



Implementación de herramientas de IA (NotebookLM) para la capacitación técnica en normatividad relacionada con los residuos peligrosos

Implementation of AI tools (NotebookLM) for technical training on regulations related to hazardous waste

José Ramón Laines-Canepa

División Académica de Ciencias Biológicas

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

0000-0002-6770-5596 | jose.laines@ujat.mx

Luis Fernando Botero-Mendoza*

Comunidad Internacional de Profesores Cerebrote

Colombia

0009-0005-5092-2171 | cerebrotevirtual@gmail.com

*Autor para correspondencia

Cita APA: Laines-Canepa, J. R. y Botero-Mendoza, L. F. (2025). Implementación de herramientas de IA (NotebookLM) para la capacitación técnica en normatividad relacionada con los residuos peligrosos. *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 97-113. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18685034>

Resumen

El manejo sostenible de los residuos peligrosos constituye desafíos críticos para la ingeniería ambiental. La complejidad técnica de regulaciones inmersas en la NOM-052-SEMARNAT-2005, piedra angular para definir la peligrosidad de un residuo, como las NOM-004-SEMARNAT-2002, NOM-133-SEMARNAT-2015, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, NOM-141-SEMARNAT-2003 y NOM-055-SEMARNAT-2003, generan barreras de aprendizaje significativas. Este estudio investiga la eficacia de una estrategia pedagógica mediada por Inteligencia Artificial Generativa para transformar textos normativos en formatos de audio (podcasts), facilitando su asimilación. Bajo un diseño cuasiexperimental en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se comparó el desempeño de un grupo experimental (n=22) frente a una línea base histórica controlada (n=60). Los resultados indican una mejora estadísticamente significativa ($\chi^2= 11.2$, $p < 0.001$), reduciendo la tasa de reprobación del 60% al 18.2%. Se concluye que la tecnología de generación de audio mediante IA reduce la carga cognitiva extrínseca, permitiendo una apropiación más profunda de la normativa técnica.

Palabras clave: Enseñanza técnica, residuos peligrosos, inteligencia artificial, NotebookLM.

Abstract

The sustainable management of soil resources and the proper disposal of biosolids are critical challenges for environmental engineering. The technical complexity of regulations such as NOM-004-SEMARNAT-2002 and NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 creates significant learning barriers. This study investigates the effectiveness of a pedagogical strategy mediated by Generative Artificial Intelligence (GAI) to transform regulatory texts into audio formats (podcasts), facilitating their assimilation. Under a quasi-experimental design at the Juárez Autónoma University of Tabasco, the performance of an experimental group (n=22) was compared to a controlled historical baseline (n=60). The results indicate a statistically significant improvement ($\chi^2=11.2$, $p < 0.001$), reducing the failure rate from 60% to 18.2%. It is concluded that AI-based audio generation technology reduces extrinsic cognitive load, allowing for a deeper understanding of technical regulations.

Key Words: Technical education, hazardous waste, artificial intelligence, NotebookLM.

Introducción

La formación de capital humano capaz de gestionar los impactos ambientales de las actividades productivas es vital para la sostenibilidad ambiental, agrícola e industrial en México. En particular, la gestión de suelos y residuos orgánicos representa uno de los ejes más sensibles para la protección ambiental. La degradación de suelos por hidrocarburos y el manejo inadecuado de lodos provenientes de plantas de tratamiento conllevan riesgos severos para la seguridad alimentaria y la salud pública.

En este contexto, el marco normativo mexicano establece límites técnicos y procedimientos obligatorios a través de instrumentos como la NOM-004-SEMARNAT-2002- Lodos y biosólidos.-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003), NOM-133-SEMARNAT-2015 - Bifenilos Policlorados (BPCs), especificaciones de manejo. Control de compuestos tóxicos persistentes de uso industrial (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016), NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012- Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013), NOM-141-SEMARNAT-2003 - Procedimiento para caracterizar jales. Regula residuos mineros que pueden contener metales pesados (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2004), y NOM-055-SEMARNAT-2003 - Requisitos para sitios de confinamiento controlado de residuos peligrosos. Establece criterios de diseño para minimizar impacto ambiental (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2004).

Sin embargo, la enseñanza de este marco legal enfrenta barreras pedagógicas significativas. Los estudiantes de Ingeniería Ambiental suelen manifestar dificultades para interpretar y aplicar documentos regulatorios extensos, caracterizados por una alta densidad de datos numéricos y lenguaje jurídico. Esta complejidad impone lo que la teoría educativa define como una alta "carga cognitiva intrínseca" (Sweller, 2011), dificultando la comprensión profunda y la transferencia del conocimiento a situaciones reales. En la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), esta dificultad se ha traducido históricamente en tasas de reprobación cercanas al 60% en asignaturas de Legislación Ambiental, Generación y Prevención de Residuos y Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial evidenciando una desconexión entre la memorización teórica y la práctica profesional requerida.

Para abordar esta problemática, la presente investigación propone un cambio de paradigma instruccional mediante la incorporación de Inteligencia

Artificial Generativa (GenAI). Recientemente, la literatura ha destacado el potencial de la GenAI para transformar materiales estáticos en recursos dinámicos y personalizados (Kong *et al.*, 2025). Específicamente, este estudio utiliza la herramienta NotebookLM de Google, la cual se fundamenta en Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) integrados con tecnología de Generación Aumentada por Recuperación (RAG, por sus siglas en inglés).

Desde una perspectiva técnica, la arquitectura RAG permite al modelo "leer" y procesar documentos fuente específicos (en este caso, los PDFs de las Normas Oficiales) para generar síntesis y explicaciones fiables, minimizando las "alucinaciones" o errores comunes en modelos generativos abiertos al limitar el contexto de respuesta a la información proporcionada (Lewis *et al.*, 2020). Esta capacidad de procesamiento permite no solo resumir textos eficientemente (Hutapea *et al.*, 2025), sino transformar la modalidad de la información de texto a audio.

La estrategia pedagógica se centra en la conversión de la normativa técnica a formatos de audio conversacional (podcasts generados por IA). Estudios recientes, como el de Jafarian y Kramer (2025), sugieren que el aprendizaje asistido por audio mediante IA puede mejorar el rendimiento académico al reducir la carga cognitiva extrínseca y aumentar la motivación del estudiante a través de la accesibilidad y la flexibilidad del formato. Al diversificar los canales de entrada de información y situar el aprendizaje en contextos auditivos tipo diálogo, se libera capacidad de procesamiento visual para el análisis de tablas y datos técnicos complejos.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficacia de esta estrategia didáctica mediada por NotebookLM. Se plantea la hipótesis de que el acceso a la información técnica mediante canales auditivos generados por IA, reforzado con evaluaciones basadas en la resolución de problemas reales, mejora significativamente la retención del conocimiento y la competencia técnica de los estudiantes en comparación con los métodos tradicionales de lectura y cátedra. La aportación principal de este trabajo radica en la validación empírica de herramientas de GenAI (específicamente RAG y audio-generación) aplicadas a la educación superior en ciencias ambientales, un campo donde la precisión técnica es un no-negociable

Materiales y métodos

Diseño de investigación y participantes

El presente estudio adoptó un diseño cuasiexperimental con grupos no concurrentes para evaluar la eficacia de herramientas de inteligencia artificial en el aprendizaje de la normatividad sobre residuos peligrosos dentro del marco de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

Este diseño fue seleccionado debido a la naturaleza del entorno educativo, donde la aleatorización completa de los estudiantes no es factible sin interrumpir la estructura curricular establecida en los tiempos dispuestos. La población de estudio consistió en estudiantes del Programa Educativo de Licenciatura en Ingeniería Ambiental de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), específicamente cursando la asignatura de "Generación y prevención de residuos". Esta asignatura fue seleccionada por ser el punto curricular donde convergen las normativas para el estudio de Residuos Peligrosos dentro de la NORMA Oficial Mexicana NOM-052-, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos (SEMARNAT-2005), presentando históricamente altos índices de dificultad conceptual.

La muestra total (N=82) se distribuyó en dos grupos no concurrentes para evitar la contaminación cruzada de la intervención pedagógica:

1. **Grupo experimental (n=22):** estudiantes inscritos en el ciclo escolar 2024, expuestos a la metodología de aprendizaje asistido por IA (podcasts y evaluación situada).
2. **Grupo control histórico (n=60):** datos académicos recopilados de las actas oficiales de los tres ciclos escolares inmediatamente anteriores (2021, 2022, 2023), donde la enseñanza se impartió bajo el método tradicional (clase magistral expositiva y lectura de textos). El uso de controles históricos permite establecer una línea base de rendimiento en contextos donde no es viable implementar grupos control concurrentes, constituyendo una estrategia válida dentro de los diseños cuasiexperimentales aplicados a evaluaciones educativas e innovaciones curriculares (Campbell y Stanley, 1963; Cook y Campbell, 1986; Walser, 2014). Este enfoque facilita la comparación con cohortes previas mediante datos archivados bajo condiciones institucionales relativamente estables.

Configuración tecnológica (NotebookLM e IA Generativa)

NotebookLM e IA generativa

Como motor de procesamiento de información se utilizó NotebookLM (Google), una plataforma basada en arquitectura de Generación Aumentada por Recuperación (RAG), la cual permite anclar las respuestas del modelo exclusivamente a los documentos fuente proporcionados. Este enfoque reduce el riesgo de generación de información no sustentada y favorece la trazabilidad del contenido educativo generado (Lewis et al., 2020).

La Figura 1 muestra el entorno de interacción utilizado durante el estudio, donde se integró la NOM-052-SEMARNAT-2005 como fuente normativa principal mediante los módulos de fuentes, chat y estudio.

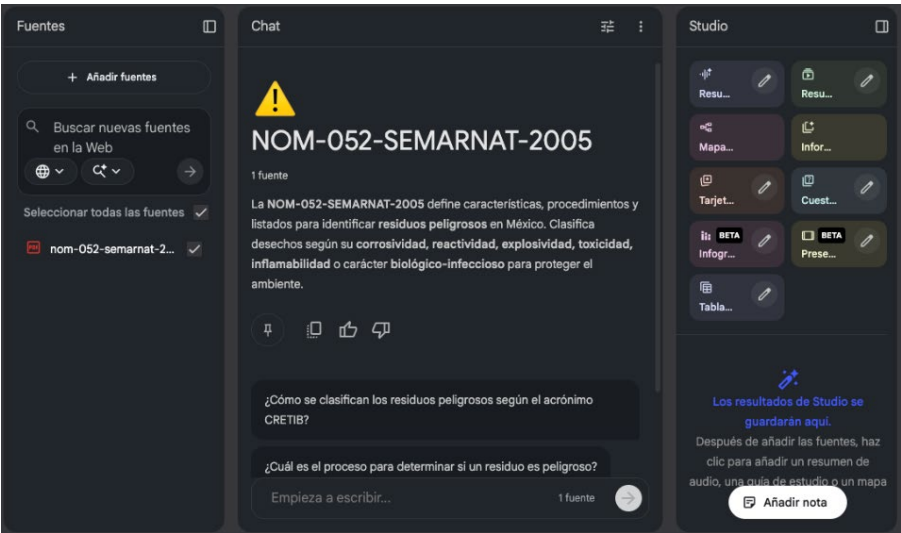


Figura 1. Entorno de interacción con inteligencia artificial mostrando la carga de fuentes normativas y la interfaz de consulta utilizada durante el estudio.

La configuración técnica se estructuró bajo un protocolo estandarizado compuesto por las siguientes etapas:

I. Ingesta de datos:

Se cargaron al sistema los archivos PDF completos de seis Normas Oficiales Mexicanas (Tabla 1), constituyendo un corpus cerrado de conocimiento. Cada norma fue incorporada en un cuaderno independiente dentro de la plataforma, con el objetivo de mantener separación temática y control de contexto durante la generación de respuestas.

Tabla 1. Relación de Normas Oficiales Mexicanas procesadas y transformadas a formato de audio mediante NotebookLM.

Norma	Descripción y relevancia en el estudio
NOM-052-SEMARNAT-2005	Características, procedimiento de identificación, clasificación y listados de residuos peligrosos. Piedra angular para definir la peligrosidad de un residuo.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles. Regula el manejo de lodos para evitar contaminación en su disposición final.
NOM-133-SEMARNAT-2015	Bifenilos Policlorados (BPCs), especificaciones de manejo. Control de compuestos tóxicos persistentes de uso industrial.
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos. Fundamental para procedimientos de muestreo y remediación en zonas petroleras.

Norma	Descripción y relevancia en el estudio
NOM-141-SEMARNAT-2003	Procedimiento para caracterizar jales. Regula residuos mineros que pueden contener metales pesados.
NOM-055-SEMARNAT-2003	Requisitos para sitios de confinamiento controlado de residuos peligrosos. Establece criterios de diseño para minimizar impacto ambiental.

Fuente: Elaboración propia

II. Ingeniería de prompts (Prompt engineering):

Para la generación de los “Audio Overviews”, el modelo fue instruido para simular un diálogo técnico entre dos expertos en gestión de residuos. El prompt se diseñó para priorizar aprendizajes profesionales contextualizados relevantes para la formación en Ingeniería Ambiental, enfatizando:

- a) la identificación de límites máximos permisibles,
- b) la explicación de procedimientos de muestreo y
- c) la discusión de errores comunes en la aplicación de la norma.

La Figura 2 muestra la interfaz de personalización del resumen de audio donde se definieron idioma, duración y estructura pedagógica del prompt.

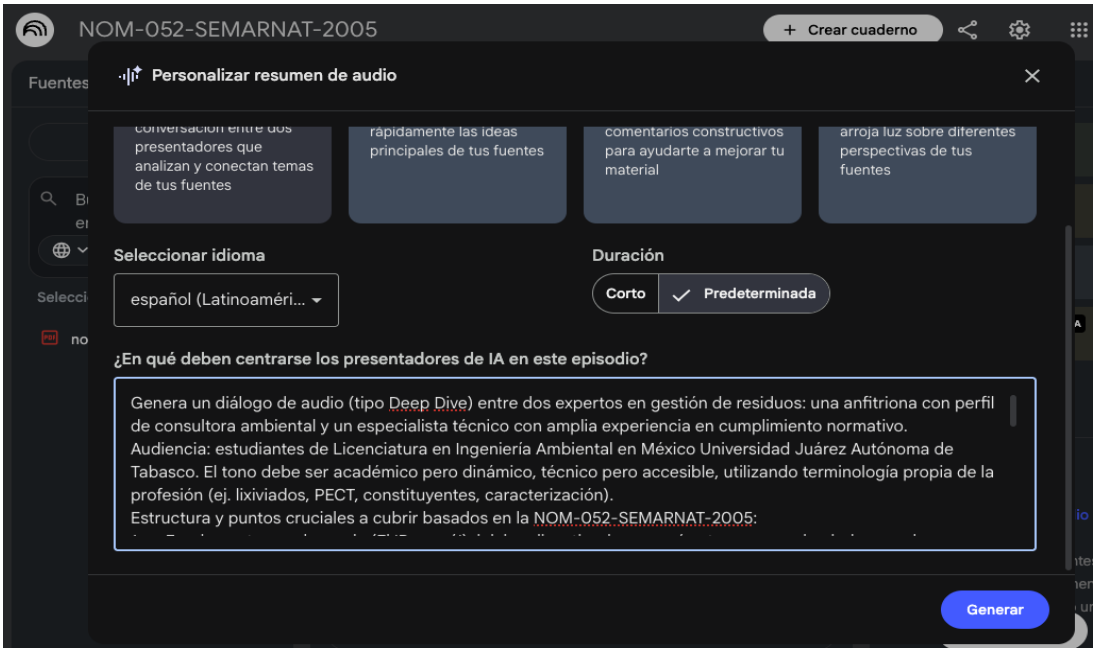


Figura 2. Interfaz de configuración del prompt instruccional para la generación de contenido educativo mediante inteligencia artificial basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005.

La configuración del modelo se estructuró mediante un prompt pedagógico alineado con los criterios del instrumento evaluativo descrito en los apartados 6.4.2 (estructura normativa) y 8.1 (criterios de evaluación del

desempeño académico), con el propósito de mantener coherencia entre la generación automatizada de contenido y los indicadores del estudio.

Prompt maestro para NotebookLM:

Instrucción de configuración de audio (lo puede probar copiando y pegando en la pestaña de configuración de audio en NotebookLM):

"Genera un diálogo de audio (tipo Deep Dive) entre dos expertos en gestión de residuos: una anfitriona con perfil de consultora ambiental y un especialista técnico con amplia experiencia en cumplimiento normativo.

Audiencia: estudiantes de Licenciatura en Ingeniería Ambiental en México Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. El tono debe ser académico pero dinámico, técnico pero accesible, utilizando terminología propia de la profesión (ej. lixiviados, PECT, constituyentes, caracterización).

Estructura y puntos cruciales a cubrir basados en la NOM-052-SEMARNAT-2005:

- 1. Fundamentos y relevancia (El 'Por qué'):** inicien discutiendo por qué esta norma es la piedra angular para un ingeniero ambiental en México. Expliquen que no solo es un listado, sino la base legal para prevenir la contaminación del suelo y agua.
- 2. Identificación y límites (Tabla 2):** Analicen la importancia de los Límites Máximos Permisibles (LMP) en el extracto PECT. Mencionen específicamente cómo sustancias como el Arsénico, Cadmio o Benceno definen la peligrosidad de un residuo.
- 3. El proceso de caracterización (muestreo y análisis):** expliquen el flujo de decisión (Figura 1) y el procedimiento de evaluación de la conformidad. Resalten que las muestras deben ser representativas y tomadas directamente del proceso o almacenamiento, subrayando la importancia de la cadena de custodia (Numeral 8.1).
- 4. Errores comunes y 'trampas' de la norma:** discutan fallos típicos en la práctica, como:
 - Confundir un residuo no listado con un residuo no peligroso (olvidar el análisis CRIT).
 - No considerar las 'Condiciones Particulares de Manejo' del Listado 5.
 - Errores en la interpretación del acrónimo CRETIB vs. CRIT.
- 5. Mensaje final:** concluyan con un consejo para los estudiantes sobre su responsabilidad ética y técnica al firmar manifestaciones basadas en conocimiento científico (Numeral 6.4.2).

Restricción de estilo: eviten un resumen plano. Creen una conversación donde se cuestionen entre sí, den ejemplos de giros

industriales (como la industria del petróleo o química) y mantengan la energía de un podcast de expertos que aman la ingeniería ambiental.”

III. Control de sesgos y verificación:

Se implementó un esquema Human-in-the-Loop mediante el cual el docente titular auditó los audios generados para verificar la precisión normativa y la consistencia de los valores numéricos antes de su distribución. En caso de detectar inconsistencias, se realizaron ajustes iterativos del prompt y una nueva generación del contenido, fortaleciendo así la validez interna del proceso.

IV. Resultado de la aplicación:

El audio resultante para este ejemplo corresponde a un archivo MP3 con una duración total de 13 min 34 s, disponible en el siguiente recurso digital: https://drive.google.com/file/d/14F_kDUvjSIQBNmoxwTNwyAns-fWI4pOO/view?usp=sharing

Instrumentos de evaluación

Para medir el desempeño del grupo experimental, se sustituyeron los exámenes tradicionales por una rúbrica de evaluación práctica situada. Este instrumento fue diseñado en alineación con los atributos de egreso definidos por el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACE, el organismo oficial en México encargado de garantizar la calidad de los programas educativos de ingeniería.

La rúbrica evaluó cuatro competencias técnicas alineadas con las categorías reportadas en la Tabla 3:

- 1. Identificación de residuos (NOM-052):** capacidad para clasificar residuos conforme a características CRETIB y listados normativos.
- 2. Muestreo de suelos (NOM-138):** diseño adecuado de estrategias de muestreo y caracterización en sitios potencialmente contaminados.
- 3. Interpretación legal:** habilidad para citar artículos específicos de la normativa aplicable y sustentar decisiones técnicas.
- 4. Propuesta de remediación:** factibilidad técnica y coherencia en la formulación de soluciones para la gestión ambiental.

Para el grupo control, se recopilaron las calificaciones finales asentadas en las actas oficiales de la universidad, las cuales reflejaban el promedio de exámenes teóricos y tareas tradicionales.

Procedimiento experimental

La intervención educativa se estructuró en tres fases secuenciales durante el semestre:

- 1) **Fase de producción (Semana 1-2):** curaduría de los documentos normativos y generación de los activos de audio mediante IA.
- 2) **Fase de implementación (Semana 3-14):** distribución semanal de los podcasts a través de plataformas móviles (LMS institucional/WhatsApp) bajo un modelo de Aula Invertida (Flipped Classroom). El tiempo de clase presencial se reasignó: de la lectura de normas a la discusión de dudas surgidas tras la escucha de los audios.
- 3) **Fase de evaluación (Semana 15-16):** aplicación de la evaluación basada en escenarios. Se presentaron casos complejos (ej. "Derrame de diésel en parcela agrícola cerca del río Grijalva") y los estudiantes entregaron informes técnicos justificativos, cuya calificación constituyó la nota final del curso.

Análisis de datos

Los datos cuantitativos fueron procesados utilizando el software estadístico R. Se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar) para caracterizar el rendimiento. Para evaluar la hipótesis principal, se aplicó la prueba de Chi-cuadrada de Pearson (χ^2) para analizar la independencia entre la condición experimental y el estatus de aprobación, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha= 0.05$.

Resultados

Análisis del rendimiento académico

El análisis comparativo entre la línea base histórica y el grupo intervenido revela un cambio significativo en las tasas de éxito académico. Históricamente, la asignatura presentaba una barrera de complejidad alta, con un promedio de aprobación de apenas el 40% durante los tres ciclos escolares previos.

Como se observa en la Tabla 2, la implementación de la estrategia basada en audios generados por IA revirtió esta tendencia. La tasa de aprobación en el grupo experimental se elevó al 81.8%, lo que representa un incremento de 41.8 puntos porcentuales respecto al grupo control histórico.

Tabla 2. Resultados de comparación de tasas de aprobación y reprobación: Grupo Control Histórico vs. Grupo Experimental.

Grupo de estudio	N (Total)	Aprobados n (%)	Reprobados n (%)	Valor P
Control histórico (Promedio 2021-2023)	60	24 (40.0%)	36 (60.0%)	--
Experimental (Intervención con NotebookLM)	22	18 (81.8%)	4 (18.2%)	<0.001

Fuente: Elaboración propia

La prueba de independencia χ^2 de Pearson indicó una asociación estadísticamente significativa ($\chi^2 (1) = 11.2, p < 0.001$). Este resultado permite rechazar la hipótesis nula, confirmando que existe una dependencia estadísticamente significativa entre la estrategia pedagógica implementada (podcasts + evaluación situada) y la mejora en la tasa de aprobación de los estudiantes.

Estos hallazgos empíricos son consistentes con la premisa teórica propuesta por Lewis et al. (2020) respecto al uso de arquitecturas de Generación Aumentada por Recuperación (RAG), las cuales favorecen la generación de lenguaje más objetivo y anclado a fuentes verificables. En el contexto educativo analizado, esta característica se traduce en una asimilación más precisa y menos abrumadora de parámetros técnico-normativos complejos, lo que contribuye a explicar la mejora sustancial observada en el desempeño académico.

Es importante desglosar que, de los 4 estudiantes reprobados en el grupo experimental, el 50% (2 casos) correspondieron a deserción por motivos ajenos a la dificultad académica (abandono temprano), lo que sugiere que la reprobación efectiva vinculada a la falta de competencias fue marginal.

Nivel de logro en competencias técnicas

Más allá de la calificación sumativa, se evaluó el dominio de competencias específicas mediante la rúbrica práctica alineada a CACEI. La Tabla 3 detalla la distribución porcentual de los estudiantes del grupo experimental en tres niveles de desempeño: Bajo, Medio y Alto.

Tabla 3. Nivel de logro de competencias técnicas en el Grupo Experimental (n=22).

Competencia técnica evaluada	Nivel Bajo (%)	Nivel Medio (%)	Nivel Alto (%)	Descripción del logro esperado
Identificación de residuos (NOM-052)	4.5%	13.6%	81.9%	Capacidad para clasificar residuos según características CRETIB y listados normativos.
Muestreo de suelos (NOM-138)	9.0%	22.7%	68.3%	Diseño correcto de patrones de muestreo (malla, zig-zag) en sitios contaminados.
Interpretación legal	13.6%	27.3%	59.1%	Habilidad para citar artículos específicos para justificar decisiones técnicas.
Propuesta de remediación	18.2%	31.8%	50.0%	Viabilidad técnica en la propuesta de soluciones para limpieza de sitios.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian que el mayor impacto de la herramienta NotebookLM se reflejó en la competencia de Identificación de Residuos (81.9% en Nivel Alto). Esto es consistente con la naturaleza de la normativa NOM-052, que exige la memorización y comprensión de las características CRETIB (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico-Infeccioso). El formato de audio permitió a los estudiantes interiorizar estos conceptos técnicos mediante la repetición y la escucha activa, facilitando la clasificación correcta de residuos peligrosos.

Por otro lado, la competencia de Propuesta de Remediación mostró una distribución más variada (50% en Nivel Alto). Esto se atribuye a que dicha competencia requiere un nivel cognitivo superior de síntesis y creatividad para proponer soluciones viables, habilidades que van más allá de la comprensión normativa facilitada por los audios.

Este comportamiento diferencial es consistente con la literatura sobre aprendizaje asistido por IA, donde las tareas de reconocimiento y clasificación muestran mayor sensibilidad a herramientas basadas en recuperación de información que aquellas que implican diseño ingenieril y toma de decisiones complejas.

Discusión

Los resultados de esta investigación demuestran que la transformación de normativas técnicas densas a formatos de audio conversacional (mediante NotebookLM) tiene un impacto directo en el rendimiento académico, reduciendo la tasa de reprobación del 60% al 18.2%. Este hallazgo se alinea con lo reportado recientemente por Jafarian y Kramer (2025), quienes demostraron en un ensayo controlado que el aprendizaje asistido por audio mediante IA mejora significativamente el compromiso de lectura y la motivación.

Sin embargo, nuestros resultados ofrecen un matiz importante a la literatura. Mientras Jafarian y Kramer observaron que el audio actuaba principalmente como un mediador motivacional, nuestros datos sugieren que, en el contexto de normativas legales (NOM-052, NOM-138), el formato de audio tiene un efecto directo en la retención de datos declarativos. El alto desempeño en la competencia de "Identificación de residuos" (81.9% en nivel alto) valida que la reducción de la carga cognitiva extrínseca —al eliminar la barrera de la lectura de textos legales áridos— permite una mejor memorización de listas y características técnicas (como el código CRETIB).

La percepción de los estudiantes sobre la utilidad de los resúmenes auditivos coincide con los hallazgos de Hutapea et al. (2025), quienes encontraron que el 83.3% de los estudiantes universitarios consideran que los resúmenes generados por IA son comprensibles y que el uso de estas

herramientas incrementa la eficiencia del tiempo de estudio en un 60%. En nuestro caso, la capacidad de NotebookLM para sintetizar seis normas extensas en diálogos focalizados permitió a los estudiantes del grupo experimental acceder a la "esencia" de la norma más rápidamente que el grupo control histórico, que dependía de la lectura lineal tradicional. Esto confirma que la IA generativa, cuando se utiliza bajo una arquitectura RAG supervisada, actúa como un andamiaje efectivo para la comprensión lectora académica.

Es crucial notar que el desempeño en la competencia de "Propuesta de remediación" fue menor (50% en nivel alto) comparado con la identificación de residuos. Este fenómeno puede explicarse a través del marco de Alfabetización en IA propuesto por Kong et al. (2025). Según Kong, el uso de IA para la resolución de problemas (nivel metacognitivo) requiere no solo acceso a la información, sino una "preparación psicológica" y un empoderamiento que va más allá del consumo pasivo de contenido.

Aunque los podcasts generados por IA facilitaron la adquisición de información teórica (el "qué" y el "por qué"), la aplicación de estos conocimientos para diseñar planes de remediación complejos (el "cómo") sigue requiriendo un andamiaje docente intensivo. La IA facilitó la entrada de información, pero la síntesis creativa necesaria para la remediación de suelos sigue siendo una habilidad que demanda práctica deliberada, sugiriendo que la herramienta es un complemento, no un sustituto, del desarrollo de pensamiento crítico en ingeniería.

Limitaciones del estudio

Aunque el diseño cuasiexperimental con control histórico permitió validar la intervención en un entorno real, se reconoce la limitación del tamaño muestral ($n=22$) frente al control ($n=60$). Asimismo, al ser un estudio en una zona geográfica específica con problemáticas ambientales particulares (región petrolera), la generalización de los hallazgos a otros contextos debe hacerse con cautela.

Conclusiones

La implementación de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa, específicamente NotebookLM, en la enseñanza de normatividad ambiental representa una estrategia prometedora para la modernización de la educación en ingeniería. A partir de los hallazgos, se concluye que:

1. La conversión de textos normativos a audio mediante arquitecturas RAG contribuye a reducir la carga cognitiva asociada al lenguaje jurídico-técnico, evidenciándose una mejora estadísticamente

significativa ($\chi^2 = 11.2$, $p < 0.001$) en las tasas de aprobación del grupo experimental.

2. La herramienta mostró mayor impacto en competencias de identificación y clasificación normativa, mientras que el efecto fue moderado en tareas de diseño de remediación, lo que sugiere la necesidad de integrar estas tecnologías dentro de modelos pedagógicos híbridos donde el docente continúe guiando procesos de aplicación compleja.
3. El uso de herramientas de IA Generativa accesibles representa una alternativa viable frente a sistemas de tutoría inteligentes de alto costo, permitiendo actualizar contenidos educativos de manera ágil en campos sujetos a cambios normativos constantes.

Se recomienda a las instituciones de educación superior explorar la integración de estas herramientas no como un atajo académico, sino como un mecanismo de alfabetización técnica acelerada que permita a los futuros ingenieros dedicar más tiempo al análisis crítico y menos a la decodificación de textos normativos.

En el caso de la aplicación trabajada se tiene una ventaja adicional ya que la herramienta por su forma de trabajo no solo evita errores y reduce las alucinaciones, sino que permite la creación de un "tutor de dominio específico" a bajo costo, democratizando el acceso a expertise técnico que se gradúa en calidad según las fuentes con las que sea alimentado cada cuaderno.

Trabajando con todo lo expuesto con resultados se propone un modelo pedagógico escalable basado en arquitecturas RAG para abordar un desafío transversal en la educación técnica: la comprensión eficiente de marcos normativos complejos. La evidencia empírica obtenida sugiere que este enfoque puede contribuir a mejorar la asimilación de contenidos altamente especializados sin sustituir el rol crítico del docente en procesos de diseño y toma de decisiones ingenieriles.

Referencias

Baidoo-Anu, D., & Ansah, L. O. (2023). Education in the Era of Generative Artificial Intelligence (AI): Understanding the Potential Benefits of ChatGPT in Promoting Teaching and Learning. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4337484>

Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). Experimental and quasi-experimental designs for research. Rand McNally.

Parra, C. M. C., & Valencia, A. R. (2021). Uso de podcast en la enseñanza de la lengua inglesa. *Revista Boletín Redipe*, 10(2), 144-157. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i2.1201>

Cook, T. D., & Campbell, D. T. (1986). Quasi-experimentation: Design & analysis issues for field settings. Houghton Mifflin.

Engzell, J., Norrman, C., Norberg, A., & Lundvall, C. (2025). Soundwaves of knowledge: using podcasts to facilitate learning in higher education. *Educational Media International*, 62(3), 361-379. <https://doi.org/10.1080/09523987.2025.2533120>

Hutapea, E., Hutabalian, R., & Hartati, R. (2024). Summarizing AI Application on Student Learning Efficiency in Understanding Academic Reading Materials. *IJEDR Indonesian Journal Of Education And Development Research*, 3(1), 737-745. <https://doi.org/10.57235/ijedr.v3i1.4878>

Jafarian, N. R., & Kramer, A. (2024). AI-assisted audio-learning improves academic achievement through motivation and reading engagement. *Computers And Education Artificial Intelligence*, 8, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100357>

Kong, S. C., Zhu, J., & Yang, Y. N. (2025). Developing and validating a scale of empowerment in using artificial intelligence for problem-solving for senior secondary and university students. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, Artículo 100359. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100359>

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2020). Contextual Personal Intelligence: A New Paradigm for AI That Evolves With You. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2005.11401>

Molina, H. L. V. (2022). Innovación educativa y espacios de construcción colectiva para apropiar y resignificar el conocimiento: Una exploración documental. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa*, 2(1), 7-22. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9077136.pdf>

Morales-Urrutia, D., Yépez-Villacis, R., & Mantilla-Falcón, L. M. (2026). Educational podcasts and student engagement in Ecuadorian higher education: an SEM-based evaluation of the technology acceptance model. *Frontiers In Education*, 10. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1744459>

Morgan, H. (2015). Focus on Technology: Creating and Using Podcasts Promotes Student Engagement and Learning. *Childhood Education*, 91(1), 71-73. <https://doi.org/10.1080/00094056.2015.1001680>

Romero, G., & López, H. (2021). Diseño y uso de podcasts en el proceso de enseñanza-aprendizaje. *En Blanco y Negro*, 11(1), 136-150. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/enblancoynegro/article/view/23197>

Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. En J. P. Mestre & B. H. Ross (Eds.), *Psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37-76). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8>

Trejo, C. J. A., & Marcano, N. (2013). Propuesta de innovación educativa mediante el uso de las TIC para la promoción de valores ambientales en la educación primaria venezolana. *Revista de Investigación*, 37(79), 33–48. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142013000200003

Walser, T. M. (2014). Quasi-experiments in schools: The case for historical cohort control groups. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 19(6), 1–13. <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/1359/galley/1310/view/>