

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs



**Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del
rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs**

Luisa Fernanda Santos Rincón

Yaricell Camelo Acuña

Brahian Steven Suarez Corrales

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Ingeniería de producción

Bogotá D.C, Colombia

12/06/2026

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en
Colombia y su relación con la generación de VOCs

**Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del
rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs**

Luisa Fernanda Santos Rincón

Yaricell Camelo Acuña

Brahian Steven Suarez Corrales

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero de Producción

Director (a):

Elizabeth León Velásquez

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de producción

Bogotá D.C, Colombia

12/06/2026

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C, día/mes/año

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

	“La tecnología adquiere verdadero sentido cuando se convierte en una herramienta para facilitar el acceso al conocimiento.”
--	--

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Agradecimientos

A nuestras familias, amigos y cercanos por acompañarnos y darnos sus ánimos durante esta
larga travesía.

Resumen

La industria del rendering animal desempeña un papel importante dentro de los procesos de aprovechamiento de subproductos de origen animal; sin embargo, durante sus etapas de transformación térmica se generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) que representan desafíos ambientales y técnicos. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un flujo de trabajo automatizado implementado en n8n para el procesamiento, organización y recuperación de información técnica relacionada con VOCs en la industria del rendering animal.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, con alcance descriptivo y diseño no experimental de corte transversal. El sistema evaluado integró automatización documental, una arquitectura de Retrieval-Augmented Generation (RAG), embeddings y búsqueda semántica para procesar documentos técnicos y responder consultas realizadas en lenguaje natural. La evaluación se estructuró en dos dimensiones: una evaluación técnica del flujo y una evaluación de calidad de respuestas mediante un Golden Set compuesto por preguntas representativas del dominio.

Los resultados evidenciaron que el sistema presentó un comportamiento funcional y consistente durante la ejecución del flujo. El procesamiento documental, generación de metadatos e indexación de fragmentos en la base vectorial se realizaron correctamente, alcanzando tasas de procesamiento exitoso y generación de JSON válidos del 100 %. Asimismo, las respuestas relacionadas con métodos de medición y recomendaciones técnicas obtuvieron los mejores desempeños dentro del Golden Set, mientras que las preguntas asociadas a temperaturas operativas y concentraciones específicas de VOCs no pudieron ser respondidas dado que dicha información no se encontraba en los documentos cargados en el sistema, lo que a su vez refleja la escasa disponibilidad de literatura especializada sobre la temática en Colombia.

Se concluye que el flujo automatizado implementado en n8n constituye una herramienta viable para la recuperación y consulta de información técnica relacionada con VOCs en la industria del

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal

en Colombia y su relación con la generación de VOCs

rendering animal. Además, los resultados evidencian que la integración entre automatización documental, búsqueda semántica y arquitectura RAG aporta valor en contextos donde la información especializada continúa siendo limitada y dispersa.

Palabras clave: rendering animal, compuestos orgánicos volátiles, VOCs, Retrieval-Augmented Generation, búsqueda semántica, automatización documental, n8n.

Abstract

The animal rendering industry plays an important role in the utilization of animal by-products; however, its thermal transformation processes generate emissions of volatile organic compounds (VOCs), creating environmental and technical challenges. In this context, the objective of this research was to evaluate the performance of an automated workflow implemented in n8n for the processing, organization, and retrieval of technical information related to VOCs in the animal rendering industry.

The research was developed under a qualitative approach with a descriptive scope and a non-experimental cross-sectional design. The evaluated system integrated document automation, a Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture, embeddings, and semantic search to process technical documents and respond to natural language queries. The evaluation was structured into two dimensions: a technical evaluation of the workflow and an assessment of response quality using a Golden Set composed of representative domain-specific questions.

The results showed that the system presented functional and consistent behavior during workflow execution. Document processing, metadata generation, and fragment indexing in the vector database were completed successfully, achieving 100% successful processing and valid JSON generation rates. Likewise, questions related to measurement methods and technical recommendations obtained the highest performance scores within the Golden Set evaluation, while questions associated with operational temperatures and specific VOCs concentrations could not be answered because the information was not available in the documents loaded into the system, which in turn reflects the limited availability of specialized literature on the subject in Colombia.

It is concluded that the automated workflow implemented in n8n constitutes a viable tool for the retrieval and consultation of technical information related to VOCs in the animal rendering

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal

en Colombia y su relación con la generación de VOCs

industry. Furthermore, the findings demonstrate that the integration of document automation, semantic search, and a RAG architecture provide value in contexts where specialized information remains limited and dispersed.

Keywords: animal rendering, volatile organic compounds, VOCs, Retrieval-Augmented Generation, semantic search, document automation, n8n.

Introducción

La industria del rendering animal cumple una función relevante dentro de los sistemas productivos al encargarse de transformar los subproductos generados tras el sacrificio de animales en bienes útiles para otras industrias. Materiales como huesos, grasas y tejidos proteicos, que no son aptos para consumo directo, pueden ser procesados y reincorporados en la cadena productiva con distintos usos, principalmente en la elaboración de insumos para alimentación animal. De esta manera, el rendering se posiciona como una estrategia de aprovechamiento que contribuye a la reducción de residuos y al uso más eficiente de los recursos disponibles.

En países como Estados Unidos, aproximadamente la mitad de un animal es catalogada como incomedible (North American Renderers Association, s. f.). Cuando estos residuos no son procesados adecuadamente y terminan en vertederos o espacios de disposición inadecuados, pueden generar impactos ambientales considerables, como la emisión de metano, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativamente superior al del dióxido de carbono (Roma, 2013, como se citó en Camin Magallanes & Quispe Aquispe, 2021). Dado que el desperdicio de alimentos constituye una fuente importante de emisiones a nivel global, el aprovechamiento de estos subproductos mediante procesos como el rendering se presenta como una alternativa que puede mitigar sus efectos negativos.

Dentro de este contexto, la industria del rendering animal ocupa un lugar relevante en Colombia, al constituir una actividad clave dentro de la economía circular. No obstante, sus procesos de cocción y esterilización generan emisiones significativas de compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés) y compuestos odoríferos, lo que impacta negativamente la percepción de las comunidades cercanas y dificulta el cumplimiento de la Resolución 909 de 2008 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008). Esta normativa establece

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

estándares estrictos de emisión de compuestos y exige la implementación de sistemas de control, como cámaras de postcombustión que deben operar a temperaturas superiores a los 760 °C.

El principal desafío radica en que estas emisiones están directamente relacionadas con variables operativas térmicas y condiciones ambientales locales cuya interacción es compleja y difícil de gestionar mediante métodos convencionales, lo que incrementa el riesgo de incumplimiento normativo y afectaciones en la operación.

Frente a esta problemática, diversos estudios han abordado la caracterización de VOCs en contextos industriales y urbanos (Franco et al., 2015; Guerra et al., 2017; Cheng et al., 2023), evidenciando tanto la diversidad química de estas emisiones como su variabilidad en función de las condiciones operativas del proceso. Sin embargo, la literatura disponible específicamente sobre rendering animal en Colombia es limitada y se encuentra dispersa en fuentes de diferente naturaleza, artículos científicos, normativas ambientales o reportes, lo que dificulta su consulta integrada por parte de quienes operan en la industria.

Esta situación expone una brecha no solo en el conocimiento disponible, sino en la capacidad de acceder a él de manera estructurada y ágil. Los enfoques tradicionales de revisión documental resultan insuficientes para responder consultas técnicas en tiempo real, y no existen, hasta donde fue posible establecer mediante la revisión documental realizada para este estudio, herramientas automatizadas orientadas específicamente a la interpretación de esta información en la industria del rendering animal.

En respuesta a esta brecha, el trabajo desarrollado en Seminario de Investigación por los mismos autores del presente estudio propuso, diseñó un flujo de trabajo automatizado en n8n que integra técnicas de recuperación aumentada de información (RAG), embeddings y agentes de inteligencia artificial, con el propósito de procesar y hacer consultable la literatura técnica y científica sobre VOCs en el rendering animal. Dicho flujo quedó estructurado en dos componentes:

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

uno orientado a la ingesta, clasificación automática e indexación de documentos, y otro orientado a la interacción con el usuario mediante lenguaje natural. La presente investigación constituye la continuación directa de ese trabajo, y se enfoca en la implementación operativa del flujo y en la evaluación de su desempeño.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos. Como objetivo general, evaluar el desempeño del flujo de trabajo automatizado implementado en n8n para el análisis de información sobre VOCs en la industria del rendering animal, a partir de criterios técnicos, de calidad de respuestas y de utilidad informativa. Como objetivos específicos se busca, primero, verificar el comportamiento técnico del flujo en sus dos componentes mediante el análisis de indicadores de procesamiento, indexación y disponibilidad de respuestas; segundo, examinar la calidad de las respuestas generadas por el sistema RAG frente a un conjunto de preguntas representativas del dominio, utilizando una rúbrica de evaluación; y tercero, describir la pertinencia y utilidad del flujo como herramienta de apoyo para la interpretación de información técnica sobre VOCs, a partir de los resultados obtenidos en la evaluación.

A partir de este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida el flujo de trabajo automatizado implementado en n8n es capaz de procesar, recuperar e interpretar información técnica sobre VOCs en la industria del rendering animal de forma funcional, precisa y consistente?

Para dar respuesta a esta pregunta, se proponen las siguientes hipótesis de trabajo:

Hipótesis 1 (Descriptiva): El flujo de trabajo automatizado implementado en n8n es capaz de procesar, indexar y recuperar información técnica sobre VOCs en la industria del rendering animal de manera funcional y consistente.

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Hipótesis 2 (Descriptiva): Las respuestas generadas por el agente de inteligencia artificial integrado en el flujo presentan un nivel de calidad suficiente para apoyar la interpretación de información técnica sobre VOCs en términos de relevancia, exactitud y claridad.

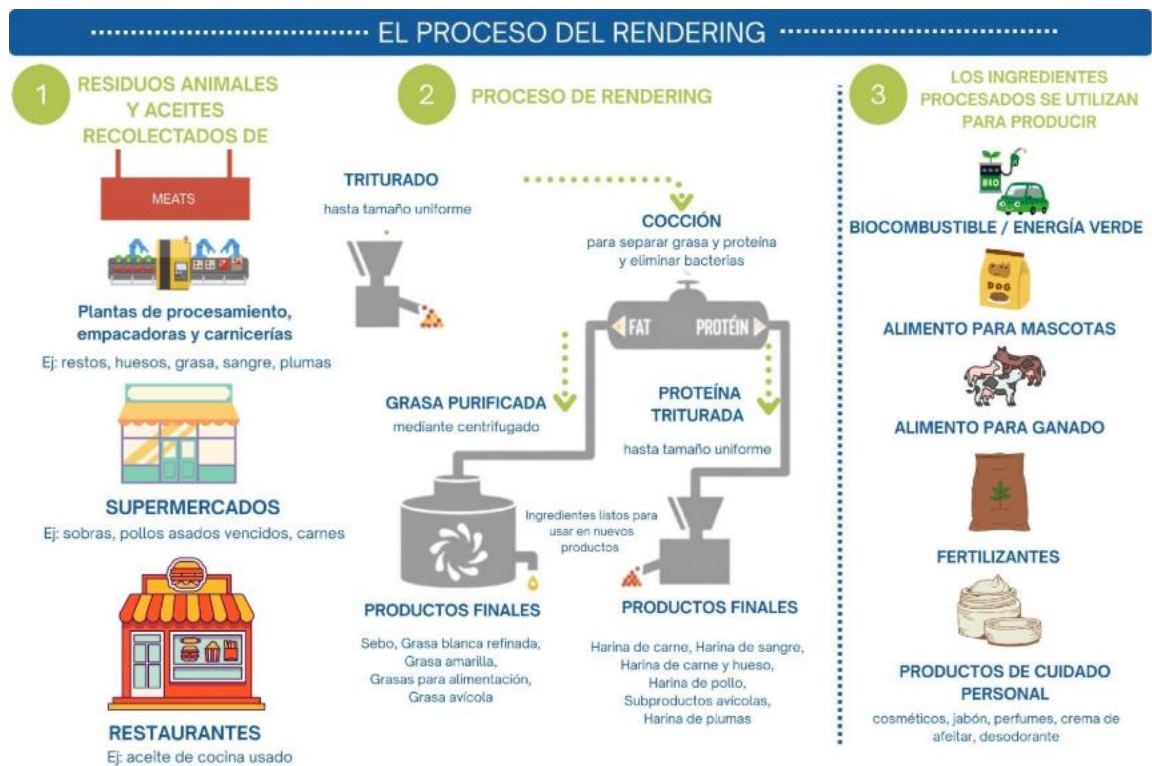
Marco teórico

1. Fundamentación conceptual del problema

La industria del rendering animal ocupa un lugar relevante dentro de los sistemas de aprovechamiento de subproductos de origen animal, constituyendo una pieza clave en la gestión sostenible de residuos generados por los sectores cárnico y avícola. Aunque su operación aporta valor dentro de un modelo de economía circular al reincorporar materiales orgánicos al ciclo productivo, sus procesos de transformación térmica generan simultáneamente emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés) que representan desafíos ambientales, normativos y técnicos de considerable complejidad (Franco et al., 2015; Cornare & Universidad de Antioquia, 2023). En Colombia, esta tensión entre aprovechamiento de residuos y generación de emisiones define el carácter problemático de la industria y justifica la necesidad de comprenderla desde múltiples dimensiones.

Abordar este problema requiere desarrollar, al menos, cuatro ejes conceptuales interrelacionados: la caracterización de la industria del rendering y su vínculo con la economía circular, la naturaleza y comportamiento de los VOCs generados en sus procesos térmicos, el marco normativo que regula sus emisiones en el contexto colombiano; y las posibilidades que ofrece la inteligencia artificial, en particular, las arquitecturas de recuperación aumentada de información para organizar e interpretar la literatura técnica disponible sobre el tema. Estos ejes se desarrollan en las secciones siguientes y constituyen la base conceptual sobre la cual se fundamenta la presente investigación.

Figura 1 El proceso del Rendering Animal



Nota. Adaptado de Proceso de rendering: Qué es y por qué es clave en la producción de harina de carne, por Chilemink ingredientes para consumo animal, s. f.,

<https://www.chilemink.cl/blog/proceso-rendering-harina-de-carne>

2. Bases teóricas

2.1 Industria del rendering animal y la economía circular en Colombia

La industria del rendering animal se define como un proceso industrial orientado al aprovechamiento de subproductos de origen animal que no son aptos para el consumo humano, transformándolos en productos con valor agregado como harinas proteicas, grasas purificadas y materias primas para biocombustibles (North American Renderers Association, s. f.). Desde una perspectiva de sostenibilidad, esta actividad se posiciona como un componente clave dentro del modelo de economía circular: se estima que cerca del 50 % del peso de cada animal sacrificado no es aprovechado para consumo humano, de manera que sin un tratamiento adecuado representaría un volumen considerable de residuos orgánicos con impacto ambiental significativo (Wilkinson & Meeker, 2021). Al transformar ese material en productos con valor económico, el rendering reduce la disposición final de residuos en vertederos y contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la descomposición de materia orgánica (Cornare & Universidad de Antioquia, 2023).

En Colombia, esta industria cumple una función complementaria dentro de la cadena de sacrificio animal, particularmente en los sectores cárnico y avícola, donde los volúmenes de subproductos generados exigen soluciones de aprovechamiento a escala industrial (Ingeprol, 2023). Su operación implica la aplicación de transformaciones térmicas y mecánicas que permiten separar los componentes principales de la materia prima, a través de etapas como la recepción, la trituración y la cocción a temperaturas que oscilan entre los 115 y 145 °C (Mavitec, s. f.; Wilkinson & Meeker, 2021). La correcta gestión de estas variables es determinante tanto para la eficiencia del proceso y la calidad del producto final como para el volumen y composición de las emisiones atmosféricas generadas.

Desde una perspectiva ambiental, el rendering animal presenta un balance que exige ser analizado en su totalidad. Si bien su contribución a la reducción de residuos orgánicos es innegable, los mismos procesos térmicos que hacen posible ese aprovechamiento generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles, contaminantes odoríferos y otros gases que impactan la calidad del aire en el entorno de las instalaciones. Este balance justifica que la industria no pueda evaluarse únicamente desde su función dentro de la economía circular, sino que requiere también un análisis riguroso de sus emisiones atmosféricas, aspecto que se desarrolla en las secciones siguientes.

2.2 Generación de VOCs en el rendering animal

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) corresponden a un grupo de sustancias químicas caracterizadas por su alta volatilidad y capacidad para liberarse a la atmósfera durante procesos industriales que involucran transformaciones térmicas de materia orgánica. En el caso del rendering animal, su generación ocurre principalmente durante las etapas de cocción y secado, donde las materias primas son sometidas a temperaturas que pueden alcanzar los 145 °C durante períodos de 40 a 90 minutos (Cheng et al., 2023). Bajo estas condiciones, la descomposición térmica de la materia orgánica produce una mezcla compleja de sustancias que incluye ácidos orgánicos, alcoholes, aldehídos, aminas, hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos (Guerra et al., 2017; Cheng et al., 2023).

Entre los compuestos detectados con mayor frecuencia en plantas de rendering se encuentran el pentanal, hexanal y tolueno como aldehídos y aromáticos predominantes, junto con acetona y etanol (Cheng et al., 2023). Estudios de caracterización han reportado concentraciones de amoníaco entre 1.600 y 2.800 ppb, ácido acético entre 80 y 320 ppb, y acetona entre 55 y 241 ppb, con variaciones asociadas a condiciones estacionales y operativas (Guerra et al., 2017). Estos

niveles de concentración, combinados con los bajos umbrales de olor de compuestos como el pentanal (0,41 ppb) y el hexanal (0,28 ppb), explican las frecuentes molestias reportadas por comunidades cercanas a estas instalaciones (Cheng et al., 2023).

La composición y concentración de las emisiones no es constante, sino que varía en función de variables operativas como la temperatura del proceso, el tiempo de cocción, el tipo de sistema de alimentación utilizado y el estado de frescura de la materia prima (Cheng et al., 2023). Esta variabilidad introduce un componente dinámico que dificulta tanto la caracterización como el control de las emisiones mediante métodos convencionales, y que a su vez condiciona la efectividad de los sistemas de tratamiento instalados en las plantas. Comprender estas interacciones resulta fundamental para el diseño de estrategias de control más precisas y adaptadas a las condiciones reales de operación.

2.3 Impactos ambientales y en la salud humana de los VOCs

Las emisiones de VOC generadas durante los procesos de rendering animal producen efectos que no se quedan únicamente en las plantas de tratamiento. Desde el punto de vista ambiental, estos compuestos contribuyen a la degradación de la calidad del aire en zonas aledañas a las plantas y generan molestias olfativas que afectan directamente la percepción y el bienestar de las comunidades cercanas (Piccardo et al., 2022). Este impacto resulta especialmente relevante en contextos donde las instalaciones industriales coexisten con zonas residenciales, ya que la imprevisibilidad de las emisiones odoríferas genera tensión y quejas frecuentes en la población expuesta.

En términos de salud, la exposición a VOCs en contextos industriales puede generar efectos como irritación de las vías respiratorias, afectaciones al sistema nervioso central y riesgos asociados a exposiciones prolongadas, entre ellos asma, dermatitis atópica y daño neurológico

(Mangotra et al., 2024; Piccardo et al., 2022). Un aspecto crítico es que los efectos de cada compuesto de forma individual son relativamente conocidos, pero las interacciones entre mezclas de sustancias con diferentes grupos funcionales como las que se generan en el rendering no han sido suficientemente estudiadas, lo que dificulta una evaluación integral del riesgo acumulativo (Piccardo et al., 2022).

Existe además una divergencia relevante en la literatura respecto a la magnitud de estos efectos. Algunos estudios señalan que las concentraciones detectadas en determinadas instalaciones se encuentran por debajo de los umbrales de toxicidad establecidos normativamente, mientras que otros enfatizan que la exposición prolongada a mezclas de compuestos puede representar un riesgo real para la salud, incluso cuando los niveles individuales no superan los límites permisibles (Piccardo et al., 2022; Guerra et al., 2017). Esta divergencia subraya la necesidad de analizar las emisiones del rendering animal no solo desde sus concentraciones individuales, sino también desde las condiciones reales de exposición y la complejidad de las mezclas generadas.

2.4 Marco normativo colombiano y el control de emisiones en el rendering animal

El control de las emisiones atmosféricas en Colombia tiene su fundamento en el derecho constitucional a gozar de un ambiente sano, reconocido en el artículo 79 de la Constitución Política, y se materializa a través de un conjunto de instrumentos normativos y técnicos que regulan la actividad de las fuentes fijas industriales. En este marco, la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial constituye la norma de referencia para el control de emisiones en instalaciones industriales, al establecer los estándares máximos admisibles de contaminantes a la atmósfera y exigir la implementación de sistemas de control técnico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008). Para la industria del rendering animal en particular, esta resolución requiere la instalación de sistemas de

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

postcombustión que operen a temperaturas superiores a los 760 °C, con el propósito de reducir las emisiones de compuestos orgánicos y odoríferos generados durante la transformación térmica de la materia prima.

Complementariamente, la Resolución 2254 de 2017 establece la norma de calidad del aire ambiente en Colombia, definiendo los niveles máximos permisibles de contaminantes como material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, con el objetivo de proteger la salud humana y el medio ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Aunque esta resolución no regula directamente los VOC como contaminantes criterio, resulta relevante para el rendering animal dado que las emisiones del proceso pueden contribuir a la formación de ozono troposférico y aerosoles secundarios, ambos considerados dentro del marco de calidad del aire. En este sentido, el cumplimiento de la normativa no se limita a controlar las emisiones en la fuente, sino que implica también considerar su comportamiento en el entorno.

En materia de compuestos orgánicos volátiles específicamente, la Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de emisiones de VOCs, publicada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2021, establece los lineamientos técnicos para la medición, el seguimiento y la reducción de estas emisiones en fuentes fijas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), aunque el documento no presenta un contenido específico para la industria del rendering animal, esta guía si define metodologías de monitoreo, criterios de reporte y estrategias de control aplicables a sectores industriales con procesos de transformación térmica, lo que la convierte en un instrumento directamente aplicable al contexto del rendering animal. Su existencia evidencia el reconocimiento institucional de los VOCs como una problemática técnica y ambiental que requiere atención específica dentro del marco regulatorio colombiano.

No obstante, a pesar de la existencia de este conjunto normativo, persisten limitaciones importantes en su aplicación a la industria estudiada en. Los enfoques regulatorios vigentes se basan principalmente en mediciones puntuales y periódicas, lo que resulta insuficiente para capturar la variabilidad dinámica de las emisiones en un proceso donde la composición de la materia prima, la temperatura de operación y el tiempo de procesamiento influyen continuamente en el volumen y la naturaleza de los contaminantes generados.

Esta brecha entre el marco normativo existente y la complejidad real del proceso justifica la necesidad de complementar los instrumentos de control convencionales con herramientas capaces de organizar, recuperar e interpretar la información técnica disponible de manera más ágil y estructurada, lo que constituye precisamente el punto de partida para las aproximaciones tecnológicas evaluadas en este estudio.

2.5 Inteligencia artificial aplicada al análisis de información en el rendering animal

La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como un conjunto de técnicas computacionales que permiten a los sistemas procesar información, identificar patrones y generar respuestas a partir de datos, simulando capacidades propias del razonamiento humano (Olawade et al., 2024). Su expansión hacia dominios ambientales e industriales ha sido significativa en los últimos años, impulsada por la creciente disponibilidad de datos técnicos y por la necesidad de herramientas capaces de procesar volúmenes de información que superan las capacidades de los métodos de análisis convencionales. En este sentido, la IA no se limita a la automatización de tareas repetitivas, sino que aporta capacidad analítica para interpretar relaciones complejas entre variables, clasificar información heterogénea y generar conocimiento útil a partir de fuentes dispersas.

En el ámbito del monitoreo ambiental e industrial, la IA ha demostrado potencial para mejorar la precisión, velocidad y cobertura del análisis de contaminantes atmosféricos, incluyendo compuestos orgánicos volátiles. Estudios recientes han documentado el uso de redes neuronales convolucionales para el análisis de emisiones de VOCs y la identificación de fuentes contaminantes, así como el uso de modelos de aprendizaje automático para el monitoreo continuo de la calidad del aire en entornos industriales (Chisom et al., 2024; Olawade et al., 2024). Estas aplicaciones evidencian que la IA puede contribuir tanto al análisis operativo de emisiones como a la gestión estructurada de la información técnica generada en estos procesos.

En el contexto específico del rendering animal, donde la información técnica disponible sobre VOCs se encuentra dispersa entre normativas, artículos científicos y reportes institucionales, la IA ofrece una oportunidad relevante para facilitar el acceso organizado al conocimiento especializado. Los agentes de inteligencia artificial, en particular, representan una aproximación funcional para este propósito: son sistemas capaces de recibir consultas en lenguaje natural, recuperar información relevante de bases de conocimiento y generar respuestas contextualizadas de manera automatizada (Olawade et al., 2024).

2.6 Arquitecturas RAG y embeddings en el análisis del rendering animal

Las arquitecturas de Retrieval-Augmented Generation (RAG) fueron propuestas formalmente por Lewis et al. (2020) como un enfoque que combina modelos de lenguaje pre-entrenados con mecanismos de recuperación de información externa, permitiendo que el sistema acceda a conocimiento específico almacenado en documentos durante el proceso de generación de respuestas. A diferencia de los modelos de lenguaje tradicionales, que dependen exclusivamente del conocimiento codificado en sus parámetros durante el entrenamiento, una arquitectura RAG consulta en tiempo real una base de documentos indexados para recuperar fragmentos relevantes

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

antes de construir una respuesta (Lewis et al., 2020). Esto permite que el sistema produzca respuestas fundamentadas en fuentes específicas y actualizables, lo que resulta especialmente valioso en dominios técnicos donde la precisión y la trazabilidad de la información son críticas.

El componente que hace posible esta recuperación es el uso de embeddings, representaciones vectoriales que convierten fragmentos de texto en números dentro de un espacio matemático multidimensional, donde las distancias entre vectores reflejan relaciones semánticas entre conceptos (Lewis et al., 2020). A través de este mecanismo, un sistema basado en RAG puede identificar los fragmentos documentales más relevantes para una consulta no por coincidencia exacta de palabras clave, sino por proximidad semántica en el espacio vectorial. Esto permite recuperar información relacionada incluso cuando la terminología utilizada por el usuario difiere de la empleada en los documentos indexados, lo que constituye una ventaja significativa frente a los motores de búsqueda convencionales basados en palabras clave (Chisom et al., 2024).

En el contexto del rendering animal, donde la información técnica sobre VOCs se encuentra distribuida entre normativas ambientales, artículos científicos, guías técnicas e informes institucionales con enfoques y terminologías distintas, la integración de embeddings y arquitecturas RAG representa una oportunidad concreta para centralizar y hacer consultable ese conocimiento disperso. Al indexar vectorialmente los documentos disponibles, el sistema puede responder consultas en lenguaje natural relacionadas con métodos de medición, variables operativas, estrategias de control o datos normativos, recuperando información relevante independientemente de las diferencias terminológicas entre fuentes. De esta forma, la arquitectura RAG no sustituye la literatura técnica existente, sino que actúa como un mecanismo de articulación que facilita su acceso estructurado y contextualizado en un dominio donde esa información continúa siendo limitada y dispersa.

Estado del arte (Metodología PRISMA)

El estado del arte de la presente investigación se desarrolló mediante una revisión documental estructurada siguiendo los principios de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el propósito de garantizar la transparencia, trazabilidad y replicabilidad del proceso de identificación, selección y análisis de las fuentes consultadas.

Ejes temáticos de búsqueda

La revisión se estructuró en torno a dos ejes de búsqueda, cada uno con su propia ecuación booleana, bases de datos consultadas y criterios de selección aplicados:

1. Ambiental/industrial: emisiones de VOCs en la industria del rendering animal, caracterización de compuestos, impacto ambiental y en salud, normativa colombiana e inventarios de emisiones.
2. Tecnológico: arquitecturas RAG para recuperación de información en dominios técnicos, automatización documental con modelos de lenguaje, y aplicaciones de inteligencia artificial en monitoreo ambiental e industrial.

Bases de datos y ecuaciones de búsqueda

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Las búsquedas se realizaron en las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS), ScienceDirect y Google Scholar, priorizando fuentes indexadas en las dos primeras para garantizar la calidad académica de los resultados. Se consideraron documentos publicados en inglés y español. Si bien el rango temporal de prioridad fue 2020-2026, se incluyeron de forma justificada referencias anteriores cuando estas constituyen fuentes de información esenciales para entender el rendering animal o RAG. Las ecuaciones de búsqueda empleadas fueron las siguientes:

Eje	Ecuación de búsqueda	Bases de datos
Ambiental / Industrial	("Volatile organic compounds" OR VOCs OR "compuestos orgánicos volátiles" OR "emisiones atmosféricas" OR "control de olores") AND (rendering OR "animal rendering" OR "fuentes fijas" OR "inventario de emisiones")	Scopus, WOS, ScienceDirect, Google Scholar
Tecnológico	("Retrieval-Augmented Generation" OR RAG OR "semantic search" OR "document automation") AND ("large language model" OR LLM OR "knowledge retrieval" OR "technical domain" OR "specialized domain" OR "information retrieval")	Scopus, WOS, ScienceDirect, Google Scholar, arXiv

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Como criterios de inclusión, se contemplaron documentos en español o inglés que abordaran directa o indirectamente el estudio de VOCs, emisiones atmosféricas, fuentes fijas industriales, rendering animal, control de contaminantes o normativa ambiental aplicable al contexto colombiano o comparable. Igualmente, se incluyeron artículos que presentaran implementaciones, evaluaciones o revisiones de sistemas RAG, arquitecturas de recuperación semántica, embeddings o automatización documental aplicados a dominios técnicos especializados. Se priorizaron fuentes publicadas entre 2020 y 2026, con excepción de referencias esenciales para el entendimiento de la temática, no se realizó ninguna discriminación por país de origen.

Por otra parte, se excluyeron aquellos documentos que no guardaran relación temática con ninguno de los dos ejes de búsqueda definidos. También se descartaron estudios de VOCs desarrollados en contextos exclusivamente urbanos o domésticos sin vínculo con procesos industriales de transformación térmica de materia orgánica, así como implementaciones de RAG o modelos de lenguaje orientados a aplicaciones sin componente de dominio especializado o sin recuperación documental estructurada. De igual manera, se excluyó literatura gris sin identificación de autoría y documentos duplicados identificados en más de una base de datos.

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

PRISMA	Ambiental / Industrial	Tecnológico	Total
Registros identificados en bases de datos	225	415	640
Registros tras eliminar duplicados	160	317	477
Excluidos por título/resumen (fuera del alcance temático)	121	267	388
Evaluados a texto completo	39	50	89
Excluidos a texto completo (sin relación directa con proyecto o metodología no aplicable)	28	46	74
Documentos incluidos en síntesis cualitativa	11	4	15

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Identificación

Registros identificados en Scopus, WOS, ScienceDirect, Google Scholar

Total: 640

Eliminación de duplicados

Registros únicos: 477

Evaluación

Revisión de título y resumen

Excluidos por fuera del alcance: 388

Aptos para evaluación a texto completo: 89

Selección

Lectura a texto completo

Excluidos: 74

Razones de exclusión: sin vínculo directo con rendering/VOCs o RAG técnico,
metodología no aplicable

Inclusión

15 documentos incluidos en síntesis cualitativa

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Tabla x Comparación de estudios seleccionados

Autor(es) / Año	Título del estudio	Objeti vo principal	Metod ología	Variables analizadas	Princip ales hallazg os	Limitac iones	Relaci ón con el proyec to
Emisiones de VOC en la industria del rendering animal y contexto ambiental colombiano							
Gómez, C., Magin, L.P., & Quintero, J. (2014) — Olores.org	Revis ión de caso exitoso de control de olores en empresa de renderin g en	Eval uar la eficien cia de un plan de mitigac ión de olores en una planta de renderi ng	Est udio de caso con olfato metría dinámi ca (EN13 725) y biocata lizador es	Concentración de olor (ouE/m³), intensidad y frecuencia odorante, gases NH ₃ y H ₂ S, variables meteorológicas	Se validó la efectivi dad del plan de reducci ón de impacto por olores, permitie ndo la continui	Depe ndencia de medicio nes sensorial es y condicio nes específic as del proceso. Sin caracteri	Úni co caso docum entado de control de emisio nes en renderi ng en Colom bia. Eviden

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

	Colombi a	colomb iana	orgáni cos		dad operativ a de la empresa	zación de VOC individuales	cia práctic a directa del proble ma que aborda el proyect o
Franco, J.F., Pacheco, J., Belalcázar, L.C., & Behrentz, E. (2015) — Atmósfera, 28(1)	Char acterizat ion and source identific ation of VOC species in Bogotá, Colombi a	Car acteriza r e identifi car fuentes de VOC en ambien te urbano	Est udio experi mental con análisi s químic o de muestr as de aire y	Concentracione s de VOC, tipos de compuestos, fuentes de emisión	Ident ificació n de eteno, propeno , n- butano, i- pentano , isopren o como	Alca nce geográfi co limitado. No se centra en fuentes fijas industria les de	Bas e científi ca colomb iana para compre nder el compor tamient o de

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

		e industri al en Bogotá	model os de recepto res		principa les especies . Alta variabili dad por fuente	renderin g	VOC en entorno s urbano s e industri ales. Refere ncia metodo lógica
Guerra, F.D., Smith, G.D., Alexis, F., & Whitehead, D.C. (2017) — Aerosol Air Qual. Res., 17	A Survey of VOC Emissio ns from Renderi ng Plants	Car acteriza r y cuantifi car las emisio nes de VOC en plantas de	Est udio de campo con muestr eo activo en múltipl es	Concentracione s de NH ₃ , ácido acético, acetona, etanol, compuestos odorantes	Amo níaco (1600- 2800 ppb) y ácido acético (80-320 ppb) como principa	Instal aciones estudiad as en EE.UU. Sin datos para contexto colombi ano o	Ref erencia fundaci onal sobre VOC en renderi ng. Base directa

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

		renderi ng	instala ciones y análisi s GC/M S		les emision es. Variabil idad estacion al signific ativa	latinoam ericano	para compre nder las emisio nes que el corpus docum ental del sistema intenta organiz ar
Sazakli, E., & Leotsinidis, M. (2021)* — Air Qual. Atmos. Health,	Odor nuisance and health risk assessm ent of VOC	Eval uar el impact o odorant e y el riesgo para la	Eva luación de riesgo con olfato metría, análisi	Aldehídos, aminas, ácidos grasos, concentraciones ouE/m³, índices de riesgo carcinogénico y no carcinogénico	Los VOC de renderin g superan umbrales de molesti	Cont exto geográfi co (Grecia) puede no trasladar	Pro porcion a metodo logía de evaluac ión de

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

14(3), 301–312	emission s from a renderin g plant	salud de comuni dades cercana s a una planta de renderi ng	s GC/M S y model os de dispers ión atmosf érica		a olfativa. Los índices de riesgo acumul ativo indican necesid ad de control continuo ado	se directam ente al contexto colombi ano	riesgo aplicab le al renderi ng. Refere ncia Scopus directa mente relevan te para el eje ambien tal del proyect o
Wilkins on, A.D., & Meeker, D.L. (2021)* — Animal	How agricultu ral renderin g supports	Doc umenta r la contrib ución del	Rev isión narrati va de literatu ra	Volumen de subproductos aprovechados, emisiones evitadas, productos	El renderin g aprovec ha ~50%	Enfo que predomi nanteme nte descripti	Fun dament a el rol del renderi ng en

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Frontiers, 11(2), 24– 34	sustaina bility and assists livestoc k	renderi ng a la sosteni bilidad agrícol a y el balance ambien tal del proceso	técnica y datos sectori ales	obtenidos, huella de carbono	del peso del animal sacrific ado; su ausenci a generarí a impacto s ambient ales conside rables	vo sin validaci ón experim ental de parámetr os ambient ales	econo mía circular y justific a el interés ambien tal del sector estudia do
Piccardo , M.T., Geretto, M., Pulliero, A., & Izzotti, A. (2022)* — Environmen	Odor emission s: A public health concern for health	Ana lizar el impact o de las emisio nes odorant es en la	Rev isión sistem ática de literatu ra con análisi	Compuestos azufrados, nitrogenados, aromáticos (BTEX), umbrales de olor, efectos en salud	La exposici ón prolong ada a mezclas de VOC represe	Cont exto general, no específic o de renderin g animal	Bas e concep tual para compre nder el doble

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

tal	risk	salud	s		nta		impact
Research,	percepti	pública	toxicol		riesgo		o
204	on	desde	ógico		para		(olfativ
		una	y		asma,		o y
		perspec	evalua		dermatit		toxicol
		tiva de	ción de		is y		ógico)
		percepc	riesgo		daño		de las
		ión del	acumul		neuroló		emisio
		riesgo	ativo		gico.		nes del
					Las		renderi
					interacc		ng y
					iones		justific
					entre		ar su
					compue		monito
					stos		reo
					están		
					insufici		
					enteme		
					nte		
					estudiad		
					as		
Cheng,	VOC	Iden	Est	Pentanal,	Pent	Cont	Ref
W.H., Lin,	Emissio	tificar	udio	hexanal, tolueno,	anal y	exto	erencia

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

C.H., Yuan, C.S., & Chang, K.L. (2023)* — Aerosol Air Qual. Res., 23(4)	ns from a Renderi ng Plant and Evaluati on for Remova l of Pentanal	los VOC emitido s por una planta de renderi ng e investi gar la eficien cia del peróxid o de hidróge no para su reducci ón	experi mental de campo con análisi s GC/M S y modela ción de dispers ión gaussia na	acetona, etanol, concentraciones ppm, eficiencias de remoción	hexanal como principa les compue stos odorant es. El peróxid o de hidróge no logra >80% de eficienc ia de remoció n de pentana l	taiwanés (sistema de alimenta ción por lote). Puede diferir de condicio nes operativ as colombi anas	Scopus más directa mente compar able al proces o de renderi ng evalua do. Sus hallazg os son base para las pregunt as del Golden Set del sistema RAG
---	--	---	---	--	---	--	---

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Cornare & Universidad de Antioquia (2023) — Informe técnico	Actualización del inventario de emisiones de modelación de dispersión de contaminantes en Oriente Antioqueño	Estimar emisiones y modelar dispersión de contaminantes atmosféricos en zonas industriales de Cornare	Inventario de emisiones de modelación de dispersión y análisis de fuentes fijas	Emisiones por tipo de fuente, contaminantes criterio, variables meteorológicas, dispersión espacial	Las fuentes fijas industriales con transformación térmica presentan alta incidencia en la generación de contaminantes. Datos aplicables al perfil del renderino	Nivel de agregación limita el detalle por industria específica. Cobertura restringida a jurisdicción Cornare	Referencia regional del colombiana que contextualiza el impacto de procesos industriales similares es al renderino en inventarios de
---	--	---	---	---	---	--	--

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

							emisio nes
Ideam (2024) — Informe nacional	Inven tario nacional de emision es y absorcio nes atmosfér icas de Colombi a (1990- 2021 / 2010- 2021)	Con solidar el invent ario naciona l de GEI, contam inantes criterio y carbon o negro en Colom bia	An álisis técnico de datos históri cos, reporte s sectori ales y metod ologías IPCC	GEI, PM10, PM2.5, NOx, SO2, CO, carbono negro, por sector y fuente	Pano rama naciona l de emision es con evoluci ón tempora l. Sector industri al como fuente signific ativa de contami nantes criterio	Nivel de agregaci ón nacional impide identific ar contribu ciones específic as del renderin g animal	Con textuali za el proble ma de emisio nes industri ales a escala nacion al, justific ando la necesid ad de herram ientas de análisis

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

							sectori al
Mangotr a, A., & Singh, S.K. (2024)* — J. Biotechnolo gy, 382, 51–69	Volat ile organic compou nds: A threat to the environ ment and health hazards to living organis ms — A review	Rev isar las fuentes , método s de análisis y efectos toxicol ógicos de los VOC en organis mos vivos y el ambien te	Rev isión sistem ática de literatu ra con análisi s de efectos en vertebr ados, inverte brados, plantas y trabaja dores	Fuentes de VOC, métodos de muestreo, efectos carcinogénicos/mu tagénicos/teratogén icos, exposición ocupacional	Los VOC presenta n efectos desde anestesi a hasta carcino ma. El BTEx tiene alto potenci al mutagé nico. Trabaja dores industri ales son	Alca nce general, no específic o de renderin g animal. Context o de países desarroll ados puede diferir	Fun dament a el impact o en salud de los VOC y justific a la necesid ad de acceso estruct urado a inform ación técnica sobre estos compu

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

					el grupo más expuest o		estos en el renderi ng
Área	Actu	Act	Inv	Emisiones por	Ident	Depe	Apo
Metropolita	alizació	ualizar	entario	tipo de fuente	ificació	ndencia	rta base
na del Valle	n del	el	de	(móvil, fija, área),	n y	de la	metodo
de Aburrá	inventari	inventar	emisio	contaminantes	cuantifi	calidad	lógica

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

&	o de	rio de	nes	atmosféricos	cación	y	regiona
Universidad	emision	emisio	basado	criterio	de las	disponib	l
Pontificia	es	nes	en		principa	ilidad de	colomb
Bolivariana	atmosfér	atmosf	factore		les	datos	iana
(2017) —	icas del	éricas	s de		fuentes	reportad	para
Informe	Valle de	de la	emisió		contami	os por	estimar
técnico	Aburrá	región	n y		nantes	las	emisio
	— Año	del	recupe		de la	empresa	nes de
	2015	Valle	ración		región.	s	proces
		de	de		Fuentes		os
		Aburrá	datos		fijas		industri
			de		industri		ales
			fuentes		ales con		similar
					alta		es al
					inciden		renderi
					cia		ng
Arquitecturas RAG y recuperación de información técnica en dominios especializados							
Lewis,	Retri	Pro	Dis	Precisión en	RA	Eval	Ref
P. et al.	eval-	poner	eño e	recuperación,	G	uación	erencia
(2020)* —	Augmen	un	imple	exactitud de	supera a	en	fundaci
NeurIPS	ted	marco	mentac	respuestas,	modelo	benchm	onal
2020,	Generati	que	ión de	capacidad de	s	arks	del
Advances	on for	integra	arquite	acceso a	paramet	académi	framew

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

in NIPS, 33, 9459–9474	Knowle dge- Intensiv e NLP Tasks	recuper ación de docum entos con modelo s generat ivos para respon der consult as basadas en conoci miento externo	ectura RAG con DPR (Dense Passag e Retriev al) y model o generat ivo BART. Evalua ción en bench marks de QA	conocimiento externo actualizable	rizados en tareas intensiv as de conoci miento. La no- paramet rización permite actualiz aciones sin reentren amiento	cos generale s; rendimie nto en dominio s muy especiali zados con vocabul ario técnico específic o puede variar	ork RAG implem entado en el proyect o. Define los princip ios teórico s del sistema evalua do
Gao, Y. et al. (2024)* —	Retri eval- Augmen	Rev isar sistemá	Rev isión sistem	Componentes de recuperación, generación y	RA G avanzad	La mayoría de	Per mite situar

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

arXiv:2312.10997 (ampliamente indexado)	ted Generati on for Large Languag e Models: A Survey	ticame nte la evoluci ón y estado del arte de las arquite cturas RAG para LLMs	ática de literatu ra con clasific ación por tipo de RAG: naive, avanza do y modul ar	aumentación; métricas de evaluación; aplicaciones por dominio	o y modular mejoran signific ativame nte la precisió n en dominio s especial izados. Las actualiz aciones del corpus no requiere n reentren amiento del	evaluaci ones se realizan en contexto s de idioma inglés con corpora de dominio general	el sistema del proyect o dentro del ecosist ema RAG actual e identifi car las mejore s práctic as de implem entació n
---	--	---	---	---	---	---	--

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

					modelo base		
[Autor et al.] (2025)* — Computer Standards & Interfaces, DOI: 10.1016/j.csi.2025.103995	Appli cation of retrieval - augment ed generati on for interacti ve industria l knowled ge manage ment via a large languag e model	Dise ñar e ñar e implem entar un sistema RAG- LLM para recuper ación interact iva de conoci miento en context os industri ales	Dis eño de sistem a híbrido con BM25 y embed dings en base vectori al Chrom a. Evalua ción con MRR,	Documentos técnicos industriales en múltiples formatos (PDF, PPTX, DOCX, CSV), métricas de recuperación y generación	MR R de 97.97% y recall de 91.62% para docume ntos regulato rios internos . Sistema viable para soporte industri al con informa ción	Impl ementaci ón en contexto industria l específic o; generali zación a otros dominio s requiere validaci ón adiciona l	Des arrollo más similar al proyect o: sistema RAG aplicad o a inform ación técnica industri al heterog énea. Refere ncia directa

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

			recall y mAP		especial izada		de viabilidad
Olawade , D.B. et al. (2024)* — Hygiene and Environmen tal Health Advances, 12, 100114	Artifi cial Intellige nce in Environ mental Monitori ng: Advance ments, Challen ges, and Future Directio ns	Rev isar el estado del arte de las aplicaci ones de IA en monito reo ambien tal	Rev isión narrati va y análisi s biblio métric o de aplicac iones de IA (ML, CNN, RNN, LLM) en monito reo	Técnicas de IA, tipos de contaminantes monitoreados, precisión de modelos, barreras de adopción	Las CNN mejoran la detecció n de VOC y la identific ación de fuentes contami nantes. La IA permite monitor eo continu o y	Alta depende ncia de datos de calidad. Barreras de costo para organiza ciones pequeña s	Vin cula la IA con el monito reo ambien tal de VOC, conecta ndo los dos ejes del proyect o y fundam entand o el uso de herram

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

			ambien		recome		ientas
			tal		ndacion		de IA
					es en		en este
					tiempo		domini
					real		o

Metodología

El presente estudio se desarrolla como continuación del trabajo comprendido en la materia de Seminario de Investigación, en el artículo "Diseño de un flujo de trabajo para el análisis de información en la industria del rendering animal", en el cual se planteó el diseño técnico y conceptual del flujo de trabajo automatizado. En dicho documento se encuentran las variables de interés definidas, la caracterización de las fuentes de información y la arquitectura del flujo implementado en n8n. La presente investigación se enfoca en la implementación operativa del flujo y en la evaluación sistemática de su desempeño desde tres dimensiones: técnica, calidad de respuestas y utilidad informativa.

Enfoque y alcance de la investigación

La presente investigación tiene enfoque cualitativo, considerando que se orienta a evaluar el comportamiento del flujo en aspectos como la interpretación, organización y recuperación de información a partir de fuentes previamente seleccionadas. Este estudio tiene especial interés en

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

comprender la calidad, coherencia y utilidad de las respuestas generadas por el sistema, sin recurrir a mediciones cuantitativas de variables operativas del proceso industrial.

En referencia al tipo de estudio, el presente estudio es de carácter descriptivo, pues busca examinar el funcionamiento del flujo en relación con el procesamiento de documentos, la recuperación de información y la generación de respuestas, permitiendo identificar patrones y entender su capacidad para apoyar la comprensión de información sobre los VOCs.

Por último, el diseño de la investigación es no experimental, dado que no se realiza manipulación de variables ni intervención sobre los datos o fuentes utilizadas. El análisis se desarrolla bajo un corte transversal, pues se lleva a cabo en un periodo de tiempo determinado y único, considerando un conjunto definido de documentos sin evaluar cambios en variables a lo largo del tiempo.

Descripción del sistema evaluado

El sistema en evaluación corresponde al flujo de trabajo automatizado diseñado e implementado en la herramienta n8n en la materia Seminario de Investigación. Este flujo se encuentra estructurado en dos componentes funcionales que operan de manera complementaria para la ingesta, indexación y consulta de información técnica sobre los VOCs en la industria del rendering animal.

El Componente A gestiona la ingesta, clasificación automática e indexación de documentos. Se activa de forma programada mediante un Schedule Trigger que se dispara cada semana, recupera los archivos PDF almacenados en una carpeta de Google Drive, los descarga y los somete a un proceso de clasificación automática mediante el modelo GPT-4o Mini, que genera un JSON con el

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

tipo de documento, nivel de relevancia, compuestos VOCs identificados y un resumen de dos oraciones. Simultáneamente, el texto de cada documento es segmentado y vectorizado mediante el modelo de embeddings text-embedding-3-large de OpenAI e indexado en la base de datos vectorial Pinecone Vector. Los metadatos de clasificación quedan registrados en la pestaña "Clasificación de Documentos" del Google Sheets del proyecto.

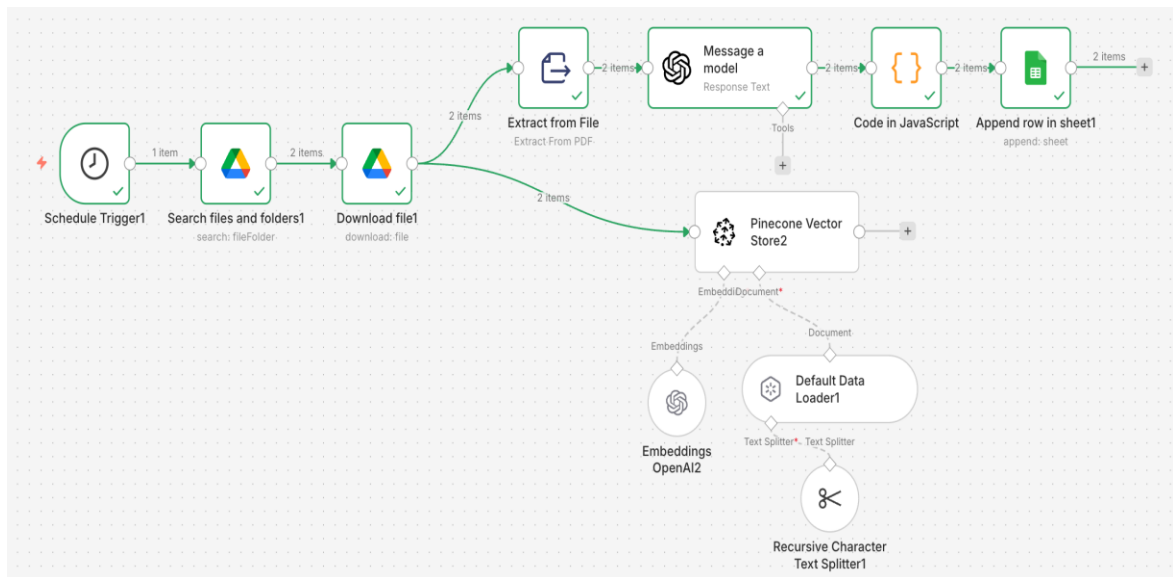


Figura 2 Flujo de automatización Componente A

Nota. Captura de pantalla del componente A desarrollado en Seminario de Investigación en la plataforma n8n (n8n.io, 2024).

El Componente B corresponde al sistema de interacción con el agente de inteligencia artificial. Se activa cuando el usuario formula una consulta en lenguaje natural a través de la interfaz de chat. El agente, configurado con GPT-4o Mini y con instrucción explícita de consultar siempre la base

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

de datos vectorial antes de responder, realiza una búsqueda semántica en Pinecone Vector para generar la recuperación de los fragmentos de texto más relevantes y posteriormente construir la respuesta si cuenta con la información suficiente. Cada interacción queda registrada en la pestaña "Respuestas Generadas" del Google Sheets, con los campos: fecha, pregunta, respuesta y un indicador de si la respuesta fue respondida satisfactoriamente o no.

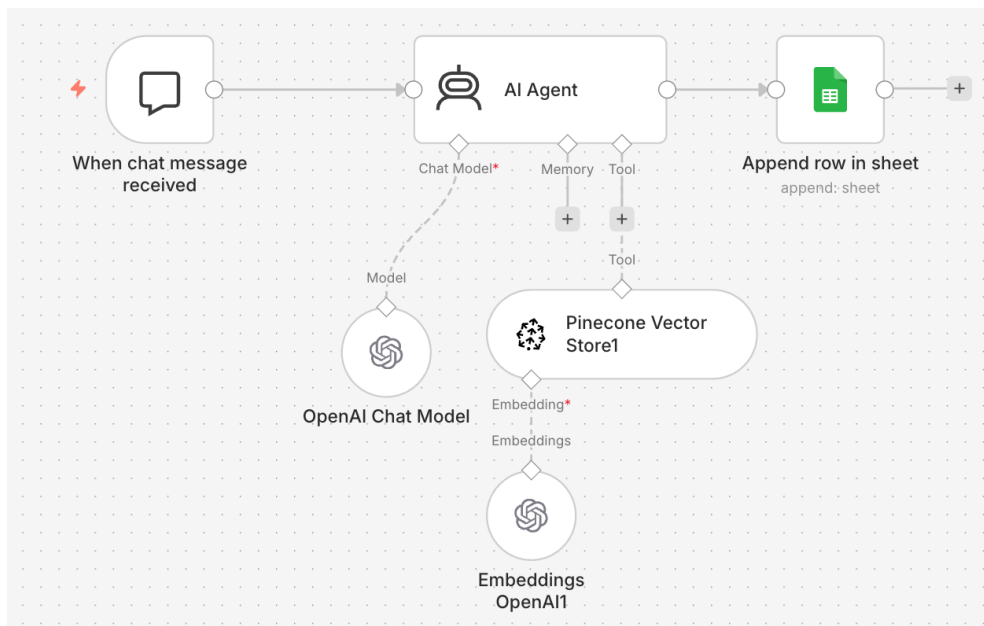


Figura 3 Flujo de automatización Componente B

Nota. Captura de pantalla del componente B desarrollado en Seminario de Investigación en la plataforma n8n (n8n.io, 2024).

Instrumentos

De acuerdo con el enfoque cualitativo y el carácter descriptivo de la investigación, el sistema de evaluación del flujo se estructura en dos niveles complementarios que responden a cada uno de los objetivos específicos planteados. Cada nivel cuenta con sus propios instrumentos, criterios y mecanismos de registro, los cuales se describen a continuación.

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Base de conocimiento utilizada en la evaluación

Teniendo en cuenta los diferentes criterios de evaluación, y con el objetivo de hacer un análisis consciente de la literatura en Colombia frente a los VOCs en la industria del rendering animal, la presente tabla presenta los diferentes documentos utilizados como base de conocimiento para ejercitar el sistema y evaluar su rendimiento en los diferentes niveles.

Autor(es) / Año	Título del estudio	Objetivo principal	Metodología empleada	Variables analizadas
C. Gómez, L.P. Magin, J. Quintero / 2014	Revisión de Caso Exitoso de Control de Olores en Empresa Dedicada al Rendering en Colombia	Documentar la implementación de un plan de reducción de impacto por olores en una planta de rendering en Colombia, verificado con olfatometría.	Estudio de caso con olfatometría dinámica (EN13725) y aplicación de biocatalizadores orgánicos	Concentración de olor (uoE/m ³), impacto odorante antes y después de intervención
Franco, J. F., Pacheco, J., Belalcázar, L. C., & Behrentz, E. (2015)	Characterization and source identification of VOC species in Bogotá, Colombia	Caracterizar e identificar fuentes de VOCs en Bogotá.	Estudio experimental con análisis químico de muestras de aire.	Concentraciones de VOCs, tipos de compuestos, fuentes.
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / 2017	Resolución 2254 de 2017 — Norma de calidad del aire ambiente	Establecer niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire para proteger la salud humana en Colombia	Instrumento normativo regulatorio	PM10, PM2.5, O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , CO y contaminantes tóxicos del aire
Ingeprol / 2023	Rendering: una industria esencial para la protección del medio ambiente	Divulgar los beneficios socioambientales de la industria del rendering en Colombia y reconocer sus impactos negativos en emisiones atmosféricas y vertimientos	Divulgación (sin metodología científica)	Emisiones atmosféricas, vertimientos, residuos sólidos, impacto en salud pública

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Nivel 1 - Evaluación técnica del flujo:

Esta dimensión tiene como propósito verificar el comportamiento técnico del flujo automatizado en sus dos componentes, mediante el análisis de indicadores de procesamiento, indexación y disponibilidad de respuestas. La información se obtiene directamente de los registros de ejecución de n8n, los logs de Pinecone y los datos registrados automáticamente en el Google Sheets del proyecto.

Métrica	Definición operacional	Meta	Registro	Resultados
Tasa de procesamiento exitoso	# archivos completados sin error / total encontrados en Drive	≥ 90 %	Logs n8n	100%
Tasa de JSON válidos	# respuestas parseables por el nodo JS / total intentos con GPT-4o Mini	≥ 95 %	Nodo Code JS	100%
Precisión del tipo de documento	# clasificaciones correctas verificadas manualmente / total clasificados	≥ 80 %	Inventario Sheets	90%
Pertinencia	Coincidencia entre relevancia asignada por el clasificador y evaluación propia	≥ 75 %	Inventario Sheets	80%

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Tasa de indexación en Pinecone	# documentos embebidos exitosamente	≥ 95 %	Logs Pinecone	100%
--------------------------------	-------------------------------------	----------------	---------------	------

Nota. Elaboración propia.

Rúbrica de evaluación de respuestas

Cada respuesta generada por el sistema frente a las preguntas del Golden Set es evaluada mediante una rúbrica de seis criterios, cada uno valorado en una escala de 0 a 2 puntos. El puntaje máximo por respuesta es de 12 puntos. Los criterios se derivan de las dimensiones de calidad relevantes para un sistema RAG en contexto técnico-científico, integrando el criterio de cobertura de variable informacional.

Criterio	0 — Insuficiente	1 — Parcial	2 — Satisfactorio
Relevancia	No responde lo preguntado	Responde parcialmente	Responde con precisión la pregunta planteada
Fundamentación	No cita fuentes o genera información sin respaldo	Cita vagamente sin identificar documento	Cita un documento específico de la base de conocimiento
Exactitud técnica	Información incorrecta o contradictoria	Información imprecisa o incompleta	Información verificable y consistente con la literatura
Claridad	Incomprensible para un técnico de planta	Requiere conocimiento especializado para entenderse	Comprensible para un operario de la industria
Cobertura de variable informacional	No aborda la variable consultada	La aborda de forma tangencial	La aborda directamente y con suficiente detalle

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Manejo del límite de conocimiento	Inventa información cuando no dispone de datos	No genera respuesta sin explicación	Indica explícitamente que no cuenta con información suficiente
-----------------------------------	--	-------------------------------------	--

Dimensión 2 — Evaluación de calidad de respuestas RAG (OE2)

Esta dimensión examina la calidad de las respuestas generadas por el sistema frente a un conjunto de preguntas representativas del dominio. Para ello se emplean dos instrumentos articulados: el Golden Set de preguntas y la rúbrica de evaluación.

El Golden Set constituye el conjunto de preguntas de referencia utilizadas para evaluar el desempeño del sistema RAG. Está compuesto por 5 preguntas organizadas entre las cinco variables informacionales definidas en el Seminario de Investigación (métodos, condiciones operativas, limitaciones, resultados y recomendaciones), garantizando una cobertura temática equilibrada.

Variable informacional	Pregunta factual	Nivel	Resultados (Puntos)
Métodos	¿Qué técnicas analíticas se utilizan para medir VOCs en plantas de rendering?	Factual	10
Condiciones operativas	¿A qué temperaturas ocurre la mayor emisión de VOCs durante el proceso de rendering?	Factual	0
Limitaciones	¿Qué limitaciones reportan los estudios sobre medición de VOCs en instalaciones de rendering?	Factual	8
Resultados	¿Qué concentraciones de VOCs se han reportado en plantas de rendering?	Factual	0

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Recomendaciones	¿Qué medidas técnicas se recomiendan para reducir las emisiones de VOCs en el rendering?	Factual	11
-----------------	--	---------	----

Resultados

Dimensión 1 — Evaluación técnica del flujo

El flujo de trabajo automatizado demostró un comportamiento técnico satisfactorio durante su ejecución. El Componente A procesó la totalidad de los cuatro documentos disponibles en la carpeta de Google Drive sin presentar errores en ninguna de las etapas del pipeline, lo que se refleja en una tasa de procesamiento exitoso del 100 %. De igual forma, la generación de JSON por parte del clasificador automático fue exitosa en todos los casos, con una tasa de JSON válidos del 100 %, y la indexación de los fragmentos de texto en Pinecone se completó correctamente, generando 169 ítems vectorizados distribuidos entre los cuatro documentos.

En cuanto a la precisión de la clasificación, la revisión manual de los metadatos generados permitió verificar que el 90 % de los documentos fueron correctamente tipificados según las categorías definidas, y que el 80 % de los niveles de relevancia asignados coincidieron con la valoración propia. Estos resultados superan o alcanzan los umbrales mínimos establecidos para ambas métricas (80 % y 75 % respectivamente), lo que indica que el clasificador automático opera de forma coherente con los criterios definidos en el diseño del sistema.

El Componente B respondió de manera funcional a las consultas formuladas, registrando cada interacción en la Bitácora de Google Sheets con los campos definidos. En los casos en que la información no estaba disponible en los documentos indexados, el agente indicó explícitamente que la información no se encontraba en los documentos proporcionados, lo que evidencia un manejo adecuado del límite de conocimiento del sistema.

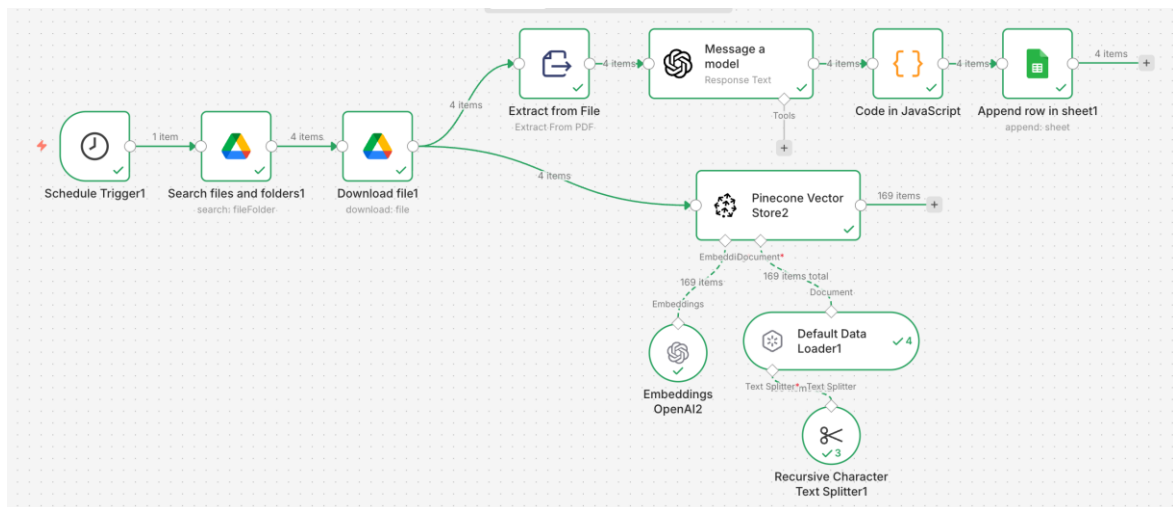
Dimensión 2 — Calidad de respuestas RAG (Golden Set)

La aplicación del Golden Set permitió evaluar el desempeño del sistema frente a cinco preguntas factuales representativas de las variables informacionales definidas en el estudio. Los resultados obtenidos muestran una variabilidad significativa en función de la disponibilidad de información en la base de conocimiento.

Las preguntas relacionadas con métodos de medición y recomendaciones técnicas obtuvieron los puntajes más altos — 10 y 11 puntos sobre 12 respectivamente — lo que indica que el sistema fue capaz de recuperar fragmentos relevantes y construir respuestas coherentes y fundamentadas para estas temáticas. En contraste, las preguntas sobre condiciones operativas de temperatura y concentraciones de los VOCs en plantas de rendering obtuvieron un puntaje de 0, dado que el agente reportó explícitamente que la información no se encontraba en los documentos proporcionados. La pregunta sobre limitaciones de los estudios obtuvo un puntaje intermedio de 8 puntos, con una respuesta parcialmente fundamentada.

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Este patrón de resultados no refleja necesariamente una falla en el diseño del sistema, sino que evidencia una limitación estructural del dominio: la escasa disponibilidad de literatura técnica específica sobre la industria del rendering animal en Colombia restringe la profundidad y cobertura de las respuestas que el sistema puede generar. En este sentido, el flujo opera correctamente dentro de los límites de su base de conocimiento — recupera lo que existe y reconoce lo que no está disponible — pero su utilidad práctica está condicionada por la amplitud del corpus documental indexado.



Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Fecha	Nombre_archivo	Tipo_documento	Relevancia	Compuestos_mencionados	Resumen
2026-05-06T00:03:30.471Z	Characterization and source identification of VOC species in Bogotá, Colombia.pdf	articulo_cientifico	media	VOC, O3, eteno, propeno, n-butano, i-pentano, isopreno, alcanos, alquenos	Caracteriza compuestos orgánicos volátiles (VOC) en tres sitios del perímetro urbano de Bogotá mediante mediciones en línea y analiza su contribución al potencial de formación de ozono (O3) usando el enfoque MIR/OFP. Identifica al tráfico vehicular, especialmente emisiones de vehículos a gasolina, como la principal fuente de los VOC y señala que eteno, propeno, n-butano, i-pentano e isopreno tienen el mayor potencial para la producción de O3.
2026-05-06T00:03:30.472Z	Resolucion-2254-de-2017.pdf	otro	baja		Documento sin contenido o solo espacios en blanco; no contiene información para evaluar.
2026-05-06T00:03:30.473Z	Rendering, una industria esencial para la protección del medio ambiente - Ingeprol Ingeniería y Consultoría Ambiental en Bogotá y Colombia.pdf	otro	media		El artículo de blog presenta la industria del rendering como un proceso esencial de reciclaje de subproductos animales que reduce residuos sólidos, disminuye la carga contaminante de aguas residuales y mitiga riesgos para la salud pública. Describe el tratamiento térmico para producir harina de carne y hueso, sus beneficios socioeconómicos y señala impactos negativos como vertimientos y emisiones atmosféricas que deben controlarse mediante tratamientos de aguas y gases.
2026-05-06T00:03:30.474Z	Revisión de Caso Exitoso de Control de Olores en Empresa Dedicada al Rendering en Colombia, Implementando un Plan Para la Reducción de Impacto por Olores Soportado con Estudios de Olfatometría.pdf	articulo_cientifico	alta		Revisión de un caso exitoso de control de olores en Ospina Grasas y Pieles Ltda. que describe la implementación de un Plan de Reducción de Impacto por olores soportado con estudios de olfatometría, cumplimiento de la Resolución 1541 de 2013 y aplicación de un biocatalizador orgánico para mitigar molestias y evitar el cierre por la autoridad ambiental.

Fecha	Pregunta	Respuesta	Respondida
2026-05-06T00:19:16.374Z	¿Qué técnicas analíticas se utilizan para medir VOCs en plantas de rendering?	En los documentos proporcionados se mencionan las siguientes técnicas: - Cromatografía en línea con un cromatógrafo portátil Synstech Spectras (mediciones de VOC en línea, resolución temporal ≈ 30 min). - Olfatometría de campo con olfatómetro TO7 (marca Ecoma), siguiendo la Norma Europea EN13725, para determinar la concentración del olor en unidades de olor europeas (ou/m).	Si
2026-05-06T00:20:03.056Z	¿A qué temperaturas ocurre la mayor emisión de VOCs durante el proceso de rendering?	Information not found in provided documents.	No
2026-05-06T00:20:41.274Z	¿Qué limitaciones reportan los estudios sobre medición de VOCs en instalaciones de rendering?	Según los documentos provistos, las limitaciones reportadas son: - Resolución temporal de las mediciones: se efectuaron mediciones en línea de VOC con una resolución temporal de 30 min utilizando un cromatógrafo portátil Synstech Spectras. - Influencia de fuentes externas: las concentraciones medias de VOC fueron más altas en sitios que se distinguen por actividades industriales/comerciales y por alta actividad vehicular, lo que afecta las mediciones en dichos emplazamientos.	Si
2026-05-06T00:22:10.539Z	¿Qué concentraciones de VOCs se han reportado en plantas de rendering?	Information not found in provided documents.	No
2026-05-06T00:22:44.628Z	¿Qué medidas técnicas se recomiendan para reducir las emisiones de VOCs en el rendering?	Información encontrada en los documentos provistos señala las siguientes medidas técnicas recomendadas para reducir emisiones/impacto de compuestos volátiles y olores en plantas de rendering: - Identificación y medición de focos emisores: medir olores por olfatometría dinámica y de campo y localizar puntos críticos (camiones durante transporte y descarga, cuarto de descargue y procesado de sebos, cuarto de depósito de productos). - Implementación de controles puntuales en cada foco identificado: aplicar medidas específicas en camiones, zonas de descargue, procesado y almacenamiento. - Captura y conducción de vapores desde los puntos de salida hacia sistemas de tratamiento: conducir los vapores generados en la planta hacia un sistema de condensado y enfriamiento. - Uso de condensado/enfriamiento (piscina de enfriamiento) para transformar las condiciones de las sustancias: reducir volúmenes de gas, disminuir temperatura y atenuar olores mediante sistemas de condensación y piscinas de enfriamiento. El documento indica que la implementación de estas medidas de control de olores resultó exitosa en el caso evaluado.	Si

Implementar el desarrollo de un flujo de trabajo automatizado en n8n que permita la obtención eficiente de información a las consultas relacionadas con el manejo de VOCs en las industrias rendering; con el fin de facilitar y agilizar el acceso a los distintos tipos de documentos sintetizados dentro del flujo de trabajo, centralizando la información de emisiones, normatividad, estudios básicos y complejos de los mismos sectores desarrollados en otros países que han investigado a fondo la problemática de estos compuestos perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a los distintos compuestos orgánicos volátiles,

brindando así una herramienta que permita buscar, cuestionar y resolver cualquier duda relacionada al manejo de los VOCs en la industria rendering.

Análisis de resultados

La pregunta de investigación planteada interroga en qué medida el flujo de trabajo automatizado implementado en n8n es capaz de procesar, recuperar e interpretar información técnica sobre los VOCs en la industria del rendering animal de forma funcional, precisa y útil. Los resultados obtenidos permiten responder esta pregunta de manera diferenciada según cada dimensión evaluada.

Desde el punto de vista de la utilidad, el sistema demostró comportarse de manera coherente con su propósito: cuando dispone de información relevante, genera respuestas fundamentadas y detalladas; cuando no la tiene, lo comunica de forma explícita en lugar de generar contenido sin respaldo. Esta característica es particularmente valiosa en contextos técnicos donde la confiabilidad de la información es crítica.

Propuesta de solución a la problemática

Situación actual

La gestión de información técnica relacionada con los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en la industria del rendering animal presenta actualmente diferentes limitaciones asociadas a la disponibilidad, organización y consulta de información especializada. Aunque existen estudios técnicos, inventarios de emisiones, lineamientos normativos y algunos casos aplicados relacionados con emisiones atmosféricas y control de olores, gran parte de esta información se encuentra dispersa entre documentos científicos, reportes institucionales, normativas ambientales y

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

literatura técnica de diferente naturaleza. Esta situación dificulta el acceso integrado al conocimiento disponible y limita la posibilidad de consultar información de manera rápida.

En el caso particular del rendering animal, la problemática adquiere una mayor complejidad debido a que se trata de un sector sobre el cual existe una disponibilidad limitada de literatura específica, especialmente en Colombia. La mayoría de las investigaciones identificadas se concentran en inventarios generales de emisiones, análisis urbanos de contaminantes o lineamientos regulatorios aplicables a fuentes fijas industriales. En consecuencia, la información relacionada directamente con los VOCs en procesos de rendering suele encontrarse fragmentada y distribuida entre múltiples fuentes, muchas veces con diferencias metodológicas y enfoques distintos.

A esta situación se suma la complejidad propia de los compuestos orgánicos volátiles. Los VOCs corresponden a mezclas de sustancias químicas cuya composición y comportamiento pueden variar dependiendo de factores como la temperatura, las condiciones operativas del proceso, las características de la materia prima y las condiciones ambientales. Debido a ello, la consulta y comprensión de información técnica sobre estas emisiones requiere revisar múltiples documentos para identificar relaciones, coincidencias y diferencias entre estudios.

Los métodos tradicionales de búsqueda documental suelen depender de revisiones manuales y procesos de lectura extensos, lo que puede dificultar la localización de información específica dentro de grandes volúmenes de documentos. Además, en contextos donde la información se encuentra distribuida entre artículos científicos, normas técnicas e informes institucionales, la consulta convencional puede volverse poco eficiente, especialmente cuando se requieren respuestas concretas relacionadas con métodos de medición, variables operativas, limitaciones reportadas o estrategias de mitigación de emisiones.

Los resultados obtenidos durante la presente investigación evidencian precisamente esta limitación estructural del dominio. Durante la evaluación del sistema mediante el Golden Set, algunas preguntas relacionadas con condiciones operativas específicas y concentraciones de los VOCs no pudieron ser respondidas debido a la ausencia de información dentro del corpus documental indexado. Este comportamiento demuestra que la principal limitación no corresponde únicamente al acceso tecnológico, sino también a la reducida disponibilidad de literatura especializada sobre el tema, los resultados también muestran que, cuando la información se encuentra disponible dentro de la base documental, el sistema logra recuperar fragmentos relevantes y generar respuestas coherentes a partir de las fuentes indexadas.

Oportunidades identificadas

El desarrollo reciente de herramientas basadas en inteligencia artificial y procesamiento de lenguaje natural ha generado nuevas posibilidades para la organización y recuperación de información técnica. Dentro de este contexto, enfoques como Retrieval-Augmented Generation (RAG), búsqueda semántica y embeddings permiten trabajar con grandes volúmenes de documentos de manera más estructurada, facilitando la consulta y recuperación de información a partir de consultas realizadas en lenguaje natural.

A diferencia de los motores de búsqueda tradicionales, los sistemas basados en embeddings no dependen exclusivamente de coincidencias exactas entre palabras clave, sino que permiten identificar relaciones semánticas entre consultas y fragmentos documentales. Esto resulta especialmente útil en escenarios técnicos donde un mismo concepto puede expresarse mediante terminologías diferentes dependiendo del documento, la metodología utilizada o el enfoque del estudio.

En el caso del rendering animal, estas tecnologías representan una oportunidad relevante debido a la dispersión y heterogeneidad de la información disponible sobre emisiones atmosféricas y los

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

VOCs. La posibilidad de integrar documentos científicos, normativos y técnicos dentro de una única base de conocimiento facilita la consulta estructurada de información especializada y reduce la dependencia de búsquedas manuales extensas.

Otra oportunidad identificada corresponde a la automatización de procesos de clasificación documental. Durante el desarrollo del flujo implementado en n8n, el sistema logró clasificar automáticamente los documentos indexados y generar metadatos relacionados con tipo de documento, nivel de relevancia, compuestos identificados y resúmenes generales. Este comportamiento permite organizar la información de forma más estructurada y facilita posteriormente los procesos de recuperación documental.

Los resultados obtenidos en la evaluación técnica muestran además que el sistema presentó un comportamiento estable durante la ejecución del pipeline. La totalidad de los documentos fue procesada correctamente, los JSON generados fueron válidos y la indexación de fragmentos en Pinecone se realizó sin errores. Estos resultados evidencian que herramientas de automatización como n8n pueden utilizarse para construir flujos orientados al procesamiento documental de información especializada.

Del mismo modo, la evaluación de calidad de respuestas permitió identificar otra oportunidad importante: la capacidad del sistema para reconocer los límites de su propia base documental. En los casos donde la información no estaba disponible, el agente indicó explícitamente que no existían datos suficientes en los documentos indexados. Este comportamiento resulta relevante porque reduce el riesgo de generar respuestas sin respaldo documental y favorece una interacción más transparente con el usuario.

Propuesta de solución al problema planteado

A partir de los resultados obtenidos, la presente investigación propone la implementación de un flujo de trabajo automatizado en n8n orientado a la organización, recuperación y consulta de

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

información técnica relacionada con compuestos orgánicos volátiles en la industria del rendering animal. La propuesta se fundamenta en el uso integrado de automatización documental, embeddings, búsqueda semántica y arquitecturas RAG para facilitar el acceso a información especializada.

El flujo desarrollado se encuentra compuesto por dos componentes principales que operan de manera complementaria. El primero corresponde al procesamiento documental automatizado, encargado de recuperar documentos desde Google Drive, clasificarlos automáticamente, segmentar su contenido e indexar los fragmentos textuales dentro de una base vectorial en Pinecone. Durante este proceso también se generan metadatos descriptivos que permiten organizar la información según criterios temáticos y de relevancia.

El segundo componente corresponde al módulo de consulta e interacción con el agente conversacional. A través de consultas realizadas en lenguaje natural, el sistema ejecuta búsquedas semánticas sobre la base vectorial y recupera los fragmentos documentales más relevantes para construir respuestas a partir de la información indexada. De esta manera, el flujo permite consultar literatura técnica sin depender exclusivamente de búsquedas manuales constantes o revisiones documentales extensas.

Los resultados obtenidos durante la evaluación muestran que la propuesta funciona de manera coherente con los objetivos definidos en la investigación. El sistema logró procesar correctamente los documentos utilizados en la evaluación, mantener consistencia en la generación de metadatos y responder adecuadamente a las consultas cuando la información se encontraba disponible dentro del corpus documental. Asimismo, el agente fue capaz de reconocer explícitamente las limitaciones de su base de conocimiento cuando no existían datos suficientes para responder determinadas preguntas.

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Uno de los principales aportes de la propuesta consiste en la centralización de información técnica proveniente de diferentes fuentes dentro de un único entorno de consulta. Esto permite integrar documentos científicos, normativa ambiental, reportes técnicos y estudios aplicados relacionados con emisiones atmosféricas y los VOCs en la industria del rendering animal. En consecuencia, el flujo facilita el acceso estructurado a información especializada que normalmente se encuentra dispersa y distribuida entre múltiples documentos.

Otro aporte relevante corresponde al uso de búsqueda semántica para información contextualizada. En lugar de limitarse a búsquedas basadas únicamente en palabras clave, el sistema identifica relaciones semánticas entre consultas y fragmentos documentales, permitiendo recuperar contenido relacionado incluso cuando la terminología utilizada varía entre diferentes documentos. Esto resulta especialmente útil en dominios técnicos donde los conceptos pueden expresarse de múltiples formas.

La propuesta también aporta una estructura replicable para futuros trabajos relacionados con gestión documental de información técnica en otros contextos industriales o ambientales. Aunque el sistema fue desarrollado específicamente para el análisis de información sobre VOCs en rendering animal, la arquitectura implementada puede adaptarse a otros dominios que presenten problemáticas similares de dispersión documental y necesidad de consulta.

Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten analizar el comportamiento del flujo de trabajo automatizado implementado en n8n desde una perspectiva orientada a la interpretación de información técnica relacionada con los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en la industria del rendering animal. A partir de la evaluación realizada, se evidencia que el sistema presenta un desempeño funcional y coherente con los objetivos planteados, especialmente en procesos asociados a la organización documental, recuperación semántica de información y

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

generación de respuestas a partir de una base de conocimiento previamente indexada. Los hallazgos obtenidos muestran que la integración entre automatización documental, búsqueda semántica y arquitecturas RAG puede utilizarse de manera funcional en dominios técnicos donde la información disponible se encuentra dispersa.

Uno de los principales aportes identificados no radica únicamente en la generación de respuestas, sino en la capacidad del flujo para organizar información técnica dentro de una estructura consultable. Este aspecto adquiere especial relevancia en contextos como el rendering animal, donde gran parte de la información relacionada con los VOCs se encuentra distribuida entre normativas ambientales, artículos científicos, estudios técnicos e informes institucionales con enfoques metodológicos distintos. En este sentido, el sistema desarrollado funciona como un mecanismo de articulación documental que facilita el acceso a contenidos especializados y permite consultar información previamente segmentada e indexada dentro de una misma estructura de conocimiento.

Los resultados obtenidos mediante la evaluación del Golden Set también permiten interpretar el comportamiento del sistema frente a diferentes tipos de consultas. Las preguntas relacionadas con métodos de medición y recomendaciones técnicas obtuvieron los mejores desempeños, evidenciando que el sistema logra recuperar fragmentos relevantes y generar respuestas coherentes cuando existe información suficiente dentro del corpus documental indexado. Esto permite constatar que el desempeño del flujo depende directamente de la calidad y amplitud de la base de conocimiento utilizada, aspecto que se hace más evidente en dominios especializados donde la literatura científica disponible continúa siendo limitada.

De igual manera, las preguntas asociadas a temperaturas específicas y concentraciones de los VOCs presentaron menores niveles de respuesta debido a la ausencia de información suficiente dentro de los documentos procesados. A diferencia de otros modelos que pueden generar

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

respuestas sin respaldo documental, el agente implementado reconoció explícitamente cuando la información solicitada no se encontraba disponible dentro de los documentos indexados. Este comportamiento evidencia un manejo coherente de los límites de conocimiento del sistema y reduce el riesgo de producir respuestas sin sustento técnico o científico.

Lo anterior resulta particularmente relevante desde el punto de vista metodológico, ya que la confiabilidad de las respuestas constituye un aspecto fundamental en contextos relacionados con información científica y ambiental. La capacidad del sistema para reconocer las limitaciones de su propia base documental fortalece la transparencia del proceso de consulta y permite interpretar que el flujo opera dentro de los límites reales de la información disponible. A partir de ello, se constata que el sistema no solo recupera información de manera coherente, sino que además aporta valor como herramienta orientada a la organización y acceso estructurado al conocimiento técnico especializado.

Los hallazgos permiten identificar que el uso de embeddings y búsqueda semántica facilita la relación entre consultas realizadas en lenguaje natural y fragmentos documentales técnicamente relevantes, incluso cuando no existe coincidencia exacta entre los términos utilizados por el usuario y los presentes en los documentos indexados. Este aspecto representa una ventaja frente a métodos tradicionales de búsqueda basados únicamente en palabras clave, especialmente en áreas técnicas donde diferentes estudios pueden emplear terminologías distintas para referirse a fenómenos similares.

A partir de lo anterior, los resultados evidencian que el flujo automatizado implementado en n8n constituye una herramienta viable para la recuperación y consulta de información técnica relacionada con los VOCs en la industria del rendering animal. Aunque su desempeño depende directamente de la disponibilidad de literatura especializada dentro del corpus documental, el sistema demuestra capacidad para organizar, estructurar y recuperar información de forma

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal

en Colombia y su relación con la generación de VOCs

contextualizada, aportando una alternativa útil para trabajar con conocimiento técnico en dominios

donde la información continúa siendo limitada y dispersa

Plan de divulgación

El proyecto busca visibilizar las problemáticas asociadas a la generación de compuestos orgánicos volátiles en el sector industrial del rendering animal, brindar una herramienta tecnológica que con ayuda de la inteligencia artificial, sea capaz de responder distintas preguntas relacionadas al tema, por este motivo, se espera que este escrito pueda ser considerado como un artículo científico en el cual se encuentre reunida información pertinente en materia legal, afectaciones a la salud e información importante relacionada con la problemática principal de la generación de VOCs, de igual forma se espera que el presente proyecto pueda ser conocido por estudiantes o empleados y demás actores relevantes en empresas del sector industrial del rendering animal con el fin de dar a conocer tanto esta problemática como posibles soluciones, adicionalmente se podrá brindar la herramienta del flujo de trabajo automatizado con el fin de contribuir al conocimiento de la información relacionada con el caso de estudio.

La divulgación como artículo científico permite dar a conocer una problemática común poco estudiada pero muy relevante, adicionalmente se brinda una herramienta capaz de agrupar y centralizar información confiable de fuentes seguras para conocer distintos aspectos claves en relación con la generación de VOCs y su impacto en distintas áreas; esta herramienta puede ser presentada a empresas del sector de rendering animal con el fin de ayudar a identificar aspectos a mejorar y fortalecer estrategias en materia de conocimiento y capacitación.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten concluir que el flujo de trabajo automatizado implementado en n8n presentó un comportamiento funcional y coherente con los objetivos planteados para el procesamiento, organización y recuperación de información técnica relacionada con los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en la industria del rendering animal. A partir de la evaluación técnica realizada, se evidenció que el sistema fue capaz de procesar correctamente la totalidad de los documentos utilizados durante la prueba, generar metadatos válidos e indexar la información dentro de la base vectorial sin presentar errores durante las etapas principales del flujo de procesamiento. Estos resultados permiten comprobar la primera hipótesis planteada, relacionada con la capacidad del sistema para procesar, indexar y recuperar información técnica de manera funcional y consistente.

En relación con el segundo objetivo específico, orientado a evaluar la calidad de las respuestas generadas por el sistema RAG, los resultados del Golden Set evidenciaron un comportamiento variable dependiendo de la disponibilidad de información dentro del corpus documental indexado. Los resultados obtenidos permitieron identificar una de las principales limitaciones del estudio: la reducida disponibilidad de literatura especializada sobre VOCs en la industria del rendering animal, particularmente en el contexto colombiano.

Otro hallazgo importante corresponde al aporte del sistema como herramienta orientada a la organización y acceso estructurado al conocimiento técnico especializado. Más allá de la generación de respuestas, la investigación permitió evidenciar que el flujo desarrollado facilita la integración de documentos científicos, normativos y técnicos dentro de una estructura consultable. Este aspecto adquiere relevancia en escenarios como el rendering animal, donde gran parte de la información relacionada con emisiones atmosféricas y VOCs se encuentra dispersa entre múltiples fuentes documentales con enfoques metodológicos distintos. En este sentido, los resultados

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

permiten responder la pregunta de investigación planteada, indicando que el flujo implementado en n8n sí presenta capacidad para recuperar e interpretar información técnica de manera funcional y útil dentro de los límites de la información disponible.

Los hallazgos obtenidos también permiten interpretar que las arquitecturas RAG y los sistemas basados en embeddings representan una alternativa viable para trabajar con documentación técnica en dominios especializados donde la información continúa siendo limitada y fragmentada. La integración entre automatización documental, búsqueda semántica y modelos de lenguaje demostró aportar valor en procesos de recuperación contextualizada de información, especialmente en escenarios donde los métodos tradicionales de búsqueda documental pueden resultar extensos o poco eficientes.

No obstante, la investigación presenta limitaciones relacionadas principalmente con el tamaño y cobertura del corpus documental utilizado durante la evaluación. El número reducido de documentos indexados condicionó la profundidad de algunas respuestas y limitó el alcance temático del sistema frente a determinadas consultas especializadas. Asimismo, la evaluación se desarrolló bajo un conjunto controlado de preguntas factuales, por lo que futuras investigaciones podrían ampliar el análisis incorporando mayores volúmenes documentales, nuevos tipos de consultas y escenarios de validación más extensos.

La investigación permite identificar oportunidades de desarrollo futuro relacionadas con la ampliación de la base de conocimiento, incorporación de nuevas fuentes técnicas y fortalecimiento de los procesos de clasificación documental y recuperación semántica. Del mismo modo, la arquitectura implementada podría adaptarse a otros contextos industriales o ambientales que presenten problemáticas similares de dispersión documental y necesidad de consulta estructurada de información especializada. En conjunto, los resultados evidencian que el flujo automatizado implementado en n8n constituye una herramienta viable para la recuperación y consulta de

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

información técnica sobre VOCs en la industria del rendering animal, aportando una experiencia aplicada sobre el uso de automatización documental y arquitecturas RAG en contextos donde el acceso al conocimiento especializado continúa siendo un desafío.

Recomendaciones

La literatura científica consultada confirma que la generación de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en la industria del rendering animal constituye una problemática ampliamente documentada a nivel internacional. Investigaciones desarrolladas por Franco et al. (2015), Cheng et al. (2023), el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Pontificia Bolivariana (2017), así como la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare) y la Universidad de Antioquia (2023), evidencian que las actividades asociadas al procesamiento de subproductos animales generan emisiones atmosféricas que pueden impactar la calidad del aire y las comunidades cercanas a las plantas de producción.

Partiendo de esta evidencia, el alcance del estudio estuvo orientado a evaluar la viabilidad de implementar un flujo de trabajo automatizado basado en inteligencia artificial que permitiera organizar, clasificar, estructurar y facilitar el acceso a la información científica relacionada con las emisiones de VOCs en la industria del rendering animal. De esta manera, la herramienta podría contribuir a la disponibilidad y consulta eficiente del conocimiento existente, proporcionando una base informativa que sirva de apoyo para futuras investigaciones en este campo.

Es importante precisar que el objetivo de la presente investigación no fue desarrollar estrategias de mitigación ambiental, diseñar tecnologías de control de emisiones ni formular planes de acción para la reducción de VOCs. Por el contrario, el propósito se centró en evaluar la capacidad de una herramienta automatizada para gestionar y facilitar el acceso a información científica especializada. No obstante, los resultados obtenidos sugieren que futuras investigaciones podrían explorar cómo este tipo de herramientas puede apoyar procesos de análisis, toma de decisiones y formulación de estrategias orientadas a la mitigación de impactos ambientales asociados a la industria del rendering animal.

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Las pruebas realizadas se limitaron a metodologías como Golden Set y evaluación de recuperación de información debido a restricciones operativas y presupuestales asociadas a los recursos requeridos para el desarrollo y ejecución del flujo en la plataforma n8n. La utilización de modelos de inteligencia artificial generativa demanda capacidad de procesamiento para el análisis y generación de información, cuyo uso se encuentra asociado a costos calculados a partir del consumo de tokens, entendidos como las unidades de texto procesadas por la herramienta. Por esta razón, se optó por desarrollar pruebas controladas que permitieran validar el desempeño funcional del flujo y verificar su capacidad de recuperación y organización de información, sin exceder los recursos disponibles dentro del alcance académico del proyecto.

De igual forma, el análisis se desarrolló sobre un conjunto reducido de cuatro documentos científicos especializados. Esta decisión respondió a los lineamientos metodológicos establecidos durante el desarrollo del proyecto, donde se priorizó la utilización de documentación directamente relacionada con la industria del rendering animal y, especialmente, aquella con contexto colombiano. Sin embargo, esta limitación permitió identificar una situación relevante: la escasa disponibilidad de estudios, investigaciones y bases documentales específicas sobre emisiones de VOCs en la industria del rendering animal en Colombia.

Precisamente, esta brecha de información refuerza la pertinencia de la propuesta desarrollada, ya que evidencia la necesidad de herramientas que permitan consolidar, estructurar e integrar el conocimiento disponible, facilitando futuras investigaciones y promoviendo una mayor disponibilidad de información técnica, la formulación de estudios ambientales y el desarrollo de nuevas líneas de investigación en el contexto nacional.

Referencias bibliográficas

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Pontificia Bolivariana. (2017). Actualización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá – Año 2015: Informe final (Convenio de Asociación No. CA-335 de 2016).
- Carmín Magallanes, S. A., & Quispe Aquise, C. W. (2021). Revisión sistemática: Impactos ambientales generados por desperdicio de alimentos [Trabajo de investigación, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/82353>
- Cheng, W. H., Lin, C. H., Yuan, C. S., & Chang, K. L. (2023). VOC emissions from a rendering plant and evaluation for removal of pentanal by oxidization using hydrogen peroxide. *Aerosol and Air Quality Research*, 23, 220440. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220440>
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare), & Universidad de Antioquia. (2023). Actualización del inventario de emisiones al aire y modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos en zonas de interés en la jurisdicción de Cornare: Informe final – Estimación de las emisiones de contaminantes para las empresas con información en los expedientes de la corporación.
- Franco, J. F., Pacheco, J., Belalcázar, L. C., & Behrentz, E. (2015). Characterization and source identification of VOC species in Bogotá, Colombia. *Atmósfera*, 28(1), 1–11. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.01.01>
- Guerra, F. D., Smith, G. D., Alexis, F., & Whitehead, D. C. (2017). A survey of VOC emissions from rendering plants. *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 209–217. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.09.0391>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2024). Inventario nacional de emisiones y absorciones atmosféricas de Colombia: Gases de efecto invernadero (1990–2021), contaminantes criterio y carbono negro (2010–2021).

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008, 5 de junio). Resolución 909 de 2008: Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.

Naciones Unidas. (2015). Objetivos de desarrollo sostenible: Acción por el clima.
<https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/accion-por-el-clima>

Olores.org. (s. f.). Revisión de caso exitoso de control de olores en empresa dedicada al rendering en Colombia, implementando un plan para la reducción de impacto por olores soportado con estudios de olfatometría.

https://www.olores.org/index.php?option=com_content&view=article&id=414

Sazakli, E., & Leotsinidis, M. (2021). Odor nuisance and health risk assessment of VOC emissions from a rendering plant. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(3), 301–312.

Wilkinson, A. D., & Meeker, D. L. (2021). How agricultural rendering supports sustainability and assists livestock's ability to contribute more than just food. *Animal Frontiers*, 11(2), 24–34.
<https://academic.oup.com/af/article/11/2/24/6276831>

Olawade, D. B. et al. (2024). Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Advancements, Challenges, and Future Directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 12, 100114. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773049224000278>

Chisom, O. N. et al. (2024). Reviewing the role of AI in environmental monitoring and conservation. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 161–171.
<https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.2720>

Flujo de trabajo automatizado para la interpretación de información en la industria del rendering animal
en Colombia y su relación con la generación de VOCs

Cheng, W.-H., Lin, C.-H., Yuan, C.-S., Chang, K.-L. (2023). VOC Emissions from a Rendering Plant and Evaluation for Removal of Pentanal by Oxidization Using Hydrogen Peroxide. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(4), 220440. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220440>

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). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 9459–9474. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/6b493230205f780e1bc26945df7481e5-Abstract.html>