran que la indagación guiada favorece el desarrollo progresivo de habilidades como la interpretación de datos, la argumentación científica y la resolución de problemas.

Con base en la literatura anterior, la habilidad de indagación experimental adoptada en esta investigación se expresa en un conjunto de componentes estrechamente relacionados: El primero corresponde a la formulación de preguntas experimentales, es decir, preguntas susceptibles de explorarse mediante comparación de condiciones y obtención de datos. El segundo es la planificación del procedimiento, que incluye la selección de materiales, la organización de etapas y la anticipación de criterios de comparación. El tercero es la identificación y control de variables, indispensable para que la comparación produzca evidencia interpretable. El cuarto es la ejecución sistemática de la práctica, entendida no como seguimiento mecánico de un protocolo, sino como realización consistente del procedimiento diseñado. El quinto componente es el registro de datos y observaciones, pues la indagación exige dejar trazabilidad de lo actuado y de lo observado. El sexto, es el reconocimiento de dificultades metodológicas que se identifican en el proceso. Finalmente, se considera la capacidad de realizar ajustes metodológicos justificados, esto es, modificar alguna condición o decisión del procedimiento cuando la evidencia del proceso lo exige, sin perder coherencia con la pregunta experimental.

Esta formulación resulta especialmente pertinente en el laboratorio de química. Hofstein y Lunetta (2004) sostienen que el laboratorio constituye un entorno singular para el aprendizaje de las ciencias porque permite investigar fenómenos, trabajar cooperativamente y articular conceptos con observaciones y datos. En trabajos sobre laboratorios de indagación en química, Hofstein y Lunetta (2004) también mostraron que los entornos de laboratorio más abiertos e integrados favorecen una participación más activa del estudiante en la toma de decisiones experimentales. En consecuencia, la habilidad de indagación experimental no debe

entenderse como un añadido externo al laboratorio, sino como una forma más exigente y formativamente más rica de habitarlo.

En el marco de este trabajo de investigación, el desarrollo de la habilidad de indagación experimental se promueve mediante una intervención organizada bajo una modalidad de indagación guiada, en la que el docente (tesistas) ofrece apoyos suficientes para sostener la formulación de preguntas, la planificación del procedimiento y la revisión de decisiones, sin anular la participación activa del estudiante (Orosz et al., 2023). De esta manera, la indagación guiada constituye la estrategia didáctica adoptada para generar oportunidades en las que los componentes de la habilidad de indagación experimental puedan movilizarse y hacerse observables durante el trabajo de laboratorio.

6.4. Fases del ciclo de indagación

Los autores Pedaste et al. (2015), que a partir de una revisión sistemática de la literatura, proponen un ciclo de indagación compuesto por cinco fases generales: 1) orientación, 2) conceptualización, 3) investigación, 4) conclusión y 5) discusión.

Así, la fase de orientación busca situar al estudiante ante un fenómeno o problema; la conceptualización incluye formulación de preguntas e hipótesis; la investigación comprende la exploración, experimentación e interpretación de datos; la conclusión se refiere a la construcción de respuestas o explicaciones; y la discusión integra comunicación, reflexión y evaluación en el proceso.

Esta síntesis es tomada para la presente investigación porque permite reconocer que la indagación no ocurre como una serie de pasos cerrados, sino como un proceso dinámico en el que algunas fases pueden reactivarse según lo exija la evidencia. En una práctica experimental, por ejemplo, la formulación de la pregunta, la experimentación y los ajustes metodológicos pueden interrelacionarse de manera continua, en lugar de suceder como momentos totalmente separados. A partir de este sistema se estructuran cada una de las intervenciones. Esta característica hace que el ciclo de Pedaste et al. (2015) sea más adecuado que un esquema lineal de “método científico”.

En coherencia con el foco del presente trabajo de investigación, las intervenciones que se proponen buscan concentrarse en las fases donde la habilidad de indagación experimental se vuelve más observable, como lo es la formulación de preguntas experimentales, planificación de comparaciones, ejecución del procedimiento, registro de evidencias y realización de ajustes metodológicos justificados. De este modo, el ciclo de indagación se adapta a los tiempos reales de implementación sin perder la relación teórica (Pedaste et al., 2015).

6.5. Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES)

6.5.1. Delimitación conceptual de los NADES

De acuerdo con Choi et al. (2011) y Dai et al. (2013), los solventes eutécticos profundos naturales (Natural Deep Eutectic Solvents, NADES) son definidos como las mezclas de compuestos naturales como azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y derivados de colina, los cuales, al combinarse en diferentes proporciones forman sistemas líquidos estables con un punto de fusión significativamente menor que los de sus componentes individuales, gracias a la formación de redes de puentes de hidrógeno.

Con ello, Dai et al. (2013), también mencionan que esta característica de la disminución del punto de fusión ocurre por las fuertes interacciones intermoleculares entre el compuesto donador y el compuesto aceptor de hidrógeno, lo cual genera un medio que disuelve compuestos que normalmente son pocos solubles en agua.

De acuerdo con lo anterior, Hikmawanti et al. (2021) y Ferreira y Sarraguça (2024) mencionan que la capacidad de extracción que tienen los NADES se debe a ciertos factores, entre ellos, la formación de los puentes de hidrógeno, la polaridad ajustable que tienen según su composición, y la capacidad que tienen para estabilizar compuestos bioactivos durante la extracción.

Asimismo, en una publicación muy reciente de Grbić et al. (2026), señalan que la eficiencia de una extracción con los NADES depende de factores como su composición, proporción molar de sus componentes y del contenido de agua incorporado al sistema, éste último debido a que el NADES por su naturaleza ya es muy viscoso, lo cual dificulta procesos de extracción.

6.5.2. NADES y Química Verde

Desde una perspectiva de química sostenible y sustentable, los NADES han sido estudiados como solventes verdes como una opción alternativa a los disolventes tradicionales, gracias a su baja volatilidad, baja toxicidad, menor inflamabilidad, su biodegradabilidad y capacidad de solubilizar una gran gama de compuestos (Chevé-Kools et al., 2025).

En la química verde se proponen diseños de procesos y productos que buscan reducir o eliminar el uso y obtención de sustancias peligrosas y prevenir la contaminación y riesgos ambientales, y así promover prácticas más sostenibles para una mejora en la vista ambiental y social, de acuerdo con los principios de Anastas y Warner (1998), por lo cual, en este caso, los NADES son reconocidos como una alternativa que se alinea con dichos principios, especialmente en procesos de extracción de compuestos con disolventes auxiliares más seguros, uso de materias primas renovables, diseño de productos químicos más seguros, entre otros (Chevé-Kools et al., 2025).

A su vez, los autores Bragagnolo et al. (2024) mencionan que con los NADES se desarrollan procesos de extracción más sostenibles, en el que pueden incorporarse directamente al producto final sin necesidad de eliminar el solvente. Asimismo, los NADES también pueden hacer una extracción eficiente de polifenoles de manera sostenible y con un menor impacto ambiental que como sería implementando otro tipo de solventes (García-Roldán et al., 2023).

6.5.3. Puntos críticos a evaluar con el uso de NADES

Los NADES, al ser una tendencia relativamente nueva, pueden considerarse como seguros, pero hay autores que advierten que no todos los NADES son totalmente inofensivos ni verdes, ya que están involucrados factores como la toxicidad, biodegradabilidad, composición y concentración, por lo cual deben evaluarse individualmente (Bragagnolo et al., 2024).

Según Chevé-Kools et al. (2025) y Ferreira y Sarraguça (2024), los aspectos a considerar con estos solventes serían:

- Evaluar la toxicidad de cada formulación antes de aplicaciones farmacéuticas y/o alimentarias

- Analizar la biodegradabilidad real del sistema
- Verificar la compatibilidad química con el compuesto de interés
- Controlar la estabilidad química del NADES durante el almacenamiento

Cabe añadir que, Grbic et al. (2026) indican que una de las limitaciones más frecuentes y destacadas es su alta viscosidad, ya que dificulta la transferencia de masa y reduce la eficiencia de extracción si no se ajusta el contenido de agua que se añade.

Finalmente, es importante destacar que para obtener buenos resultados es necesario controlar variables como la temperatura, tiempo de extracción, proporción del NADES respecto a la muestra, y el porcentaje de agua añadida, debido a que estas variables influyen en el rendimiento del proceso (Koraqi et al., 2024).

6.6. Matriz y compuesto de interés

6.6.1. Avena sativa como cereal y matriz de interés

La avena (*Avena sativa* L.) es una especie de grano de cereal ampliamente reconocido por su valor nutricional y por constituir una fuente importante de compuestos bioactivos de interés alimentario y nutracéutico (Ruja et al., 2024). Su composición incluye fibra dietaria, especialmente de β -glucanos, lípidos insaturados, compuestos fenólicos, fitoesteres, carotenoides y vitamina E, los cuales son componentes que han sido asociados con propiedades funcionales y beneficios para la salud humana (Gangopadhyay et al., 2015). Debido a su composición, la avena ha sido considerada una materia prima relevante para el desarrollo de alimentos funcionales y para el aprovechamiento de subproductos agroindustriales como el salvado y las cascarillas (Nikolić et al., 2024).

Con ello se puede evidenciar que la avena constituye una matriz vegetal un poco compleja porque sus compuestos bioactivos no se distribuyen uniformemente en las diferentes estructuras del grano (Martín-Diana et al., 2021), esto hace que las fracciones externas de la avena, como el salvado, presentan mayores concentraciones de compuestos fenólicos que otras partes del cereal, lo que las convierte en materiales de interés para procesos de extracción y valorización de metabolitos bioactivos (Nikolić et al., 2024).

6.6.1.1. Tratamiento hidrotermal en la avena

Este tratamiento se plantea en este trabajo de investigación como una etapa de la preparación de la muestra con el fin de favorecer la accesibilidad al ácido ferúlico de la matriz, ya que la literatura sobre biomasa y salvados de los cereales menciona que los tratamientos hidrotermales pueden contribuir a la desestructuración parcial de la pared celular, a la solubilización de hemicelulosas y al debilitamiento de enlaces inter-poliméricos asociados a compuestos fenólicos, lo que mejora la disponibilidad de estos compuestos para etapas posteriores de extracción (Liu et al., 2022).

Por ello, su inclusión en el procedimiento resulta metodológicamente razonable como una estrategia de facilitación del acceso al compuesto y no como una “liberación total” o una “ruptura completa” de la matriz (Papadaki et al., 2024).

6.6.2. Analito de interés: Ácido ferúlico

Entre los compuestos fenólicos presentes en la avena, el ácido ferúlico es uno de los más abundantes en este grano, que se encuentra especialmente en partes como el salvado y las

cascarillas, ya que es allí donde se concentra una buena parte de los fenoles totales (Martín-Diana et al., 2021). La relevancia del ácido ferúlico radica en sus propiedades biológicas, particularmente su actividad antioxidante y antiinflamatoria (Liu et al., 2025), las cuales han motivado su estudio para aplicaciones alimentarias, farmacéuticas y cosmeceúticas (Zduńska et al., 2018).

Sin embargo, la mayor parte del ácido ferúlico presente en cereales no se encuentra en forma libre, sino que está unido a componentes estructurales de la pared celular, particularmente a los arabinoxilanos, hemicelulosas y lignina, y esto hace que su disponibilidad sea un poco más limitada y además dificulta su recuperación directa (Pyrzynska, 2024).

Siendo así, la avena, así como algunos otros cereales, realmente es una matriz compleja para hacer la extracción de este compuesto, ya que la eficiencia de recuperación depende no solo del solvente o de la técnica empleada, sino también de la capacidad del proceso para romper o debilitar las interacciones que retienen el compuesto en la estructura de la matriz, lo cual involucra otros procesos de pretratamiento de la muestra, como el procesamiento térmico, dejándola en las condiciones adecuadas para procesos de extracción (Călinoiu y Vodnar, 2019).

En este sentido, de acuerdo con Liu et al. (2022), Călinoiu y Vodnar (2019) y Al-Shwafy et al. (2023), los pretratamientos físicos, térmicos, hidrotérmicos o enzimáticos favorecen la liberación de compuestos fenólicos ligados a la pared celular y con ello mejorar su recuperación, por lo cual es necesario seleccionar adecuadamente tanto la preparación de la muestra como la metodología extractiva empleada.

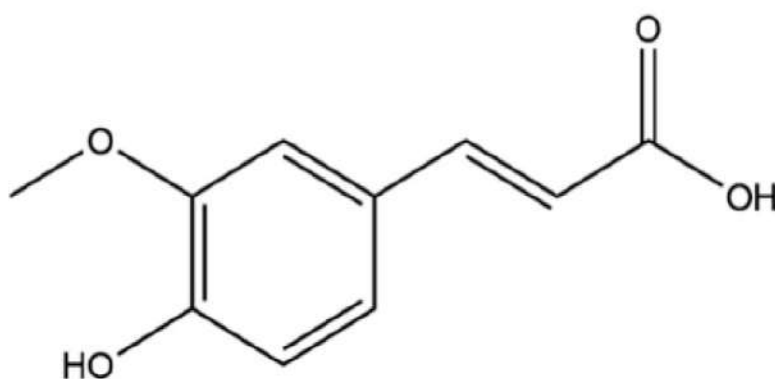


Figura 1. Estructura química del ácido ferúlico.
Fuente: Liu et al. (2025)

6.6.2.1. Actividad biológica del ácido ferúlico

La actividad antioxidante del ácido ferúlico es una de las propiedades biológicas más relevantes de este compuesto, debido a que se relaciona con la neutralización de especies reactivas mediante los grupos fenólicos de su estructura y con su función en mecanismos que favorecen la respuesta antioxidante celular. De acuerdo con Pyrzynska (2024), su acción puede manifestarse tanto mediante la captura directa de especies reactivas como por el incremento de la actividad de sistemas antioxidantes. Complementando esta idea, los autores

Zduńska et al. (2018) señalan que el ácido ferúlico puede actuar como captador de radicales libres, inhibir enzimas involucradas en su generación y favorecer la actividad de enzimas antioxidantes, asimismo estas características explican el interés por este compuesto en matrices alimentarias y en el desarrollo de aplicaciones para disminuir procesos asociados con el estrés oxidativo.

Junto con su capacidad antioxidante, el ácido ferúlico presenta una actividad antiinflamatoria que ha sido relacionada con la modulación de diferentes vías de señalización celular asociadas con la respuesta inflamatoria. Autores como Liu et al. (2025) describen su participación en la regulación de vías como NF- κ B, MAPK, NLRP3, JAK/STAT y Nrf2, mediante mecanismos que pueden disminuir la producción de mediadores proinflamatorios y, también, fortalecer respuestas celulares frente al estrés oxidativo. Asimismo, este compuesto cuenta con otras actividades biológicas, entre ellas efectos antimicrobianos, antivirales y hepatoprotectores, además de su estudio en procesos relacionados con enfermedades metabólicas y proliferación celular (Pyrzynska, 2024). En este sentido, el interés por recuperar ácido ferúlico de subproductos cerealistas como el salvado de avena no depende únicamente de su abundancia en la matriz, sino también del conjunto de propiedades biológicas que sustentan su potencial aprovechamiento en los ámbitos alimentario, farmacéutico y cosmeceútico.

6.6.3. Métodos actuales de extracción de ácido ferúlico y su impacto ambiental

De acuerdo con la literatura (Pyrzynska, 2024 y Liu et al., 2022), la recuperación de ácido ferúlico desde matrices de cereales representa un desafío en el sentido de que gran parte de este compuesto se encuentra unido a componentes estructurales de la pared celular, especialmente arabinoxilanos y lignina.

Por esta razón, la hidrólisis alcalina ha sido uno de los métodos más utilizados para su liberación, pero, este procedimiento requiere de ciertas condiciones de operación, además también influiría en la degradación de los compuestos fenólicos y generaría corrientes residuales que reducen su sostenibilidad ambiental (Al-Shwafy et al., 2023). De manera que, como alternativa, se han desarrollado estrategias basadas en tratamientos hidrotermales y enzimáticos capaces de incrementar la accesibilidad y recuperación de compuestos fenólicos ligados sin la necesidad de recurrir a condiciones químicas agresivas (Papadaki et al., 2024).

Entonces, desde una posición sostenible, la selección del método de extracción debe considerar no sólo la eficiencia de recuperación, sino también el impacto ambiental asociado al proceso, pues los solventes orgánicos convencionales presentan limitaciones relacionadas con volatilidad, inflamabilidad y toxicidad, mientras que los NADES constituyen una alternativa prometedora, aunque su carácter de ser "verde" depende de factores como la composición, biodegradabilidad, reutilización y destino final del solvente (Bragagnolo et al., 2024).

En este contexto, los pre-tratamientos hidrotermales y tecnologías como la extracción asistida por batelada y ultrasonido han sido propuestos como enfoques más sostenibles y viables, de acuerdo con los recursos disponibles, para la recuperación de compuestos fenólicos, ya que pueden mejorar la transferencia de masa y reducir el consumo de solventes y energía en comparación con métodos convencionales (Papadaki et al., 2024 y Koraqi et al., 2024).

6.6.4. Técnicas de extracción

6.6.4.1. Extracción con técnica de batelada

La técnica de batelada es un modo de extracción y ofrece una condición simple, manejable y fácilmente controlable en un laboratorio, y aunque se reconoce que no es el recurso más eficiente disponible, se emplea como una condición base donde una cantidad fija de muestra se pone en contacto con un volumen determinado de solvente permitiendo discutir tiempo y contacto por medio de la agitación sólido-líquido, con ello se favorece la transferencia de los compuestos de interés desde la matriz sólida hacia la fase líquida, y ya finalmente se separan las fases por medio de filtración o centrifugación (Dmitrienko et al., 2024).

6.6.4.2. Extracción asistida por ultrasonido

La extracción asistida por ultrasonido ha mostrado utilidad para intensificar la extracción de compuestos bioactivos mediante la mejora de la transferencia de masa y mayor accesibilidad de la matriz, incluso cuando se implementan los solventes eutécticos profundos como medio (Ferreira y Sarraguça, 2024).

Por su parte, también es reconocida como una tecnología de extracción sostenible con mejor potencial para reducir tiempos y favorecer rendimientos, y en matrices cerealistas se ha empleado para incrementar la recuperación de compuestos fenólicos y otros componentes funcionales (Kasote et al., 2021), ya que como tal el ultrasonido aumenta el área de superficie de contacto entre las fases sólida y líquida al permitir que el solvente penetre más profundamente en la matriz de alimentos (Koraqi et al., 2024).

7. MARCO METODOLÓGICO

7.1. Enfoque y diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló desde un enfoque mixto (Johnson et al., 2019) implementado por medio de un diseño mixto convergente (Creswell & Plano Clark, 2018), en la cual los datos cuantitativos y cualitativos se recogieron en el marco de la implementación, se analizaron de manera independiente y luego se integró el análisis de los datos para comprender ampliamente el fenómeno de estudio, identificando convergencias, complementariedades o si también si hay discrepancias.

De esta manera, se buscó analizar el desarrollo de la habilidad de indagación experimental a partir de los cambios observados en el desempeño de los participantes en los indicadores definidos, así como de la manera en que esta habilidad se manifestó durante el proceso de la implementación. Asimismo, este trabajo de investigación se desarrolló con un solo grupo previamente constituido, realizando una medición inicial (pretest), posteriormente la implementación de las intervenciones y, finalmente, una medición final (postest), con el propósito de identificar cambios en los niveles de desempeño que, integrados con las evidencias cualitativas del proceso, permitieron analizar el desarrollo de la habilidad de indagación experimental (Knapp, 2016).

Es pertinente precisar, en términos de diseño metodológico que la investigación realizada fue un diseño mixto convergente, en la que la dimensión cuantitativa siguió una lógica pre-experimental de un solo grupo con medición pretest y postest (Campbell y Stanley, 1963), sin grupo control y sin asignación aleatoria de participantes y analizada

mediante la rúbrica de análisis; la dimensión cualitativa correspondió al análisis de contenido de las producciones escritas de los participantes (pretest, posttest, formato de indagación y cartelera), ambas dimensiones se recogieron en paralelo durante la implementación y se integraron en el análisis mediante la triangulación, para identificar convergencias, complementariedades y posibles tensiones en el desarrollo de la habilidad.

Un ejemplo de esto, a nivel cuantitativo, es cuando los resultados evidencian una mejora estadística significativa y generalizada, mientras que a nivel cualitativo se muestra un desarrollo desigual con los componentes de la habilidad (como la formulación de preguntas comparativas o la argumentación de ajustes) que permanecen en niveles intermedios pese al avance global.

7.2. Contexto y participantes del estudio

La investigación se desarrolló en el espacio académico “Énfasis didáctico I: Alimentos bajo la lupa” de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, abordado en el periodo académico 2026-1. En este espacio se integra el análisis de matrices alimentarias con el trabajo experimental, lo que ofrece un espacio apropiado para implementar las intervenciones de indagación que se proponen en este trabajo de investigación, asimismo, se tiene coherencia con la finalidad del curso y sus áreas temáticas, especialmente la de cereales.

En cuanto a los participantes, fueron estudiantes de la Licenciatura en Química que estuvieron matriculados en el espacio académico en el que se implementaron las intervenciones en el periodo académico de 2026-1, a ellos se les fue entregado un consentimiento informado de su participación en esta investigación (anexo B). Esta selección correspondió a un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que el grupo ya estaba constituido y accesible para la investigación.

7.3. Variables de la investigación

Para este trabajo de investigación, la variable independiente corresponde a: La intervención didáctica de indagación guiada, contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con NADES. Mientras que la variable dependiente corresponde al: Desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación.

7.4. Indicadores de evaluación de la habilidad de indagación experimental

La unidad de análisis de esta investigación corresponde a la habilidad de indagación experimental, operacionalizada mediante siete indicadores derivados de las prácticas científicas del Framework for K-12 Science Education (NRC, 2012) y de los rasgos de la indagación experimental adaptados de Chinn y Malhotra (2002). Cada indicador se valora en cuatro niveles de desempeño mediante la rúbrica analítica y a la vez orienta la codificación cualitativa de las producciones escritas. Los siete indicadores son:

1. Formula preguntas experimentales pertinentes y abordables.
2. Planifica procedimientos comparativos acordes con la pregunta planteada.
3. Identifica variables relevantes y establece condiciones de control.
4. Ejecuta la práctica de manera sistemática y consistente.
5. Registra datos y observaciones de forma organizada.
6. Reconoce dificultades metodológicas durante el proceso.
7. Realiza ajustes metodológicos justificados en función de la evidencia obtenida.

Como se mencionó, estos siete indicadores se basan en referentes teóricos sobre prácticas científicas y epistémicas de indagación, específicamente con las Science and Engineering Practices del Framework for K-12 Science Education (National Research Council, 2012) y con los rasgos epistemológicos que distinguen la indagación auténtica de la indagación simple propuesta por Chinn y Malhora (2002). En la tabla 1 se visualiza esta correspondencia:

Tabla 1. Correspondencia epistemológica de los indicadores

Indicador de la rúbrica	Práctica científica (NRC, 2012)	Rasgo epistémico Chinn y Malhora (2002)
Formula preguntas experimentales pertinentes y abordables	Asking questions and defining problems	Generación de la pregunta de investigación
Planifica procedimientos comparativos acorde con la pregunta	Asking questions and defining problems	Diseño del estudio
Identifica variables relevantes y establece condiciones de control	Planning and carrying out investigations	Control de variables en el diseño
Ejecuta la práctica de manera sistemática y consistente	Planning and carrying out investigations	Proceso cognitivo de ejecución sistemática
Registra datos y observaciones de forma organizada	Analyzing and interpreting data	Transformación y registro de datos
Reconoce dificultades metodológicas durante el proceso	Constructing explanations and designing solutions	Proceso epistemológico de manejo de datos anómalos
Realiza ajustes metodológicos en función de la evidencia	Engaging in argument from evidence	Justificación epistemológica de decisiones

Estos indicadores constituyen la unidad de análisis de la investigación y corresponde más adelante a lo que son las categorías: hay categorías clasificadas como CAT 1 Y CAT 2, allí se agrupan para facilitar la lectura de patrones, también hay una CAT 3 la cual se mantiene como una dimensión contextual y no como unidad de la habilidad (explícitas en 7.8); con ello se garantiza la coherencia entre el objeto de estudio y las unidades con que se analiza.

Finalmente, aunque el marco original K-12 fue estructurado para la educación básica y media, tanto el National Research Council (2012) como la National Science Teaching Association (2024) señalan que este estándar conceptual debe orientar directamente a los profesionales responsables de la formación de profesores de ciencias en las universidades. Esto se debe a que la enseñanza científica bajo prácticas contemporáneas requiere un aprendizaje transformador donde el docente en formación actúe como un hacedor activo de ciencia y no como un receptor pasivo de información, permitiéndole desarrollar su conocimiento disciplinar y pedagógico, de manera que es indispensable que primero vivan la experiencia del marco K-12, lo comprendan y lo experimenten a través de su propia formación universitaria, para luego implementarlo en su actuación profesional.

7.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para una recolección de datos óptima, se realizó una combinación metodológica de pretest (anexo G), posttest (anexo H), formato de indagación para el diseño de laboratorio (anexo I) con sus respectivos resultados y rúbrica analítica (anexo J), siguiendo el enfoque de diseño mixto convergente adoptado para esta investigación.

La rúbrica analítica empleada fue de carácter unidireccional, centrada únicamente en la valoración de la habilidad de indagación experimental, sin embargo su carácter analítico nos permitió desagregar la habilidad en indicadores observables, esto con el objetivo de poder hacer explícitos los desempeños que conforman y nos permitan valorar con mejor precisión el avance de los participantes.

Esta rúbrica se construyó a partir de siete indicadores: formulación de preguntas experimentales, planificación de procedimiento comparativos, identificación de variables relevantes y condiciones de control, ejecución sistemática de la práctica, registro y organizado de datos y observaciones, reconocimiento de las dificultades metodológicas y realización de ajustes metodológicos justificados, tal como se evidencia en el anexo J.

De esta manera, las diferentes valoraciones de los indicadores no se interpretan como mediciones aisladas de un producto final, sino, se entienden como una estrategia de evaluación por niveles de desempeño, por cada indicador, además de la valoración de las diferentes evidencias a lo largo del proceso, estos indicadores se organizan de manera progresiva según el grado de autonomía, pertinencia y coherencia argumentativa frente a la evidencia del proceso, de esta manera no solo valorando si una acción estaba presente o no sino teniendo en cuenta la calidad con la que se desarrollaba.

De esta manera, la rúbrica se consideró en la articulación con dos de los instrumentos (pretest y posttest), para el pretest y posttest se les aplicó un valor cuantitativo de 1 a 4, según los niveles de desempeño, mientras que para el otro instrumento (el formato de indagación de laboratorio) se revisó de manera descriptiva y cualitativa.

Estos instrumentos se diseñaron para que fuesen desarrollados de forma escrita para recolectar de manera efectiva la toma de decisiones en contexto experimental. Todos se construyeron a partir de una situación problema coherente con el eje de la intervención: el aprovechamiento de salvado de avena mediante una estrategia de extracción que, además de ser viable en condiciones de laboratorio universitario, permitiera discutir criterios de sostenibilidad y selección y diseño de solventes.

En este marco de ideas, los participantes debían analizar una situación problema de una empresa en cuanto a la recuperación de ácido ferúlico a partir del salvado de avena y proponer una estrategia experimental comparativa empleando NADES como medio para su extracción.

De modo que, en lo que respecta al pretest, las preguntas se orientaron a valorar principalmente la formulación de preguntas experimentales, la planificación de comparaciones, la identificación de variables de control, la anticipación del registro de datos y la previsión de posibles ajustes metodológicos. En el posttest se conservó esa misma estructura, pero con un aumento en la exigencia analítica por medio de la incorporación de resultados más detallados, observaciones del proceso o dificultades metodológicas.

En cuanto al formato de indagación para el diseño del laboratorio, éste fue empleado como un instrumento de registro, el cual los participantes iban llenando durante el desarrollo de las intervenciones 1 y 2. De manera que su función principal fue que de manera estructurada, documentaran las decisiones metodológicas adoptadas por cada grupo, las condiciones de trabajo definidas, las observaciones más destacadas en cuanto a la preparación del NADES y la extracción de ácido ferúlico con los NADES, las dificultades identificadas y los ajustes introducidos en el procedimiento.

En este sentido, este documento del formato no fue como un informe de laboratorio, sino como una evidencia escrita del proceso de indagación en curso, orientada a conservar la trazabilidad de las acciones y decisiones tomadas durante la experiencia experimental.

7.6. Producciones grupales de los estudiantes

Además del análisis realizado al pretest y el posttest, también se analizaron los productos que cada grupo realizó como el formato de indagación para el diseño del laboratorio y las carteleras que cada grupo socializó presentando sus resultados en la última intervención con sus respectivas evidencias. Todo esto se analizó mediante una lectura cualitativa relacionada con los indicadores definidos en este trabajo de investigación.

7.7. Técnicas de análisis de datos

Para el análisis de los datos, se realizó mediante estadística descriptiva de los resultados en el pretest y el posttest, por medio de las valoraciones de la rúbrica y los niveles de desempeño que en ella se indican. Para ello, se organizaron los puntajes globales por indicador, con el propósito de identificar tendencias en el desempeño de los participantes antes y después de la intervención.

Para contrastar los resultados del pretest y del posttest se empleó el software Jamovi 2.7.33. Los puntajes totales obtenidos por cada participante fueron ingresados en dos columnas correspondientes al pretest y al posttest y se seleccionó el análisis para muestras pareadas. Como comprobación del supuesto de normalidad, se activó la prueba de Shapiro-Wilk, aplicada a las diferencias entre las puntuaciones de ambas mediciones. Para su interpretación se consideró un nivel de significancia de 0,05. Posteriormente, se empleó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para comparar los resultados del pretest y el posttest.

Como prueba inferencial principal se seleccionó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, debido a que las mediciones corresponden a los mismos participantes en dos momentos, los puntajes se derivan de niveles ordinales de desempeño establecidos mediante la rúbrica y la muestra es reducida ($n=12$). La prueba t de Student para muestras relacionadas se reportó únicamente como análisis complementario, mientras que la interpretación principal de las diferencias entre pretest y posttest se realizó a partir de Wilcoxon.

De acuerdo con ello, se formularon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula H_0 : No existen diferencias estadísticamente significativas entre las puntuaciones del pretest y del posttest de los estudiantes participantes tras la aplicación de las intervenciones.
- Hipótesis alternativa H_1 : Existen diferencias estadísticamente significativas entre las puntuaciones del pretest y del posttest de los estudiantes participantes,

mostrando un incremento en el rendimiento tras la aplicación de las intervenciones.

El análisis cualitativo de los datos se realizó mediante análisis temático, orientado a identificar patrones de sentido en las evidencias recogidas a través del formato de indagación para el diseño del laboratorio y también por medio de los productos/evidencias de los participantes recogidas en las intervenciones (anexo K). La codificación inicial se organizó en coherencia con los indicadores de la habilidad de indagación experimental definidos en el marco teórico. Con ello, se permitió interpretar cómo se manifestó la habilidad de indagación y cómo los participantes articularon decisiones metodológicas, evidenciaron y reflexionaron sobre los procesos (Braun y Clarke, 2006, 2023).

Para sistematizar el análisis cualitativo, la codificación se organizó en un sistema jerárquico de nodos coherente con el diseño mixto convergente. Se definieron tres categorías (CAT) analíticas: evolución del razonamiento experimental y control de variables (CAT-1), obstáculos metodológicos y autorregulación (CAT-2), estas dos agrupan y operacionalizan los siete indicadores y (CAT-3) apropiación científica, química verde y transposición didáctica, no constituye una unidad de análisis de la habilidad de indagación, se asume como una dimensión contextual emergente que evidencia cómo los participantes conectan la experiencia con la sostenibilidad (ODS 12) y con su futura práctica docente. Por lo anterior, se reportó de manera descriptiva y no se puntuó contra los indicadores, preservando la coherencia entre el objetivo de (la habilidad de indagación) y las unidades con que se analiza.

De esta manera, las categorías no sustituyen a los indicadores de la rúbrica, sino que agrupan sus manifestaciones para facilitar la lectura de patrones. La codificación se aplicó a las fuentes cualitativas del estudio (pretest, formato de indagación, posttest y carteleros de socialización) y sus resultados se triangularon con la evidencia cuantitativa de la rúbrica y con las señales analíticas de HPLC, conforme a la lógica convergente adoptada (Figura 3).

CAT-1 Evolución del razonamiento experimental y control de variables Indicadores 1-4	
NOD-1.1 Formulación de preguntas e hipótesis	- SUB-1.1a Preguntas descriptivas / incompletas - SUB-1.1b Preguntas comparativas / correlacionales
NOD-1.2 Control y discriminación de variables	- SUB-1.2a Variable independiente – NADES / sistema - SUB-1.2b Variable dependiente – señal HPLC - SUB-1.2c Justificación de parámetros de control
NOD-1.3 Planificación del procedimiento	
CAT-2 Obstáculos metodológicos, desviaciones y autorregulación Indicadores 6-7	
NOD-2.1 Anomalías físico-reológicas	- SUB-2.1a Viscosidad reológica del NADES - SUB-2.1b Emulsión / espuma por ultrasonido - SUB-2.1c Fluctuación térmica / agitación
NOD-2.2 Reajustes justificados	- SUB-2.2a Variación de tiempos / temperatura - SUB-2.2b Ajuste: extracción L-L con acetato de etilo
CAT-3 Apropriación científica, química verde y transposición didáctica Transversal / Ind. 5	
NOD-3.1 Explicación intermolecular	- SUB-3.1a Puentes de hidrógeno y solvatación - SUB-3.1b Densidad de grupos -OH: láctico vs cítrico
NOD-3.2 Química verde y ODS 12	SUB-3.2a Sustitución de solventes tóxicos
NOD-3.3 Transposición didáctica	SUB-3.3a Proyectos escolares en secundaria

Figura 2. Sistema de códigos (nodos y subnodos) del análisis cualitativo
Nota. Imagen generada por IA mediante ChatGPT plus 5.2. de OpenAI, 2026.

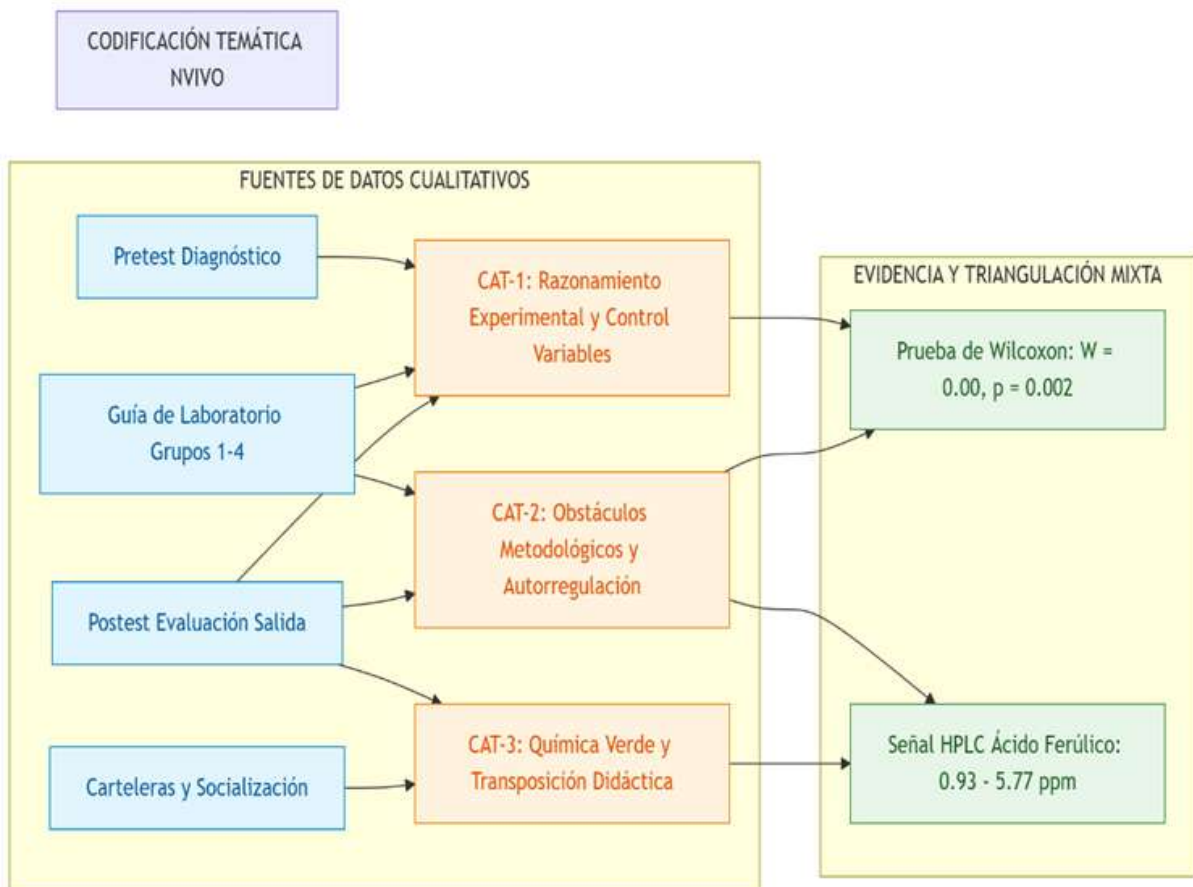


Figura 3. Diseño de análisis: fuentes cualitativas, categorías y triangulación mixta
Nota . Imagen generada por el software NVivo, 2026.

La integración final de resultados se realizó conforme a la lógica del diseño mixto convergente adoptado en este trabajo de investigación. De modo que, los hallazgos cuantitativos se contrastaron con las evidencias cualitativas del proceso para identificar convergencias, complementariedades y tensiones interpretativas en torno al desarrollo de la habilidad de indagación experimental. Esta integración permitió construir una comprensión más completa del efecto de la intervención, al relacionar los cambios observados en los desempeños con las decisiones, dificultades y ajustes registrados durante la experiencia (Creswell & Plano Clark, 2018).

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Intervención

En este trabajo de investigación, las intervenciones se caracterizaron porque los estudiantes indagaron por medio de preguntas orientadoras que los tesisistas realizaron, integraron sus conocimientos y experiencias con las situaciones problema que se plantean, y en cuanto a la parte experimental, ellos no recibieron un protocolo totalmente cerrado, pero tampoco se enfrentaron una tarea abierta sin límites, sino que trabajaron dentro de una matriz de posibilidades. De esta manera, se dio la posibilidad de que ellos formularan sus preguntas, justificaran sus variables, planificaran el procedimiento, registraran evidencia y revisaran sus decisiones metodológicas.

Este equilibrio entre guía y autonomía está respaldado por la literatura sobre indagación guiada (Furtak et al., 2012 y Orosz et al., 2023) que muestra que la guía docente es importante cuando los estudiantes son relativamente nuevos en este tipo de actividades de indagación o cuando la complejidad del contexto es alta. De acuerdo con ello, las intervenciones se organizaron alrededor de una situación problema contextualizada .

Esta situación problema orientó el trabajo investigativo a partir de un contexto relevante para los participantes y estuvo incluida dentro de un paquete de material complementario (anexo C) que se le entregó a cada grupo de trabajo diseñado para apoyar el desarrollo de la intervención. En el paquete también se tenía un conjunto de infografías informativas sobre los cereales y avena (*Avena sativa*), métodos de extracción, el ácido ferúlico, y sobre los Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES).

Estos recursos tuvieron como propósito proporcionar información de referencia que facilitara la comprensión del contexto de estudio y que sirviera de apoyo durante las diferentes actividades de las intervenciones. Es importante mencionar que las infografías fueron elaboradas por los tesisistas con el apoyo de la inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI) para la organización y el diseño del contenido.

Finalmente, y en coherencia con las fases del ciclo de indagación propuesto por Pedaste et al. (2015), este trabajo de investigación ajustó esas fases a la duración y características de cada una de las cuatro intervenciones. Por lo cual, las fases teóricas de orientación, conceptualización, investigación, conclusión y discusión, no se asumieron como momentos rígidos ni completamente separados, sino como referentes que estructuran los momentos de trabajo propuestos a lo largo de cada intervención, como se puede evidenciar en el anexo D.

Tomando esto en cuenta, durante las intervenciones 0 y 1, se abordaron los contenidos necesarios para construir el contexto de trabajo: propiedades y composición general de los cereales, importancia de los cereales en la industria alimentaria, características de *Avena sativa* como cereal de interés, compuestos fenólicos presentes en matrices cerealistas, relevancia del ácido ferúlico, principios generales de extracción en matrices vegetales, panorama de métodos de extracción convencionales e introducción a los NADES como alternativa de extracción, y también se estableció una relación con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (ODS 12) respecto al consumo y producción sostenible.

En estas dos sesiones también se presentó el problema experimental propuesto para el curso y se orientó a los participantes en la formulación de preguntas investigables, en la construcción de hipótesis y en la elaboración preliminar del diseño experimental, de modo que la contextualización disciplinar se articula explícitamente con el desarrollo inicial de la habilidad de indagación.

En la intervención 2 se llevó a cabo la práctica experimental de extracción de ácido ferúlico con NADES, a partir de propuestas formuladas por los estudiantes dentro de los parámetros previamente establecidos, lo que permite poner en juego la planificación del procedimiento, el control de variables, el registro sistemático de observaciones y la toma de decisiones durante la ejecución. En este momento también se incorporó la lectura por HPLC en columna C-18 como referente analítico para la interpretación de los resultados, esta parte estuvo a cargo de los tesisistas con ayuda de la analista química del departamento de química.

Ya en la intervención 3, se realizó la socialización de resultados, la entrega del formato de indagación para el diseño del laboratorio por parte de los estudiantes y la aplicación de la prueba de salida, con el fin de valorar los cambios en el desempeño de los participantes y recuperar de manera reflexiva la relación entre contexto, decisiones metodológicas y desarrollo de la habilidad de indagación experimental.

Finalmente, para evitar que la lectura cromatográfica por HPLC fuera percibida como un procedimiento ajeno al proceso de indagación, la medición instrumental se utilizó como un recurso de andamiaje cognitivo. Debido a que la inyección manual de las muestras en la columna C-18 y el acondicionamiento del equipo requieren conocimientos técnicos y tiempo de ejecución, estos procedimientos fueron realizados por los investigadores. Mientras tanto, ese tiempo se aprovechó para promover la discusión y el análisis de las hipótesis planteadas por los participantes.

La indagación se centró en la interpretación de los cromatogramas, relacionando el tiempo de retención (1.233-1.250 min), el área bajo la curva y la concentración de ácido ferúlico (0.93-5.77 ppm) con las características observadas en los extractos (color, turbidez y viscosidad) y con las hipótesis iniciales.



Figura 4. Desarrollo de actividades de indagación en los grupos de trabajo.



Figura 5. Evidencias del proceso de preparación del NADES (ácido cítrico: glicerol) y extractos de ácido ferúlico con NADES.



Figura 6. Evidencia de la toma de decisiones en la práctica experimental .



Figura 7. Actividad de socialización de resultados por medio de cartelera.

8.1.1. Diseño experimental del sistema NADES–salvado de avena y estrategia analítica para la evaluación semicuantitativa del ácido ferúlico

El componente químico-experimental de la intervención se estructuró como un sistema comparativo de carácter exploratorio, orientado a establecer condiciones operativamente viables para la extracción de compuestos fenólicos asociados al ácido ferúlico desde salvado de *Avena sativa*, mediante el empleo de formulaciones basadas en glicerol y ácidos orgánicos.

Este diseño no tuvo como propósito optimizar el proceso extractivo ni validar un método analítico de cuantificación, sino consolidar un sistema experimental reproducible dentro de las condiciones disponibles en el laboratorio y, simultáneamente, suficientemente abierto para favorecer la formulación de preguntas, la selección de variables, la comparación de condiciones y la toma de decisiones metodológicas por parte de los profesores de química en formación.

La definición de las condiciones experimentales se apoyó en una prueba piloto previa, mediante la cual se examinó la viabilidad de dos formulaciones de solvente: 1) ácido cítrico:glicerol y 2) ácido láctico:glicerol, y dos sistemas de asistencia: calentamiento con agitación y ultrasonido. A partir de esta prueba se identificaron restricciones relacionadas con la viscosidad de los extractos, la separación de fases y su compatibilidad con el procedimiento de análisis por HPLC. En consecuencia, los resultados instrumentales se interpretan como señales cromatográficas relativas y estimaciones semicuantitativas, y no como una cuantificación absoluta o una validación analítica del rendimiento de extracción.

Con ello, en este estudio se distinguen dos niveles del diseño experimental. El primero corresponde al pilotaje desarrollado por los investigadores, mediante el cual se verificaron las condiciones técnicas y operativas del sistema NADES–avena. El segundo

corresponde al diseño comparativo guiado desarrollado durante la intervención, en el que los participantes seleccionaron condiciones de trabajo dentro de una matriz de posibilidades previamente delimitada. Esta diferenciación permite evitar que el pilotaje químico sea confundido con el diseño didáctico elaborado por los participantes y clarifica la función de cada componente dentro de la investigación.

8.1.1.1. Preparación de las formulaciones NADES

Para el desarrollo del sistema experimental se prepararon dos formulaciones líquidas constituidas por ácido láctico y glicerol, y ácido cítrico y glicerol, respectivamente. Debido al estado físico de los componentes y a la forma en que fueron medidos durante el procedimiento, las relaciones de preparación no se expresaron bajo una misma base. La formulación ácido láctico:glicerol se preparó empleando una relación volumétrica aproximada 1:1 (v/v), mientras que la formulación ácido cítrico:glicerol se preparó mediante una relación operacional mixta 1:1 (m/v), correspondiente a un gramo de ácido cítrico por cada mililitro de glicerol. En ambas formulaciones se adicionó agua en una proporción de 20% (v/v) con el propósito de disminuir la viscosidad y favorecer la manipulación del sistema y su contacto con la matriz vegetal.

Cada formulación se preparó mediante calentamiento a 60 °C y agitación constante hasta obtener una fase líquida transparente y visualmente homogénea. La selección del ácido láctico, ácido cítrico y glicerol como componentes de las formulaciones se sustentó en antecedentes que describen la formación de sistemas eutécticos profundos a partir de estas combinaciones. Rocha et al. (2023) estudiaron mezclas de glicerol y ácido láctico en distintas relaciones y evidenciaron la formación de sistemas eutécticos, así como la incorporación de agua sobre propiedades como la viscosidad y la polaridad.

De manera similar, Md Yusoff, Gan y Shafie (2023) caracterizaron sistemas constituidos por ácido cítrico monohidratado y glicerol en diferentes relaciones molares, identificando interacciones intermoleculares asociadas con la formación del sistema eutéctico. Estos antecedentes, junto con los trabajos fundacionales de Choi et al. (2011) y Dai et al. (2013), respaldaron la selección de los componentes empleados. No obstante, las relaciones utilizadas en el presente trabajo se establecieron como proporciones operacionales —1:1 (v/v) para ácido láctico:glicerol y 1:1 (g/mL) para ácido cítrico:glicerol— de acuerdo con el estado físico de los reactivos y las condiciones disponibles de preparación, y su viabilidad fue posteriormente verificada durante la prueba piloto.

La incorporación de agua se realizó como una estrategia para disminuir la viscosidad de las formulaciones y favorecer la transferencia de masa durante el contacto con la matriz vegetal, dado que la hidratación de sistemas eutécticos puede modificar significativamente sus propiedades fisicoquímicas y reducir su viscosidad (Rocha et al., 2023). Para las dos formulaciones, el contenido de agua se mantuvo constante en 20 % (v/v) como una condición operacional definida para esta investigación y verificada durante el pilotaje.

En la presente investigación, la obtención de una fase transparente y homogénea se adoptó como criterio operacional para finalizar la preparación de las formulaciones. Sin embargo, este criterio visual no se asumió como una confirmación fisicoquímica independiente del comportamiento eutéctico, debido a que no se realizaron análisis térmicos o espectroscópicos específicos, como calorimetría diferencial de barrido, espectroscopia infrarroja o resonancia magnética nuclear. En consecuencia, las mezclas se denominaron

formulaciones NADES con base en su composición, comportamiento operacional y procedimiento de preparación.

Tabla 2. Condiciones operacionales de preparación de las formulaciones NADES

Formulación	Ácido láctico:glicerol	Ácido cítrico:glicerol
Estado de los componentes	Líquido:líquido	Sólido:líquido
Relación operacional	1:1 (v/v)	1:1 (g/mL)
Agua adicionada	20 % (v/v)	20 % (v/v)
Temperatura	60 °C	60 °C
Criterio operacional	Formación de una fase transparente y visualmente homogénea	Disolución aparente del sólido y formación de una fase transparente y visualmente homogénea

Matriz y extracción.

La matriz fue Salvado de avena pretratado (secado, molido, tamizado y desengrasado con etanol), 3,0 g por ensayo —ajustada desde 5,0 g tras el piloto—. La extracción se realizó empleando una relación sólido:líquido de 1:10 (g/mL), correspondiente a un gramo de salvado de avena por cada 10 mL de formulación NADES. La extracción contrastó dos sistemas de asistencia: calentamiento y agitación (60 °C, 30 min) frente a ultrasonido (30 min); en ambos casos, centrifugación a 5000 rpm por 15 min.

Acondicionamiento y determinación por HPLC.

Como los extractos no atravesaban el filtro de 0.45 μm , se incorporó una extracción líquido-líquido con acetato de etilo (35 mL de extracto + 30 mL de acetato de etilo), acidificada con HCl. La fase orgánica se analizó por HPLC con columna C-18 a 320 nm (Lu et al., 2007); la curva de referencia (0–25 ppm, producto comercial) presentó tiempo de retención de 1.233–1.250 min y ecuación 1–10 ppm Área = 145801x – 14628 ($R^2 = 0.9991$). Las áreas se interpretan como señales analíticas relativas (semicuantitativas, 0.93–5.77 ppm), no como concentraciones absolutas.

Vínculo con las variables.

La variable independiente es el sistema experimental elegido (tipo de NADES y/o sistema de asistencia) y la variable dependiente es la señal de ácido ferúlico por HPLC; masa, relación matriz:NADES, temperatura, tiempo y proporción son condiciones de control. (Referir Tablas 2–8 y Anexos E, F y L.)

8.2. Prueba piloto del sistema experimental

Antes de la implementación de las intervenciones, se desarrolló una prueba piloto del sistema experimental en los laboratorios de química de la Universidad Pedagógica Nacional, con el propósito de verificar la viabilidad operativa de la extracción de ácido ferúlico a partir de una matriz comercial de salvado de avena empleando Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES). Esta fase tuvo una función metodológica dentro del estudio, ya que permitió reconocer el comportamiento inicial del sistema de extracción, identificar restricciones técnicas asociadas a la preparación de las muestras y ajustar el procedimiento antes de incorporarlo en la intervención didáctica con profesores de química en formación.

Esta prueba no se realizó con el objetivo de optimizar el procedimiento ni como una validación del método de extracción, sino de comprobar el sistema experimental y su funcionamiento, y así poder evidenciar la obtención de extractos y de igual manera poder establecer las condiciones operativas iniciales para una extracción de ácido ferúlico empleando NADES como contexto de indagación guiada. De esta manera esta prueba permitió definir las condiciones de trabajo teniendo en cuenta las disponibilidades del laboratorio y las condiciones metodológicas.

Para esta parte del trabajo se empleó salvado de avena comercial como matriz de trabajo. Se evaluaron dos formulaciones NADES, las cuales fueron ácido cítrico:glicerol y ácido láctico:glicerol, ambas preparadas en proporción 1:1. En todos los casos se adicionó 20% de agua al sistema, con el fin de disminuir la viscosidad del NADES y favorecer su manipulación durante la extracción. Las mezclas se prepararon a 60 °C, bajo agitación constante, hasta obtener una fase homogénea.

La prueba piloto se organizó en cuatro ensayos, derivados de la combinación entre las dos formulaciones NADES y dos sistemas de asistencia: calentamiento y ultrasonido. De este modo, los ensayos correspondieron a: ácido cítrico:glicerol asistido por calentamiento, ácido láctico:glicerol asistido por calentamiento, ácido cítrico:glicerol asistido por ultrasonido y ácido láctico:glicerol asistido por ultrasonido.

Tabla 3. Diseño general de los ensayos desarrollados en la prueba piloto

Ensayo piloto	Formulación NADES	Sistema de asistencia	Propósito del ensayo
1	Ácido cítrico:glicerol (1:1)	Calentamiento y agitación	Verificar la obtención de extracto bajo asistencia térmica
2	Ácido láctico:glicerol (1:1)	Calentamiento y agitación	Verificar la obtención de extracto bajo asistencia térmica
3	Ácido cítrico:glicerol (1:1)	Ultrasonido	Verificar la obtención de extracto bajo asistencia por ultrasonido
4	Ácido láctico:glicerol (1:1)	Ultrasonido	Verificar la obtención de extracto bajo asistencia por ultrasonido

Para cada ensayo se emplearon 5g del salvado de avena comercial y una relación matriz: NADES de 1:10, correspondiente a 50g de NADES por muestra. Esta relación se mantuvo constante en los cuatro ensayos piloto con el propósito de comparar el

comportamiento operativo de las formulaciones y de los sistemas de asistencia bajo condiciones equivalentes.

En los ensayos asistidos por calentamiento y agitación, la mezcla de avena y NADES se mantuvo a 60 °C durante 30 minutos. En los ensayos asistidos por ultrasonido, la extracción también se realizó durante 30 minutos. Posteriormente, en todos los casos, las muestras fueron sometidas a centrifugación a 5000 rpm durante 15 minutos, con el fin de separar el extracto líquido de la fase sólida.

Después de la centrifugación se observó la formación de un extracto líquido de color ámbar claro, poco espeso y sin turbidez notable, separado de manera evidente de la fase sólida. Esta observación permitió evidenciar la obtención de extractos bajo las condiciones evaluadas. No obstante, la observación visual de una fase líquida separada no garantizaba por sí misma la compatibilidad de los extractos con la preparación requerida para el análisis por HPLC, debido a las características propias de los sistemas NADES.

Tabla 4. Condiciones generales de extracción empleadas en la prueba piloto

Ensa yo	Formulación NADES	Relación matriz : NADES	Masa de NADES	Sistema de asistencia	Condiciones de extracción y separación	
1	Ácido cítrico: glicerol + 20% de agua	1:10	50 g	Calentamiento y agitación	60 °C durante 30 min	Centrifugación a 5000 rpm durante 15 min
2	Ácido láctico: glicerol + 20% de agua	1:10	50 g	Calentamiento y agitación	60 °C durante 30 min	Centrifugación a 5000 rpm durante 15 min
3	Ácido cítrico: glicerol + 20% de agua	1:10	50 g	Ultrasonido	30 min	Centrifugación a 5000 rpm durante 15 min
4	Ácido láctico: glicerol + 20% de agua	1:10	50 g	Ultrasonido	30 min	Centrifugación a 5000 rpm durante 15 min

8.3. Resultados de la prueba piloto

8.3.1. Curva de calibración para ácido ferúlico

Con el objetivo de tener una referencia para las lecturas cromatográficas de los extractos, se preparó una curva de referencia para el ácido ferúlico a partir de un producto comercial de origen cosmético, más exactamente un ácido ferúlico al 25%, distribuido por Esthetic Store, donde la ficha comercial reporta un 25% de ácido ferúlico como compuesto principal, empleando como fase fija una columna C-18 y como fase móvil una mezcla de ácido acético al 1% (20%) y acetonitrilo (80%).

Es importante resaltar que este producto se empleó como una referencia instrumental y no como un estándar analítico, por tanto, la curva no se considera como validación analítica del método, sino como un apoyo para reconocer la zona cromatográfica asociada al analito de interés, y así poder establecer una correcta relación exploratoria entre la concentración y el área.

Los puntos analizados corresponden a 0, 1, 5, 10 y 25 ppm, para la curva se registró la lectura a 320 nm (Lu et al., 2007), presentando un tiempo de retención entre 1.233 y 1.250 min, con un valor promedio cercano a 1.242 min, esto se debe a que el equipo empleado emplea inyección manual. En el anexo E se presentan los cromatogramas de los puntos de la curva de calibración.

Tabla 5. Lecturas de la curva de calibración para ácido ferúlico

Concentración de referencia	Tiempo de retención del pico principal	Área del pico principal	Altura del pico
0 ppm	1.217 min	626	0
1 ppm	1.250 min	128987	10583
5 ppm	1.242 min	687799	55401
10 ppm	1.242 min	1456883	118071
25 ppm	1.233 min	4633808	366259

Se observó que la relación entre la concentración y el área del pico principal mostró una tendencia lineal. Considerando los puntos entre 0 y 25 ppm, a partir de esta se obtuvo una ecuación de la forma: $\text{Área} = 186441x - 147192$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9916$.

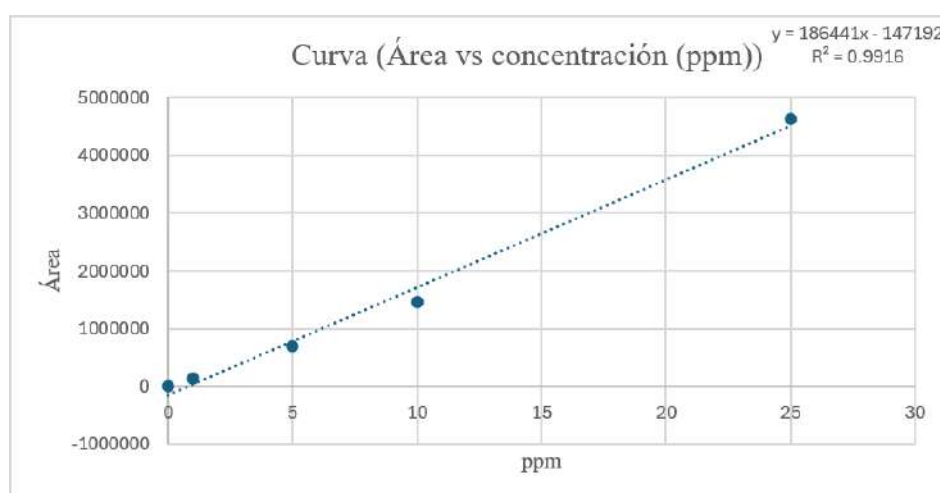


Figura 8. Curva de calibración de ácido ferúlico entre 0 y 25 ppm

Sin embargo, considerando los puntos entre 1 y 10 ppm, la linealidad fue mayor, dando la ecuación $\text{Área} = 145801x - 14628$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9991$.

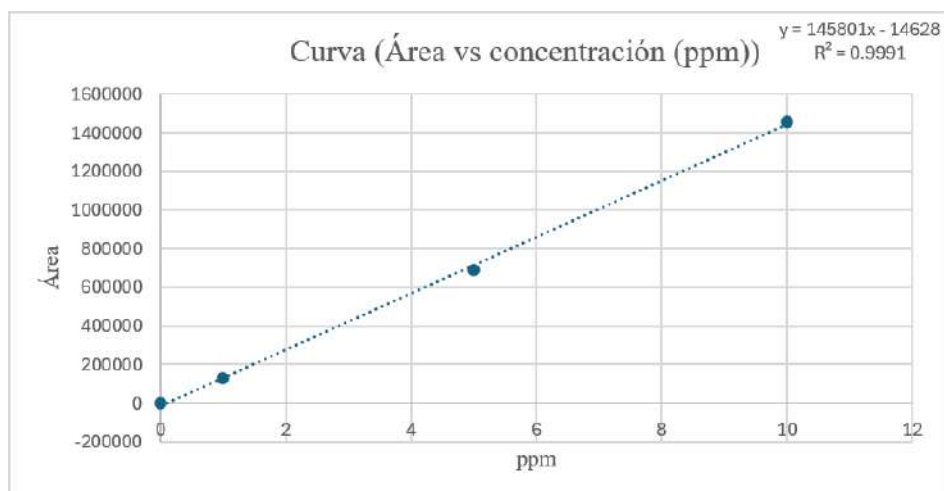


Figura 9. Curva de calibración de ácido ferúlico entre 0 y 10 ppm

Teniendo en cuenta lo anterior, esta curva se interpreta como una referencia semicuantitativa, y no como una cuantificación absoluta del ácido ferúlico extraído, ya que la fuente utilizada para realizar la curva corresponde a un producto comercial y no a un estándar analítico, y también porque el objetivo de la prueba era exploratorio y operativo orientado a la viabilidad.

8.3.2. Preparación para lectura en HPLC

Una vez se obtuvieron los extractos iniciales con NADES, se realizó su preparación directa para lectura por HPLC. Para ello, las muestras debían pasar previamente por un filtro de 0.45 μm , como requisito de preparación antes del análisis cromatográfico. Sin embargo, durante este proceso se evidenció que los extractos no atravesaban adecuadamente el filtro debido a sus características de densidad y viscosidad, lo que generó una dificultad de filtración e impidió continuar con la lectura directa de los extractos.

Esta dificultad se relacionó con una restricción metodológica derivada de la compatibilidad física de los extractos con el procedimiento de preparación de muestras requerido para el análisis por el equipo de HPLC. En este sentido, se incorporó una etapa adicional de extracción con acetato de etilo, orientada a obtener una fracción orgánica con características más adecuadas para su posterior análisis cromatográfico.

El ajuste para la lectura se realizó de la siguiente manera, se tomaron 35 mL del extracto obtenido con los NADES y se le agregaron 30 mL de acetato de etilo. Adicionalmente la mezcla fue acidificada con HCl para favorecer la extracción, se realizó agitación constante y luego se dejó en reposo hasta observar la separación de fases claras. Posteriormente se recuperó directamente la fase orgánica correspondiente al acetato de etilo junto con el analito extraído para realizar una concentración hasta un volumen final de 10 mL y así finalmente poder realizar la lectura por medio del equipo HPLC. En el ensayo correspondiente a ácido cítrico:glicerol asistida por ultrasonido, se concentró a un volumen final de 5 mL, esta diferencia se tuvo en cuenta en la interpretación comparativa.

El ajuste de extracción debido a la imposibilidad de filtrar directamente los extractos no fue asumida como una falla experimental, más bien como una restricción técnica identificada, permitiendo así ajustar el procedimiento acorde a los instrumentos y materiales disponibles en el laboratorio.

8.3.3. Lectura cromatográfica de los extractos obtenidos en la prueba piloto

Una vez realizada la extracción adicional con acetato de etilo y concentrada la fase orgánica recuperada, se efectuó la lectura cromatográfica de los cuatro extractos correspondientes a las condiciones evaluadas en la prueba piloto. También se realizó la lectura del acetato de etilo como blanco, con el fin de reconocer posibles señales asociadas al solvente empleado en la segunda extracción.

El blanco de acetato de etilo presentó una señal principal a un tiempo de retención de 1.342 min, con un área de 135315, y una señal menor a 2.858 min, con un área de 1071. Esta lectura permitió reconocer que el solvente empleado en la etapa de extracción líquido-líquido podría generar señales cromatográficas propias, por lo cual su comportamiento debía considerarse al momento de interpretar los cromatogramas de las muestras.

En los extractos obtenidos a partir de las cuatro condiciones piloto se observaron picos principales en tiempos de retención próximos a la zona identificada en la curva de referencia para ácido ferúlico. La muestra correspondiente a ácido cítrico:glicerol asistida por calentamiento presentó un pico a 1.183 min, con un área de 754189; la muestra de ácido láctico:glicerol asistida por calentamiento presentó un pico a 1.267 min, con un área de 540065; la muestra de ácido cítrico:glicerol asistida por ultrasonido presentó un pico a 1.233 min, con un área de 1329728; y la muestra de ácido láctico:glicerol asistida por ultrasonido presentó un pico a 1.250 min, con un área de 630419, como se evidencia en el anexo F.

Tabla 6. Lecturas HPLC de los extractos obtenidos en la prueba piloto

Condición evaluada	Tiempo de retención del pico principal	Área cruda	Altura	Volumen final antes de HPLC	Observación metodológica
Blanco: acetato de etilo	1.342 min	135315	9652	No aplica	Señal asociada al solvente blanco
Ácido cítrico:glicerol + calentamiento	1.183 min	754189	44687	10 mL	Lectura de fase orgánica concentrada
Ácido láctico:glicerol + calentamiento	1.267 min	540065	26152	10 mL	Lectura de fase orgánica concentrada
Ácido cítrico:glicerol + ultrasonido	1.233 min	1329728	66329	5 mL	Muestra concentrada a menor volumen final
Ácido láctico:glicerol + ultrasonido	1.250 min	630419	31523	10 mL	Lectura de fase orgánica concentrada

Debido a que la muestra correspondiente a ácido cítrico:glicerol asistida por ultrasonido fue concentrada hasta 5 mL, mientras que las demás muestras fueron concentradas hasta 10 mL, su área cruda no fue directamente comparable con las áreas de las otras condiciones. Para realizar una comparación preliminar entre condiciones, se consideró una normalización aproximada del área en función del volumen final de concentración. Así, el área registrada para la muestra ácido cítrico:glicerol asistida por ultrasonido se dividió entre dos, obteniendo un área comparable aproximada de 664864.

Tabla 7. Comparación preliminar de áreas considerando el volumen final de concentración

Condición evaluada	Área cruda	Volumen final antes de HPLC	Criterio de normalización	Área comparable aproximada
Ácido cítrico:glicerol + calentamiento	754189	10 mL	No requiere ajuste	754189
Ácido láctico:glicerol + calentamiento	54065	10 mL	No requiere ajuste	540065
Ácido cítrico:glicerol + ultrasonido	1329728	5 mL	Área cruda ÷ 2	664864
Ácido láctico:glicerol + ultrasonido	630419	10 mL	No requiere ajuste	630419

Bajo esta corrección, las señales cromatográficas observadas sugieren que las condiciones evaluadas presentaron respuestas relativamente cercanas. Al realizar una comparación se evidencia que el ácido cítrico:glicerol mostraron una aparente extracción mayor frente a las muestras de ácido láctico: glicerol, sin embargo, esta comparación no debe asumirse como definitiva frente al rendimiento de extracción, debido al carácter exploratorio y las variables mencionada previamente. Esta estimación se presenta únicamente como apoyo interpretativo del pilotaje y no como cuantificación absoluta del ácido ferúlico en la matriz.

Tabla 8. Estimación semicuantitativa preliminar a partir del área comparable

Condición evaluada	Área comparable aproximada	Concentración estimada aproximada
Ácido cítrico:glicerol + calentamiento	754189	5.31 ppm
Ácido láctico:glicerol + calentamiento	540065	3.86 ppm
Ácido cítrico:glicerol + ultrasonido	664864	4.70 ppm
Ácido láctico:glicerol + ultrasonido	630419	4.47 ppm

Las concentraciones estimadas se calcularon a partir de la ecuación preliminar $\text{Área} = 145801x - 14628$, correspondiente al intervalo de 1 a 10 ppm. Se resalta que estos valores deben interpretarse de manera exploratoria y semicuantitativa.

Los resultados instrumentales obtenidos se interpretan como una evidencia de la viabilidad del sistema experimental empleado y apoya la justificación de la incorporación del laboratorio en la intervención didáctica.

8.3.4. Decisiones metodológicas derivadas de la prueba piloto

A partir de la prueba se realizaron los ajustes relevantes para un diseño final del laboratorio, en primer lugar como se evidenció en las lecturas, se confirmaron los empleos de los NADES ácido cítrico:glicerol y ácido láctico:glicerol en la intervención didáctica en la extracción de

ácido ferúlico a partir de salvado de avena, en un segundo lugar, se verificó que los sistemas asistidos calentamiento y ultrasonido, condiciones disponibles en el laboratorio, y por último lugar, se identificó que la viscosidad, de los extractos con los NADES no permite una filtración óptima para la lectura en el equipo de HPLC, lo cual nos llevó a incorporar un paso adicional de extracción empleando acetato de etilo para facilidad instrumental.

Tabla 9. Decisiones metodológicas derivadas de la prueba piloto

Situación observada durante el pilotaje	Decisión metodológica adoptada	Justificación para la intervención
Se obtuvieron extractos líquidos de color ámbar claro después de la centrifugación	Mantener el sistema NADES-avena como contexto experimental viable	Permitió evidenciar que el procedimiento podía desarrollarse en condiciones reales de laboratorio
Las formulaciones ácido cítrico:glicerol y ácido láctico:glicerol permitieron obtener extractos	Conservar ambas formulaciones como posibilidades del sistema experimental	Permitió ofrecer a los participantes variables comparables dentro de la intervención
Calentamiento y ultrasonido permitieron desarrollar la extracción	Mantener ambos sistemas de asistencia como rutas de comparación	Permitió estructurar preguntas experimentales asociadas al efecto del sistema de asistencia
Los extractos NADES no pasaron adecuadamente por filtro de 0.45 μm	Incorporar extracción adicional con acetato de etilo para lectura instrumental	Permitió adecuar las muestras para su análisis por HPLC
Una muestra fue concentrada a 5 mL y las demás a 10 mL	Interpretar las áreas considerando el volumen final de concentración	Evitó comparar directamente áreas crudas no equivalentes
La curva se preparó con producto comercial de ácido ferúlico al 25%	Interpretar los resultados como referencia instrumental preliminar	Evitó presentar los datos como validación analítica completa

A partir de estas decisiones, la prueba piloto permitió consolidar una matriz de posibilidades para la intervención didáctica, sin convertir el laboratorio en una práctica totalmente cerrada, con esto se determinaron las condiciones seguras y viables para la práctica experimental pero manteniendo los espacios para que los participantes pudieran formular preguntas experimentales, seleccionaran variables de comparación, planificaran procedimientos, registraran evidencias y propusieran ajustes metodológicos.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos no se deben considerar como una optimización del método de extracción, por lo que desde el punto de vista didáctico, los resultados aportan un auténtico problema experimental, aportando la estructura central de la práctica de laboratorio enfocada en el aprendizaje por indagación guiada, anticipando restricciones reales frente a la extracción de ácido ferúlico con NADES desde la *Avena sativa* como matriz.

Respecto al ajuste en la masa de la matriz vegetal (5.0g a 3.0g), en la prueba piloto se empleó 5.0g de salvado comercial con 50g de NADES (relación 1:10), sin embargo, al someter el sistema al tratamiento hidrotermal suave (90°C, 20 min) y luego centrifugación, la alta viscosidad del solvente con el hinchamiento de la biomasa vegetal generó un volumen de

mezcla que saturaba la capacidad de los tubos de Falcon de 50 mL, dificultando la separación de fase y reduciendo la recuperación del sobrenadante. Por lo anterior, se decidió usar 3.0g de salvado pretratado, permitiendo optimizar la transferencia de masa y la cavitación por ultrasonido/calentamiento dentro de los tiempos de la práctica, además de garantizar una separación eficiente en la centrifuga y finalmente, alinearse con los principios de la química verde.

8.4. Validación de los instrumentos

En lo que respecta a la validación de los instrumentos empleados en el desarrollo de este trabajo de grado, se elaboró y remitió un documento de validación que fue revisado y aprobado por la Dra. Leidy Gabriela Ariza, el cual se encuentra en el anexo A. Con ello, y con el fin de garantizar una evaluación sistemática e integral de la propuesta, se estructuró el proceso de validación en seis categorías: Categoría 1. Justificación general de la intervención; Categoría 2. Validación de los instrumentos de evaluación (pretest y postest); Categoría 3. Validación de la secuencia didáctica (intervenciones 0 a 3); Categoría 4. Validación del formato de laboratorio; Categoría 5. Validación de la rúbrica analítica; y Categoría 6. Validación de la implementación y la logística.

8.5. Pretest y postest

Para evaluar el impacto de la intervención, se presentan los resultados de los doce (12) estudiantes participantes correspondientes al Énfasis Didáctico I: Alimentos bajo la lupa, de manera que en la tabla 10 y en la tabla 11 se presentan los resultados de las pruebas pretest y postest, respectivamente, con sus respectivos valores de nivel de desempeño (de 1 a 4) obtenido en cada indicador, así como también las diferencias entre ellos (pretest-postest) en la tabla 12.

Tabla 10. Valores de los resultados de los indicadores del pretest

Estudiante	Ind. 1	Ind. 2	Ind. 3	Ind. 4	Ind. 5	Ind. 6	Ind. 7	Total pretest
1	2	1	2	1	2	2	1	11
2	2	2	1	1	2	1	1	10
3	2	1	2	1	1	1	1	9
4	3	2	2	3	3	1	2	16
5	2	2	1	2	1	2	2	12
6	2	1	2	2	2	1	2	12
7	3	2	2	1	1	2	1	12
8	1	2	1	1	2	2	1	10
9	1	2	2	1	2	1	1	10
10	2	2	1	2	2	2	2	13
11	3	2	2	2	2	2	2	15
12	1	1	2	1	2	2	1	10

Nota: Ind. corresponde a Indicador

Tabla 11. Valores de los resultados de los indicadores del postest

Estudiante	Ind. 1	Ind. 2	Ind. 3	Ind. 4	Ind. 5	Ind. 6	Ind. 7	Total postest
1	3	4	3	3	3	2	3	21
2	3	3	4	2	3	4	2	21
3	2	2	2	2	2	1	3	14
4	3	4	4	3	4	3	3	24
5	2	2	2	2	1	2	2	13
6	2	2	4	2	3	2	2	17
7	2	2	2	2	2	2	2	14
8	1	2	2	2	2	3	2	14
9	2	2	1	2	1	2	1	11
10	3	4	3	3	4	3	2	22
11	2	3	4	3	2	3	2	19
12	2	2	3	2	3	3	2	17

Nota: Ind. corresponde a Indicador

Tabla 12. Consolidado de resultados y su diferencia

Estudiante	Pretest	Postest	Diferencia
1	11	21	+10
2	10	21	+11
3	9	14	+5
4	16	24	+8
5	12	13	+1
6	12	17	+5
7	12	14	+2
8	10	14	+4
9	10	11	+1
10	13	22	+9
11	15	19	+4
12	10	17	+7

A partir de los datos registrados en las tablas 10 y 11, correspondientes a las pruebas pretest y postest, respectivamente, se evidencia que hay un aumento en el nivel de desempeño en el postest de cada uno de los participantes, alcanzando en algunos casos hasta el nivel 4, cosa que no se evidencia en el pretest, el cual tiene más tendencia de tener niveles entre el 1 y 2, y en algunas ocasiones el nivel 3.

Con esto, en la prueba de salida (tabla 11), se evidencia mayor tendencia en que los estudiantes están en los niveles 3 y 4, y en algunas ocasiones en los niveles 1 y 2. Esto representa una mejora razonable de los niveles de desempeño en cuanto a cada uno de los siete indicadores establecidos para la habilidad de indagación experimental.

En la tabla 12 se presentan las diferencias de los resultados del pretest respecto al posttest con su respectivo signo de Wilcoxon que puede ser positivo (+) o negativo (-), en este caso el signo fue positivo (+) en todos los participantes, lo cual indica que el valor de la segunda medición es mayor que en la primera.

8.6. Prueba de rangos con signos de Wilcoxon

De acuerdo con la prueba de signos de Wilcoxon, se presentan los resultados del valor absolutos de las diferencias y el rango respectivo en la tabla 14, el resultado estadístico de las pruebas T de Student y W de Wilcoxon cada una con su respectivo p valor en la tabla 15.

En la tabla 16, se presenta el intervalo de confianza al 95% de las pruebas T y W con su valor más bajo y superior, respectivamente. Y finalmente, en la tabla 17 se presentan los indicadores analíticos de las muestras, como la media, la mediana, el DE y EE del pretest y posttest.

Tabla 13. Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)

			W	p
Pretest	-	Posttest	0.942	0.529

Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de normalidad

La prueba de Shapiro-Wilk aplicada a las diferencias entre las puntuaciones del pretest y el posttest presentó un valor de $W = 0.942$ y $p = 0.529$. Dado que el valor de p fue superior al nivel de significancia establecido (0.05), no se encontró evidencia suficiente para rechazar el supuesto de normalidad de las diferencias entre ambas mediciones.

Tabla 14. Valores absolutos de las diferencias y rangos Wilcoxon

Estudiante	Valor absoluto de las diferencias	Rango
5	1	1.5
9	1	1.5
7	2	3
11	4	4.5
8	4	4.5
6	5	6.5
3	5	6.5
12	7	8
4	8	9

10	9	10
1	10	11
2	11	12

Nota. Los rangos se asignaron a partir de las diferencias absolutas entre los resultados del pretest y el posttest, ordenándolas de menor a mayor. La diferencia más pequeña recibe el rango 1, la siguiente el rango 2 y así sucesivamente. Cuando dos o más diferencias tienen el mismo valor, se les asigna el promedio de los rangos que ocuparían; por ejemplo, dos diferencias iguales a 1 ocupan los rangos 1 y 2, por lo que ambas reciben un rango de 1.5.

Tabla 15. Prueba t de Student y Wilcoxon para muestras pareadas

			Estadística	df	p
Pretest	Posttest	T de Student	-5.65	11.0	< .001
		W de Wilcoxon	0.00		0.002

Tabla 16. Intervalos de confianza y magnitud del efecto de las diferencias entre el pretest y el posttest

Intervalo de Confianza al 95%			Intervalo de Confianza al 95%		
	Más bajo	Superior	Magnitud del efecto	Más bajo	Superior
T	-7.76	-3.41	La d de Cohen	-2.49	-0.737
W	-8.00	-3.00	Correlación Biseriada de rangos		

Tabla 17. Estadísticos descriptivos de los resultados del pretest y el posttest

	N	Media	Mediana	DE	EE
Pretest	12	11.7	11.5	2.15	0.62
Posttest	12	17.3	17.0	4.14	1.194

A partir de la tabla 12, esa información se organizó en orden ascendente para asignar rangos de acuerdo con el grado de esas diferencias en la tabla 13. Con ello, se utilizó el software Jamovi 2.7.33 y se realizó una prueba estadística de los datos, para obtener los valores de los resultados de las pruebas de Wilcoxon y la T de Student. El resultado de ese análisis se proyecta en las tablas 14, 15 y 16.

De acuerdo con los resultados de prueba de Wilcoxon y la prueba T de Student indicadas en la tabla 14, se puede evidenciar que la intervención que se propuso y desarrolló en el marco de este trabajo de investigación, presenta una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de la prueba pretest y la prueba posttest, lo que se puede interpretar como un aumento en los indicadores de la habilidad de indagación expresados en la rúbrica de evaluación, esto porque el p valor de la prueba T de Student es <0.001 y la W de Wilcoxon es 0.002, entonces dado que el valor de p es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis

nula y se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas mediciones (pretest y postest).

De acuerdo con los resultados del software, la magnitud del efecto fue de -1.00 en la correlación bi-seriada de rangos, lo que indica un efecto muy grande. El signo negativo se debe a que el Software Jamovi calculó la diferencia como pretest menos postest, por lo que el resultado evidencia que los puntajes del postest fueron superiores.

Al observar la información reportada en la tabla 16, se identifica que en las pruebas W y T hay un incremento estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% en los puntajes obtenidos por los participantes después de la intervención. Esto debido a que, según los datos, la media del grupo en los niveles de desempeño establecidos pasó de 11.7 puntos obtenidos en el pretest a 17.3 en el postest. En cuanto a la mediana, los valores tuvieron un aumento de 11.5 a 17.0 puntos.

Por su parte, la desviación estándar reportada (DE) indica que los estudiantes participantes respondieron de manera muy distinta a la intervención, pues al tener un $DE=4.14$ en el postest se analiza que algunos estudiantes mejoraron mucho, obteniendo niveles de desempeño más altos, y otros no mejoraron tanto, lo que indica que hubo un impacto desigual de los indicadores en los participantes.

8.7. Tendencia de los niveles de desempeño

A continuación, se presentan por medio de gráficas, las tendencias de los niveles de desempeño en cada uno de los indicadores respecto a las pruebas pretest y postest.

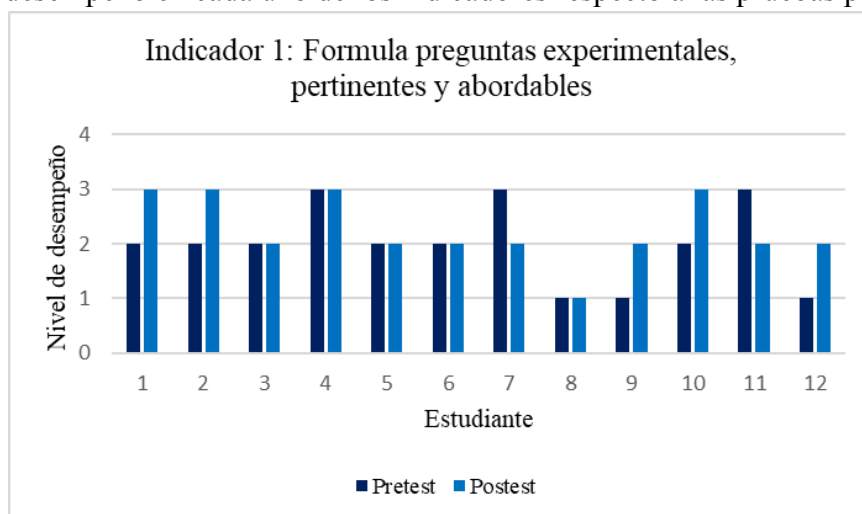


Figura 10. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 1

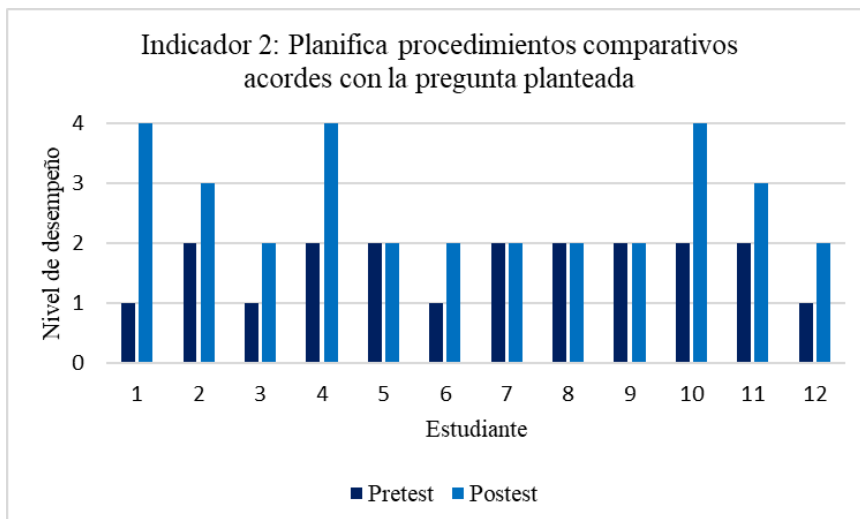


Figura 11. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 2

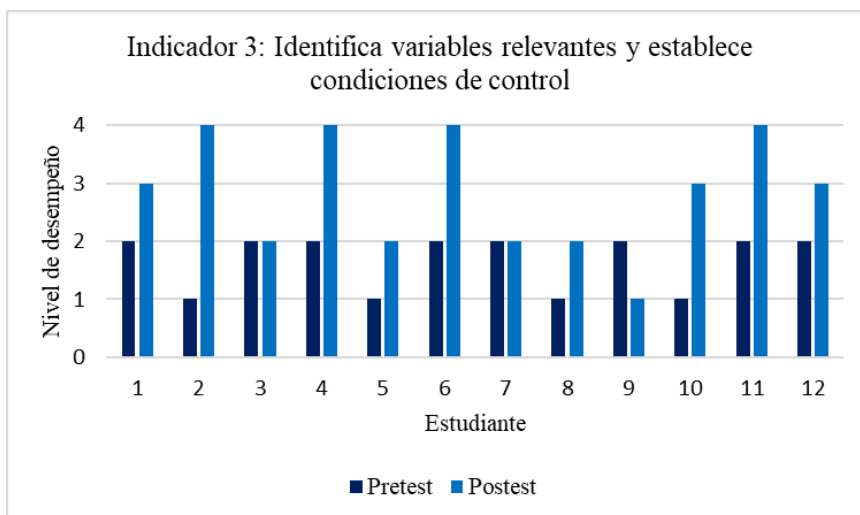


Figura 12. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 3

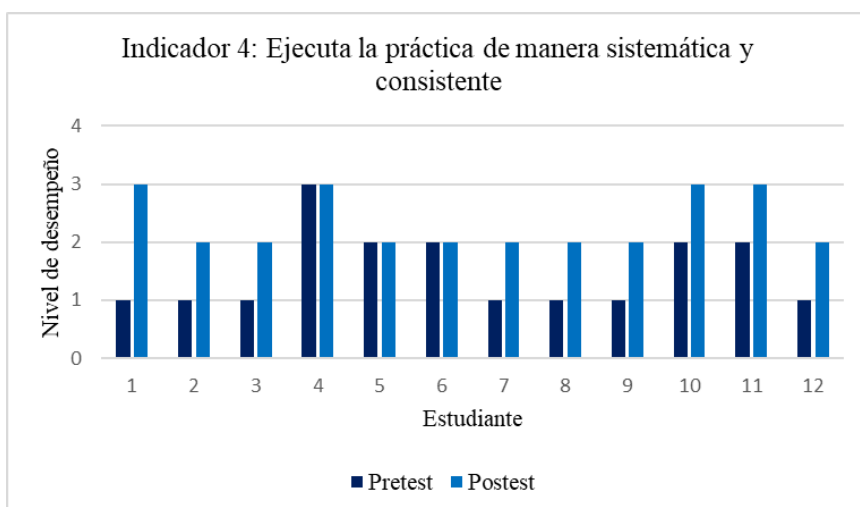


Figura 13. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 4

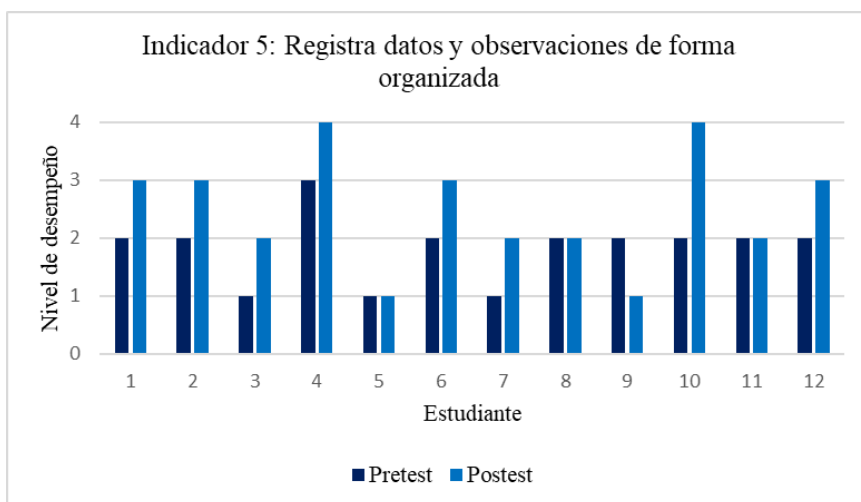


Figura 14. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 5

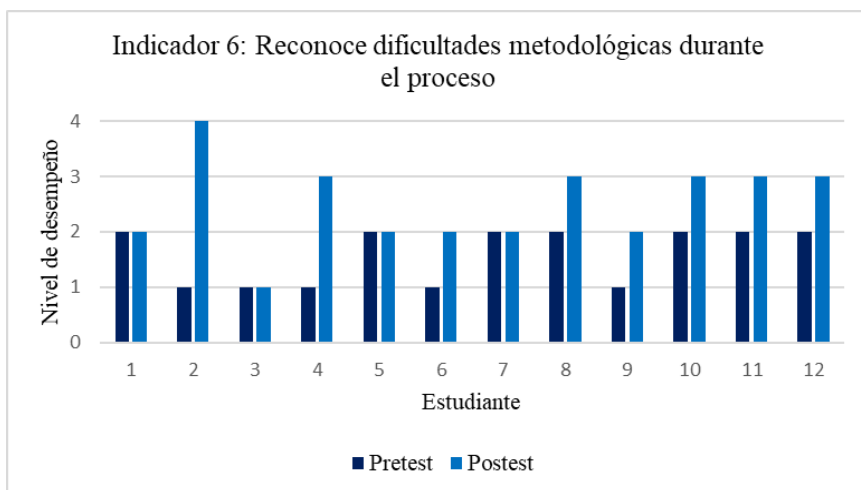


Figura 15. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 6

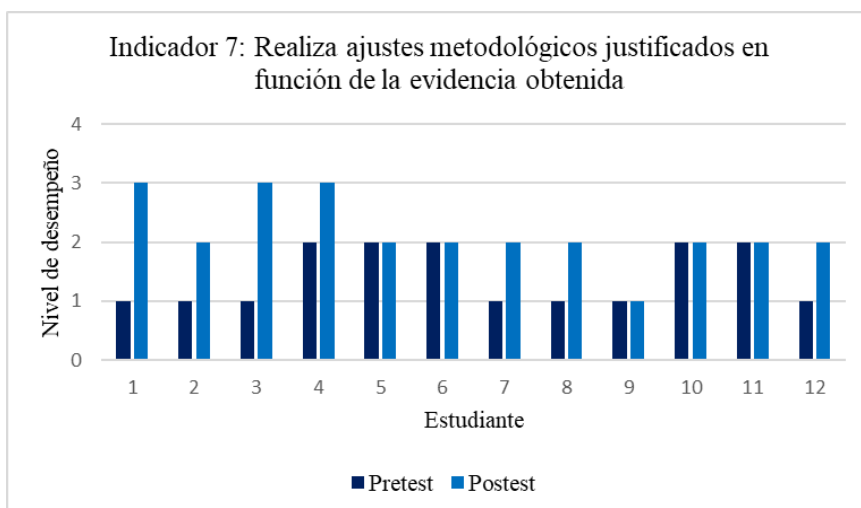


Figura 16. Resultados de los niveles de desempeño del indicador 7

En cuanto al análisis específico de los resultados de cada uno de los indicadores, se hace a partir de las figuras 10-16, en las cuales se evidencia una tendencia de mejora general

en cada uno respecto a la habilidad de indagación, asimismo, por medio de los indicadores se puede observar que aunque la tendencia fue positiva en todos los casos, no hay un comportamiento homogéneo en los resultados de las pruebas, por lo cual hubo resultados más favorables en algunos estudiantes con algunos indicadores, y no una homogeneidad favorable de mejora en todo su conjunto.

En el primer indicador, correspondiente a la formulación de preguntas experimentales, pertinentes y abordables, se evidencia que cinco estudiantes tuvieron un cambio positivo, es decir que aumentó su nivel de desempeño; por su parte, dos estudiantes presentaron un cambio negativo, disminuyeron en su nivel de desempeño, y otros cinco estudiantes se mantuvieron en el mismo nivel. Esto indica que, a pesar de que ningún estudiante alcanzó el cuarto nivel de desempeño, en el postest la media logró formular una pregunta experimental clara y abordable dentro de los parámetros planteados, pero poco delimitada a la situación problema.

En cuanto a los indicadores 2 y 3, en éstos se evidencia un cambio significativo bastante alto, ya que hay un salto entre uno y dos niveles en varios casos, asimismo no hubo retroceso de nivel de desempeño para el segundo indicador y solo hubo un caso para el tercero.

De manera que en el postest para el indicador número dos, tres estudiantes alcanzaron el cuarto nivel de desempeño, dos llegaron al tercer nivel y el resto se mantuvo en el nivel dos. En cuanto al indicador tres, cuatro estudiantes alcanzaron el nivel cuatro, tres el tercer nivel y cuatro en el nivel dos.

Estos resultados hacen referencia a que los estudiantes sí proponen y planifican una comparación general para el proceso experimental, sólo que algunos la estructuran y delimitan de manera más consistente de acuerdo con la pregunta planteada. De igual manera, los estudiantes pasaron de no justificar adecuadamente las condiciones de control a identificar y justificar de manera precisa la variable principal y establecer condiciones de control pertinentes.

En el indicador cuatro, junto con los indicadores uno y siete, ninguno de los participantes alcanzó el cuarto nivel de desempeño. En estos tres casos, se evidencia una tendencia a permanecer en los niveles dos y tres. De manera que, respecto al cuarto indicador en el postest, la mayoría estableció la práctica experimental pero con algunas inconsistencias en las condiciones de control, y los otros estudiantes sí la establecieron de forma ordenada y definiendo con mayor precisión las condiciones.

Respecto al indicador cinco, se aprecia un mejoramiento en cuanto a la selección del registro de datos relevantes para el proceso experimental, esto debido a que durante el proceso tuvieron la oportunidad de observar con mayor claridad qué datos son los que están realmente involucrados e influyen en el comportamiento del sistema.

En cuanto al indicador seis, solo un participante alcanzó el cuarto nivel de desempeño, mientras la mayoría de sus compañeros permanecieron en los niveles dos y tres, entre los cuales se detalla que cuatro de ellos mantuvieron su mismo nivel de desempeño en el pretest y en el postest. En general, estos resultados indican que los estudiantes mejoraron su habilidad de identificar dificultades metodológicas, algunos con escasa precisión, mientras que otros reconocieron dificultades claramente y las relacionaron con el procedimiento y las variables alcanzando un mayor control al respecto.

Finalmente, el indicador siete tuvo la tendencia de permanecer en niveles intermedios, y aunque no presentó el mejor avance entre los indicadores, los participantes subieron de los niveles uno y dos del pretest a los niveles de desempeño dos y tres en el postest. Lo cual indica que plantean ajustes pertinentes al proceso relacionado con las dificultades identificadas, pero con una justificación no muy bien articulada ni coherente con la evidencia.

En general, se evidencia que en la prueba de salida hubo un aumento de nivel de desempeño en todos los indicadores, exceptuando algunos casos específicos de estudiantes que disminuyeron un nivel de desempeño en algún indicador. De manera que, en general este comportamiento permite entender que en una situación definida como la extracción con los Solventes Eutécticos Profundos Naturales - NADES (no conocidos por la mayoría de los participantes) bajo un enfoque de aprendizaje por indagación, se presentan aumentos significativos en los niveles de desempeño respecto a la habilidad de indagación.

Como síntesis de esta sección, en la figura 17 se sintetiza el nivel de desempeño promedio por indicador antes y después de la intervención. El avance es general pero heterogéneo: los indicadores de planificación (Ind. 2) e identificación de variables (Ind. 3) muestran los mayores incrementos (alcanzando el nivel 4 en varios casos), mientras que la formulación de preguntas (Ind. 1) y el ajuste metodológico (Ind. 7) presentan el avance más modesto y ningún caso en nivel 4.

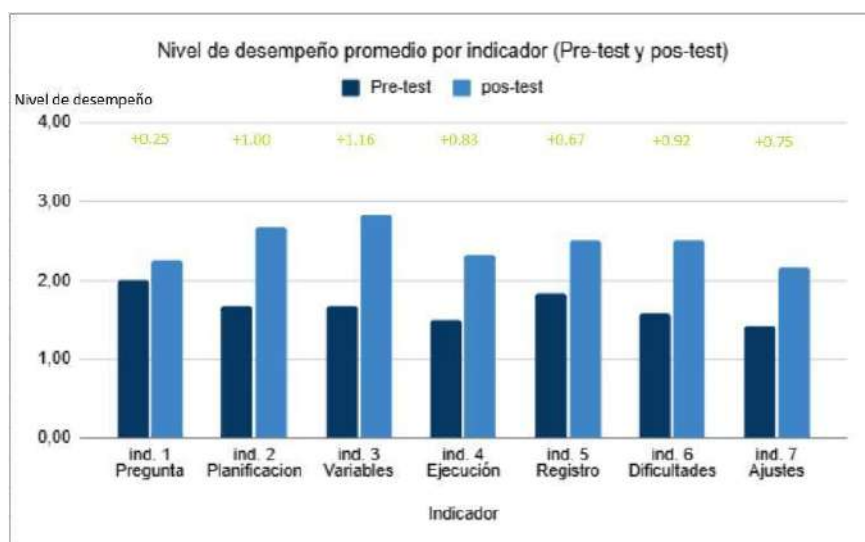


Figura 17. Nivel de desempeño promedio por indicador (pretest vs. postest)

8.8. Productos y evidencias de los participantes

Los estudiantes estuvieron organizados por grupos y así desarrollaron actividades como el desarrollo del formato de indagación para el diseño del laboratorio, y también una cartelera con su respectiva presentación oral sobre los resultados de su práctica experimental bajo las condiciones que ellos seleccionaron y mediado bajo preguntas indagatorias por parte de los tesisas. En ella se resaltó información como la pregunta problema, la hipótesis, las variables que seleccionaron, las condiciones de control, las dificultades que presenciaron, los resultados que les dió el análisis por medio del equipo de HPLC, la relación entre su hipótesis y sus resultados, y un análisis de sus datos frente a los de los otros grupos.

De manera que, en lo que respecta a la revisión de los productos que realizó cada grupo, se puede identificar que sí hubo momentos de indagación por parte de los estudiantes en el proceso, esto se puede evidenciar porque formularon preguntas sobre el qué y el cómo podrían hacer y desarrollar su diseño experimental, también seleccionaron variables que discutieron en grupo como las más indicadas para atender el objetivo de la práctica, establecieron ciertas condiciones de control que ellos consideraron pertinentes, interpretaron sus resultados y también comunicaron sus conclusiones y posibles mejoras a su propio sistema para tener mejores resultados.

En cuanto a los formatos de indagación para el diseño del laboratorio se evidencia que en general los cuatro grupos sí plantearon preguntas experimentales relacionadas con la extracción del analito de interés que es el ácido ferúlico mediante los NADES. Asimismo, se observó que identificaron variables dependientes e independientes, solo que en algunos casos los controles experimentales no fueron registrados con suficiente precisión.

De modo que, respecto a las carteleras y su presentación, se observó que los estudiantes compartieron sus resultados y los relacionaron con sus hipótesis iniciales, de manera que algunos grupos sí acertaron en la confirmación de su hipótesis inicial (grupos 1, 3 y 4), mientras que los otros no (grupo 2), y adicionalmente, propusieron ciertos ajustes que podrían aplicar a su diseño experimental, por ejemplo:

- Grupo 1: Variar proporciones; experimentación.
- Grupo 2: Aumentar proporciones; temperatura; más tiempo de ultrasonido; revisar variables.
- Grupo 3: Pasarlo a UV-Vis.
- Grupo 4: Aumento de ácido cítrico; porcentaje de agua.

En esta parte, en general, todos los grupos también hicieron uso de las áreas bajo la curva de los cromatogramas que se les compartió respecto al resultado del equipo HPLC de los extractos de cada grupo (anexo L), pero se identificó dificultades en lo que respecta a la explicación química de esos resultados y también del uso del lenguaje técnico analítico.

Haciendo una relación entre los productos y evidencias que hicieron los estudiantes a lo largo de todas las intervenciones, con los resultados extraídos del pretest y del posttest, se logran identificar cómo esos datos cuantitativos se manifiestan, ya que se evidencian avances en la formulación de preguntas, identificación de variables y una relación entre hipótesis y resultados.

Esto se representa de manera en que hubo una cierta mejora en la formulación de preguntas comparativas, hubo una buena mejora en la identificación de variables ya que reconocieron variables dependientes e independientes y con ello hay un avance en la planificación experimental, también hubo mejora en el uso de resultados ya que los grupos utilizaron las áreas del HPLC para comparar los ensayos y así fortalecieron el uso de la evidencia, y finalmente, respecto a las dificultades y ajustes, ningún grupo mencionó errores procedimentales totales, sino se enfocaron en los ajustes de mejora.

Y con ello, al ser un contexto nuevo, la formulación de preguntas, la planificación de procedimiento comparativos, la identificación de variables, la ejecución de la práctica, el registro de datos, el reconocimiento de dificultades metodológicas y la realización de ajustes metodológicos, en sí la toma de decisiones justificadas, se convierte en un aspecto

fundamental en el proceso de indagación en el que se refuerza a los estudiantes a comprender de mejor manera las situaciones problema que se presentan y el cómo podrían ser abordadas.

Con estos análisis de las producciones de los estudiantes, y de los datos que se extrajeron de los instrumentos, se puede reconocer que las intervenciones favorecieron el desarrollo de aspectos centrales de la habilidad de indagación.

8.8.1. Resultados HPLC de los grupos

En cuanto a los resultados del área bajo la curva por parte del equipo HPLC para determinar la concentración de ácido ferúlico de los dos extractos de cada grupo, tomando como referencia la curva de calibración (figura 9) construida en la prueba piloto, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación en la tabla 18.

Tabla 18. Áreas cromatográficas y concentraciones de ácido ferúlico determinadas por HPLC de cada grupo

Grupo	NADES	Área	Área corregida	Concentración (ppm)
Grupo 1	Ácido láctico: Glicerol	589207	452821	3.16
	Ácido cítrico: Glicerol	523832	387446	2.82
Grupo 2	Ácido láctico: Glicerol	1100082	963696	5.77
	Ácido cítrico: Glicerol	222590	86204	1.28
Grupo 3	Ácido cítrico: Glicerol (1:1)	333407	197021	1.85
	Ácido cítrico: Glicerol (1:3)	201708	65322	1.17
Grupo 4	Ácido láctico: Glicerol	556966	420580	2.99
	Ácido cítrico: Glicerol	154101	17715	0.93

En lo que respecta a las áreas cromatográficas de cada grupo reportadas por el equipo de HPLC (tabla 18), presentadas en el anexo L, éstas se consideran como señales analíticas relativas asociadas al compuesto de interés que es el ácido ferúlico. De modo que, como tal no se asume como concentraciones absolutas de este compuesto en el extracto, ya que para ello sería necesario contar con un patron certificado para una curva de calibración analítica como se describe en el desarrollo de la prueba piloto, un control de diluciones, normalización por masa de muestra y además condiciones de cuantificación validadas. Si no que se asume como una verificación de que en el extracto que se lee, hay presencia de ese analito. En este

caso específico, se encuentra en un rango del minuto 1.233 al minuto 1.250, lo cual fue evidenciado en el proceso de la prueba piloto.

8.8.1.1. Contraste entre las respuestas de los participantes y la evidencia experimental

Con el fin de complementar la lectura instrumental presentada en la tabla 18, se contrastaron las señales obtenidas por HPLC con respuestas registradas por los participantes en el formato de indagación. Este contraste permite observar la manera en que los participantes usaron la evidencia para revisar sus hipótesis, reconocer dificultades y proponer modificaciones a su procedimiento.

Un ejemplo corresponde al grupo 2, cuya pregunta de indagación estableció cómo afectaba el tipo de ácido empleado en la formulación del NADES a la extracción de ácido ferúlico, manteniendo condiciones comparables entre los dos ensayos. De manera que, antes de conocer los resultados, el grupo planteó como hipótesis que el sistema que contenía ácido cítrico podría favorecer en mayor medida la extracción. Sin embargo, después del análisis experimental señaló: *“No, porque el ácido láctico recuperó 4,5 veces más que el ácido cítrico”*. Esta respuesta es consistente con la evidencia de la tabla 18, donde el sistema ácido láctico:glicerol presentó una señal semicuantitativa equivalente a 5.77 ppm, frente a 1.28 ppm para ácido cítrico:glicerol. En consecuencia, este grupo no se limitó a conservar su predicción inicial, sino que utilizó el resultado experimental para rechazarla y reformular su interpretación.

Este mismo grupo también registró dificultades relacionadas con el control de las condiciones experimentales, puntualmente con la temperatura, y propuso cambios en el sistema de calentamiento y agitación. Esta respuesta evidencia que el grupo reconoció una limitación metodológica y formuló una alternativa. No obstante, la justificación del ajuste permanece parcialmente desarrollada, pues se identifica qué debería modificarse, pero no se explica en profundidad cómo dicha modificación mejoraría la calidad de la evidencia obtenida. Esto es coherente con la tendencia observada en el indicador 7, en el cual los participantes avanzaron principalmente hacia niveles intermedios de desempeño.

Otro caso se observa en el grupo 4, que al relacionar su hipótesis con los resultados señaló que estos sí la apoyaban a partir de las concentraciones obtenidas para los dos sistemas estudiados. En la tabla 18, el NADES ácido láctico:glicerol presentó una estimación semicuantitativa de 2,99 ppm, mientras que el sistema ácido cítrico:glicerol presentó 0,93 ppm, por lo que la interpretación desarrollada por el grupo fue consistente con la tendencia de la señal instrumental. Luego, los participantes propusieron posibilidades de mejora: aumentar la cantidad de ácido cítrico, modificar el sistema de asistencia y revisar la proporción de agua. Aquí nuevamente se evidencia la capacidad para proponer alternativas experimentales, aunque algunas de ellas requieren una argumentación más explícita que relacione la modificación propuesta con la evidencia obtenida.

En general, con esta información se permite hacer una triangulación entre tres fuentes de información. Por una parte, los formatos de indagación muestran cualitativamente cómo los participantes formularon comparaciones, interpretaron resultados y propusieron ajustes; por otra, las señales de HPLC proporcionaron una evidencia experimental externa frente a la cual pudieron contrastar sus hipótesis; y ya finalmente, los resultados de la rúbrica muestran que los mayores avances se concentraron en la planificación del procedimiento y la identificación y control de variables, mientras que la formulación de preguntas y,

especialmente, la justificación de los ajustes permanecieron como componentes de desarrollo más moderado.

8.9. Análisis cualitativo de contenido: codificación por nodos

Mientras la valoración cuantitativa por rúbrica abarcó a los doce participantes (n=12) el análisis cualitativo de contenido de la línea de base se realizó sobre una muestra intencional de ocho casos (n=8), seleccionados por la riqueza y legibilidad de sus respuestas escritas, con el fin de profundizar en los patrones de razonamiento, que no buscan representatividad estadística como la aportada por la rúbrica, sino por el contrario, garantizan comprensión en profundidad y coherencia con el diseño mixto convergente.

El análisis de contenido de la línea de base (pretest, n = 8 casos clasificados y codificados en detalle) confirma un punto de partida de nivel incipiente - intermedio: la mayoría de los participantes reconoce el problema y propone comparar solventes o técnicas, pero con debilidades sistemáticas en la formulación de la pregunta comparativa, en la distinción entre variable independiente y dependiente, y en la explicitación de un criterio de evaluación. La tabla 19 presenta la frecuencia de aparición de cada nodo; en la tabla 20 se presenta la matriz caso por cada nodo, y a continuación se recuperan citas representativas, en el anexo M.

Tabla 19. Frecuencia de nodos en el pretest (n = 8 casos)

Nodo	Casos	Casos que lo evidencian
Pregunta comparativa explícita (Ind. 1)	4	S2, S3, S4, S8 (+ S5 post)
Foco en una sola condición / no comparativa	4	S1, S5 (inicial), S6, S7
Criterio = rendimiento / % recuperación	5	S2, S5, S6, S7, S8
Confusión variable independiente/dependiente	4	S1, S3, S5, S7
Alfabetización instrumental (IR, UV-Vis, HPLC, pH)	3	S8, S3, S7
Viscosidad / filtración como obstáculo	3	S2, S5, S7
Sostenibilidad / ODS 12	3	S4, S2, S1
Ajuste = agua / temperatura / solvente	6	S1, S2, S3, S4, S6, S7
Replicabilidad / control de error	2	S4, S8

Tabla 20. Matriz caso × nodo — pretest (● presencia · ◐ parcial · ○ ausente)

Nodo	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Pregunta comparativa (Ind.1)	○	●	●	●	◐	◐	◐	●
Planificación con criterio (Ind.2)	◐	●	●	●	●	●	●	●

Distingue (Ind.3)	VI/VD	○	◐	◑	●	○	●	◐	●
Ejecución comparable (Ind.4)		○	◐	◑	●	○	●	◐	●
Diseña (Ind.5)	registro/tabla	◐	●	●	●	◐	●	◐	●
Identifica (Ind.6)	dificultad	●	●	●	●	●	◐	●	◐
Ajuste (Ind.7)	justificado	◐	●	◐	●	◐	◐	◐	◐
Instrumentación analítica		○	○	●	○	○	○	◐	●
Sostenibilidad / ODS 12		◐	◐	○	●	○	○	○	○

Acorde a lo anterior, algunas de las citas representativas en la formulación de la pregunta (Ind. 1) se observa el contraste entre una formulación sólida y una débil:

“¿De qué manera se puede extraer el ácido ferúlico realizando distintos tipos de pretratamiento (vía seca y húmeda) y cómo estos sistemas logran una preconcentración... con equipos como IR, UV-Vis y espectrofotómetro, para comparar la preconcentración de ambos medios? (S8)”

“¿Cuál es la ruta correspondiente que se debe llevar a cabo para evitar los solventes orgánicos? [interrogantes sueltos, sin variable a comparar] (S1)”

En el criterio de comparación destaca la aparición temprana del rendimiento como métrica de decisión:

“...los criterios están orientados hacia el mejor porcentaje de rendimiento, mayores porcentajes de eficacia y minimización de residuos. (S2)”

Y en el reconocimiento de dificultades, la viscosidad y la filtración aparecen anticipadas de forma recurrente:

“La filtración puede afectar la cantidad de ácido ferúlico que puede extraerse... pienso que el solvente no funciona de forma óptima. (S2)”

Así, el pretest evidencia que el componente más frágil es la formulación de preguntas comparativas y la argumentación de ajustes, mientras que existen acercamientos útiles o criterios que permiten dar explicación a lo solicitado (criterio de rendimiento, intuición sobre viscosidad) sobre los cuales la intervención puede construir. Estos patrones cualitativos anticipan el comportamiento cuantitativo por indicador reportado en la tendencia de los niveles de desempeño mencionados.

8.10. Triangulación de datos

La triangulación entre la codificación cualitativa, la rúbrica y las señales de HPLC muestran tres relaciones. Lo primero es una convergencia, ya que los nodos más frágiles en la línea de base entre la formulación de la pregunta (Ind. 1) y ajuste justificado (Ind. 7) son precisamente los indicadores de menor avance cuantitativo, mientras que los nodos con

anclajes previos, correspondientes a la planificación e identificación de variables, son los de mayor variación. Lo segundo es una complementariedad, pues el criterio de rendimiento y la anticipación de la viscosidad, presentes ya en el pretest, se materializan en el uso de las áreas de HPLC para comparar ensayos y en las dificultades reales registradas en la prueba piloto. Y lo tercero es una tensión, en el sentido de que el efecto es significativo (Wilcoxon $p = 0.002$; tamaño del efecto muy grande) pero heterogéneo, en la que la desviación estándar pasa de 2.15 a 4.14, lo que indica que la intervención moviliza los componentes procedimentales de la indagación con más fuerza que los argumentativo-epistémicos. La Figura 13 resume cómo los nodos se relacionan con los hallazgos y con las conclusiones.

Mapa de relación: Nodos de codificación → Hallazgos del análisis → Conclusiones
Intervención con indagación guiada · NADES / ácido ferúlico · $n=12$ (cuali: pretest $n=8$)

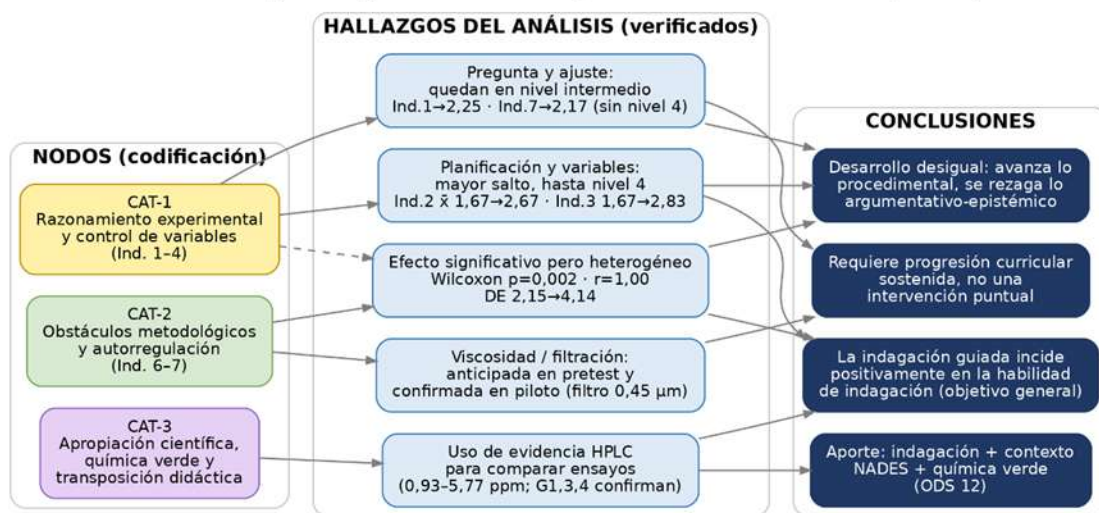


Figura 18. Relación entre nodos de codificación, hallazgos y conclusiones

Nota . Imagen generada por el software NVivo, 2026.

8.10.1. Análisis por indicador triangulado

Indicador 1 (formulación de preguntas). La media pasó de 2.00 a 2.25 (cinco ascensos, dos descensos, cinco sin cambio; ningún nivel 4). El contraste cualitativo lo ilustra: mientras un caso plantea interrogantes sueltos como “¿cuál es la ruta... para evitar los solventes orgánicos?” (S1), otro formula una pregunta comparativa con criterio instrumental “...para comparar la preconcentración de ambos medios” (S8). Que sea el componente de menor avance concuerda con Chinn y Malhotra (2002) y el NRC (2012): formular preguntas investigables es un rasgo epistémico que no emerge de forma espontánea y requiere enseñanza explícita.

Indicador 2 (planificación del procedimiento comparativo). Es uno de los mayores avances (1.67 → 2.67; con tres casos en nivel 4). En la línea de base ya asomaba un criterio de decisión como “los criterios están orientados hacia el mejor porcentaje de rendimiento... y minimización de residuos” (S2), que la intervención consolidó, en coherencia con Furtak et al. (2012): la indagación guiada favorece especialmente la planificación cuando hay oportunidades concretas de decisión.

Indicador 3 (variables y control). Registra el mayor avance (1.67 → 2.83; con cuatro casos en nivel 4). En el pretest predominaba la confusión de roles como “la variable que depende de la extracción son las técnicas a usar” (S5), superada al distinguir la variable principal. Se interpreta a la luz de Chinn y Malhotra (2002), para quienes el control de variables es un descriptor central de la indagación auténtica.

Indicador 4 (ejecución sistemática). Mejora de 1.50 a 2.33, sin alcanzar el nivel 4. Las respuestas muestran una noción incipiente de comparabilidad como “se mide simultáneamente... van de manera consistente” (S6), afinada pero no consolidada. Coherente con Hofstein y Lunetta (2004) y el NRC (2012): ejecutar de forma sistemática exige un control fino que demanda experiencia repetida.

Indicador 5 (registro de datos). Avanza de 1.83 a 2.50 (con dos casos en nivel 4). Ya en el pretest algunos participantes diseñaban tablas de registro con variables pertinentes (S2, S4), competencia fortalecida al observar qué datos influyen en el sistema; se vincula con la práctica de “analizar e interpretar datos” del NRC (2012).

Indicador 6 (reconocimiento de dificultades). Mejora de 1.58 a 2.50 (con un caso en nivel 4). La anticipación de obstáculos físico-reológicos es notable desde la línea de base como “la filtración puede afectar la cantidad de ácido ferúlico...” (S2); “se pueden formar grumos... pérdida de materia” (S5), y triangula con una dificultad real del piloto (los extractos no pasaban el filtro de 0,45 μm). Corresponde a la fase de investigación del ciclo de Pedaste et al. (2015).

Indicador 7 (ajustes justificados). Es el avance más modesto (1,42 → 2,17; con ningún nivel 4). Los ajustes propuestos son plausibles pero poco fundamentados como “adición de agua, cambiar la temperatura... diluiría más” (S2). Que este componente y la formulación de preguntas queden rezagados confirma que los rasgos argumentativo-epistémicos (argumentar a partir de la evidencia, en términos del NRC (2012)) requieren una progresión más larga que una intervención puntual.

En términos comparativos, estos resultados presentan puntos de convergencia con antecedentes desarrollados en la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional. De manera que, los autores Gómez y Rodríguez (2024), mediante una propuesta de indagación guiada contextualizada en el potencial antimicrobiano del extracto de semillas de uva, identificaron cambios en el desarrollo de habilidades investigativas durante y después de la intervención, aunque con comportamientos diferenciados entre las habilidades evaluadas.

En este trabajo de investigación también se observa un desarrollo heterogéneo, pero referido específicamente a los componentes de la habilidad de indagación experimental, con mayores avances en la planificación del procedimiento y el control de variables, y menores avances en la formulación de preguntas y la justificación de ajustes metodológicos. A partir de esta comparación, se permite reconocer una tendencia común en cuanto al potencial de las experiencias de indagación guiada para movilizar habilidades

durante la formación inicial en química sin asumir equivalencia entre los constructos evaluados en ambas investigaciones.

9. CONCLUSIONES

A partir de los resultados que se obtuvo en la estructuración e implementación de este trabajo de grado, se concluye que la propuesta didáctica basada en la indagación guiada, contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de una matriz de *Avena sativa* por medio de Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES), incidió positivamente en el desarrollo de la habilidad de indagación experimental en los participantes: profesores de química en formación. Esto se sustenta debido a la evidencia cualitativa y cuantitativa del incremento de los niveles de desempeño observados en el postest como en los análisis estadísticos realizados, en los cuales se registraron diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones inicial y final ($p < 0.05$), además de una magnitud del efecto muy grande. En respuesta directa a la pregunta de investigación, la intervención de indagación guiada incide en el desarrollo de la habilidad de indagación experimental de manera positiva pero diferenciada por componente: moviliza con fuerza la planificación de comparaciones y la identificación de variables, y con menor intensidad la formulación de preguntas y la argumentación de ajustes. Con base en la prueba de Wilcoxon ($p = 0.002$), se rechaza la hipótesis nula y se adopta la hipótesis alterna.

Por lo tanto, el objetivo general definido en este trabajo de investigación se alcanzó satisfactoriamente, demostrando que una serie de intervenciones fundamentadas en la indagación contextualizadas en corrientes contemporáneas como el empleo de Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES), favorece el fortalecimiento de capacidades propias del trabajo científico cuando se desarrolla mediante experiencias experimentales contextualizadas.

En lo que respecta al primer objetivo específico, se logró caracterizar el nivel inicial de desempeño de los participantes en la habilidad de indagación experimental. Los resultados del pretest evidenciaron un predominio de niveles bajos e intermedios en los siete indicadores evaluados, con una media global de 11.7 puntos. En cuanto al análisis cualitativo de la línea de base, esta permitió complementar esta caracterización, mostrando dificultades particularmente relacionadas con la formulación de preguntas experimentales comparativas, la distinción entre variables independientes y dependientes, la ejecución de comparaciones bajo condiciones controladas y también la justificación de ajustes metodológicos a partir de la evidencia. Claro que también se identificaron aproximaciones iniciales relacionadas con criterios de rendimiento, reconocimiento de posibles dificultades como la viscosidad y la filtración, y propuestas preliminares de modificación del procedimiento.

En cuanto al segundo objetivo específico, se diseñó e implementó una intervención didáctica de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* mediante Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES). Con ello, la intervención se estructuró a partir de las fases del ciclo de indagación de Pedaste et al. (2015), adaptadas a cuatro momentos de trabajo, y se desarrolló mediante una matriz de posibilidades que permitió mantener un equilibrio entre la orientación proporcionada por los investigadores (tesisistas) y la toma de decisiones por parte de los participantes.

Así, el sistema experimental, previamente ajustado mediante la prueba piloto, proporcionó condiciones viables para que los estudiantes formularan preguntas, plantearan

hipótesis, seleccionaran variables, planificaran procedimientos comparativos, registraran evidencias, reconocieran dificultades y propusieran ajustes metodológicos. Asimismo, las señales obtenidas mediante el equipo de HPLC funcionaron como evidencia experimental para contrastar las hipótesis y discutir las decisiones adoptadas por los grupos. En este sentido, la extracción de ácido ferúlico con los NADES no constituyó únicamente el componente químico de la propuesta, sino el contexto experimental que permitió movilizar de manera observable los diferentes componentes de la habilidad de indagación experimental.

Respecto al tercer objetivo específico, la integración de las evidencias cuantitativas y cualitativas obtenidas antes, durante y después de la intervención permitió identificar cambios positivos, aunque también heterogéneos, en los niveles de desempeño de los participantes. Esto debido a que los puntajes globales aumentaron de una media de 11.7 puntos en el pretest a 17.3 puntos en el posttest, mientras que la mediana pasó de 11.5 a 17.0 puntos; adicionalmente, la prueba de rangos con signo de Wilcoxon mostró diferencias estadísticamente significativas entre ambas mediciones ($p = 0,002$).

El análisis por indicador permitió establecer que los mayores avances se presentaron en la planificación de procedimientos comparativos, cuya media pasó de 1.67 a 2.67, y en la identificación y control de variables, que pasó de 1.67 a 2.83. Por su parte, la formulación de preguntas experimentales pasó de 2.00 a 2.25 y la realización de ajustes metodológicos justificados de 1.42 a 2.17, manteniéndose como los componentes de avance más moderado.

Esta tendencia fue consistente con las producciones de los participantes, los formatos de indagación, las carteleras de socialización y el uso de las señales de HPLC para contrastar hipótesis y resultados. Así, la triangulación permitió establecer que la intervención se asoció con un desarrollo favorable de la habilidad de indagación experimental, pero también que ese desarrollo fue diferenciado entre sus componentes, teniendo mayores avances en aspectos de planificación y control experimental y una progresión más limitada en aquellos que requieren mayor elaboración argumentativa y epistémica.

Sin embargo, no todo fue 100% efectivo ya que también se evidencia que el desarrollo de la habilidad de indagación experimental no tuvo el mismo impacto, o un impacto homogéneo, en todos los participantes. Entonces, algunos indicadores, especialmente lo que estaban relacionados con la formulación de preguntas, el de argumentación y de ajustes metodológicos, continuaron teniendo niveles intermedios al finalizar la intervención.

Con esto se puede inferir que dichos componentes de la habilidad demandan procesos formativos más prolongados en el que los estudiantes tengan más oportunidades para enfrentarse a problemas experimentales abiertos, argumentar sus decisiones y tener mayor criterio sobre la evidencia obtenida. Por lo tanto, una intervención de corta duración como la que se propuso aquí, sí logra constituir un avance importante, solo que no lo suficiente para alcanzar niveles de desempeño plenamente consolidados en todos los componentes de la indagación.

Finalmente, uno de los principales aportes que deja este trabajo de investigación es la integración de tres elementos que pocas veces convergen en propuestas didácticas dirigidas a la formación inicial de profesores, que es la enseñanza basada en la indagación, la contextualización mediante un problema experimental y la incorporación de principios de química verde a través del uso de los Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES).

Por lo cual, esta articulación demuestra que es posible diseñar experiencias experimentales que, además de fortalecer competencias investigativas, también acerquen a los futuros docentes a problemáticas actuales de la investigación química y promuevan una comprensión más contextualizada, crítica y sostenible del trabajo científico. En este sentido, este trabajo de investigación constituye un referente susceptible de ser adaptado e implementado en otros espacios académicos y formativos para docentes interesados en fortalecer el desarrollo de la habilidad de indagación experimental desde una perspectiva contextualizada y responsable ambientalmente.

En síntesis, el aporte más importante de este trabajo a la didáctica de las ciencias radica en evidenciar que un sistema experimental real y vigente ambientalmente puede constituirse en un contexto de indagación guiada en la formación inicial de docentes de química en este caso, incluso bajo restricciones de tiempo propias del espacio académico.

Así mismo, los resultados sugieren que el desarrollo de la habilidad de indagación experimental no ocurre de manera homogénea entre sus componentes, pues mientras la planificación de procedimientos comparativos y la identificación de variables mostraron avances consistentes, la formulación de preguntas y la argumentación de ajustes metodológicos permanecieron en niveles intermedios al finalizar la intervención; sugiriendo que, una intervención de corta duración es suficiente para movilizar los componentes más procedimentales de la indagación, pero que es insuficiente para consolidar los componentes más argumentativos y epistémicos, los cuales probablemente requieren una progresión curricular sostenida durante la formación inicial de profesores de química y no una intervención puntual y aislada.

Así también, se constituye en un insumo para el diseño curricular de espacios académicos de laboratorio, en tanto plantea la necesidad de diferenciar estrategias didácticas según el componente específico de la indagación que se busque fortalecer.

Finalmente, la codificación cualitativa del pretest y la verificación estadística convergen en la misma conclusión: la intervención incide positivamente en la habilidad de indagación, con un desarrollo desigual entre componentes que orienta las implicaciones didácticas reforzar explícitamente la formulación de preguntas comparativas y la argumentación de ajustes basada en evidencia.

9.1. Limitaciones y proyecciones

La validación de los instrumentos pretest y posttest con base en la rúbrica analítica (anexo J) fue realizada por un único evaluador, constituyendo una limitación metodológica que impidió calcular el índice de confiabilidad, si bien la rúbrica cuenta con descriptores explícitos validados externamente (anexo A) se reconoce que la calificación de un solo evaluador introduce un riesgo de subjetividad que futuras investigaciones de esta propuesta pueden controlar.

Como esta investigación se desarrolló en un contexto educativo específico, se tienen algunas limitaciones a considerar al interpretar los resultados, por ejemplo, la intervención se implementó con un grupo reducido de estudiantes participantes y fue durante un periodo de tiempo delimitado, por lo cual los hallazgos corresponden a este contexto particular y no pretenden ser generalizables a todas las poblaciones de formación docente.

Por su parte, aunque con la propuesta se permitió evidenciar avances significativos en la habilidad de indagación experimental, algunos de los indicadores que se definieron requieren procesos formativos más prolongados y experiencias continuas de indagación para alcanzar niveles de desempeño más consolidados.

Con esto, se hace la recomendación para que futuras investigaciones amplíen la implementación de la propuesta a muestras más grandes y diversos contextos de formación inicial y continuada de profesores de ciencias, con el fin de contrastar los resultados y analizar su alcance en diferentes escenarios educativos.

Asimismo, también sería pertinente hacer intervenciones de mayor duración que permitan realizar un seguimiento longitudinal del desarrollo de la habilidad de indagación experimental y de su transferencia a la práctica docente.

Debido a que la intervención fue realizada en un espacio académico ya constituido curricularmente, también implica reconocer que los participantes pudieron desarrollar la habilidad de indagación experimental durante el trayecto de formación en la licenciatura, en otros espacios académicos, y no exclusivamente por la intervención, limitación frente a la validez interna de los resultados y el efecto testing (el solo pretest sensibiliza a los participantes frente a lo que se espera de ellos en el postest) (Shadish, Cook y Campbell, 2002).

Como proyección para futuras implementaciones de esta propuesta didáctica, se sugiere incorporar una visita guiada al laboratorio o micro demostración en vivo de la inyección de extractos en la columna C-18 del HPLC durante la fase de extracción independientemente que los estudiantes en su proceso de formación ya conozcan o no el proceso, esto fortalece la alfabetización instrumental de los participantes sin comprometer el tiempo asignado al diseño y autorregulación experimental, especialmente cuando posiblemente muchos de ellos no tengan un laboratorio en su ejercicio docente.

Por último, se propone explorar la aplicación de esta estrategia en otros contextos de la química experimental y de la química verde, incorporando diferentes técnicas analíticas y problemas científicos contextualizados que continúen fortaleciendo la formación investigativa, el pensamiento crítico y la toma de decisiones fundamentadas en la formación de futuros profesores de química.

10. REFERENCIAS

- Aguiar Andrade, E. A. (2011). El aprendizaje práctico de la química y el uso de los signos de Tolman y Vygotsky. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 8(3), 282–290.
- Aguilar, J., et al. (2021). *Tecnociencia, prácticas pedagógicas y competencias*. Corporación Centro Internacional de Marketing Territorial para la Educación y el Desarrollo.
- Al-Shwafy, K. W. A., Chadni, M., Abg Zamari, M. H. H., & Ioannou, I. (2023). Enzymatic extraction of ferulic acid from brewer's spent grain: Effect of physical pretreatments and optimization using design of experiments. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 51, 102779. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102779>
- Anastas, P. T. y Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.

- Asociación Nacional de Enseñanza de las Ciencias (NSTA). 2024. *Aprendizaje profesional en la enseñanza de las ciencias*. Declaración de posición de la NSTA. <https://www.nsta.org/nstas-official-positions/professional-learning-science-education>.
- Bisquerra Alzina, R. (2009). *Metodología de la investigación educativa*. La Muralla.
- Bragagnolo, F. S., Strieder, M. M., Pizani, R. S., de Souza Mesquita, L. M., González-Miquel, M., & Rostagno, M. A. (2024). Revisiting natural deep eutectic solvents (NADES) as extraction media and ready-to-use purposes. *Trends in Analytical Chemistry*, 176, 117726. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117726>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.
- Braun, V., & Clarke, V. (2023). Toward good practice in thematic analysis: Avoiding common problems and be(com)ing a knowing researcher. *International Journal of Qualitative Methods*, 22, 1–15.
- Caamaño, A. (2003). Los trabajos prácticos en ciencias. En M. P. Jiménez Aleixandre (Coord.), *Enseñar ciencias* (pp. 95–118). Graó.
- Caamaño, A. (2004). Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: ¿Una clasificación útil de los trabajos prácticos? *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 39, 8–19.
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Houghton Mifflin.
- Cañal de León, P., del Carmen, L., García Barros, S., Jiménez Aleixandre, M. P., Márquez, C., Martínez Losada, C., & Sanmartí Puig, N. (2011). *Didáctica de la biología y la geología* (Vol. 2). Graó.
- Castillo, M. C. (2021). El trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias: Una revisión preliminar. *Revista Convergencia Educativa*, 9, 30–44. <http://doi.org/10.29035/rce.9.30>
- Călinoiu, L. F., & Vodnar, D. C. (2019). Thermal processing for the release of phenolic compounds from wheat and oat bran. *Biomolecules*, 10(1), 21. <https://doi.org/10.3390/biom10010021>
- Chevé-Kools, E., Choi, Y. H., Roullier, C., Ruprich-Robert, G., Grougnet, R., Chapeland-Leclerc, F., & Hollmann, F. (2025). Natural deep eutectic solvents (NaDES): Green solvents for pharmaceutical applications and beyond. *Green Chemistry*, 27(28), 8360–8385. <https://doi.org/10.1039/D4GC06386D>
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science education*, 86(2), 175–218. <https://doi.org/10.1002/sce.10001>
- Choi, Y. H., van Spronsen, J., Dai, Y., Verberne, M., Hollmann, F., Arends, I. W. C. E., Witkamp, G.-J., & Verpoorte, R. (2011). Are natural deep eutectic solvents the

- missing link in understanding cellular metabolism and physiology? *Plant Physiology*, 156(4), 1701–1705. <https://doi.org/10.1104/pp.111.178426>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3.^a ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE.
- Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G.-J., Verpoorte, R., & Choi, Y. H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Analytica Chimica Acta*, 766, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.12.019>
- Del Carmen, L. (2011). El lugar de los trabajos prácticos en la construcción del conocimiento científico en la enseñanza de la biología y la geología. En P. Cañal de León, L. del Carmen, S. García Barros, M. P. Jiménez Aleixandre, C. Márquez, C. Martínez Losada, & N. Sanmartí Puig (Coords.), *Didáctica de la biología y la geología* (Vol. 2, pp. 42–55). Graó.
- Dmitrienko, S. G., Apyari, V. V., Tolmacheva, V. V., Gorbunova, M. V., Furletov, A. A., & Zolotov, Y. A. (2024). *Methods for the extraction of organic compounds from solid samples: 1. Solvent extraction. Review of reviews*. *Journal of Analytical Chemistry*, 79(8), 999–1010. <https://doi.org/10.1134/S1061934824700382>
- Dos Santos-Fernandes, L., y Fernandes-Campos, A. (2014). Enseñanza del enlace químico desde una perspectiva situación-problema. *Formación Universitaria*, 7(6), 45–52. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062014000600006>
- Duschl, R. A., & Bybee, R. W. (2014). Planning and carrying out investigations: An entry to learning and to teacher professional development around NGSS science and engineering practices. *International Journal of STEM Education*, 1, 12. <https://doi.org/10.1186/s40594-014-0012-6>
- Estrada Solís, R., Mondragón Rosales, A., González Mora, R., Cuadros Medina, A., Konstantinovich Fokin, S., Martínez Maldonado, P., Bernal Pérez, M. del R., & Miranda Arce, J. (Coords.). (2018). *Formación docente y práctica educativa: Experiencias profesionales de diversas IES*. Red Durango de Investigadores Educativos, A.C.
- Fernández Marchesi, N. E. (2018). Actividades prácticas de laboratorio e indagación en el aula. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 44, 203–218. <https://doi.org/10.17227/ted.num44-9001>
- Ferreira, C., & Sarraguça, M. (2024). A comprehensive review on deep eutectic solvents and its use to extract bioactive compounds of pharmaceutical interest. *Pharmaceuticals*, 17(1), 124. <https://doi.org/10.3390/ph17010124>
- Franco Moreno, R. A., Gallego Badillo, R., & Pérez Miranda, R. (2017). *La dimensión investigativa en la formación inicial de profesores de química*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2012). Experimental and quasi-experimental studies of inquiry-based science teaching: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 82(3), 300–329. <https://doi.org/10.3102/0034654312457206>

- Gangopadhyay, N., Hossain, M. B., Rai, D. K., & Brunton, N. P. (2015). A review of extraction and analysis of bioactives in oat and barley and scope for use of novel food processing technologies. *Molecules*, 20(6), 10884–10909. DOI: 10.3390/molecules200610884
- García Gruezo, M. G., García Gruezo, R. A., Montaña Rodríguez, E. V., Armijo Mogrovejo, A. V., & Llor Pinargote, J. A. (2025). Estrategias didácticas innovadoras para la enseñanza de la química en la educación secundaria: Propuesta desde la didáctica actual. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(3), 4039–4065. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18035
- García-Roldán, A., Piriou, L. P., & Jauregi, P. (2023). Natural deep eutectic solvents as a green extraction of polyphenols from spent coffee ground with enhanced bioactivities. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1072592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1072592>
- Gómez Olarte, L. A., & Rodríguez Saavedra, R. S. (2024). *El potencial antimicrobiano del extracto de las semillas de uva, un contexto para el desarrollo de habilidades investigativas* [Trabajo de grado de licenciatura, Universidad Pedagógica Nacional].
- Grbić, J., Davidović, S., Bogdanović, M., Miljković, M., Petrović, P., Mijin, D., & Djukić-Vuković, A. (2026). Unlocking the potential of natural deep eutectic solvents for the valorization of different biological materials. *Molecules*, 31(5), 835. <https://doi.org/10.3390/molecules31050835>
- Herranen, J., & Aksela, M. (2019). Student-question-based inquiry in science education. *Studies in Science Education*, 55(1), 1–36. <https://doi.org/10.1080/03057267.2019.1658059>
- Hernández-Millán, G., Irazoque-Palazuelos, G., & López-Villa, N. M. (2012). ¿Cómo diversificar los trabajos prácticos? Un experimento ilustrativo y un ejercicio práctico como ejemplar. *Educación Química*, 23, 101–111.
- Hernández Prieto, J. H., Chinome Cipagauta, J. D., & Martínez Pérez, L. F. (2020). Procesos indagatorios en formación inicial de profesores a partir de situaciones problemáticas experimentales. *Bio-grafía*, 13(24). <https://doi.org/10.17227/bio-grafia.vol.13.num24-11565>
- Hikmawanti, N. P. E., Ramadon, D., Jantan, I., Mun'im, A., & other authors. (2021). Natural deep eutectic solvents (NADES): Phytochemical extraction performance enhancer for pharmaceutical and nutraceutical product development. *Plants*, 10(10), 2091. <https://doi.org/10.3390/plants10102091>
- Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88(1), 28–54. <https://doi.org/10.1002/sce.10106>
- Ibáñez Martínez, A. T., & Román Poveda, L. A. (2026). *Objeto virtual de aprendizaje para fortalecer habilidades investigativas en auxiliares de enfermería en el contexto de las enfermedades neurodegenerativas* [Trabajo de grado de licenciatura, Universidad Pedagógica Nacional].

- Jegstad, K. M. (2024). Inquiry-based chemistry education: A systematic review. *Studies in Science Education*, 60(2), 251–313. <https://doi.org/10.1080/03057267.2023.2248436>
- Johnson, R. B., Christensen, L. B., & Turner, L. A. (2019). *Research methods, design, and analysis* (13th ed.). Pearson.
- Kasote, D. M., et al. (2021). Food processing technologies to develop functional foods with enriched bioactive phenolic compounds in cereals. *Frontiers in Plant Science*, 12, 771276. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.771276>
- Knapp, T. R. (2016). Why is the one-group pretest–posttest design still used? *Clinical Nursing Research*, 25(5), 467–472. <https://doi.org/10.1177/1054773816666280>
- Koraqi, H., Aydar, A. Y., Khalid, W., Ercisli, S., Rustagi, S., Ramniwas, S., & Pandiselvam, R. (2024). Ultrasound-assisted extraction with natural deep eutectic solvent for phenolic compounds recovery from *Rosa damascene* Mill.: Experimental design optimization using central composite design. *Microchemical Journal*, 196, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109585>
- Liu, J., Guan, Y., Yang, L., Fang, H., Sun, H., Sun, Y., Yan, G., Kong, L., & Wang, X. (2025). Ferulic acid as an anti-inflammatory agent: Insights into molecular mechanisms, pharmacokinetics and applications. *Pharmaceuticals*, 18(6), 912. <https://doi.org/10.3390/ph18060912>
- Liu, Z., et al. (2022). Improved release of monosaccharides and ferulic acid from wheat bran by hydrothermal pretreatment. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 814246. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.814246>
- López Rúa, A. M., & Tamayo Alzate, Ó. E. (2012). Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 8(1), 145–166.
- Lu, G.-H.; Cheng, S.-Q.; Leung, K.S.-Y.; Ma, J.-Y.; Chan, K.; and Zhao, Z.-Z. (2007) "Determination of free and total available ferulic acid in different types of Chinese Angelica by high performance liquid chromatography," *Journal of Food and Drug Analysis*: Vol. 15 : Iss. 4 , Article 11. Available at: <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2396>
- Machado Ramírez, E. F., Montes de Oca Recio, N., & Mena Campos, A. (2008). El desarrollo de habilidades investigativas como objetivo educativo en las condiciones de la universalización de la educación superior. *Pedagogía Universitaria*, 13(1), 156–180.
- Machado Ramírez, E. F., & Montes de Oca Recio, N. (2009). El desarrollo de habilidades investigativas en la educación superior: La solución de problemas profesionales. *Humanidades Médicas*, 9(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-81202009000200002&lng=es&tlng=es
- Marín Quintero, M. (2021). El trabajo práctico de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales: Una experiencia con docentes en formación inicial. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 49, 163–182. <https://doi.org/10.17227/ted.num49-8221>

- Martín-Diana, A. B., García-Casas, M. J., Martínez-Villaluenga, C., Frías, J., Peñas, E., & Rico, D. (2021). Wheat and oat brans as sources of polyphenol compounds for development of antioxidant nutraceutical ingredients. *Foods*, 10(1), 115. <https://doi.org/10.3390/foods10010115>
- Martínez Rodríguez, D., & Márquez Delgado, D. L. (2014). Las habilidades investigativas como eje transversal de la formación para la investigación. *Tendencias Pedagógicas*, 24, 347–360.
- Martins, I., Veiga, M. L., Teixeira, F., Tenreiro-Vieira, C., Vieira, R. M., Rodrigues, A., & Couceiro, F. (2007). *Educação em ciências e ensino experimental: Formação de professores*. Ministério da Educação/DGIDC.
- Md Yusoff, M. H., Gan, C.-Y., & Shafie, M. H. (2023). Characterization of citric acid monohydrate-glycerol based deep eutectic solvents which could be used as an extraction medium for hydrophilic bioactive components. *Journal of Molecular Liquids*, 389, 122879. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122879>
- Minner, D. D., Levy, A. J., & Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction—What is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474–496. <https://doi.org/10.1002/tea.20347>
- National Research Council. (2012). *A framework for K–12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- Nikolić, V., et al. (2024). Characterization and potential food applications of oat flour and husks from differently colored genotypes as novel nutritional sources of bioactive compounds. *Foods*, 13(23), 3853. <https://doi.org/10.3390/foods13233853>
- Orosz, G., Németh, V., Kovács, L., Somogyi, Z., & Korom, E. (2023). Guided inquiry-based learning in secondary-school chemistry classes: A case study. *Chemistry Education Research and Practice*, 24, 50–70. <https://doi.org/10.1039/D2RP00110A>
- Papadaki, E., Grigorakis, S., Palaiogiannis, D., Lalas, S. I., & Mitlianga, P. (2024). Hydrothermal treatment of wheat bran under mild acidic or alkaline conditions for enhanced polyphenol recovery and antioxidant activity. *Molecules*, 29(6), 1193. <https://doi.org/10.3390/molecules29061193>
- Parga-Lozano, D. L., & Piñeros-Carranza, G. Y. (2018). Enseñanza de la química desde contenidos contextualizados. *Educación Química*, 29(1), 55–64. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2018.1.63683>
- Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, 14, 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003>
- Pyrzynska, K. (2024). Ferulic acid—A brief review of its extraction, bioavailability and biological activity. *Separations*, 11(7), 204. <https://doi.org/10.3390/separations11070204>

- Rocha, D., Freitas, D. S., Castro, T. G., Noro, J., Cavaco-Paulo, A., & Silva, C. (2023). Hydration is not detrimental for glycerol:lactic acid deep eutectic mixtures. *Journal of Molecular Liquids*, 391, 123249. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123249>
- Rodríguez-Cepeda, R., Casas-Mateus, J. A., & Martínez-Cárdenas, D. E. (2020). Laboratorio de química bajo contexto: insumo para el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (47), 33–52.
- Rönnebeck, S., Bernholt, S., & Ropohl, M. (2016). Searching for a common ground—A literature review of empirical research on scientific inquiry activities. *Studies in Science Education*, 52(2), 161–197. <https://doi.org/10.1080/03057267.2016.1206351>
- Ruja, A., Cozma, A., Cozma, B., Horablaga, N. M., Dinulescu, C., Alexa, E., Buzna, C., Cocan, I., Berbecea, A., Dossa, S., et al. (2024). Nutritional, phytochemical, and rheological profiles of different oat varieties and their potential in the flour industry. *Agronomy*, 14(7), 1438. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071438>
- Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference. Houghton Mifflin.
- Strat, T. T. S., Henriksen, E. K., & Jegstad, K. M. (2023). Inquiry-based science education in science teacher education: A systematic review. *Studies in Science Education*, 60(2), 191–249. <https://doi.org/10.1080/03057267.2023.2207148>
- Villamizar, D. (2023). *Formación del profesorado universitario desde el enfoque radical e inclusivo* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid. <https://repositorio.uam.es/server/api/core/bitstreams/e401c87b-cfb2-45f3-b7c9-01fc1708feaf/content>
- Vo, DV, Simmie, G. Evaluación de la indagación científica: una revisión sistemática de la literatura sobre tareas, herramientas y técnicas. *Int J of Sci and Math Educ* 23 , 871–906 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10498-8>
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941–967. <https://doi.org/10.1002/sce.20259>
- Zduńska, K., Dana, A., Kolodziejczak, A., & Rotsztein, H. (2018). Antioxidant properties of ferulic acid and its possible application. *Skin Pharmacology and Physiology*, 31(6), 332–336. <https://doi.org/10.1159/000491755>

11. ANEXOS

Anexo A. Documento de validación del trabajo de grado



VALIDACIÓN DE LA INTERVENCIÓN DIDÁCTICA

Título trabajo de investigación: Desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación: una intervención didáctica de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de avena sativa con NADES

Tesistas: Paula Natalia Vanegas Olarte y Jorge Enrique Parada Restrepo

Director: Blanca Florinda Rodriguez Hernandez

Fecha de envío para validación: 11/06/2026

INTRODUCCIÓN

El presente formato tiene como propósito recopilar la valoración de expertos sobre la propuesta de intervención didáctica y los instrumentos de recolección de información diseñados en el marco de este trabajo de investigación. Su experiencia académica y profesional resulta fundamental para determinar la pertinencia, coherencia, claridad, viabilidad y correspondencia de los diferentes componentes garantizando que las actividades, recursos y estrategias propuestas respondan adecuadamente al contexto educativo en el que serán implementados. Para ello, se presentan seis categorías de evaluación que abarcan la justificación general de la intervención, los instrumentos de evaluación, la secuencia didáctica, la hoja de ruta de laboratorio, la rúbrica analítica y los aspectos relacionados con la implementación y logística.

Se invita a los evaluadores a realizar una revisión crítica y constructiva de la intervención didáctica y de los instrumentos presentados, considerando aspectos como la validez de contenido, la claridad de las instrucciones, la adecuación al nivel educativo, la coherencia metodológica y la capacidad para generar la información requerida. Las observaciones, sugerencias y recomendaciones aportadas contribuirán al fortalecimiento y refinamiento de la propuesta investigativa, favoreciendo la calidad académica, su rigurosidad metodológica y su impacto en los procesos de enseñanza y aprendizaje. Agradecemos de antemano el tiempo dedicado a este proceso y los aportes que considere pertinentes realizar.

Con el propósito de facilitar la comprensión de la propuesta sometida a validación, a continuación se presentan los objetivos que orientan el desarrollo de la investigación. Estos constituyen el eje articulador de la intervención didáctica, los instrumentos de evaluación y las actividades propuestas, por lo que se recomienda tenerlos en consideración durante el proceso de valoración.

Objetivo general

Evaluar la incidencia de una propuesta didáctica a partir del aprendizaje basado en indagación sobre el desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación, contextualizado en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES).

Objetivos específicos

1. Caracterizar el nivel inicial de desempeño de los profesores de química en formación en la habilidad de indagación experimental, antes de la implementación de la intervención didáctica.
2. Diseñar una intervención didáctica de indagación guiada, contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con NADES, orientada al desarrollo de la habilidad de indagación experimental.
3. Implementar la intervención didáctica diseñada mediante una secuencia breve de clases y laboratorio en la que los participantes formulen preguntas experimentales, planifiquen procedimientos comparativos, ejecuten la práctica, registren evidencias y ajusten decisiones metodológicas.
4. Evaluar los cambios en el desempeño de los participantes en la habilidad de indagación experimental, a partir de evidencias obtenidas antes, durante y después de la intervención.

CATEGORÍAS

Categoría 1: Justificación General de la Intervención

A continuación, se presenta una tabla con una serie de criterios relacionados con la justificación general de la intervención didáctica. Para cada criterio, marque con una X la opción que mejor refleje su valoración respecto a la pertinencia, claridad, coherencia y relevancia del componente evaluado. Adicionalmente, en el espacio destinado para observaciones y recomendaciones, registre los comentarios, sugerencias o aspectos de mejora que considere necesarios para fortalecer la propuesta

Item a evaluar	Respuesta y justificación de los investigadores	Pertinente	No pertinente	Observaciones y/o recomendaciones
----------------	---	------------	---------------	-----------------------------------

1.1. Coherencia del propósito general de la intervención con el objetivo de la tesis.	La intervención didáctica tiene como propósito favorecer el desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación mediante una secuencia de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de Avena sativa con NADES. Este propósito es coherente con el objetivo general de la tesis, ya que la intervención constituye el medio a través del cual se busca analizar la incidencia de la indagación guiada en el desarrollo de dicha habilidad.	x		Coherencia impecable. La transición desde un enfoque prescriptivo a uno indagativo es el núcleo central de la investigación
1.2. Pertinencia de la problemática que fundamenta la intervención.	La problemática que fundamenta la intervención es pertinente porque parte del reconocimiento de que muchas prácticas de laboratorio en la formación inicial del profesorado de química continúan desarrollándose bajo esquemas prescriptivos o tipo “receta”, centrados en seguir instrucciones y obtener resultados esperados. Frente a esto, la intervención propone una experiencia experimental que exige formular preguntas, tomar decisiones metodológicas, controlar variables, registrar evidencias y justificar ajustes, lo cual responde directamente al problema identificado en el trabajo de grado.	x		Se justifica plenamente. Romper el paradigma de "recetas de cocina" en laboratorios universitarios es vital para formar educadores críticos

1.3. Justificación del enfoque de indagación guiada para el grupo de participantes.	El enfoque de indagación guiada es pertinente para profesores de química en formación, porque permite equilibrar la autonomía del participante con una orientación docente suficiente para sostener el proceso experimental. La intervención no entrega un protocolo cerrado, pero tampoco plantea una actividad completamente abierta; en cambio, ofrece una estructura que orienta la formulación de preguntas, la selección de variables, la planificación del procedimiento y la revisión de decisiones metodológicas. Esto favorece el desarrollo progresivo de la habilidad de indagación experimental.	x		Excelente andamiaje. La indagación guiada evita la frustración cognitiva en sistemas de alta complejidad química como los NADES
1.4. Pertinencia formativa de la intervención para profesores de química en formación.	La intervención es pertinente desde el punto de vista formativo porque permite que los futuros docentes comprendan el laboratorio como un espacio de construcción de evidencia, toma de decisiones y reflexión metodológica, y no únicamente como un lugar para ejecutar técnicas. Esta experiencia puede contribuir a que los profesores en formación reconozcan la importancia de diseñar prácticas experimentales más abiertas, contextualizadas y orientadas al desarrollo de habilidades científicas en sus futuros escenarios de enseñanza.	x		Formar al profesor en indagación a través de la vivencia propia asegura la posterior transferencia didáctica a sus aulas de secundaria

1.5. Pertinencia del contexto experimental: extracción de ácido ferúlico de Avena sativa con NADES.	El contexto experimental seleccionado es pertinente porque articula contenidos de química, sostenibilidad y análisis de matrices alimentarias mediante una situación actual y didácticamente significativa. La extracción de ácido ferúlico del salvado de avena con NADES permite trabajar variables como tipo de solvente, proporción molar, cantidad de agua, temperatura, tiempo y sistema de extracción, lo cual genera condiciones adecuadas para que los participantes formulen preguntas experimentales, comparen procedimientos y justifiquen decisiones metodológicas.	x		Eje temático de vanguardia. Conecta directamente principios de Química Verde (ODS 12) con balances de masa y variables instrumentales
1.6. Coherencia entre la justificación didáctica, metodológica, formativa, institucional y contextual de la intervención.	La intervención mantiene coherencia entre las diferentes dimensiones de la justificación del trabajo de grado. Desde lo didáctico, busca superar prácticas de laboratorio reproductivas; desde lo metodológico, focaliza una habilidad observable y evaluable; desde lo formativo, aporta a la preparación de futuros docentes de química; desde lo institucional, se articula con un espacio académico relacionado con alimentos y laboratorio; y desde lo contextual y científico, emplea un sistema experimental actual vinculado con química verde y valorización de residuos agroindustriales.	x		Existe una sinergia robusta entre la problemática de la agroindustria de la avena y los conceptos curriculares de la Licenciatura.

1.7. Viabilidad y delimitación del alcance de la intervención.	La intervención es viable porque se plantea como una secuencia breve y acotada, ajustada a condiciones reales de tiempo, laboratorio y disponibilidad de recursos. Su alcance está delimitado al desarrollo de la habilidad de indagación experimental, sin pretender abarcar todas las dimensiones de la indagación científica ni realizar una optimización química exhaustiva del sistema de extracción. Esta delimitación fortalece la coherencia metodológica del trabajo y permite evaluar cambios concretos en el desempeño de los participantes.	x		La tercerización de las lecturas cromatográficas (HPLC) a los tesisas garantiza la viabilidad temporal de la secuencia en el semestre.
--	---	---	--	--

A partir de los criterios evaluados en esta categoría, ¿La justificación general de la intervención cumple con los criterios de pertinencia, coherencia y suficiencia para fundamentar la propuesta didáctica?

Marque con una X la opción correspondiente:

Si <u> x </u>	No <u> </u>
-----------------	----------------

Justificación del dictamen: La propuesta teórica se encuentra firmemente anclada en la didáctica contemporánea de las ciencias. El uso de subproductos agroindustriales como el salvado de avena contextualiza de manera brillante el aprendizaje, dotando al laboratorio de química de un propósito real y ambientalmente responsable.

Recomendaciones generales para el ajuste del componente evaluado:

Categoría 2: Validación de los Instrumentos de Evaluación (Pretest y Postest)

Revise los criterios relacionados con los instrumentos de evaluación (pretest y postest) y marque con una X la opción correspondiente a su valoración. Considere aspectos como la claridad, pertinencia, coherencia con los objetivos de la investigación y capacidad para

evaluar la habilidad de indagación experimental. Registre las observaciones y recomendaciones que considere necesarias.

Item a evaluar	Respuesta y justificación de los investigadores	Pertinente	No pertinente	Observaciones y/o recomendaciones
2.1. El pretest evalúa adecuadamente el nivel inicial de desarrollo de la habilidad de indagación experimental, considerando aspectos como la formulación de preguntas experimentales pertinentes, la planificación de procedimientos comparativos, el control de variables relevantes, la ejecución sistemática de prácticas experimentales, el registro de datos y evidencias, el reconocimiento de dificultades metodológicas y la propuesta de ajustes metodológicos justificados.	El diseño del pretest permite caracterizar el nivel inicial de desarrollo de la habilidad de indagación experimental de los participantes mediante un contexto problematizador que exige la formulación de preguntas investigables, la planificación de procedimientos comparativos y la toma de decisiones metodológicas. Asimismo, las actividades propuestas facilitan la recopilación de evidencias relacionadas con el control de variables, la anticipación de dificultades experimentales y la justificación de posibles ajustes metodológicos, proporcionando información relevante sobre los conocimientos y habilidades previas de los profesores de química en formación.			Sugerencia: Mantenerlo abierto es adecuado, pero se debe asegurar que no intimide al estudiante sin conocimientos previos de NADES. Las aclaraciones conceptuales previas son correctas.

2.2 El posttest evalúa adecuadamente la transferencia de la habilidad de indagación experimental a un nuevo contexto de estudio, mediante situaciones que implican un mayor nivel de complejidad y variabilidad, permitiendo valorar la capacidad de los participantes para formular preguntas experimentales pertinentes, planificar procedimientos, controlar variables, analizar e interpretar datos, reconocer dificultades metodológicas y proponer ajustes fundamentados en escenarios diferentes a los abordados durante la intervención didáctica.	El diseño del posttest permite valorar el desarrollo de la habilidad de indagación experimental. Para ello, se plantea una situación con características y condiciones diferentes que exige a los participantes movilizar y aplicar los conocimientos, procedimientos y habilidades adquiridas, tales como la formulación de preguntas investigables, la planificación de estrategias experimentales, el control de variables, el análisis de evidencias y la toma de decisiones metodológicas fundamentadas. De esta manera, el instrumento proporciona evidencias sobre la capacidad de los participantes para utilizar dichas habilidades de forma autónoma y flexible en escenarios novedosos.	x		Excelente diseño del post-test. No es memorístico; exige un verdadero análisis metodológico e interpretativo a partir de datos reales de anomalías experimentales.
--	--	---	--	--

A partir de los criterios evaluados en esta categoría, ¿Considera que el pretest y el posttest presentan la claridad, pertinencia y coherencia necesarias para evaluar la habilidad de indagación experimental antes y después de la intervención didáctica?

Marque con una X la opción correspondiente:

Si <u> x </u>	No <u> </u>
-----------------	----------------

Justificación del dictamen: Ambos instrumentos superan el enfoque tradicional de evaluación de contenidos conceptuales y se enfocan de manera directa en la dimensión procedimental y metodológica de la competencia científica (indagación).

Recomendaciones generales para el ajuste del componente evaluado:

Categoría 3: Validación de la Secuencia Didáctica (intervenciones 0 a 3)

Revise los criterios relacionados con la secuencia didáctica y marque con una X la opción correspondiente a su valoración. Considere la coherencia entre los objetivos y las actividades propuestas, así como la viabilidad y contribución de cada sesión al desarrollo de la habilidad de indagación experimental. Registre las observaciones y recomendaciones que considere pertinentes.

Item a evaluar	Respuesta y justificación de los investigadores	pertinente	No pertinente	Observaciones y/o recomendaciones
3.1. La intervención 0 presenta actividades coherentes con el objetivo de contextualizar la problemática, despertar el interés de los participantes e identificar sus conocimientos previos sobre el tema de estudio.	El objetivo de la intervención 0 es despertar la curiosidad de los participantes sobre los cereales, reconocer el valor del salvado de avena y contextualizar la importancia de la extracción de ácido ferúlico. La actividad de clasificación de granos, el análisis de etiquetas nutricionales y el uso de infografías guiadas mediante preguntas orientadoras permiten activar conocimientos previos, promover la reflexión sobre el aprovechamiento sostenible de subproductos agroindustriales y generar las bases conceptuales necesarias para el desarrollo posterior de la indagación experimental.	x		La clasificación inicial táctil/visual de cereales promueve una excelente fase de enganche u "Orientación".

3.2. La intervención 1 presenta actividades coherentes con el objetivo de formular preguntas experimentales, plantear hipótesis e identificar variables y condiciones de control para el diseño experimental.	El objetivo de la intervención 1 es formular una pregunta experimental clara y viable, así como identificar variables y condiciones de control para el diseño experimental. La lectura guiada de las infografías sobre ácido ferúlico, NADES y métodos de extracción, junto con las actividades de discusión, retroalimentación y estructuración del diseño experimental, permiten que los participantes construyan una propuesta experimental fundamentada, articulando la pregunta de investigación, la hipótesis, las variables y el procedimiento que será ejecutado posteriormente.	x		La revisión colectiva de la coherencia interna del diseño experimental antes de ingresar al laboratorio previene sesgos metodológicos graves
3.3. La intervención 2 es viable en términos de tiempo, recursos y organización para la ejecución del diseño experimental, el registro sistemático de datos y la regulación del procedimiento ante posibles dificultades.	El objetivo de la intervención 2 es ejecutar el diseño experimental propuesto, controlando las variables definidas y registrando de manera sistemática las observaciones obtenidas. La organización de la práctica experimental, el uso de una hoja de ruta para el registro de datos y el acompañamiento constante de los tesisas favorecen la viabilidad de la sesión en términos de tiempo, recursos y seguridad, permitiendo además que los participantes identifiquen dificultades metodológicas y realicen ajustes justificados durante el desarrollo de la extracción.			Sugerencia clave: Debido a la alta viscosidad de los NADES cítrico/láctico-glicerol , vigilar de cerca la agitación mecánica e inicial. 105 min de investigación es justo pero suficiente.

3.4. La intervención 3 promueve adecuadamente el análisis e interpretación de resultados, la argumentación basada en evidencia y la comunicación de los hallazgos obtenidos durante la intervención.	El objetivo de la intervención 3 es promover el análisis, la argumentación y la comunicación de los resultados obtenidos durante el proceso experimental. Las actividades de interpretación de los resultados reportados por HPLC, la elaboración de carteleros, la comparación entre grupos y las discusiones guiadas mediante preguntas orientadoras favorecen la construcción de explicaciones sustentadas en evidencia, la reflexión sobre las decisiones metodológicas tomadas y la comunicación de conclusiones fundamentadas.			El andamiaje para que comprendan la cromatografía (HPLC) sin necesidad de operar el instrumento es excelente y formativamente rico
--	--	--	--	--

A partir de los criterios evaluados en esta categoría, ¿La secuencia didáctica cumple con los criterios de coherencia, progresión metodológica y pertinencia para favorecer el desarrollo de la habilidad de indagación experimental?

Marque con una X la opción correspondiente:

Si ☒	No ☐
--	-----------------------------

Justificación del dictamen: L

a secuencia respeta rigurosamente el modelo de ciclo de indagación. Se observa una progresión lógica que va desde la estimulación sensorial del grano de avena hasta la abstracción e interpretación cromatográfica.

Recomendaciones generales para el ajuste del componente evaluado:

Categoría 4: Validación de la Guía de Laboratorio

Revise la hoja de ruta de laboratorio y valore la pertinencia, claridad y coherencia de sus componentes en relación con la metodología de indagación guiada y los objetivos de la

investigación. Considere aspectos como la claridad de la contextualización, la pertinencia de la situación problema, la coherencia con el enfoque de indagación guiada, la orientación para la selección de variables y controles, la construcción del procedimiento experimental, el registro de datos, dificultades y ajustes, así como la capacidad de la guía para promover el análisis, la reflexión y la formulación de conclusiones basadas en evidencia. Marque con una X la opción correspondiente a su valoración y registre las observaciones o recomendaciones que considere necesarias para fortalecer el instrumento.

Item a evaluar	Respuesta y justificación de los investigadores	Pertinente	No pertinente	Observaciones y/o recomendaciones
4.1. Claridad y pertinencia de la contextualización, situación problema y propósito de la práctica experimental.	La guía presenta una contextualización clara y pertinente, ya que introduce a los participantes en el uso de NADES como alternativa sostenible para la extracción de compuestos fenólicos del salvado de avena. La situación problema permite relacionar el contenido químico con un contexto ambiental y agroindustrial real, favoreciendo que los profesores de química en formación comprendan el sentido de la práctica y su relación con la valorización de residuos, la química verde y el ODS 12.	x		bien estructurado el andamiaje sobre aceptores (HBA) y donadores (HBD) de puentes de hidrógeno.
4.2. Coherencia de la guía con el enfoque de indagación guiada.	La guía es coherente con el enfoque de indagación guiada porque ofrece una ruta general del laboratorio, preguntas orientadoras y tablas de apoyo, pero no entrega un procedimiento cerrado. Esto permite que los participantes tomen decisiones metodológicas sobre el tipo de NADES, la proporción molar, la cantidad de agua, el sistema asistido y la variable experimental a comparar. De esta manera, se orienta el	x		Ofrecer opciones discretas (citrato-glicerol vs lactato-glicerol, batelada vs ultrasonido) encausa metodológicamente el diseño experimental.

	proceso sin convertir la práctica en una receta.			
4.3. Pertinencia de las secciones para el diseño experimental: variables, controles, pregunta, hipótesis y objetivo.	Las secciones destinadas al diseño experimental son pertinentes porque permiten que los participantes seleccionen una variable independiente, definan una variable dependiente, establezcan variables de control y justifiquen su importancia. Además, la formulación de la pregunta de indagación, la hipótesis y el objetivo experimental favorece la articulación entre el problema, las decisiones metodológicas y el análisis posterior de los resultados.			Obligar al estudiante a justificar por qué controla cada parámetro físico-químico estimula el pensamiento crítico profundo
4.4. Adecuación de las secciones para la construcción del procedimiento, registro de datos, dificultades y ajustes durante la ejecución.	La guía incluye espacios adecuados para que los participantes redacten el procedimiento paso a paso, registren condiciones experimentales, observaciones, dificultades y ajustes realizados durante la práctica. Esto es fundamental para evaluar la habilidad de indagación experimental, ya que permite evidenciar no solo el resultado obtenido, sino también la toma de decisiones, el control del proceso y la capacidad de justificar modificaciones metodológicas durante la ejecución.			Aporte metodológico: La inclusión de la columna "¿Alguna dificultad? ¿Qué ajuste hicieron?" es brillante para registrar la autorregulación.

4.5. Pertinencia de las secciones de análisis, conclusiones, reflexión metacognitiva y revisión final.	Las secciones finales son pertinentes porque orientan a los participantes a comparar los ensayos, identificar qué condición favoreció la extracción, contrastar los resultados con la hipótesis inicial y proponer mejoras al procedimiento. Además, la reflexión metacognitiva permite reconocer aprendizajes sobre el diseño experimental y su posible aplicación en futuras clases de química. La lista de chequeo final fortalece la autorregulación del grupo antes de iniciar la práctica y ayuda a verificar la coherencia interna del diseño propuesto.			Las preguntas de transposición didáctica ("¿Cómo usarías esta experiencia en el colegio?") añaden un valor invaluable para licenciados en formación
--	---	--	--	---

¿A partir de los criterios evaluados en esta categoría, ¿La guía de laboratorio cumple con los criterios de claridad, pertinencia y coherencia necesarios para orientar una práctica experimental basada en indagación guiada?

Marque con una X la opción correspondiente:

Si x_	No ____
-------	---------

Justificación del dictamen:

La guía equilibra perfectamente la estructura y la libertad metodológica. Proporciona un marco de seguridad química indispensable en laboratorios de pregrado sin sofocar la autonomía del estudiante

Recomendaciones generales para el ajuste del componente evaluado:

Categoría 5: Validación de la Rúbrica Analítica

Revise los criterios relacionados con la rúbrica analítica empleada para valorar la habilidad de indagación experimental. Considere la pertinencia de los indicadores propuestos, la claridad y diferenciación de los niveles de desempeño, la observabilidad de los criterios, la

coherencia de la rúbrica con el pretest, el postest y la hoja de ruta de laboratorio, así como su capacidad para valorar cambios en el desempeño de los participantes antes, durante y después de la intervención. Marque con una X la opción correspondiente a su valoración y registre las observaciones o recomendaciones que permitan mejorar la claridad, precisión y utilidad evaluativa de la rúbrica.

Item a evaluar	Respuesta y justificación de los investigadores	Pertinente	No pertinente	Observaciones y/o recomendaciones
5.1. Pertinencia de los indicadores para evaluar la habilidad de indagación experimental.	Los indicadores propuestos son pertinentes porque abarcan dimensiones centrales de la indagación experimental: formulación de preguntas experimentales, planificación de procedimientos comparativos, identificación de variables y controles, ejecución sistemática, registro de datos, reconocimiento de dificultades metodológicas y realización de ajustes justificados. En conjunto, estos indicadores permiten valorar la habilidad de indagación experimental como un proceso integral y no como una acción aislada.	x		Los siete indicadores representan de forma fidedigna y exhaustiva las sub-habilidades del quehacer científico experimental.
5.2. Claridad, diferenciación y progresión de los niveles de desempeño 1 a 4.	Los niveles de desempeño son claros y diferenciables, ya que describen una progresión desde desempeños iniciales, vagos o desorganizados, hasta desempeños rigurosos, sistemáticos y justificados. Esta organización permite identificar avances graduales en los participantes y facilita que el evaluador distinga entre niveles bajos, intermedios y altos de desarrollo de la habilidad evaluada.			La escala lógicamente progresiva evita subjetividades y simplifica la asignación de puntajes objetivos por parte de los evaluadores

5.3. Observabilidad de los criterios descritos en la rúbrica.	Los criterios son observables porque se relacionan con evidencias concretas que pueden identificarse en los instrumentos y en la práctica: preguntas formuladas, procedimientos escritos, variables seleccionadas, controles definidos, registros de datos, dificultades reportadas y ajustes metodológicos propuestos. Esto favorece una evaluación más objetiva y reduce la ambigüedad al momento de asignar un nivel de desempeño.			Criterios nítidos. Términos como "delimita una comparación concreta" o "anticipa puntos críticos" facilitan el análisis cualitativo
5.4. Coherencia de la rúbrica con el pretest, el postest y la guía de laboratorio.	La rúbrica es coherente con los instrumentos de recolección de información, ya que sus indicadores se corresponden con las acciones solicitadas en el pretest, el postest y la guía de laboratorio. Estos instrumentos demandan que los participantes formulen preguntas, planifiquen procedimientos, controlen variables, registren evidencias, analicen dificultades y propongan ajustes. Por tanto, la rúbrica permite valorar de manera articulada las evidencias obtenidas antes, durante y después de la intervención.			Excelente alineación constructiva. Es el instrumento de evaluación perfecto para un estudio de diseño cuasi-experimental

5.5. Capacidad de la rúbrica para valorar cambios en el desempeño de los participantes.	La rúbrica permite valorar cambios en el desempeño porque establece niveles progresivos que pueden aplicarse en distintos momentos de la intervención. Esto facilita comparar el nivel inicial de los participantes con sus desempeños posteriores, identificando avances en la precisión de las preguntas, la coherencia del diseño experimental, el control de variables, la sistematicidad en la ejecución, la calidad del registro y la justificación de ajustes metodológicos.			Permitirá visibilizar de manera precisa los aprendizajes alcanzados por los profesores en formación a lo largo de las intervenciones
---	---	--	--	--

A partir de los criterios evaluados en esta categoría, ¿La rúbrica analítica cumple con los criterios de claridad, observabilidad y coherencia necesarios para evaluar la habilidad de indagación experimental?

Marque con una X la opción correspondiente:

Si <u> x </u>	No <u> </u>
-----------------	------------------

Justificación del dictamen:

La rúbrica es metodológicamente intachable. Se destaca la descripción de los niveles de autorregulación y flexibilidad metodológica (indicadores 6 y 7), que comúnmente se omiten en rúbricas tradicionales de laboratorio.

Recomendaciones generales para el ajuste del componente evaluado:

Categoría 6: Validación de la Implementación y Logística

Revise los criterios relacionados con la organización general de la implementación y las condiciones logísticas de la intervención didáctica. Considere aspectos como la pertinencia del cronograma, la distribución del tiempo en las sesiones, la coherencia entre actividades, productos esperados e indicadores de evaluación, la claridad del rol de los tesisas como docentes-facilitadores, la disponibilidad de recursos, materiales, espacios y procedimientos requeridos, así como la organización para la recolección de evidencias y el cierre de la intervención. Marque con una X la opción correspondiente a su valoración y registre las

observaciones o recomendaciones que considere necesarias para garantizar la viabilidad y coherencia del proceso.

Item a evaluar	Respuesta y justificación de los investigadores	Pertinente	No pertinente	Observaciones y/o recomendaciones
6.1. Pertinencia del cronograma y distribución del tiempo en las sesiones de la intervención.	La distribución del tiempo es pertinente porque organiza la intervención en sesiones progresivas: motivación, problematización y diseño experimental, ejecución y regulación, y análisis, argumentación y comunicación. Cada sesión cuenta con una duración definida para las fases de orientación, conceptualización, investigación, conclusión y cierre, lo que permite desarrollar la habilidad de indagación experimental de manera gradual. Además, el tiempo asignado responde a la complejidad de cada momento, dando mayor duración a las actividades de diseño, ejecución experimental, socialización de resultados y aplicación de instrumentos.	x		El tiempo global planeado es coherente con los ritmos normales del trabajo práctico universitario

6.2. Coherencia entre actividades, productos esperados e indicadores de evaluación.	La planeación presenta coherencia entre las actividades propuestas, los productos esperados y los indicadores de evaluación. En la sesión de diseño experimental, los productos se relacionan con la formulación de preguntas, hipótesis, variables y controles. En la ejecución, se espera obtener extractos rotulados y registros del procedimiento, datos, observaciones, dificultades y ajustes. En la sesión final, los productos incluyen carteleras, conclusiones grupales, comunicación de resultados y posttest individual. Esto permite recoger evidencias claras del proceso de indagación experimental antes, durante y después de la práctica.			Los productos propuestos están perfectamente sincronizados con las fases de indagación y los momentos de evaluación
6.3. Claridad del rol de los tesisas como docentes-facilitadores durante la intervención.	El rol de los tesisas está claramente definido, ya que actúan como facilitadores del proceso y no como transmisores directos de respuestas. Su función consiste en entregar recursos, moderar discusiones, plantear preguntas orientadoras, retroalimentar los diseños experimentales, supervisar la seguridad en el laboratorio, acompañar la ejecución y guiar la interpretación de resultados. Esta mediación es coherente con la indagación guiada, porque permite orientar a los participantes sin eliminar su autonomía en la toma de decisiones metodológicas.			Definición perfecta de la facilitación didáctica. Se debe asegurar el rigor en el registro del diario de campo de los tesisas

6.4. Viabilidad de los recursos, materiales, espacios y procedimientos requeridos para la implementación.	La implementación es viable porque la planeación contempla recursos concretos para cada momento, como infografías, hojas de situación problema, etiquetas nutricionales, formatos de diseño experimental, hoja de ruta de laboratorio, materiales para carteleras y resultados de HPLC. Además, se especifica que los participantes realizan el diseño y la extracción, mientras que los tesisas asumen la lectura por HPLC debido a la disponibilidad de tiempo y equipos. Esto permite ajustar la práctica a las condiciones reales del contexto educativo y del laboratorio.	x		Es altamente viable. El uso de metodologías de microescala en la extracción con solventes eutécticos optimiza el uso de insumos.
6.5. Pertinencia de la organización logística para la recolección de evidencias y cierre de la intervención.	La organización logística es pertinente porque contempla distintos momentos de recolección de información: consentimiento informado, pretest, formatos de diseño experimental, hoja de ruta de laboratorio, registros de observaciones, extractos rotulados, carteleras grupales, grabaciones de audio, diálogo guiado y posttest individual. Esta organización permite documentar el proceso de aprendizaje y valorar los cambios en la habilidad de indagación experimental. Además, el cierre final permite sintetizar los aprendizajes relacionados con química verde, NADES, control de variables, interpretación de resultados y argumentación basada en evidencia.	x		La triangulación cualitativa y cuantitativa propuesta otorgará validez metodológica y analítica robusta al reporte final de la tesis

A partir de los criterios evaluados en esta categoría, ¿La implementación y logística propuestas cumplen con las condiciones de viabilidad, organización y coherencia necesarias para el desarrollo de la intervención didáctica?

Marque con una X la opción correspondiente:

Si __x__	No ____
-------------	---------

Justificación del dictamen:

El diseño logístico es altamente pragmático y riguroso. Al delegar la medición por HPLC a los tesisistas se resuelven de raíz las restricciones de tiempos de uso de equipos analíticos avanzados en las prácticas docentes

Recomendaciones generales para el ajuste del componente evaluado:

Reúne los elementos de rigor experimental y pertinencia didáctica necesarios para incidir en la formación inicial de profesores de química. El diseño experimental de extracción de ácido ferúlico con NADES como modelo didáctico de indagación guiada constituye un aporte innovador a la enseñanza de la química verde en Colombia.

Firma validador

__Leidy Gabriela Ariza A_____

Nombre:

Dictamen, marque con una X:

PROBADO __x__	NO APROBADO ____	APROBADO CON OBSERVACIONES ____
---------------	------------------	------------------------------------

Anexo B. Consentimiento informado



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN QUÍMICA**

TRABAJO DE GRADO: Desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación: una intervención didáctica de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de *Avena sativa* con NADES.

Docentes investigadores: Jorge Enrique Parada Restrepo y Paula Natalia Vanegas Olarte.

Directora: Blanca Florinda Rodríguez Hernández.

Codirector: Diego Alexander Blanco Martínez.

NOMBRE: _____ **FECHA:** _____

CONSENTIMIENTO INFORMADO

La participación en esta investigación es de carácter completamente voluntario. Antes de decidir si desea participar, es importante que conozca el propósito y las condiciones del estudio. Este proyecto tiene como finalidad recolectar información con fines académicos e investigativos, específicamente para analizar conocimientos previos relacionados con el tema de estudio. Su participación consistirá en responder un instrumento diagnóstico (pretest), el cual no tendrá ninguna incidencia en su evaluación académica ni generará consecuencias negativas en caso de decidir no participar.

La información que usted proporcione será tratada con estricta confidencialidad. Los datos recolectados serán utilizados únicamente con fines investigativos y académicos. En ningún caso se divulgará información que permita su identificación personal.

El tratamiento de sus datos se realizará conforme a lo establecido en la Ley 1581 de 2012 y el Decreto 1377 de 2013, los cuales regulan la protección de datos personales en Colombia.¹

Asimismo, esta investigación se desarrolla bajo los principios éticos y lineamientos institucionales de la Universidad Pedagógica Nacional, garantizando el respeto por la dignidad, la autonomía y los derechos de los participantes.

Al aceptar su participación, usted manifiesta que ha sido informado(a) de manera clara sobre los objetivos del estudio, el uso de la información y sus derechos como participante.

Marque con una (X):

☐ Acepto participar en la investigación

☐ No acepto participar en la investigación

Nombre del participante: _____

Firma: _____ Fecha: _____

1. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981>

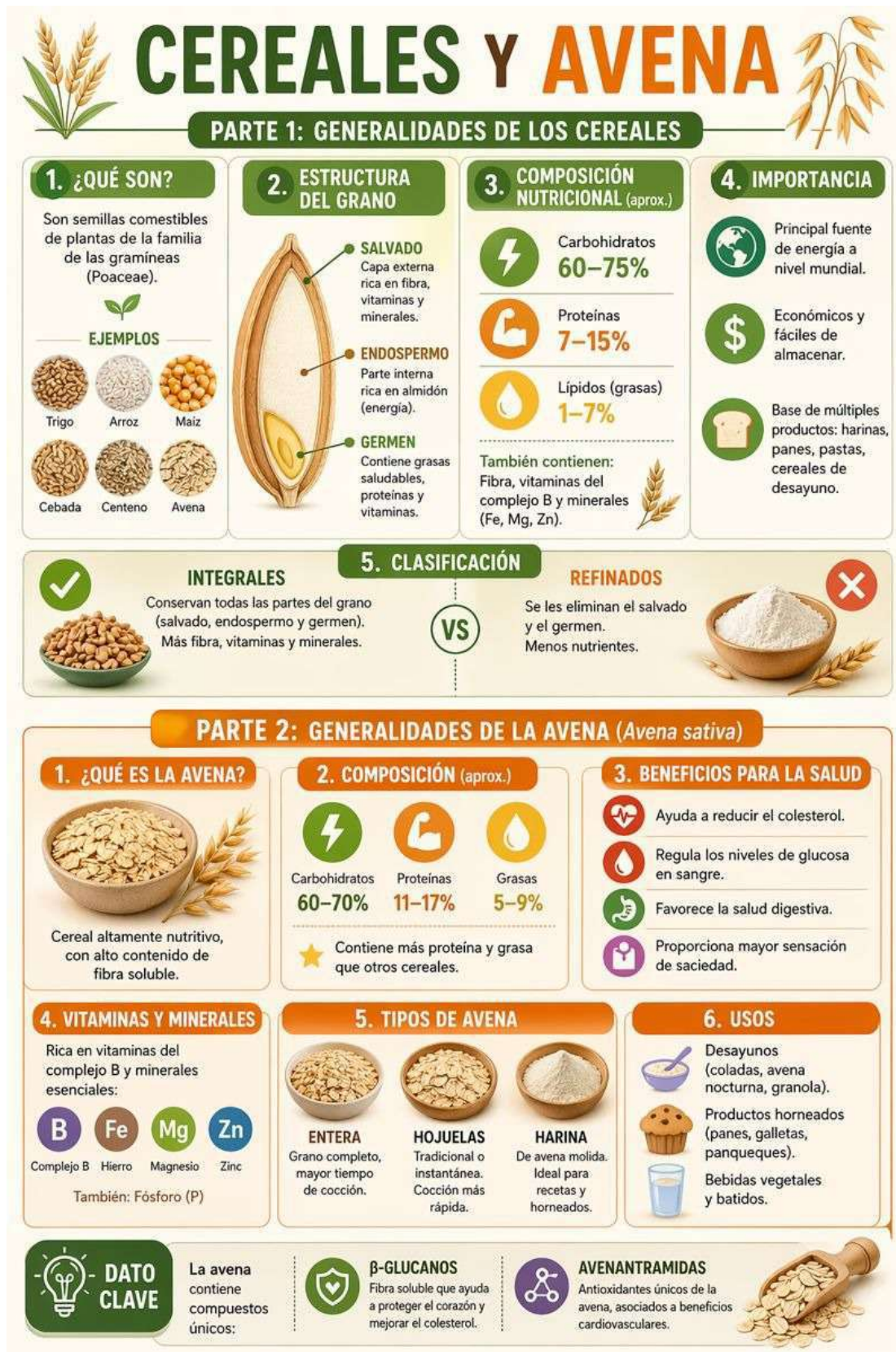
Anexo C. Paquete de material complementario

Situación problema:

“En una empresa dedicada a procesar avena para la producción de harina, se observa que en el proceso se generan grandes cantidades de salvado de avena, aunque este material suele destinarse a usos de bajo valor comercial, se reconoce que contiene compuestos fenólicos de interés, entre ellos ácido ferúlico, a partir de este residuo se desea hacer la extracción de este analito de interés. Debido al potencial del ácido ferúlico en aplicaciones alimentarias y cosméticas, la empresa desea explorar una ruta preliminar de recuperación. Su grupo de trabajo ha sido seleccionado para buscar una formulación de extracción como alternativa que evite depender exclusivamente de solventes orgánicos convencionales y sea amigable con el medio ambiente. ¿Qué alternativa para la extracción propone de manera que se cumpla con las condiciones ambientales que se les solicita y no emplee disolventes orgánicos convencionales?”

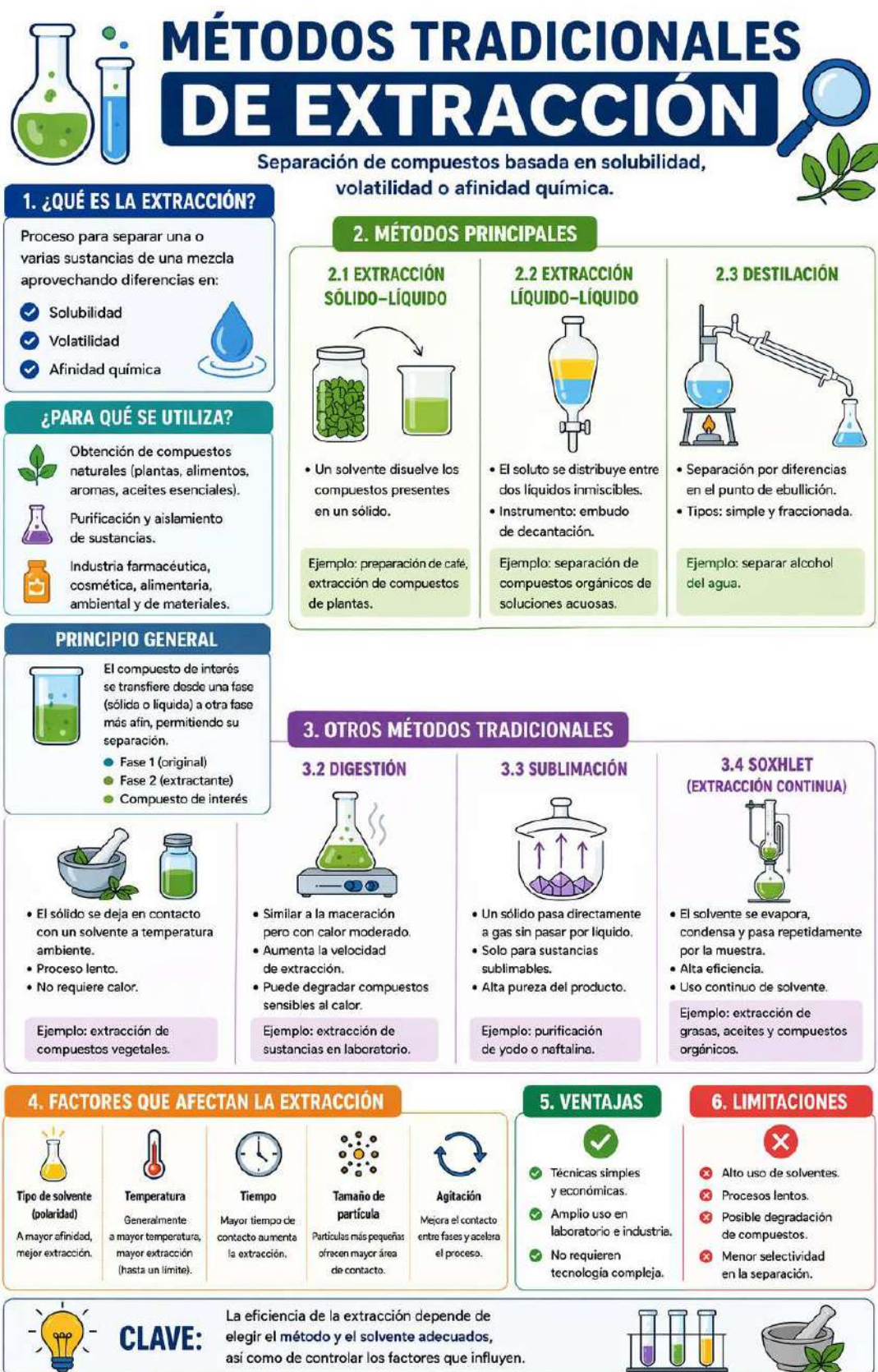
Anexo C Figura 1.

Infografía de cereales y avena



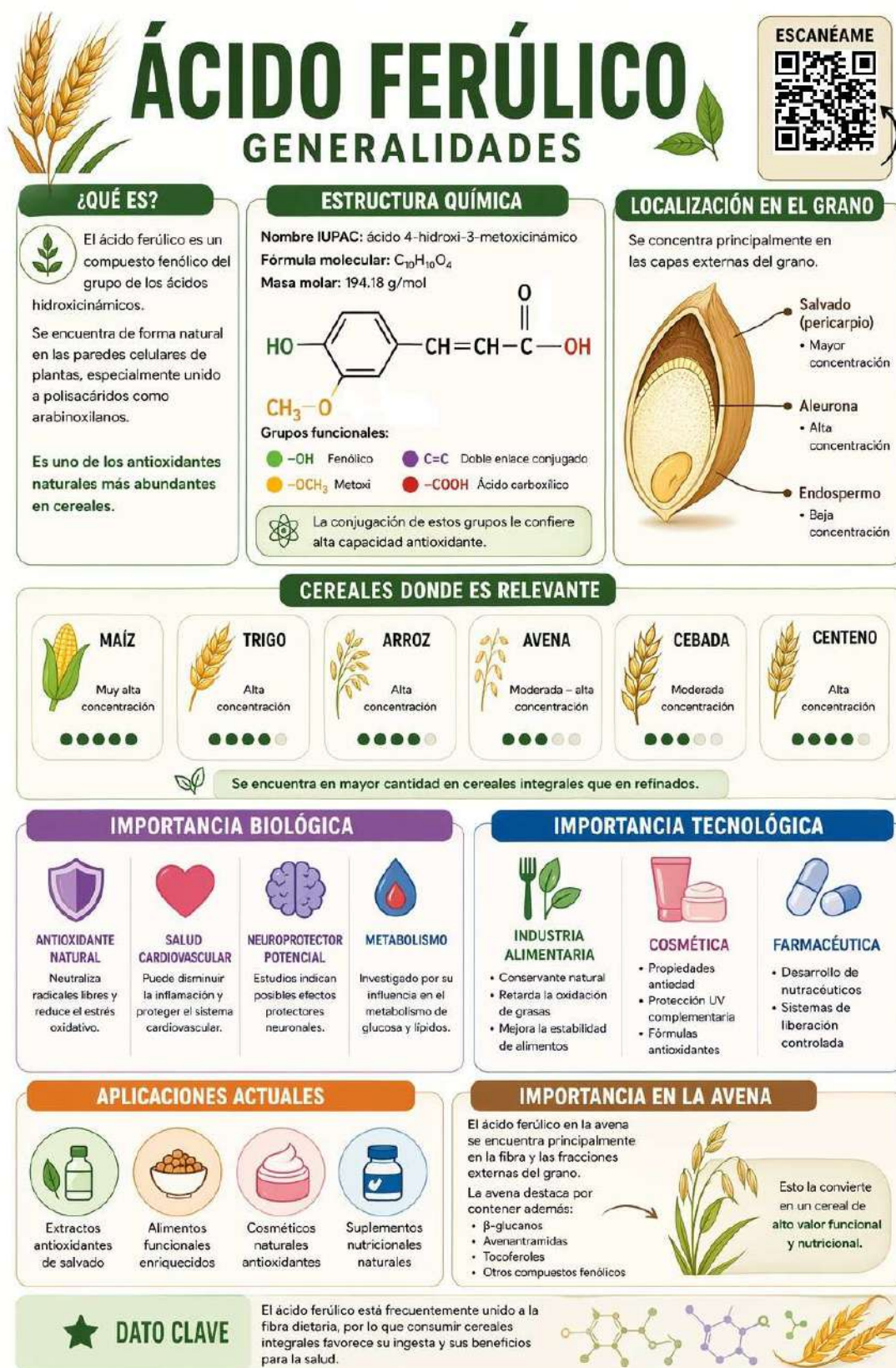
Anexo C Figura 2.

Infografía de métodos de extracción



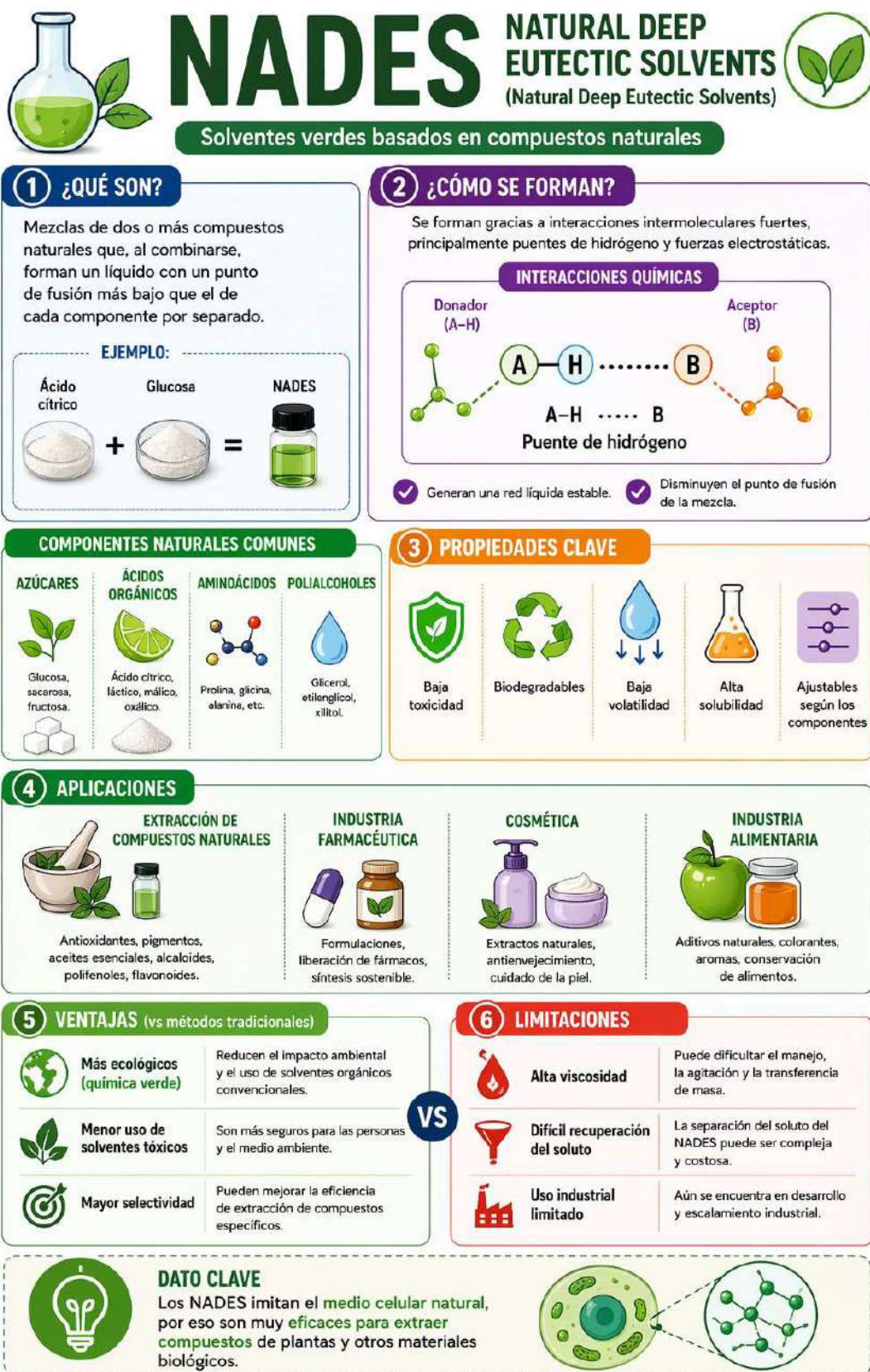
Anexo C Figura 3.

Infografía del ácido ferúlico



Anexo C Figura 4.

Infografía sobre NADES



Anexo D. Planeación de las intervenciones

Planeación de sesiones de indagación experimental con NADES

Organización de la información en formato de tabla: sesiones 0 a 3

Intervención	Objetivo de aprendizaje	Fases de la indagación	Actividades a desarrollar	Duración	Producto del grupo	Papel del docente (tesistas)	Indicadores
MOTIVACIÓN (0)	Despertar la curiosidad sobre los cereales, diferenciando los integrales de los ultraprocesados, reconocer el salvado como subproducto valioso y la importancia de extraer el ácido ferúlico.	Orientación	Se inicia con una actividad de clasificación de granos (arroz, lenteja, avena, maíz, frijol), en donde los estudiantes, mediante criterios propios y justificados, realizan su propia clasificación a partir de la observación de imágenes contrastando plantas de cereales. Se le hace entrega a los estudiantes de un paquete de material de apoyo donde se incluyen: 4 infografías y una hoja de situación problema.	20 min	Clasificación de los diferentes granos. Tabla comparativa de etiquetas nutricionales. Reflexión ambiental e hipótesis sobre las preguntas generales (sin consulta).	Facilitador de recursos; modera las discusiones sin dar respuesta; plantea preguntas controversiales; introduce conceptos como ODS 12 y direcciona el proceso indagativo.	No se evalúa formalmente; corresponde al diagnóstico de ideas previas.

		Conceptualización	Uso del paquete hoja 1: infografía sobre partes del grano, beneficios de la fibra y etiquetas nutricionales. Los tesistas se apoyan de las siguientes preguntas orientadoras: ¿qué es un cereal?, ¿por qué consumirlo?, ¿cuál es la diferencia entre integral, refinado y ultra procesado? Análisis de etiquetas de alimentos empaquetados.	40 min	Consentimiento informado y pretest diligenciados.		
		Investigación	Se hace uso de la infografía 2 sobre ácido ferúlico, en el que se presenta su localización en el mapa del salvado (partes del grano). Los tesistas se apoyan de las siguientes preguntas orientadoras: ¿qué es y dónde se encuentra el ácido ferúlico?, ¿por qué es valioso? Se introduce el ODS 12 y se debate: si se continúa desechando el salvado, ¿qué problemas y oportunidades ambientales se generan?	40 min			

		Conclusión	Discusión sobre diferencias entre granos integrales y ultraprocesados. Los tesistas sistematizan las ideas de los estudiantes y enuncia la pregunta orientadora: ¿cómo diseñar un experimento para extraer un compuesto, como el ácido ferúlico, del salvado usando alternativas sostenibles?	20 min			
		Discusión / Cierre	Realización de pretest con previa firma del consentimiento informado y autorización para uso de imágenes.	60 min			

Intervención	Objetivo de aprendizaje	Fases de la indagación	Actividades a desarrollar	Duración	Producto del grupo	Papel del docente (tesistas)	Indicadores
--------------	-------------------------	------------------------	---------------------------	----------	--------------------	------------------------------	-------------

PROBLEMA Y DISEÑO EXPERIMENTAL (1)	Formular una pregunta experimental clara, viable y comparativa, identificando una variable y condiciones de control, a partir de la situación problema del salvado de avena y los NADES.	Orientación	Se emplean las infografías sobre ácido ferúlico, NADES y métodos de extracción. Los grupos leen, y los tesisistas mediante preguntas favorecen la comprensión y diálogo de la información, y los estudiantes formulan su pregunta inicial y la hipótesis, que guiará la formulación del diseño experimental que van a desarrollar.	30 min	Formato de diseño experimental: pregunta, hipótesis, variables y controles. Pregunta ajustada después de la retroalimentación.	Presenta el problema; de recursos según interés de los estudiantes; guía la formulación de preguntas sin cerrar opciones; retroalimenta y da coherencia a la metodología.	Formula preguntas experimentales pertinentes y abordables. Planifica procedimientos comparativos acordes con la pregunta planteada. Identifica variables relevantes y establece condiciones de control.
		Conceptualización	Cada grupo socializa la pregunta. Los tesisistas realizan preguntas críticas orientadoras: ¿cómo sabrán si extrajeron el compuesto de interés y cuánto de él?, ¿qué mantienen constante?, ¿la variable es una sola?, ¿la pregunta se puede ejecutar experimentalmente?	20 min			

		Investigación / diseño	Se presentan los parámetros para la práctica experimental en el laboratorio de química en cuanto a la extracción de ácido ferúlico de una matriz de <i>Avena Sativa</i> por medio de solvents eutécticos profundos naturales. Cada grupo define qué condiciones de control se mantendrán constantes y cuál será la variable experimental.	50 min			
		conclusión	Cada grupo define su variable experimental y formula una hipótesis sobre el resultado esperado en la efectividad de la extracción. Los grupos formulan teóricamente las proporciones y condiciones del procedimiento después del pretratamiento de la avena hasta la obtención del extracto. Deben considerar condiciones de control y contraste de la variable experimental: proporciones molares entre donador	60 min			

			y aceptor de hidrógeno, temperatura, tiempo, técnica, porcentaje de agua u otra variable viable. Cada grupo plantea Máximo dos ensayos de extracción.				
		Discusión / Cierre	Se realiza una revisión colectiva para identificar, cuestionar y ajustar la coherencia entre pregunta, hipótesis, variable, controles y procedimiento para definir el diseño experimental para su ejecución posterior.	20 min			

Intervención	Objetivo de aprendizaje	Fases de la indagación	Actividades a desarrollar	Duración	Producto del grupo	Papel del docente (tesistas)	Indicadores
EJECUCIÓN Y REGULACIÓN (2)	Ejecutar el diseño experimental propuesto para la extracción de	orientación	los tesistas retoman la situación problema relacionada con el aprovechamiento del salvado de avena y la extracción de ácido ferúlico mediante NADES. Cada	15 min	Extractos obtenidos y rotulados. Hoja de ruta experimental	Acompaña la ejecución experimental, supervisa el cumplimiento	Ejecuta el procedimiento experimental de manera organizada y

	ácido ferúlico a partir de salvado de avena mediante NADES, controlando las variables definidas, registrando observaciones y regulando el procedimiento ante posibles dificultades o ajustes necesarios.		grupo revisa la pregunta experimental, la hipótesis, la variable seleccionada y las condiciones de control definidas en la sesión anterior. Además, se recuerdan las normas de seguridad, el uso adecuado de materiales y la importancia del registro sistemático durante la práctica.		de laboratorio con registro del procedimiento, datos, observaciones, dificultades y ajustes realizados.	de las normas de seguridad y orienta a los estudiantes mediante preguntas que favorecen la regulación del proceso.	segura. Mantiene la coherencia entre pregunta, hipótesis, variable y condiciones de control.
		conceptualización	Los estudiantes revisan los conceptos y criterios necesarios para ejecutar correctamente el procedimiento experimental: variable independiente, variables de control, comparación entre ensayos, preparación del NADES, manejo de la matriz de <i>Avena Sativa</i> y registro de datos. Cada grupo verifica que su procedimiento sea coherente con la pregunta y la hipótesis planteadas, antes de iniciar la experimentación.	20 min	Tabla de control de variables y evidencias del proceso experimental.	Además, verifica que los grupos mantengan la coherencia entre la pregunta experimental, la hipótesis, la variable seleccionada, las condiciones de control y el	Registra datos, observaciones y dificultades de forma clara y sistemática. Reconoce desviaciones o problemas durante la práctica y propone ajustes justificados. Relaciona los

		Investigación	Los grupos desarrollan el procedimiento experimental de extracción del ácido ferúlico a partir del salvado de avena, utilizando el NADES definido en su diseño. Cada grupo realiza dos ensayos, modificando únicamente la variable experimental seleccionada y manteniendo constantes las condiciones de control. Durante la práctica, registran en la hoja de ruta experimental las cantidades empleadas, tiempos, temperaturas, observaciones, cambios físicos, dificultades y posibles desviaciones del procedimiento planeado.	105 min		procedimiento realizado.	resultados preliminares con la hipótesis y el diseño experimental planteado.
		Conclusión	Cada grupo revisa los resultados observables preliminares obtenidos durante la práctica y los contrasta con su hipótesis inicial. Los estudiantes identifican si el procedimiento permitió obtener extractos	20 min			

			comparables, reconocen las dificultades presentadas y explican qué ajustes fueron necesarios durante la ejecución. No se realiza aún un análisis profundo de resultados, sino una primera valoración de la coherencia entre el diseño experimental, la ejecución y las evidencias obtenidas.				
		Discusión / cierre	Los grupos recolectan, rotulan y organizan los extractos obtenidos para su análisis posterior. También completan la hoja de ruta del laboratorio y socializan brevemente las principales dificultades, decisiones y aprendizajes derivados de la práctica. Los tesistas orientan una reflexión sobre la importancia de controlar variables, registrar datos de manera rigurosa y justificar los ajustes realizados durante el proceso experimental.	20 min			

			Se menciona que los tesistas serán los encargados de realizar la lectura de las muestras por medio de HPLC por cuestión de tiempos y disposición de equipos.				
--	--	--	--	--	--	--	--

Intervención	Objetivo de aprendizaje	Fases de la indagación	Actividades a desarrollar	Duración	Producto del grupo	Papel docente (tesistas)	Indicadores
---------------------	--------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-----------------	---------------------------	---------------------------------	--------------------

ANÁLISIS, ARGUMENTACIÓN Y COMUNICACIÓN (3)	Analizar y comunicar los resultados obtenidos por cada grupo en el proceso de extracción de ácido ferúlico a partir de salvado de avena mediante NADES, relacionando los parámetros experimentales utilizados, los resultados reportados por HPLC y la hipótesis planteada, con el fin de argumentar los hallazgos, dialogar sobre lo	orientación	Los tesistas proyectan una línea de tiempo visual construida específicamente para la intervención recopilando lo que se ha desarrollado a lo largo de las intervenciones, en ella se incluye: intervención 0: Cereales, salvado y ácido ferúlico. intervención 1: Diseño experimental. intervención 2: Ejecución de la extracción. intervención 3: Análisis y comunicación. Con ello, se van desarrollando preguntas para todo el grupo como: ¿Qué problema intentábamos resolver? ¿Por qué el salvado puede considerarse un residuo aprovechable?	15 min	Cartelera grupal con la pregunta experimental, hipótesis, variables, parámetros, controles, resultados y su relación con la hipótesis. Conclusiones grupales construidas a partir del diálogo guiado. Comunicación clara de los resultados obtenidos por el grupo.	Explica el proceso general de lectura de las muestras mediante HPLC y orienta la interpretación de los resultados reportados. Acompaña la organización de la información en las carteleras, guía la socialización de cada grupo y promueve el diálogo mediante preguntas que favorecen la argumentación, la comparación de resultados y la	Relaciona los resultados con la hipótesis y el diseño experimental planteado. Reconoce desviaciones o problemas después de la práctica y propone ajustes pertinentes.
---	---	-------------	--	--------	---	--	---

	comprendido y valorar los aprendizajes construidos durante la intervención.		¿Qué son los NADES y cómo influyen químicamente en el proceso? ¿Qué variable estudió cada grupo? Así, se recuperan las ideas clave surgidas durante la intervención y se contextualiza el propósito de la última intervención, analizando si las decisiones experimentales que se tomaron en el laboratorio de la sesión anterior realmente influyeron en los resultados que obtuvo cada grupo y cómo se pueden defender las conclusiones utilizando evidencia.		Relación entre los parámetros experimentales, la hipótesis y los resultados. Participación activa en la discusión mediante preguntas, explicaciones o aportes. Aplicación del posttest individual.	reflexión sobre los aprendizajes alcanzados. Finalmente, realiza el cierre de la intervención y orienta la aplicación del posttest.	
		conceptualización	Los tesistas presentan una infografía sobre “cómo se analizan las muestras” diseñado para la intervención, en ella se incluye, qué es HPLC, qué mide, qué significa un resultado reportado, y la relación entre concentración y eficiencia de extracción.	25 min			

			Como actividad, cada grupo tiene los resultados de la lectura de HPLC de las extracciones que hizo, con ello, deberán hacer un análisis de dicho resultado reportado por HPLC, qué significa para su extracción, y si el resultado es alto o bajo respecto a los demás grupos. Esto lo harán atendiendo preguntas orientadoras como: ¿Qué representa este valor? ¿Qué nos indica sobre la extracción? ¿Qué podría explicar este resultado?. Para esto, los tesistas realizan la explicación necesaria para que los estudiantes puedan interpretar los datos experimentales.				
--	--	--	--	--	--	--	--

		Investigación	Con los materiales que trae cada grupo (Pliego de papel periódico, marcadores, tijeras, papel de colores, notas adhesivas, entre otros), se registran aspectos como: Pregunta experimental, hipótesis, variable estudiada, técnica utilizada, condiciones de control, resultado HPLC, ¿Cual es la relación entre el resultado y la hipótesis?. Luego, cada grupo presenta su procedimiento durante 3 a 4 minutos, con esta información los tesistas construyen un cuadro comparativo que permite contrastar los experimentos realizados por todos los grupos. Los tesistas formulan preguntas como: ¿Qué variable cambió este grupo? ¿Qué mantuvieron constante? ¿Qué diferencias observan frente a su experimento? ¿Qué resultado obtuvieron?, ¿qué ajustes pueden hacer? y ¿se confirmó la hipótesis?,	50 min			
--	--	---------------	--	--------	--	--	--

		Conclusión	Cuando todos los grupos han compartido sus resultados, los estudiantes analizan el cuadro completo e identifican las variables más efectivas, las variables que fueron menos efectivas, patrones observados, y posibles causas de las diferencias. En este proceso, los tesistas evitan dar respuestas y más bien se promueven preguntas del tipo ¿Qué evidencia respalda esa afirmación? ¿Qué dato permite concluir eso? ¿Hay algún grupo cuyos resultados contradicen esa idea?, ¿Qué variable pudo influir en ese resultado?, ¿Qué evidencia lo demuestra? y ¿Qué haríamos diferente en una nueva extracción?.	20 min			
--	--	------------	---	--------	--	--	--

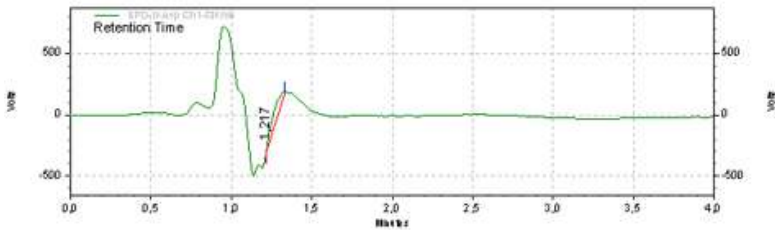
		Discusión / cierre Las carteleras se exponen alrededor del aula y los estudiantes realizan un recorrido observando los trabajos de los demás grupos. Luego, los tesistas orientan una conversación final con preguntas orientadoras como: ¿Qué aprendimos sobre los NADES? ¿Por qué es importante controlar las variables? ¿Qué aprendimos sobre investigación científica? ¿Qué dificultades encontramos? ¿Cómo puede aprovecharse un residuo agroindustrial?. Se recolecta la información en grabaciones de audio de la intervención. Finalmente, los estudiantes responden individualmente el postest. Se hace el cierre, en el que los tesistas agradecen la participación de los estudiantes y realizan una síntesis de	70 min				
--	--	--	--------	--	--	--	--

			los aprendizajes construidos durante todo el proceso: Aprovechamiento sostenible del salvado, principios de química verde, uso de NADES, diseño experimental, control de variables, interpretación de resultados, argumentación científica basada en evidencia.				
--	--	--	---	--	--	--	--

Anexo E. Cromatogramas de la curva de calibración

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Nueva carpeta\Acido Ferulico
2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Ac Ferulico 0ppm Ac-ACN 20-80
User: System
Acquired: 25/03/2026 05:25:00 p.m.
Printed: 25/03/2026 06:27:50 p.m.



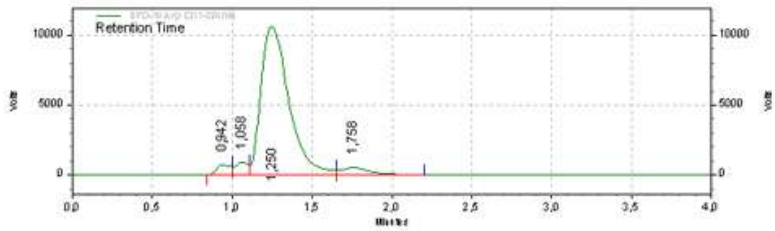
SPD-10Avp
Ch1.320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,217	626	100,00	0	0,00
Totals	626	100,00	0	0,00

Anexo E Figura 1. Cromatograma de ácido ferúlico a 0 ppm

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Nueva carpeta\Acido Ferulico
2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Ac Ferulico 1ppm Ac-ACN 20-80
User: System
Acquired: 25/03/2026 05:34:11 p.m.
Printed: 25/03/2026 06:55:59 p.m.



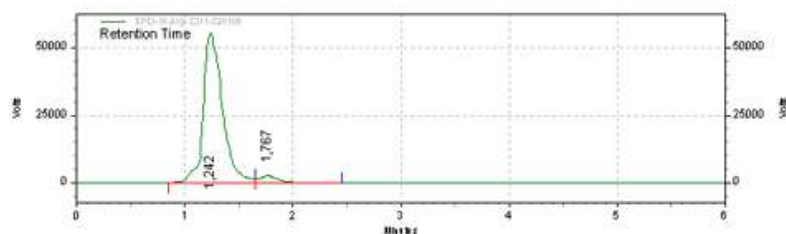
SPD-10Avp
Ch1.320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0,942	4110	2,84	697	5,48
1,058	4833	3,34	886	6,97
1,250	128987	89,25	10583	83,20
1,758	6601	4,57	554	4,36
Totals	144531	100,00	12720	100,00

Anexo E Figura 2. Cromatograma de ácido ferúlico a 1 ppm

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Nueva carpeta\Acido Ferulico
2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Ac Ferulico 5ppm Ac-ACN 20-80
User: System
Acquired: 25/03/2026 05:13:11 p.m.
Printed: 25/03/2026 06:59:21 p.m.



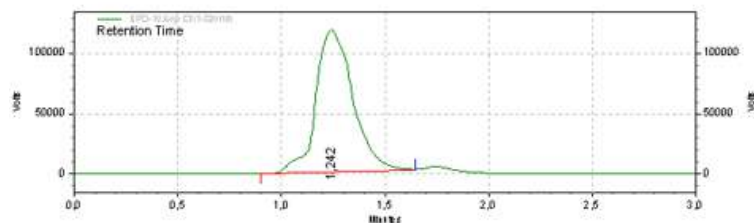
SPD-10Avp
Ch1:320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.242	687799	95.19	55401	95.21
1.767	34755	4.81	2790	4.79
Totals	722554	100.00	58191	100.00

Anexo E Figura 3. Cromatograma de ácido ferúlico a 5 ppm

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Nueva carpeta\Acido Ferulico
2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Ac Ferulico 10ppm Ac-ACN 20-80
User: System
Acquired: 25/03/2026 05:39:49 p.m.
Printed: 25/03/2026 06:30:08 p.m.



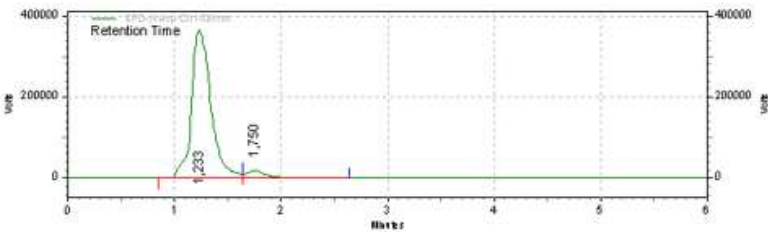
SPD-10Avp
Ch1:320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.242	1456883	100.00	118071	100.00
Totals	1456883	100.00	118071	100.00

Anexo E Figura 4. Cromatograma de ácido ferúlico a 10 ppm

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Nueva carpeta\Acido Ferulico
2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\Nueva carpeta\Ac Ferulico 25ppm Ac-ACN 20-80
User: System
Acquired: 25/03/2026 05:04:45 p.m.
Printed: 25/03/2026 06:58:08 p.m.



SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

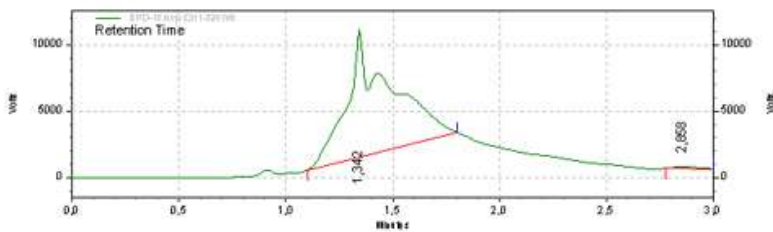
Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.233	4633808	95.12	366259	95.01
1.750	237922	4.88	19235	4.99
Totals	4871730	100.00	385494	100.00

Anexo E Figura 5. Cromatograma de ácido ferúlico a 25 ppm

Anexo F. Cromatogramas de las extracciones de la prueba piloto

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acetato de etilo 20260409-2.dat
User: System
Acquired: 09/04/2026 03:46:57 p.m.
Printed: 09/04/2026 03:50:54 p.m.



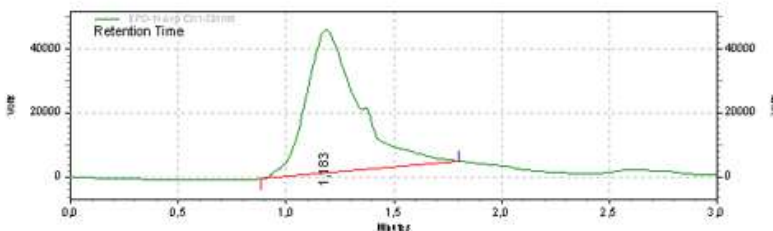
SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.342	135315	99,21	9652	98,67
2.858	1071	0,79	130	1,33
Totals	136386	100,00	9782	100,00

Anexo F Figura 1. Blanco acetato de etilo

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Ac Ferulico Ac
citriglic-calentado-acetato 20260409.dat
User: System
Acquired: 09/04/2026 03:36:24 p.m.
Printed: 09/04/2026 04:02:07 p.m.



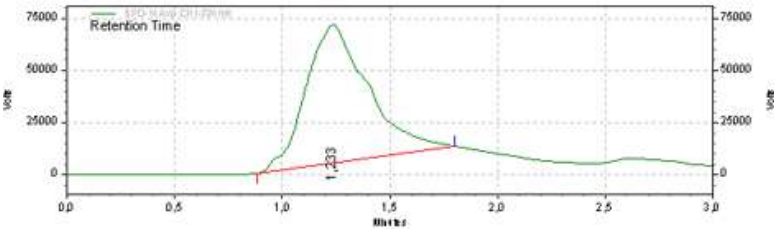
SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.183	754189	100,00	44687	100,00
Totals	754189	100,00	44687	100,00

Anexo F Figura 2. Ácido cítrico:glicerol - calentamiento y agitación

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Ac Ferulico Ac
citri-glic-ultrasonido-acetato len5 -20260409.dat
User: System
Acquired: 09/04/2026 03:30:53 p.m.
Printed: 09/04/2026 03:56:51 p.m.



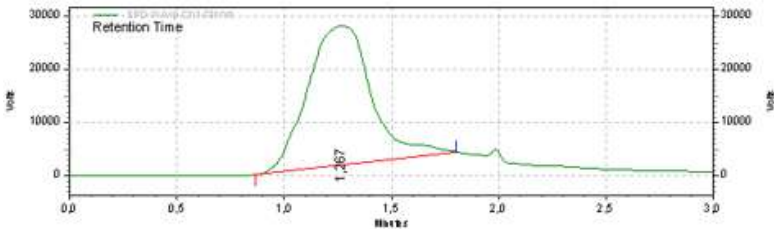
SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,233	1329728	100,00	66329	100,00
Totals	1329728	100,00	66329	100,00

Anexo F Figura 3. Ácido cítrico : glicerol - ultrasonido

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Ac Ferulico Ac
lac-glic-calentado-acetato-20260409.dat
User: System
Acquired: 09/04/2026 02:52:32 p.m.
Printed: 09/04/2026 03:59:11 p.m.



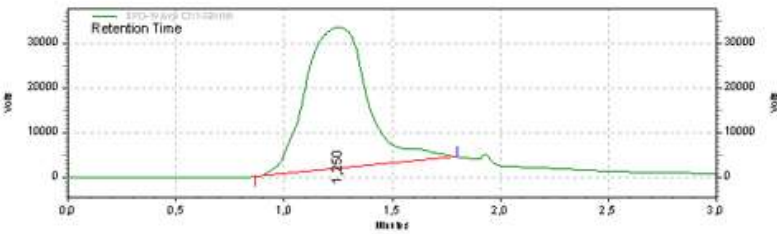
SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,267	540065	100,00	26152	100,00
Totals	540065	100,00	26152	100,00

Anexo F Figura 4. Ácido láctico:glicerol - calentamiento y agitación

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Ac Ferulico Ac lac-gli
ultrasonido-Acetato-20260409-2.dat
User: System
Acquired: 09/04/2026 02:26:13 p.m.
Printed: 09/04/2026 04:00:17 p.m.



SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.250	630419	100,00	31523	100,00
Totals	630419	100,00	31523	100,00

Anexo F Figura 5. Ácido láctico : glicerol - ultrasonido



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN QUÍMICA**

TRABAJO DE GRADO: Desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación: una intervención didáctica de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de avena sativa con NADES

Docentes investigadores: Jorge Enrique Parada Restrepo y Paula Natalia Vanegas Olarte.

Directora: Blanca Florinda Rodríguez Hernández.

Codirector: Diego Alexander Blanco Martínez.

PRE-TEST

Nombre _____ **Fecha** _____

Semestre _____ **Espacio académico** _____

El presente instrumento de entrada busca identificar el nivel de desarrollo de la habilidad de indagación experimental antes de la intervención didáctica diseñada en el marco de la investigación titulada “Desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación: una intervención didáctica de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de avena sativa con NADES”, siendo éste el instrumento diagnóstico con el cual se caracteriza la habilidad de indagación experimental de los participantes de acuerdo con los indicadores:

- Formula preguntas experimentales pertinentes y abordables.
- Planifica procedimientos comparativos acordes con la pregunta planteada.
- Identifica variables relevantes y establece condiciones de control.
- Ejecuta la práctica de manera sistemática y consistente.
- Registra datos y observaciones de forma organizada.
- Reconoce dificultades metodológicas durante el proceso.
- Realiza ajustes metodológicos justificados en función de la evidencia obtenida.

Instrucciones: Estimado docente en formación, lea cuidadosamente la situación planteada y responda de acuerdo con su razonamiento actual como futuro docente, no espere que conozca las respuestas técnicas correctas, se valora su capacidad para plantear una estrategia experimental razonable. Escriba solo en los espacios indicados y no deje ningún espacio en blanco.

Las preguntas están clasificadas por indicadores de habilidad y todas las preguntas requieren de respuesta con explicación escrita. Al ser un instrumento diagnóstico se les solicita honestidad en las respuestas, el resultado de la prueba no va a afectar las notas del espacio académico.

Situación problema

Una empresa que procesa avena para producir harina genera grandes cantidades de salvado como subproducto, este salvado contiene ácido ferúlico (compuesto fenólico con potencial uso en alimentos y cosméticos), actualmente este salvado se desecha o se usa para alimentación animal. En cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el 12 (producción y consumo responsable), la empresa quiere explorar una ruta de extracción sostenible que evite solventes orgánicos convencionales. Para ello cuenta con los siguientes reactivos: ácido cítrico, ácido láctico, cloruro de colina, glicerol, glucosa y diferentes aminoácidos, también dispone de equipos de laboratorio para el uso de técnicas de ultrasonido, batelada y planchas de calentamiento así como material de laboratorio de vidrio.

Su tarea será diseñar una estrategia experimental comparativa para recuperar ácido ferúlico del salvado de avena, usando los reactivos disponibles y las condiciones del laboratorio viables.

1. Formulación de la pregunta experimental

Redacte una pregunta experimental que permita comparar dos alternativas para extraer ácido ferúlico, indicando con claridad: a. ¿Qué variables va a comparar? (eje: dos reactivos diferentes, dos proporciones, dos técnicas, etc). b. ¿Por cuál técnica experimental? (calentamiento y agitación, ultrasonido o batelada). c. ¿Con qué propósito? (qué quiere averiguar).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Planificación del procedimiento comparativo

Describa brevemente cómo organizaría esa comparación en el laboratorio, señalando la secuencia general de trabajo, las condiciones que contrastará y el criterio con el que evaluaría los resultados. Indique:

1. Secuencia general de pasos
2. Las dos condiciones que va a contrastar
3. El criterio que usará para evaluar los resultados (qué variable medirá u observará para decidir cual conducción es mejor)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. Variables y condiciones de control

Indique:

1. ¿Cuál sería la variable principal de comparación, aquella que va a cambiar (variable independiente)?
2. ¿Qué resultado observará o medirá para valorar la extracción (variable dependiente)?
3. Enumere al menos tres condiciones que deba mantener constantes para que la comparación sea válida. Explique brevemente por qué.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. Ejecución sistemática de la práctica

Explique cómo en el trabajo del laboratorio las dos condiciones planteadas se ejecutan de manera ordenada, consistente y comparable (por ejemplo: ¿simultáneamente o secuencialmente?, ¿Como se asegura que las condiciones de control no varían entre una y otra?).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. Registro de datos y observaciones

Indique:

1. ¿Qué datos y observaciones registraría durante el procedimiento?
2. Mencione al menos cuatro tipos de información que registraría o anotaría y explique para qué le serviría cada una al final de la práctica.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6. Reconocimiento de dificultades metodológicas

- Identifique una dificultad metodológica que podría presentarse durante el proceso de extracción (por ejemplo, relacionada con la viscosidad, la temperatura , la filtración, etc.).
- Explique de qué manera afectaría la calidad de la evidencia obtenida y la interpretación de los resultados.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

7. Ajuste metodológico justificado

1. Imagine que al finalizar el procedimiento de extracción, los resultados no permiten concluir claramente cuál de las dos condiciones es mejor (por ejemplo: las condiciones son muy parecidas o hubo problemas técnicos).
2. Identificar con claridad el análisis, debido a la viscosidad del producto.
3. Proponga un ajuste correcto al procedimiento que le permita hacer un segundo intento para mejorar la comparación y justifique por qué ese cambio sería pertinente.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Gracias por su participación.



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN QUÍMICA**

TRABAJO DE GRADO: Desarrollo de la habilidad de indagación experimental en profesores de química en formación: una intervención didáctica de indagación guiada contextualizada en la extracción de ácido ferúlico de Avena sativa con NADES

Docentes investigadores: Jorge Enrique Parada Restrepo y Paula Natalia Vanegas Olarte.

Directora: Blanca Florinda Rodríguez Hernández.

Codirector: Diego Alexander Blanco Martínez.

POS-TEST

Nombre _____ Fecha _____
Semestre _____ Espacio académico _____

Instrucciones: Estimado docente en formación, lea cuidadosamente la situación planteada y responda de acuerdo con su razonamiento actual como futuro docente. En este instrumento de salida se valora su capacidad para analizar una situación experimental, comparar evidencia, justificar decisiones metodológicas y proponer ajustes razonados. No se busca que repita definiciones teóricas, sino que explique cómo plantearía, organizaría y revisaría una estrategia experimental a partir de la información disponible. Escriba solo en los espacios indicados y no deje ningún espacio en blanco.

Al ser un instrumento diagnóstico de salida, se solicita responder con honestidad. El resultado de la prueba no va a afectar las notas del espacio académico.

Situación problema

En el marco de una práctica de laboratorio universitaria orientada a la valorización del salvado de Avena sativa, un grupo de docentes en formación evaluó dos condiciones de extracción de ácido ferúlico empleando un NADES ya seleccionado. En ambos casos se trabajó con la misma matriz vegetal, el mismo pretratamiento hidrotermal suave, la misma masa de muestra, el mismo volumen de solvente y el mismo procedimiento general de separación posterior.

Las dos condiciones comparadas fueron:

- Condición A: extracción por batelada con calentamiento.
- Condición B: extracción asistida por ultrasonido.

Después de una primera corrida experimental, se obtuvieron los siguientes registros generales:

- En la condición A, el extracto presentó una apariencia homogénea, la separación del sólido fue relativamente estable y la señal analítica asociada al ácido ferúlico fue intermedia, con poca variación entre repeticiones.
- En la condición B, en una repetición se obtuvo una señal analítica más alta, pero el sistema presentó formación de espuma/emulsión y dificultades en la separación del sólido. En otra repetición, la señal disminuyó notablemente. Además, se reportó que durante el procedimiento hubo diferencias en el tiempo real de sonicación y en la homogeneización inicial de la mezcla.
- En las notas de laboratorio también se registró que el NADES presentaba alta viscosidad al inicio del procedimiento, lo que dificulta una mezcla uniforme en algunos ensayos.

Su tarea será analizar esta situación y proponer una nueva estrategia experimental comparativa que permita obtener evidencia más clara sobre la recuperación de ácido ferúlico del salvado de avena usando NADES en condiciones viables de laboratorio universitario.

A partir de esta situación, responda las siguientes preguntas:

1. Formulación de la pregunta experimental

Redacte una pregunta experimental que permita comparar de manera pertinente las dos condiciones de extracción descritas. En su pregunta indique con claridad:

- a. ¿Qué condición o técnica de extracción va a comparar?
- b. ¿En qué sistema experimental se realizará la comparación?
- c. ¿Con qué propósito se hará la comparación?
- d. ¿Cómo incorporaría la necesidad de valorar tanto la señal analítica asociada al ácido ferúlico como la estabilidad del proceso entre repeticiones?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Planificación del procedimiento comparativo

Describa brevemente cómo organizaría una nueva comparación entre la condición A y la condición B en el laboratorio. Indique:

- a. La secuencia general de pasos que seguiría.

- b. Cómo organizaría las repeticiones de cada condición para que los resultados puedan compararse.
- c. Qué condiciones mantendría iguales y qué aspectos revisaría a partir de las dificultades reportadas en la primera corrida.
- d. El criterio que usaría para evaluar los resultados y decidir cuál condición ofrece evidencia más confiable.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. Variables y condiciones de control

Indique:

- a. ¿Cuál sería la variable principal de comparación o variable independiente?
- b. ¿Qué resultado, dato u observación usaría para valorar la extracción o variable dependiente?
- c. Enumere al menos tres condiciones que deberían mantenerse constantes para que la comparación sea válida e interpretable.
- d. Explique brevemente por qué esas condiciones de control son importantes para analizar la evidencia obtenida.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. Ejecución sistemática de la práctica

Explique cómo debería ejecutarse la práctica para que las dos condiciones se desarrollen de manera ordenada, consistente y comparable en una nueva corrida experimental. Considere:

- a. Si realizaría las condiciones de manera simultánea o secuencial y cómo evitaría sesgos entre ensayos.
- b. Cómo controlaría el tiempo real de sonicación o calentamiento, la homogeneización inicial, la temperatura y la separación del sólido.
- c. Cómo verificaría que cada repetición cumpla el procedimiento planificado antes de interpretar los resultados.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. Registro de datos y observaciones

Indique:

- ¿Qué datos y observaciones registraría durante el procedimiento y al final de la práctica?
- Mencione al menos cuatro tipos de información que registraría y explique para qué le serviría cada una en el análisis final.
- Diseñe una tabla de registro que permita reconstruir lo ocurrido y comparar la calidad de la evidencia entre condiciones.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6. Reconocimiento de dificultades metodológicas

A partir de la situación descrita:

- Identifique una dificultad metodológica relevante que haya afectado el proceso de extracción o la comparación entre condiciones.
- Explique de qué manera esa dificultad afecta la calidad de la evidencia obtenida.
- Señale cómo esa dificultad podría influir en la interpretación de los resultados entre la condición A y la condición B.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

7. Ajuste metodológico justificado

Imagine que, después de repetir la extracción, los resultados aún no permiten concluir con claridad cuál condición es más adecuada. A partir de la evidencia disponible:

- a. Proponga un ajuste metodológico concreto para mejorar la comparación entre la condición A y la condición B.
- b. Justifique por qué ese ajuste ayudaría a resolver la dificultad identificada.
- c. Explique cómo el ajuste permitiría mantener la coherencia con la pregunta experimental inicial y obtener evidencia más válida en un segundo intento.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Gracias por su participación.

Anexo I. Formato de indagación para el diseño del laboratorio

FORMATO DE INDAGACIÓN PARA EL DISEÑO DEL LABORATORIO

Extracción de compuestos fenólicos del salvado de avena usando NADES

Curso:	
Fecha:	
Grupo:	
Integrantes:	

CONTEXTUALIZACIÓN (Andamiaje cognitivo)

Como investigadores, se enfrentarán a una tecnología verde llamada NADES (Natural Deep Eutectic Solvents). Estos solventes se forman al mezclar dos sólidos naturales: un Aceptor de enlaces de hidrógeno (HBA), como el Cloruro de Colina (una sal), y un Donador de enlaces de hidrógeno (HBD), como azúcares o ácidos orgánicos (ácido láctico/cítrico). Al interactuar fuertemente mediante puentes de hidrógeno a nivel molecular, su punto de fusión baja de forma drástica y se transforman en un líquido transparente a temperatura ambiente. Aunque poseen una alta viscosidad, su afinidad química es ideal para degradar la matriz celular vegetal y liberar antioxidantes como el ácido ferúlico sin necesidad de emplear solventes orgánicos volátiles y peligrosos como el metanol o acetate de etilo (Santana et al., 2019).

SITUACIÓN PROBLEMA

Una empresa que procesa avena para producir harina genera grandes cantidades de salvado como subproducto, este salvado contiene ácido ferúlico (compuesto fenólico con potencial uso en alimentos y cosméticos), actualmente este salvado es tratado como un desecho de bajo valor y la extracción del ácido ferúlico se realiza con solventes orgánicos tóxicos como el metanol. El equipo de investigación y desarrollo (I+D) de la empresa desea proponer un método de extracción alternativo más amigable con el medio ambiente, utilizando Solventes Eutécticos Profundos Naturales (NADES). El equipo debe diseñar un experimento que permita comparar la eficiencia de la extracción de ácido ferúlico utilizando el método convencional (con metanol o etanol) frente al método propuesto (con NADES).

En este sentido, deben diseñar un proceso que permita a la empresa dejar de ver el salvado como un desperdicio y empezar a verlo como un tesoro escondido (porque contiene compuestos con alto valor comercial, como el ácido ferúlico) y reemplazar los solventes tóxicos por una alternativa más verde, segura y sostenible alineado con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), un objetivo global para reducir el desperdicio y promover procesos sostenibles.

Así, usaran como alternativa los NADES; que como se mencionó anteriormente, son una mezcla líquida que se forma cuando combinas al menos dos compuestos naturales (sólidos por separado) y los calientas suavemente. La magia: esta mezcla tiene un punto de fusión mucho más bajo que el de sus componentes individuales, y se comporta como un solvente ideal, veamos algunas características que puede ampliar con la bibliografía anexa y de la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los Natural Deep Eutectic Solvents (Solventes Eutécticos Profundos Naturales)

característica	resultante
Ecológicos y biodegradable	Están hechos de componentes naturales, no tóxicos y se descomponen fácilmente en el ambiente.
Económicos y seguros	No requieren condiciones extremas de presión o temperatura para prepararse. Son muy estables y se pueden usar en procesos a baja escala
Versátiles y eficientes	Se pueden ajustar sus componentes y proporciones para extraer selectivamente diferentes compuestos, desde pigmentos hasta antioxidantes
Alternativa real a solventes contaminantes	En el contexto de la Química Verde (que busca desarrollar procesos químicos sostenibles), los NADES reemplazan a disolventes tradicionales que son tóxicos, volátiles y generan muchos residuos

Antes de iniciar el proceso de extracción es recomendable recordar que el ácido ferúlico es un compuesto fenólico que se encuentra en las paredes celulares de la avena, específicamente en el salvado. Es un poderoso antioxidante natural con propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas, protectoras de la piel (por eso se usa en cosméticos antiedad) y beneficiosas para la salud cardiovascular y digestiva. El problema es que está fuertemente unido a la pared celular, y los solventes tradicionales tienen dificultades para extraerlo sin dañar la molécula. Es aquí donde entran los NADES, debido a que pueden formar **puentes de hidrógeno** (un tipo de fuerza intermolecular) con el ácido ferúlico, son capaces de "romper" sus uniones con la pared celular y arrastrarlo, obteniendo un extracto rico en este valioso compuesto. Un NADES se prepara calentando suavemente sus componentes sólidos hasta que se vuelven líquidos y se mezclan. En esta práctica, ustedes van a elegir y preparar su propio NADES, eligiendo entre dos posibilidades:

Componente A (Aceptor de H)	Componente B (Donador de H)	Nombre del NADES
Acido cítrico	Glicerol	Acido cítrico: glicerol
Acido láctico	Glicerol	Acido láctico: glicerol

Ademas de tener en cuenta que:

Aceptor/Donador de hidrógeno: Son los componentes químicos que forman la red de puentes de hidrógeno que le da la estabilidad al NADES. Piensa en el aceptor como un imán (con carga negativa) y en el donador como otro imán (con carga positiva). Al juntarlos, se atraen y crean una estructura líquida homogénea y estable.

Proporción molar (ejemplo 1:4): Indica en qué cantidad (en moles) se mezclan el aceptor y el donador. Es como la "receta" del NADES. Una proporción 1:4 significa que por cada mol de ácido cítrico, se añaden 4 moles de glicerol. Esta proporción influye en la eficiencia de extracción, la viscosidad y la polaridad.

En esta práctica diseñarán y ejecutarán su propio experimento para extraer compuestos fenólicos del salvado de avena utilizando NADES. Ustedes deberán:

1. Elegir una variable para comparar (tipo de NADES, proporción molar, cantidad de agua o sistema asistido).

2. Definir qué van a medir u observar (variable dependiente).
3. Identificar qué condiciones deben mantenerse constantes (controles) y justificar por qué.
4. Formular una pregunta de indagación, una hipótesis y un objetivo.
5. Escribir un procedimiento paso a paso.
6. Ejecutarlo, **registrar observaciones y dificultades**, y hacer **ajustes justificados** si es necesario.
7. Analizar los resultados y **concluir** si su hipótesis se cumplió.

Esta forma de trabajar se llama indagación guiada. El docente les dará los materiales básicos, pero las decisiones metodológicas son de ustedes.

Propósito: seleccionar una variable experimental, definir controles, formular una hipótesis y construir un procedimiento de laboratorio coherente a partir de una ruta predefinida.

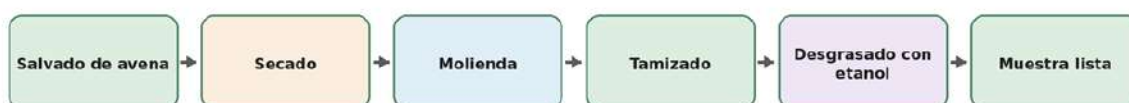
Ruta general del laboratorio



1. Contexto del laboratorio

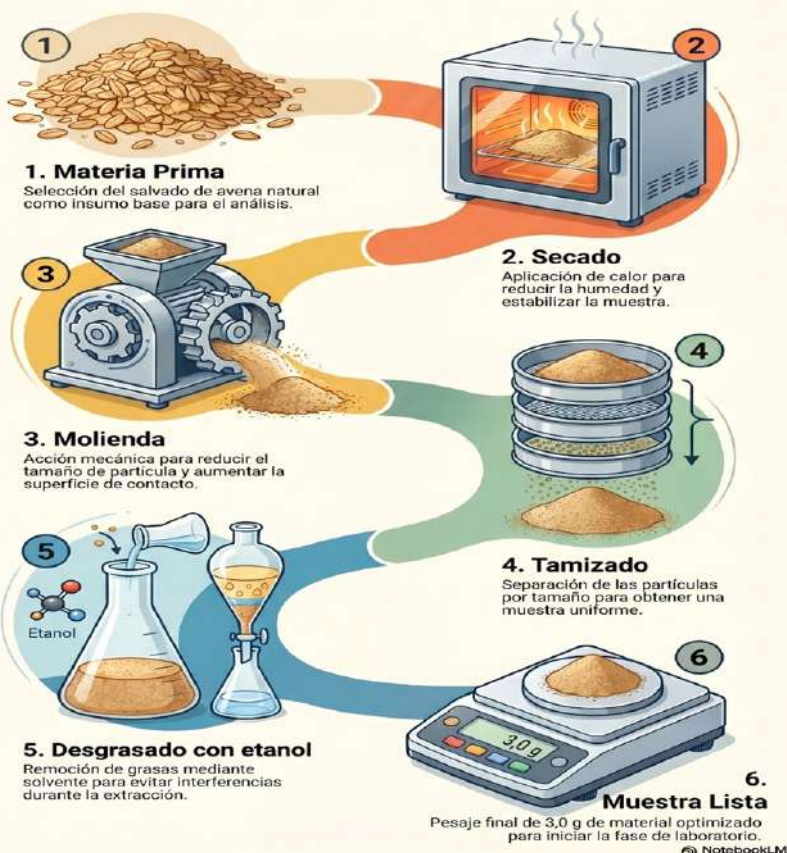
En este laboratorio se trabajará con una muestra de salvado de avena previamente tratada. El grupo no realizará el pretratamiento, pero debe reconocerlo porque hace parte del proceso experimental y condiciona la extracción.

Muestra entregada: salvado de avena pretratado



Secuencia de Pretratamiento del Salvado de Avena

Para garantizar una extracción eficiente de compuestos fenólicos, el salvado de avena debe pasar por un proceso de acondicionamiento. Este pretratamiento asegura que la muestra sea homogénea, tenga el tamaño de partícula adecuado y esté libre de interferencias lipídicas.



Etapas previas	Descripción
Secado	Disminución de la humedad de la muestra.
Molienda	Reducción del tamaño de partícula.
Tamizado	Separación por tamaño de partícula.
Desgrasado con etanol	Remoción parcial de compuestos grasos.

2. Condición inicial común para todos los grupos

Dato de partida	Valor definido
Masa de muestra	3,0 g de salvado de avena pretratado
Estado de la muestra	Secada, molida, tamizada y desgrasada con etanol
Etapas que inicia el grupo	Preparación del NADES
Etapas finales del proceso	Centrifugación y obtención del extracto

3. Ruta general que debe conservar el procedimiento

El procedimiento construido por cada grupo puede variar según la variable elegida, pero debe mantener esta secuencia general:

Orden	Etapas obligatorias
1	Preparación del NADES seleccionado.

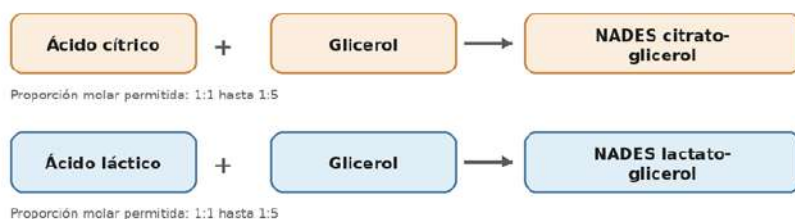
2	Tratamiento hidrotermal suave de la muestra de avena con el sistema solvente.
3	Aplicación del sistema asistido elegido: ultrasonido, batelada o calentamiento.
4	Centrifugación de la mezcla.
5	Separación y recuperación del extracto.
6	Registro de observaciones, mediciones y comparación de resultados.

4. Ficha de selección de parámetros

Instrucción: seleccione las condiciones de trabajo. Después defina cuál será la variable a estudiar y cuáles permanecerán constantes.

Antes de continuar, a título de hipótesis, justifique: ¿Por qué el tratamiento hidrotermal (90 °C, 20 min) es necesario para liberar el ácido ferúlico de la pared celular de la avena?

Selección del tipo de NADES



4.1 Tipo de NADES

☐ Ácido cítrico : glicerol

☐ Ácido láctico : glicerol

NADES seleccionado: _____

4.2 Proporción molar del NADES

La proporción seleccionada no debe superar la relación **1:5**.

☐ 1:1	☐ 1:2	☐ 1:3
☐ 1:4	☐ 1:5	☐ Otra proporción autorizada: _____ :

Proporción seleccionada: _____

4.3 Cantidad de agua agregada al NADES

Forma de registro	Valor seleccionado por el grupo
Porcentaje de agua	_____ %
Volumen de agua	_____ mL
Masa de agua	_____ g

Cantidad de agua definida:

4.4 Sistema asistido de extracción



Variables de Control Críticas



Temperatura y Tiempo
Son las dos variables transversales que deben registrarse sin excepción en los tres sistemas.



Registro de Equipos
En ultrasonido y calentamiento, la descripción del equipo o forma de calor es fundamental.

RSI NotebookLM

☐ ☐ Ultrasonido	☐ ☐ Batelada	☐ ☐ Calentamiento
Sistema	Datos mínimos que deben registrarse	
Ultrasonido	Tiempo de exposición, temperatura y condiciones del equipo.	
Batelada	Tiempo de contacto, agitación si aplica y temperatura.	
Calentamiento	Temperatura, tiempo y forma de calentamiento.	

5. Definición de variables del diseño experimental

Relación entre variables del diseño experimental



5.1 Variable independiente (lo que van a cambiar a propósito) – marquen una sola opción (parámetro que el grupo decide modificar para observar su efecto sobre la extracción).

☐ ☐ Tipo de NADES	☐ ☐ Proporción molar del NADES
☐ ☐ Cantidad de agua agregada	☐ ☐ Sistema asistido de extracción
☐ ☐ Tiempo de extracción	☐ ☐ Nades seleccionado

[_____]	Otra: [] proporciones de Nades
-------------	---------------------------------

Variable independiente seleccionada:

Ensayo	Valor o condición de la variable independiente
Ensayo 1	
Ensayo 2	

5.2 Variable dependiente (lo que van a medir u observar)

(lo que se observará o medirá como resultado del cambio aplicado. Extracción de ácido ferulico. Ejemplos: color del extracto, intensidad de color, facilidad de filtración, volumen recuperado, formación de espuma, etc.)

5.3 Variables de control (condiciones que deben mantenerse IDÉNTICAS en ambos ensayos)

Completen la tabla JUSTIFICANDO cada control.

Son las condiciones que deben permanecer iguales para que la comparación sea válida.

Variable de control	Valor que se mantendrá constante	¿Por qué es importante controlarla ?
Masa de muestra	3,0 g	
Tipo de muestra	Salvado de avena pretratado	
Tipo de NADES		
Proporción molar del NADES		
Cantidad de agua agregada		
Sistema asistido utilizado		
Tiempo de extracción		
Temperatura de extracción		
Velocidad o tiempo de centrifugación		
Volumen de solvente utilizado		
Otro control importante (especifique)		

6. Pregunta de indagación, hipótesis y objetivo

6.1 Pregunta de indagación

Estructura sugerida: ¿Cómo afecta [variable independiente] a [variable dependiente] durante la extracción de compuestos fenólicos del salvado de avena usando NADES?

Escriba la pregunta formulada por el grupo:

6.2 Hipótesis

Estructura sugerida: Si se modifica [variable independiente] de [ensayo 1] a [ensayo 2], entonces [efecto esperado en la variable dependiente], porque [fundamento químico o físico].

Escriba sus hipótesis individuales o del grupo:

6.3 Objetivo experimental

Estructura sugerida: Evaluar el efecto de [variable independiente] sobre [variable dependiente] en la extracción de compuestos fenólicos del salvado de avena usando NADES.

Objetivo redactado por el grupo:

7. Diseño experimental del grupo

Complete la tabla antes de iniciar el procedimiento. Solo una condición debe cambiar si el objetivo es comparar el efecto de una variable específica.

Ensayo	Muestra	NADES	Prop.	Agua	Sistema	Tiempo	Temp.
1	3,0 g						
2	3,0 g						

8. Construcción del procedimiento paso a paso

Instrucción: redacte acciones concretas, en orden, usando las condiciones seleccionadas en las secciones anteriores.

8.1 Paso 1. Preparación del NADES

Describe cómo se preparará el NADES seleccionado.

Condición	Valor definido
Componentes seleccionados	
Proporción molar	
Cantidad de agua agregada	

Procedimiento redactado por el grupo: (describan como se mezclan los reactivos, en que orden, si se calientan, agitan, etc)

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

8.2 Paso 2. Tratamiento hidrotermal suave de la muestra (90 °C, 20 min) – ya definido, pero escriban cómo lo harán

1. _____
2. _____
3. _____

8.3 Paso 3. Aplicación del sistema asistido (el que eligieron)

Describe las condiciones de ultrasonido, batelada o calentamiento.

Condición	Valor definido
Sistema seleccionado	
Tiempo de extracción	
Temperatura	
Agitación si aplica	
Equipo utilizado	

Procedimiento redactado por el grupo:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

8.4 Paso 4. Centrifugación

Describe cómo se separará el extracto líquido del residuo sólido.

Condición	Valor definido
Tiempo de centrifugación	
Velocidad de centrifugación	
Temperatura si aplica	
Aspecto esperado del sobrenadante	

Procedimiento redactado por el grupo:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

8.5 Paso 5. Obtención y conservación del extracto

Describe cómo se recogerá, rotulará y conservará el extracto.

Condición	Valor definido
Color	
Transparencia	
Presencia de partículas	
Volumen recuperado	

Procedimiento redactado por el grupo:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____

8.6. Esquema del montaje experimental (diagrama de control)

Dibujen aquí el montaje (matraces, baño, centrífuga, etc.) y etiqueten dónde y cómo se controla cada variable.

Parte 2. EJECUCIÓN Y REGISTRO (completar DURANTE el laboratorio)

Tiempo/paso	Que observan(color, viscosidad, espuma, facilidad de mezcla)	¿Alguna dificultad? ¿Qué ajuste hicieron sobre la marcha?
Preparación NADES		
Mezcla con muestra		

Tratamiento hidrotermal		
Sistema asistido		
Centrifugación		
Obtención extracto		

9. Registro de resultados

Ensayo	Variable independiente	Observación del extracto (color, turbidez)	Medición obtenida (volumen recuperado)	Resultado comparativo/ observaciones adicionales
1				
2				

Parte 3. Análisis y conclusiones

10. Análisis desde la indagación

¿Qué ensayo presentó mayor evidencia de extracción? (Basados en el color, volumen, facilidad, etc.)

¿Qué condición experimental parece favorecer más la extracción?

¿Los resultados apoyan la hipótesis inicial? Explique.

¿Qué variable fue más difícil de controlar? Por qué?

¿Qué modificaría el grupo si repitiera el experimento? Justifique

12. Conclusión del grupo

Redacten una conclusión breve (máximo 5 líneas) que responda a su pregunta de indagación usando las evidencias que obtuvieron.

Conclusión:

13. Reflexión metacognitiva (respondan individual o grupalmente)

¿Cuál fue la decisión más importante que tomaron como grupo? ¿Por qué?

¿Qué aprendieron sobre el diseño experimental que no sabían antes?

¿Cómo usarían esta experiencia en una futura clase de química con estudiantes de secundaria?

¿Qué otros residuos agroindustriales conocen que podrían valorizarse de forma similar? ¿Por qué es importante reducir el desperdicio en la producción de alimentos?

14. Revisión final antes de iniciar (lista de chequeo)

Criterio	Sí	No
----------	----	----

Se seleccionó una sola variable independiente principal.	[]	[]
Se definió una variable dependiente observable o medible.	[]	[]
Se mantuvo constante la masa de muestra en 3,0 g.	[]	[]
Se indicó el tipo de NADES seleccionado.	[]	[]
La proporción del NADES no supera 1:5.	[]	[]
Se registró la cantidad de agua agregada.	[]	[]
Se seleccionó un sistema asistido de extracción.	[]	[]
Se incluyó la centrifugación para obtener el extracto.	[]	[]
El procedimiento fue escrito en pasos claros y ordenados.	[]	[]
La hipótesis se relaciona con la variable seleccionada.	[]	[]

15. Observaciones para mejorar el proceso realizado

Observaciones:

16. Retroalimentación posterior al laboratorio

Aspecto	Respuesta
Mayor dificultad experimental	
Decisión más importante del grupo	
Dato más relevante obtenido	
Posible fuente de error	
Aprendizaje principal	

Bibliografía

Bezerra, F. S., & Koblitz, M. G. B. (2025). Extraction of Phenolic Compounds from Agro-Industrial By-Products Using Natural Deep Eutectic Solvents: A Review. *Separations*, 12(6), 150. DOI: 10.3390/separations12060150

Deffner, S., & Hermanns, J. (2025). Inquiry-Based Learning in a Newly Designed Laboratory Course for Preservice Chemistry Teachers. *Journal of Chemical Education*. DOI: 10.1021/acs.jchemed.4c01057

Carreón-Hidalgo, J. P. et al. (2024). Solventes eutécticos profundos naturales: aplicaciones en biotecnología. *BioTecnología*, 28(2), 31-50. (Acceso abierto)

Santana, A., Hurtado, J., & Benítez, R. (2019). Sustainable synthesis of natural deep eutectic solvents (NADES) by different methods. *Journal of Molecular Liquids*, 293, 111452. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111452>

Google. (2026). *Gemini* [Modelo de lenguaje grande]. <https://gemini.google.com>

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

Anexo J. Rúbrica



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN QUÍMICA



Indicadores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Formula preguntas experimentales, pertinentes y abordables	La pregunta es vaga, descriptiva o no experimental. No delimita claramente qué se desea comparar ni puede abordarse de forma realista en el contexto del laboratorio.	La pregunta se relaciona con la extracción o con los NADES, pero todavía es general o poco precisa. La comparación posible está insinuada, aunque no queda completamente delimitada.	La pregunta es experimental, clara y abordable. Delimita una comparación concreta dentro de los parámetros del problema planteado y resulta coherente con el contexto de extracción de ácido ferúlico con NADES.	La pregunta, además de ser clara y abordable, muestra pertinencia metodológica y conceptual. Define con precisión la relación entre variable de comparación, sistema experimental y propósito de obtención de evidencia.
Planifica procedimientos comparativos acordes con la pregunta planteada	No propone una comparación clara o plantea acciones desconectadas de la pregunta formulada. El procedimiento resulta incompleto o improcedente.	Propone una comparación general, pero con una secuencia poco organizada o con debilidades en la correspondencia entre la pregunta y el procedimiento.	Diseña una comparación coherente con la pregunta experimental, con una secuencia lógica de acciones y una delimitación razonable de condiciones y pasos.	Planifica un procedimiento comparativo claro, secuenciado y consistente, anticipando condiciones de ejecución, criterios de contraste y posibles puntos críticos del proceso.
Identifica variables relevantes y	No distingue con claridad la variable principal de comparación ni las	Reconoce algunas variables relevantes, pero omite otras importantes o no justifica	Identifica la variable principal y establece condiciones de control	Identifica y justifica de manera precisa la variable principal, las variables de control y su

establece condiciones de control	condiciones que deben mantenerse constantes.	adecuadamente las condiciones de control.	pertinentes para que la comparación sea interpretable.	importancia metodológica para asegurar la validez de la comparación experimental.
Ejecuta la práctica de manera sistemática y consistente	La ejecución es desorganizada, con seguimiento irregular del procedimiento y sin cuidado suficiente en la consistencia de las acciones realizadas.	La ejecución sigue parcialmente el procedimiento, pero presenta inconsistencias en tiempos, manipulación, secuencia o control básico de condiciones.	La práctica se ejecuta de forma ordenada, con consistencia general en la secuencia del procedimiento y atención adecuada a las condiciones definidas.	La ejecución es rigurosa, sistemática y coherente con la planificación previa. El participante mantiene control del proceso, actúa con criterio y sostiene la consistencia del procedimiento incluso ante dificultades operativas.
Registra datos y observaciones de forma organizada	El registro es escaso, desordenado o poco útil para reconstruir lo ocurrido durante la práctica.	Se registran algunos datos y observaciones, pero de manera parcial o sin suficiente organización para sustentar un análisis sólido.	El registro incluye datos y observaciones relevantes, organizados de manera comprensible y suficiente para seguir el proceso experimental.	El registro es claro, sistemático y detallado. Permite reconstruir la secuencia experimental, identificar comportamientos del sistema y sustentar decisiones o conclusiones posteriores.
Reconoce dificultades metodológicas durante el proceso	No identifica dificultades relevantes o las atribuye de forma imprecisa sin relacionarlas con el procedimiento o con el comportamiento del sistema.	Reconoce algunas dificultades evidentes, pero con escasa precisión o sin analizar su efecto sobre la calidad de la comparación.	Identifica dificultades metodológicas relevantes surgidas durante la práctica y las relaciona de forma razonable con el procedimiento o con condiciones del sistema experimental.	Reconoce con claridad dificultades metodológicas, interpreta su incidencia sobre la evidencia obtenida y distingue entre problemas de ejecución, de control de variables o de comportamiento del sistema.
Realiza ajustes metodológicos justificados en	No propone ajustes, o los propone sin relación clara con la dificultad observada	Propone ajustes generales, pero con justificación limitada o poco articulada	Plantea ajustes pertinentes y los justifica a partir de las dificultades observadas o	Propone ajustes metodológicos precisos, viables y bien argumentados, mostrando

función de la evidencia obtenida	ni con la evidencia disponible.	con los problemas identificados.	de la evidencia obtenida durante el proceso.	capacidad para revisar críticamente el procedimiento a la luz de la evidencia y mantener coherencia con la pregunta experimental inicial.
----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	--	---

Anexo K. Productos/evidencias de los participantes

Ensayo	NADES (Glicerina)	Proporciones	Agua (%)	Sistema	Area HPLC
1	Ácido láctico	1:1	20	Calentamiento	452821
2	Acido Cítrico	1:1	20	Calentamiento	387446

¿Cómo afecta el tipo de NADES a la cantidad de ácido felónico extraído del salvado de avena durante el proceso de extracción de compuestos fenólicos?

Escriba sus hipótesis individuales o del grupo:

~~Se puede cambiar la cantidad de compuestos fenólicos del salvado de avena, debido a que las propiedades químicas dependen de la solubilidad y la capacidad de extracción de compuestos, esperamos que el láctico tenga mayor cantidad de obtención~~

6.3 Objetivo experimental

Variable.

Independiente Tipo de NADES (Ac. Cítrico y Ac. Láctico)

Dependiente Obtención del Ac. Felónico

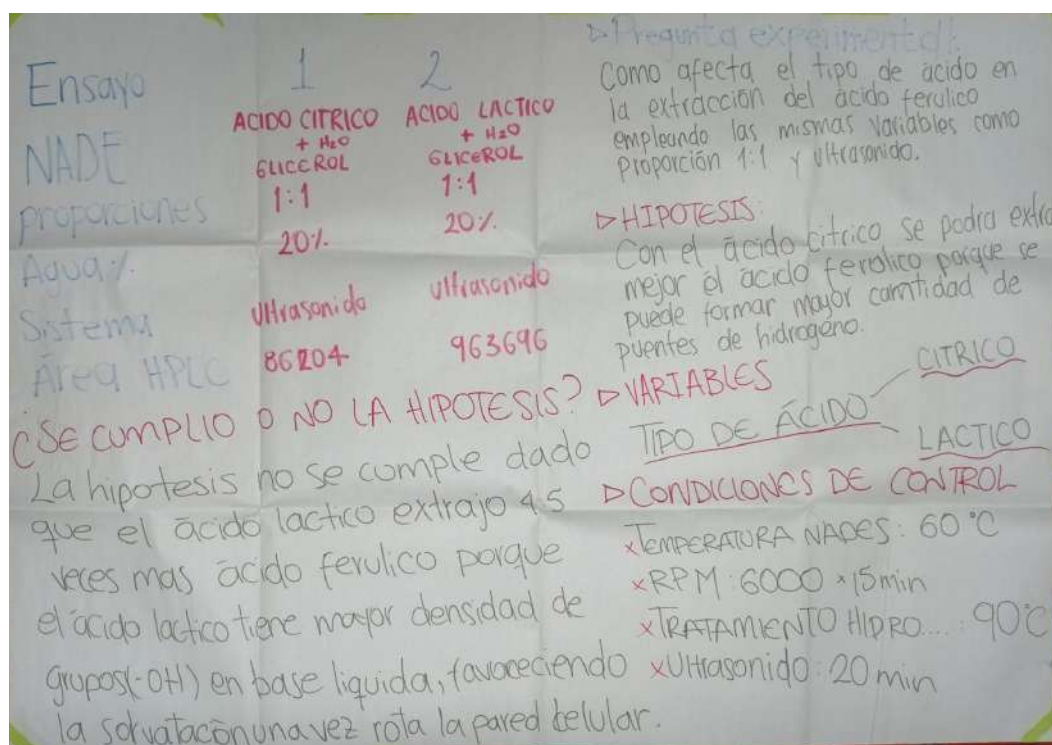
Condiciones

- * plancha de calentamiento a 60 °C y mezcla constante
- * 6000 revoluciones durante 15 minutos

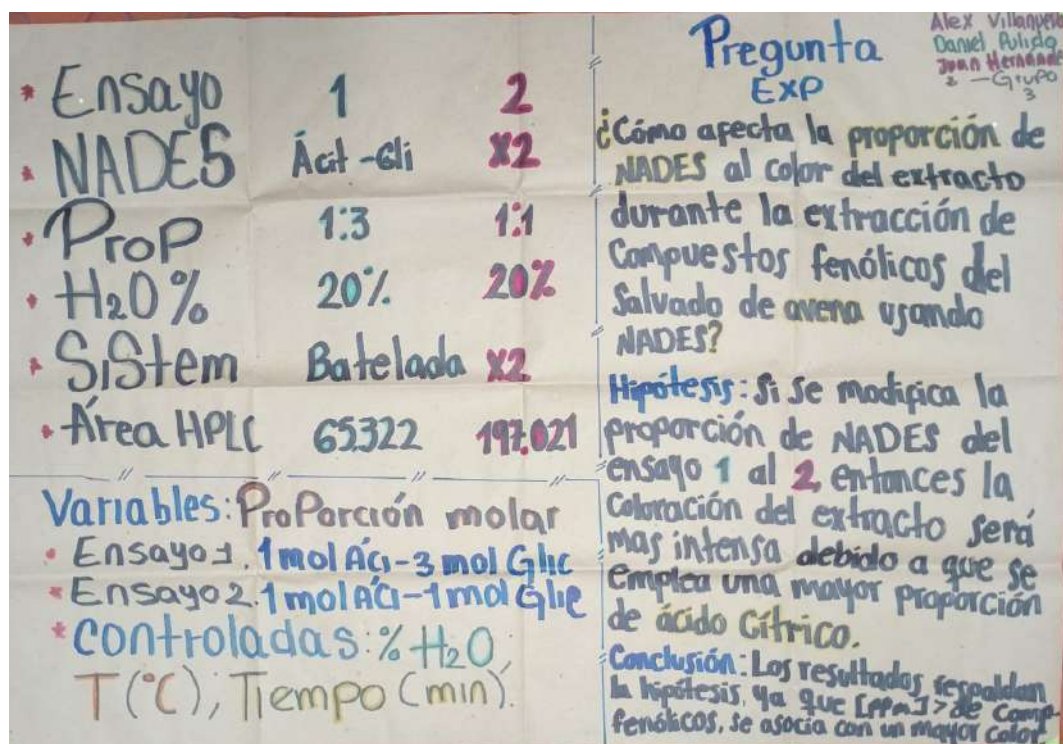
Relación de la hipótesis con los resultados

- En relación con la hipótesis, se confirmó que se obtuvo lo esperado durante la hipótesis, básicamente se obtuvo más ácido felónico en el NADES del Ac. Láctico, que del Ac. Cítrico

Anexo K Figura 1. Productos y evidencias del grupo 1: Cartelera



Anexo K Figura 2. Productos y evidencias del grupo 2: Cartelera



Anexo K Figura 3. Productos y evidencias del grupo 3: Cartelera

Laura Casallas, Juliana Herrera y Laura Pineda

Ensayo	NADES	Proporción	% Agua	Sistema	Área
1	Citrato - Glicerol	1:1	20%	Ultrasonido	177150
2	Lactato - Glicerol	1:1	20%	Ultrasonido	420580

Pregunta Experimental: ¿Qué tipo de NADES (lactato-Glicerol / Citrato-Glicerol) extrae mayor concentración de ácido ferúlico utilizando un sistema asistido por ultrasonido.

Hipótesis: El NADES que actuará como mejor medio de extracción es el que contiene ácido láctico.

Variable: Ácido cítrico: glicerol
Ácido láctico: glicerol

Condiciones de control: T_{ambiente}: 60°C

% Agua: 20% Proporción: 1:1

V_{centrifugación}: 600 r/min T_{temperatura ultrasonido}: 15-20 min

T_{centrifugación}: 15 min T_{tratamiento hidrotermal}: 80°C

Relación Hipótesis y Resultados: Se confirma hipótesis planteada con base en los resultados del HPLC.

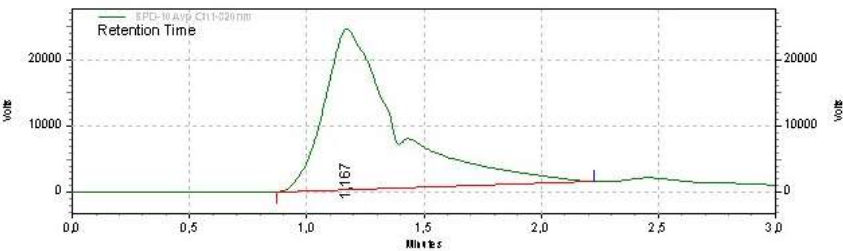
Anexo K Figura 4. Productos y evidencias del grupo 4: Cartelera

Anexo L. Áreas cromatográficas de cada grupo reportadas por el equipo de HPLC

Page 1 of 1

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo 1 acido citrico 2026-05-27.dat
User: System
Acquired: 27/05/2026 03:34:10 p.m.
Printed: 27/05/2026 07:29:16 p.m.



SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

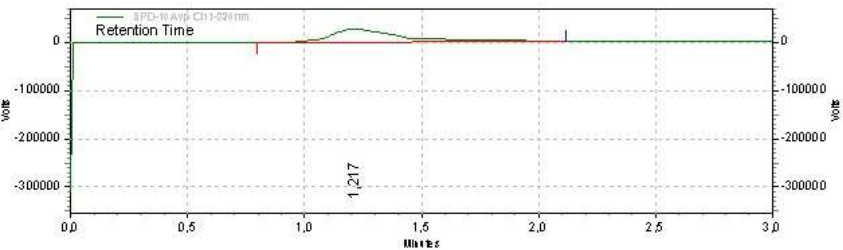
Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.167	523832	100,00	24232	100,00
Totals	523832	100,00	24232	100,00

Anexo L Figura 1. Grupo 1: NADES Ácido cítrico:glicerol

Page 1 of 1

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\grupo 1 acido lactico 2026-05-27.dat
User: System
Acquired: 27/05/2026 03:12:08 p.m.
Printed: 27/05/2026 03:28:14 p.m.



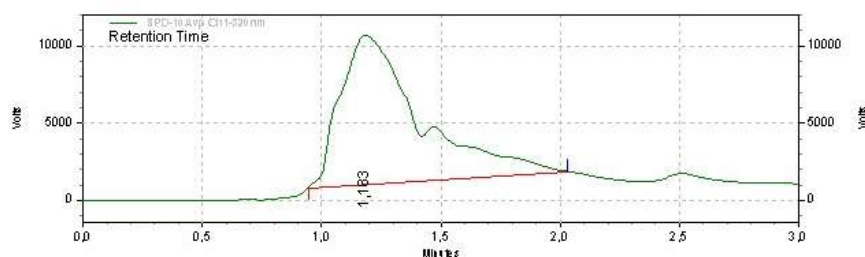
SPD-10Avp
Ch1-320nm
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1.217	589207	100,00	27348	100,00
Totals	589207	100,00	27348	100,00

Anexo L Figura 2. Grupo 1: NADES Ácido láctico:glicerol

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
 Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo2 acido citrico 2026-05-27.dat
 User: System
 Acquired: 27/05/2026 03:47:11 p.m.
 Printed: 27/05/2026 07:33:54 p.m.



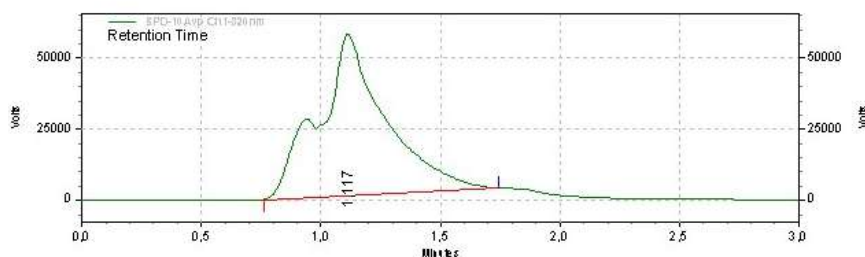
SPD-10Avp
 Ch1-320nm
 Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,183	222590	100,00	9648	100,00
Totals	222590	100,00	9648	100,00

Anexo L Figura 3. Grupo 2: NADES Ácido cítrico:glicerol

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
 Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo2 acido lactico 2026-05-27.dat
 User: System
 Acquired: 27/05/2026 03:40:47 p.m.
 Printed: 27/05/2026 07:34:52 p.m.



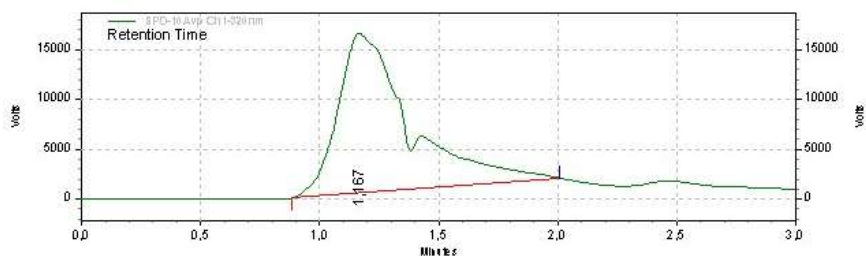
SPD-10Avp
 Ch1-320nm
 Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,117	1100082	100,00	56720	100,00
Totals	1100082	100,00	56720	100,00

Anexo L Figura 4. Grupo 2: NADES Ácido láctico:glicerol

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
 Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo3 acido citrico 1 a 1
 2026-05-27.dat
 User: System
 Acquired: 27/05/2026 03:54:01 p.m.
 Printed: 27/05/2026 07:35:56 p.m.



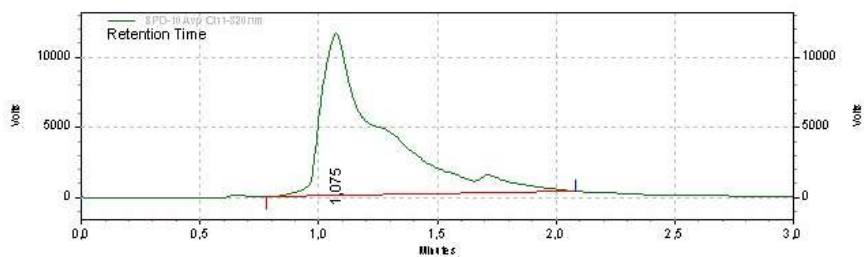
SPD-10Avp
 Ch1-320nm
 Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,167	333407	100,00	16002	100,00
Totals	333407	100,00	16002	100,00

Anexo L Figura 5. Grupo 3: NADES Ácido cítrico:glicerol (1:1)

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
 Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo3 acido citrico 1 a 3
 2026-05-27.dat
 User: System
 Acquired: 27/05/2026 04:00:09 p.m.
 Printed: 27/05/2026 07:36:42 p.m.



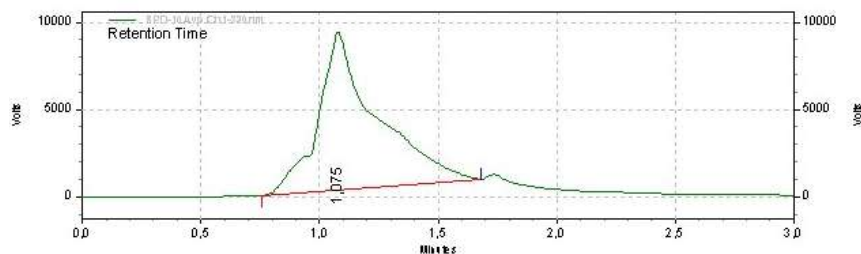
SPD-10Avp
 Ch1-320nm
 Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,075	201708	100,00	11604	100,00
Totals	201708	100,00	11604	100,00

Anexo L Figura 6. Grupo 3: NADES Ácido cítrico:glicerol (1:3)

Area % Report

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
 Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo Lau Pin acido citrico
 2026-05-27.dat
 User: System
 Acquired: 27/05/2026 04:06:30 p.m.
 Printed: 27/05/2026 07:32:27 p.m.

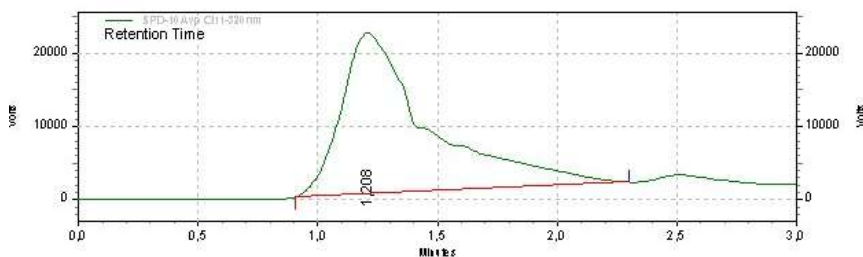


SPD-10Avp
 Ch1-320nm
 Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,075	154101	100,00	9055	100,00
Totals	154101	100,00	9055	100,00

Anexo L Figura 7. Grupo 4: NADES Ácido cítrico:glicerol**Area % Report**

Method Name: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Acido Ferulico 2026-03-25.met
 Data: C:\EZStart\Projects\Default\Methods\2026\BLANCA\Grupo Lau Pin acido lactico
 2026-05-27.dat
 User: System
 Acquired: 27/05/2026 04:13:34 p.m.
 Printed: 27/05/2026 07:31:00 p.m.



SPD-10Avp
 Ch1-320nm
 Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
1,208	556966	100,00	21977	100,00
Totals	556966	100,00	21977	100,00

Anexo L Figura 8. Grupo 4: NADES Ácido láctico:glicerol

Anexo M. Sistema de códigos y matriz de codificación del análisis cualitativo

Este anexo documenta el sistema de códigos empleado en el análisis cualitativo de contenido y su aplicación empírica. La codificación siguió un enfoque deductivo-inductivo coherente con el análisis temático (Braun y Clarke, 2006, 2023) y con el diseño mixto convergente (Creswell & Plano Clark, 2018): las categorías y nodos se anclaron en los siete indicadores de la habilidad de indagación experimental (marco teórico y rúbrica) y se refinaron con subnodos emergentes de las fuentes. La estructura jerárquica del sistema se representa gráficamente en la Figura 3.

Las fuentes codificadas fueron el pretest, formato de indagación, postest y carteleros de socialización. Y el alcance de la matriz empírica de este anexo corresponde a la matriz caso $\times$ nodo y las frecuencias corresponden a la codificación detallada del pretest ($n = 8$ casos: S1–S8), que constituye la línea de base.

Los nodos que se nutren principalmente del formato/postest/carteleros (como anomalías físico-reológicas observadas en la práctica y explicación intermolecular) se relacionan en el libro de códigos y se completarán con la codificación del resto del corpus.

Anexo M Tabla 1. Sistema de códigos y su correspondencia con los siete indicadores de la rúbrica

Código	Nombre	Definición operativa (qué se codifica)	Indicador
CAT-1 · Evolución del razonamiento experimental y control de variables			
NOD-1.1	Formulación de preguntas e hipótesis	Modo en que el participante plantea la pregunta/hipótesis que guía la comparación.	Ind. 1
SUB-1.1a	Preguntas descriptivas / incompletas	Interrogantes sueltos, no comparativos o sin variable definida.	Ind. 1
SUB-1.1b	Preguntas comparativas / correlacionales	Pregunta que contrasta dos alternativas (reactivos/técnicas) con criterio.	Ind. 1
NOD-1.2	Control y discriminación de variables	Identificación y distinción de variables y condiciones de control.	Ind. 3
SUB-1.2a	Variable independiente – NADES / sistema	Reconoce lo que se cambia a propósito (tipo de NADES, sistema asistido).	Ind. 3
SUB-1.2b	Variable dependiente – señal HPLC	Reconoce lo que se mide (rendimiento, % recuperación, área/señal).	Ind. 3
SUB-1.2c	Justificación de parámetros de control	Constantes justificadas (temperatura, masa, proporción, volumen).	Ind. 3

NOD-1.3	Planificación del procedimiento	Secuencia de pasos y ejecución comparable de las condiciones.	Ind. 2, 4
CAT-2 · Obstáculos metodológicos, desviaciones y autorregulación			
NOD-2.1	Anomalías físico-reológicas	Dificultades del sistema NADES-avena que afectan la evidencia.	Ind. 6
SUB-2.1a	Viscosidad reológica del NADES	Alta viscosidad que dificulta mezcla/filtración.	Ind. 6
SUB-2.1b	Emulsión / espuma por ultrasonido	Formación de espuma/emulsión que dificulta la separación.	Ind. 6
SUB-2.1c	Fluctuación térmica / agitación	Variación de temperatura o agitación no controlada.	Ind. 6
NOD-2.2	Reajustes justificados	Ajustes al procedimiento fundamentados en la dificultad detectada.	Ind. 7
SUB-2.2a	Variación de tiempos / temperatura	Ajuste de tiempo o temperatura (y adición de agua) con justificación.	Ind. 7
SUB-2.2b	Ajuste: extracción L-L con acetato de etilo	Cambio de estrategia de separación para lectura instrumental.	Ind. 7
CAT-3 · Apropriación científica, química verde y transposición didáctica			
NOD-3.1	Explicación intermolecular	Uso de modelos químicos para explicar la extracción.	Transv.
SUB-3.1a	Puentes de hidrógeno y solvatación	Explica la extracción por interacciones NADES-analito.	Transv.
SUB-3.1b	Densidad de grupos –OH: láctico vs cítrico	Compara reactivos por su química (grupos funcionales).	Transv.
NOD-3.2	Química verde y ODS 12	Encuadra la decisión en sostenibilidad / menor impacto.	Transv.
SUB-3.2a	Sustitución de solventes tóxicos	Justifica NADES frente a solventes orgánicos convencionales.	Transv.
NOD-3.3	Transposición didáctica	Proyección del aprendizaje a la enseñanza escolar.	Transv.
SUB-3.3a	Proyectos escolares en secundaria	Ideas de llevar la indagación al aula propia.	Transv.

Anexo M Tabla 2. Frecuencia de nodos en el pretest (n = 8): Casos que evidencian cada nodo (línea de base)

Nodo	Casos	Casos que lo evidencian
Pregunta comparativa explícita (Ind. 1)	4	S2, S3, S4, S8 (+ S5 en adenda)
Foco en una sola condición / no comparativa	4	S1, S5 (inicial), S6, S7
Criterio = rendimiento / % recuperación	5	S2, S5, S6, S7, S8
Confusión variable independiente/dependiente	4	S1, S3, S5, S7
Alfabetización instrumental (IR, UV-Vis, HPLC, pH)	3	S8, S3, S7
Viscosidad / filtración como obstáculo	3	S2, S5, S7
Sostenibilidad / ODS 12	3	S4, S2, S1
Ajuste = agua / temperatura / solvente	6	S1, S2, S3, S4, S6, S7
Replicabilidad / control de error	2	S4, S8

Anexo M Tabla 3. Matriz caso × nodo (pretest): Matriz de codificación — ● presencia · ◐ parcial · ◯ ausente

Nodo	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Pregunta comparativa (Ind.1)	◯	●	●	●	◐	◐	◐	●
Planificación con criterio (Ind.2)	◐	●	●	●	●	●	●	●
Distingue VI/VD (Ind.3)	◯	◐	◐	●	◯	●	◐	●
Ejecución comparable (Ind.4)	◯	◐	◐	●	◯	●	◐	●
Diseña registro/tabla (Ind.5)	◐	●	●	●	◐	●	◐	●
Identifica dificultad (Ind.6)	●	●	●	●	●	◐	●	◐
Ajuste justificado (Ind.7)	◐	●	◐	●	◐	◐	◐	◐
Instrumentación analítica	◯	◯	●	◯	◯	◯	◐	●
Sostenibilidad / ODS 12	◐	◐	◯	●	◯	◯	◯	◯

Clave de casos (pretest): S1 Morales · S2 Casallas · S3 Pineda · S4 Herrera · S5 Núñez · S6 Olarte · S7 Guzmán · S8 Villanueva. La identificación se conserva anonimizada en el cuerpo de la tesis.

Anexo M. 4. Citas fuente por nodo

Se presentan extractos verbatim de las respuestas manuscritas del pretest organizados por nodo (identificador de caso entre paréntesis).

NOD-1.1 · Formulación de preguntas e hipótesis

SUB-1.1b (comparativa):

“¿De qué manera se puede extraer el ácido ferúlico realizando distintos tipos de pretratamiento (vía seca y húmeda)... con equipos como IR, UV-Vis y espectrofotómetro, para comparar la preconcentración de ambos medios? (S8)”

“¿Cómo se podría llevar a cabo una ruta de extracción sostenible... comparando el uso de ácido cítrico y ácido láctico, con proporciones diferentes, a través de la técnica de ultrasonido, para identificar cuál presenta la mayor eficacia? (S2)”

SUB-1.1a (descriptiva/incompleta):

“¿Cuál es la ruta correspondiente que se debe llevar a cabo para evitar los solventes orgánicos? [interrogantes sueltos, sin variable a comparar] (S1)”

NOD-1.2 · Control y discriminación de variables

SUB-1.2b (variable dependiente / señal):

“Para conocer cuál es mejor se puede medir el porcentaje de recuperación, es decir el ácido ferúlico final de cada técnica. (S5)”

Confusión VI/VD (código emergente):

“Variables = cantidad o peso de muestra. Constantes: temperatura, cantidad de reactivos. (S1)”

“La variable que depende de la extracción son las técnicas a usar. (S5)”

NOD-2.1 · Anomalías físico-reológicas

“La filtración puede afectar la cantidad de ácido ferúlico que puede extraerse... pienso que el solvente no funciona de forma óptima. (S2)”

“Este salvado, al estar en solución, se puede formar grumos... lo que puede dificultar su manejo o pérdida de materia. (S5)”

NOD-2.2 · Reajustes justificados

“Adición de agua, cambiar la temperatura, esto porque influye en la cinética de reacción... ajustaría temperatura y diluiría más. (S2)”

“Utilizaría otro solvente que pudiera ser más compatible con el salvado. (S7)”

NOD-3.1 y NOD-3.2 · Apropiación científica y química verde

SUB-3.2a (sustitución de solventes / ODS):

“...para la extracción de ácido ferúlico es propicio utilizar el ácido láctico frente al ácido cítrico... y garantizar menor impacto ambiental. (S4)”

Alfabetización instrumental (indicio de apropiación):

“IR→identificar compuestos; cromatografía→analizar a profundidad su composición; pruebas bromatológicas→determinar si es válido el extracto; pH. (S3)”

Anexo M. 5. Nota metodológica

La codificación fue realizada por un único codificador, en coherencia con la valoración de la rúbrica, se reconoce como limitación y se proyecta una segunda codificación con cálculo de acuerdo entre evaluadores. Las categorías CAT-1 a CAT-3 no sustituyen a los siete indicadores, sino que agrupan sus manifestaciones para facilitar la lectura de patrones, manteniendo la trazabilidad con la rúbrica (Anexo J).