



Evaluación de la exposición ocupacional a sustancias químicas y métodos de control ingenieril en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Antioquía, Colombia

Lizeth Mejía Gálvez

Corporación Universitaria Minuto de Dios
Rectoría Virtual y a Distancia
Sede Bogotá D.C. - Sede Principal
Maestría en Gerencia en Seguridad y Salud en el Trabajo
Julio de 2025

Evaluación de la exposición ocupacional a sustancias químicas y métodos de control ingenieril en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Antioquía, Colombia

Lizeth Mejía Gálvez

Tesis de Maestría presentado como requisito para optar al título de Magíster en Gerencia de la Seguridad y Salud en el Trabajo

Asesora

Katherine Montaña Oviedo

Magister en Ciencias Químicas

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual y a Distancia

Bogotá D.C. - Sede Principal

Maestría en Gerencia en Seguridad y Salud en el Trabajo

Julio de 2025

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en todo momento. Gracias por darme la sabiduría y las fuerzas necesarias para superar cada obstáculo y alcanzar esta meta.

A mi madre, Nelly, por ser mi refugio, mi pilar inquebrantable. Tus oraciones, amor y apoyo constante me han mantenido firme y han sido la luz que me ha guiado en los momentos más difíciles.

A mis hijas, Sara y Alejandra, mi inspiración y el motor de mi vida. Su amor incondicional y su alegría y apoyo me impulsaron a seguir adelante, recordándome cada día la razón de este esfuerzo.

A mi esposo, por su paciencia, amor y compañía en cada paso de este camino. Gracias por ser mi mayor sostén y por creer en mí siempre, incluso en los momentos más complicados.

A mi familia, por su amor incondicional y su apoyo constante en todo momento. Su presencia ha sido clave para mantenerme fuerte y enfocada en este proceso.

A mis amigos del alma y compañeros de vida, por estar a mi lado en cada momento y nunca dejarme desfallecer. Gracias por su compañía, su aliento y por ayudarme a superar uno de los años más importantes y llenos de aprendizaje de mi vida. Este logro también es de ustedes.

Agradecimientos

Agradezco a mis hijas, ya que fueron mis críticas y mis consejeras, a los Ingenieros Luis Eugenio Ramírez, Francisco Muñoz, Héctor Bautista y Johan F. Urango Mejía, quienes fueron mi guía y apoyo en los momentos difíciles de este proceso. Su confianza en mí, su orientación sobre el proceso, su experiencia, su experticia técnica, su tiempo, su Empresa y sus sabios consejos me ayudaron a retomar el camino cuando sentí que todo estaba perdido. No habría logrado llegar hasta aquí sin su incondicional respaldo y profesionalismo.

A la Magíster en Ciencias Químicas Katherine Montaña Oviedo, mi profesora y asesora, por su paciencia, dedicación y compromiso. Gracias por motivarme a dar lo mejor de mí y por impulsar este trabajo hacia la excelencia. Su acompañamiento y exigencia han sido esenciales para el éxito de este proyecto.

Contenido

Lista de tablas.....	8
Lista de figuras	9
Lista de anexos	11
Resumen.....	12
Abstract	14
Introducción	15
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
Pregunta problema	22
Justificación	22
Objetivos	24
Objetivo general.....	24
Objetivos específicos.....	24
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	25
Antecedentes de la Investigación.....	25
Bases teóricas o fundamentos conceptuales	31
Organización del sector o la actividad económica	35
Procesos productivos y actividades asociadas al sector.....	36
Factores de riesgos laborales	40
Efectos a corto y largo plazo por la exposición	41
Biomarcadores y Marcadores Biológicos de Exposición en PTAR	43
Sustancias químicas peligrosas identificadas en PTAR.....	45
Estrategias de valoración e intervención	46
Bases legales de la investigación.....	49
CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	55
Tipo de investigación.....	56
Población y/o muestra objeto de estudio	57
Técnicas o herramientas de recolección de datos	58
Tabla 12 Identificación de factores de riesgo asociados al uso de sustancias químicas	58
Tabla 13 Variables para la estimación cualitativa del riesgo químico (Metodología INRS).....	60

Operacionalización de variables.....	61
Fases metodológicas	61
Análisis estadístico o de los datos	62
Consideraciones éticas	64
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	65
Resultado 1: Estimación del nivel del riesgo haciendo uso de metodologías cualitativas	65
Exposición química según caracterización de sustancias	65
1. Inventario y fuentes de información	65
2. Clasificación según peligrosidad SGA	65
3. Clasificación toxicológica y efectos sobre la salud	66
Tabla 15 Clasificación toxicológica y efectos sobre la salud.....	66
Tabla 16 Clasificación de carcinogenicidad (IARC)	67
4. Sustancias críticas y prevalentes	67
5. Resultados derivados de la aplicación de la NTP 937.....	68
Tabla 21 Sustancias con mayor puntuación de riesgo según matriz NTP 937.....	70
Tabla 22 Sustancias reguladas por Resolución 1890 de 2025	71
Tabla 23 Clasificación del riesgo por área de trabajo.....	71
Resultados 2: Determinación de la efectividad de los controles de ingeniería implementados.....	73
Tabla 25 Evaluación de la efectividad de controles por etapa del proceso	74
Tabla 26 Sustancias con riesgo alto y deficiencias de control	74
Tabla 27 Recomendaciones técnicas jerarquizadas por tipo de control	75
Análisis de la efectividad de los controles existentes	76
1. Enfoque metodológico	76
Tabla 28 Análisis técnico de efectividad por etapa del proceso.....	76
2. Hallazgos relevantes del análisis	84
3. Recomendaciones técnicas para mejora	84
Resultados 3: Propuesta de estrategias para mitigar la exposición a sustancias químicas y reducir los daños en caso de accidentes o emergencias	85
Discusión de resultados.....	94
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
Conclusiones	97
Recomendaciones	98

Referencias bibliográficas.....	99
Anexos.....	108

Lista de tablas

Tabla 1- Pirámide normativa principal sobre gestión del riesgo químico en PTAR en Colombia ..20	
Tabla 2 Síntesis comparativa de antecedentes investigativos sobre riesgo químico en PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3 Cuadro comparativo de antecedentes internacionales y nacionales sobre riesgos químicos en PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4 Definiciones conceptuales clave sobre riesgo químico y seguridad y salud en el trabajo	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5 Términos técnicos clave relacionados con las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6 Proceso general del tratamiento de aguas residuales en una PTAR (Prevor, 2022). .	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8 Etapas del tratamiento de aguas residuales en una PTAR y sus principales actividades operativas.....	39
Tabla 9 Matriz de Factores de Riesgos químicos según GTC 45, INSST y NIOSH.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10 Efectos a Corto y Largo Plazo por Agente de Riesgo.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11 Biomarcadores y Marcadores Biológicos utilizados en Exposición Ocupacional en PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12 Sustancias químicas peligrosas identificadas en procesos operativos de la PTAR... ..	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13 Aplicación Práctica de la Jerarquía de Controles en PTAR .	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 14 Relación entre niveles de riesgo y estrategias de intervención en PTAR.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 15 Línea del tiempo sobre la legislación aplicable en Seguridad y Salud en el Trabajo (SST)	51
Tabla 16 Resumen del diseño metodológico de la investigación sobre riesgo químico en PTAR	¡Error! Marcador no definido.

Lista de figuras

Ilustración 1- Pirámide normativa principal sobre gestión del riesgo químico en PTAR en Colombia	20
Ilustración 2 Síntesis comparativa de antecedentes investigativos sobre riesgo químico en PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 3 Cuadro comparativo de antecedentes internacionales y nacionales sobre riesgos químicos en PTAR.....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 4 Definiciones conceptuales clave sobre riesgo químico y seguridad y salud en el trabajo.....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 5 Términos técnicos clave relacionados con las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 6 Proceso general del tratamiento de aguas residuales en una PTAR (Prevor, 2022).	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 8 Etapas del tratamiento de aguas residuales en una PTAR y sus principales actividades operativas.....	39
Ilustración 9 Matriz de Factores de Riesgos químicos según GTC 45, INSST y NIOSH	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 10 Efectos a Corto y Largo Plazo por Agente de Riesgo..	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 11 Biomarcadores y Marcadores Biológicos utilizados en Exposición Ocupacional en PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 12 Sustancias químicas peligrosas identificadas en procesos operativos de la PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 13 Aplicación Práctica de la Jerarquía de Controles en PTAR	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 14 Relación entre niveles de riesgo y estrategias de intervención en PTAR.....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 15 Línea del tiempo sobre la legislación aplicable en Seguridad y Salud en el Trabajo (SST).....	51
Ilustración 16 Resumen del diseño metodológico de la investigación sobre riesgo químico en PTAR	¡Error! Marcador no definido.

Lista de anexos

- **Anexo A** Matriz de identificación de sustancias químicas (SGA y FDS) **¡Error! Marcador no definido.**
- **Anexo B** Matriz de estimación cualitativa del riesgo químico (Metodología simplificada INRS)
61
- **Anexo C** Herramienta de apoyo NTP 937 para evaluación de riesgos sin mediciones instrumentales **¡Error! Marcador no definido.**

Resumen

Contexto: El tratamiento de aguas residuales es fundamental para proteger los recursos hídricos en Colombia, pero los trabajadores de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) enfrentan exposición a sustancias químicas peligrosas durante las etapas de almacenamiento, manejo, desinfección y tratamiento de lodos. Estos riesgos representan desafíos relevantes para la seguridad y salud laboral, exigiendo una evaluación de la efectividad de los controles existentes y la aplicación de mejoras basadas en principios de ingeniería.

Objetivo: Evaluar cualitativamente las sustancias químicas peligrosas utilizadas en las PTAR, identificando los riesgos de exposición y proponiendo estrategias de prevención para mitigar accidentes laborales y enfermedades relacionadas.

Métodos: Se realizó un estudio cualitativo, transversal y descriptivo con enfoque cuantitativo en trabajadores operativos de PTAR de Antioquia. Se emplearon observación directa y revisión de Fichas de Datos de Seguridad (FDS), utilizando la Guía Técnica Colombiana GTC 45 y la metodología INRS para valorar riesgos químicos, complementadas con la NTP 937 para analizar la efectividad de controles existentes. Se utilizó una matriz de riesgo para jerarquizar peligros y priorizar intervenciones según severidad, frecuencia y eficacia de las medidas de control.

Resultados: Se identificaron riesgos críticos en áreas de almacenamiento y manejo de sustancias químicas como cloruro férrico, ácido sulfúrico y cloro gaseoso, con mayor peligrosidad en procesos manuales y con diluciones realizadas directamente, aumentando la probabilidad de accidentes y emergencias. También se detectó exposición a vapores de cloro, sulfuro de hidrógeno y amoníaco en procesos de desinfección y tratamiento de lodos, sin monitoreo ambiental ni ventilación localizada. El 65 % de las tareas analizadas presentan riesgo medio o alto cuando el proceso no está automatizado, con deficiencias en el uso de EPP, FDS desactualizadas y ausencia de procedimientos técnicos, lo que evidencia un cumplimiento parcial de requisitos normativos.

Conclusión: La exposición ocupacional a sustancias químicas en las PTAR evaluadas es demostrativa, especialmente en áreas de almacenamiento, desinfección y tratamiento de lodos, y se agrava por la falta de ventilación, capacitación y automatización en el manejo de sustancias peligrosas. Se requiere implementar controles de ingeniería como ventilación forzada, lavadores de gases, sensores de detección, automatización de la dosificación y reorganización de almacenamiento según compatibilidad química, junto con señalización técnica y uso de EPP especializado con tecnologías de barrera y neutralización química. Se recomienda fortalecer la capacitación, actualizar procedimientos técnicos y ampliar futuros estudios con muestras mayores, considerando la duración de la exposición y la realización

de exámenes de laboratorio en trabajadores para verificar exposición y efectividad de las medidas implementadas.

Palabras clave: Exposición ocupacional, sustancias químicas, plantas de tratamiento de aguas residuales, riesgo químico, control de ingeniería.

Abstract

Context: Wastewater treatment is essential for protecting water resources in Colombia; however, workers at wastewater treatment plants (WWTP) face exposure to hazardous chemicals during storage, handling, disinfection, and sludge treatment stages. These risks represent significant challenges for occupational safety and health, requiring an evaluation of the effectiveness of existing controls and the implementation of improvements based on engineering principles.

Objective: To qualitatively assess hazardous chemicals used in WWTP, identifying exposure risks and proposing prevention strategies to mitigate occupational accidents and related diseases.

Methods: A qualitative, cross-sectional, and descriptive study with a quantitative approach was conducted among operational workers at WWTP in Antioquia. Direct observation and Safety Data Sheet (SDS) reviews were applied, using the Colombian Technical Guide GTC 45 and the INRS methodology to assess chemical risks, complemented by NTP 937 to analyze the effectiveness of current controls. A risk matrix was used to rank hazards and prioritize interventions based on severity, frequency, and the effectiveness of control measures.

Results: Critical risks were identified in storage and handling areas of chemicals such as ferric chloride, sulfuric acid, and chlorine gas, with higher hazard levels in manual processes and direct dilution handling, increasing the likelihood of accidents and emergencies. Exposure to chlorine vapors, hydrogen sulfide, and ammonia was also detected during disinfection and sludge treatment processes, without environmental monitoring or localized ventilation. Sixty-five percent of the tasks analyzed presented medium or high risk when processes were not automated, with deficiencies in PPE use, outdated SDS, and a lack of technical procedures, indicating partial compliance with regulatory requirements.

Conclusion: Occupational exposure to hazardous chemicals in the evaluated WWTP is significant, particularly in storage, disinfection, and sludge treatment areas, and is exacerbated by the lack of ventilation, training, and automation in chemical handling. Engineering controls such as forced ventilation, gas scrubbers, fixed detection sensors, automated dosing systems, and storage reorganization according to chemical compatibility, along with technical signage and the use of specialized PPE with barrier and chemical neutralization technologies, are required. Strengthening training, updating technical procedures, and expanding future studies with larger

samples, considering exposure duration and conducting laboratory tests to verify worker exposure and the effectiveness of implemented measures, are recommended.

Keywords: Occupational exposure, hazardous chemicals, wastewater treatment plants, chemical risk, engineering control.

Introducción

La gestión de aguas residuales representa un eje estratégico para la sostenibilidad ambiental y la salud pública. En Colombia, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) cumplen un papel esencial al remover contaminantes antes del vertimiento o reutilización del recurso hídrico. No obstante, las condiciones de trabajo en estas plantas han sido objeto de creciente preocupación, debido a la constante exposición del personal operativo a sustancias químicas peligrosas empleadas en procesos de coagulación, desinfección y neutralización, como ácido nítrico, cloruro férrico, hipoclorito de sodio y soda cáustica (Prevor, 2022; Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021).

De manera internacional, se ha evidenciado que las plantas de tratamiento de aguas residuales representan ambientes laborales con múltiples riesgos, destacándose los químicos y biológicos como los principales (Gómez et al., 2021; Spellman & Welsh, 2018). Investigaciones recientes resaltan que los trabajadores de PTAR enfrentan exposición a sustancias químicas como cloro, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y compuestos genotóxicos, asociados con afectaciones respiratorias, dérmicas y sistémicas, impactando negativamente su salud y productividad (Li et al., 2023; da Silva et al., 2022). Asimismo, se ha documentado que, aunque existen protocolos de control, persisten vacíos en la implementación de prácticas seguras y monitoreo de exposición en estas instalaciones, generando la necesidad de fortalecer las estrategias de gestión de riesgos químicos (Carvalho & Silva, 2021; Pereira & Vasconcelos, 2004).

En departamentos como Antioquia, donde el uso de reactivos es intensivo y cotidiano, la exposición ocupacional sin medidas adecuadas de control constituye un riesgo para la integridad respiratoria, dérmica y sistémica de los trabajadores (Solano et al., 2021). Aunque existen marcos normativos que abordan el riesgo químico, como la Ley 55 de 1993, el Decreto 1072 de 2015, el Decreto 1496 de 2018 y las Resoluciones 0773 de 2021 y 1890 de 2025, se evidencian brechas entre lo exigido por la normatividad y su implementación en los entornos reales de trabajo (Decreto 1496 de 2018, 2018; Ley 55 de 1993, 1993; Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA), 2021; Ministerio de Trabajo, 2025).

La contaminación del agua es relevante, especialmente en zonas urbanas de países desarrollados o en desarrollo. En estas circunstancias, suele existir un sistema organizado de tratamiento de agua que emplea a un número considerable de trabajadores. La mayoría de los artículos que se han revisado en investigaciones previas seleccionados destacaron el riesgo biológico y químico como los principales, según (Santos et al., 2021) Las aguas residuales contienen numerosos microorganismos, como bacterias, virus, hongos y protozoos. Existe una alta producción de bioaerosoles. La concentración atmosférica de

endotoxinas suele ser mayor en lugares con mayor agitación del líquido, especialmente cuando circula a alta presión y durante la limpieza de algunas estructuras. Los bioaerosoles pueden contener el propio microorganismo o fragmentos/endotoxinas producidas por este. Algunos de los agentes químicos en cuestión son genotóxicos/cancerígenos; se pueden encontrar hidrocarburos aromáticos, metales pesados, pesticidas, pinturas, nitrosaminas y bifenilos. Sin embargo, la exposición varía según el trabajo y el momento; en ocasiones, incluso es intermitente, lo que dificulta la evaluación (Santos et al., 2021).

Estudios previos han documentado fallas estructurales en la gestión de sustancias peligrosas. (Bermudez Grisales & Carrillo Loaiza, 2019) identifican deficiencias en el almacenamiento y manejo de reactivos en la planta de tratamiento del municipio de Guasca, Cundinamarca. (Cordoba Rojas, 2007) expone la baja implementación de prácticas de higiene y seguridad industrial en la PTAR de Cañaveralejo (EMCALI), reflejando la ausencia de protocolos adecuados. Por su parte, (Almeida Cevallos & Diego Fernando, 2025) resalta condiciones operativas críticas durante procesos como la digestión anaerobia, con potencial de exposición directa a residuos y subproductos en plantas de tratamiento.

A pesar del reconocimiento de estos riesgos, muchas PTAR carecen de controles de ingeniería efectivos y de una cultura preventiva robusta. Las Fichas de Datos de Seguridad (FDS) se encuentran frecuentemente desactualizadas, los procedimientos técnicos son inexistentes o inadecuados, y el uso de elementos de protección personal (EPP) no siempre responde a las características de los agentes químicos manipulados (Buitrago Cabra & Arevalo Cárdenas, 2023; Solano et al., 2021). Lo anterior evidencia la necesidad de actualizar las FDS, fortalecer los procedimientos técnicos y garantizar el uso de EPP adecuado, contribuyendo así a cerrar la brecha entre la normativa y la práctica operativa, proteger la salud de los trabajadores y cumplir con los estándares legales vigentes (Gómez et al., 2021; Spellman & Welsh, 2018).

Esta investigación tiene como propósito evaluar cualitativamente la exposición a sustancias químicas peligrosas en trabajadores operativos de PTAR del departamento de Antioquia y analizar la efectividad de los controles de ingeniería implementados. Se busca formular estrategias de prevención y control que contribuyan a reducir la exposición, fortalecer la gestión del riesgo químico y mejorar las condiciones laborales, garantizando el cumplimiento de la normativa vigente. El estudio responde a la necesidad de cerrar la brecha entre la normativa y la práctica operativa, aportando herramientas técnicas que faciliten la toma de decisiones preventivas y permitan mitigar los impactos en caso de materializarse los riesgos.

Para ello, se adopta un estudio cualitativo de tipo aplicado y diseño transversal, con alcance descriptivo y elementos de cuantificación para priorización de riesgos. Se integran técnicas de observación directa y revisión de Fichas de Datos de Seguridad (FDS) aplicadas a trabajadores operativos en PTAR, permitiendo analizar contextos reales de trabajo. La valoración del riesgo químico se realiza mediante adaptaciones de la Guía Técnica Colombiana GTC 45 y la metodología de evaluación simplificada del peligro químico del INRS, complementadas con el análisis de la efectividad de controles de ingeniería según la NTP 937. Asimismo, se emplea una matriz de riesgo para jerarquizar peligros y priorizar intervenciones según severidad, frecuencia y eficacia de las medidas de control actuales. Este enfoque permite diagnosticar las condiciones de exposición y los controles de riesgos químicos en las PTAR, formulando estrategias de mejora alineadas con la normativa vigente y las necesidades reales de gestión en seguridad y salud en el trabajo.

El presente documento se estructura en cinco capítulos. En el primero, se introduce el problema de investigación y su contexto. El segundo expone el marco teórico, incluyendo antecedentes, fundamentos técnicos y legales. El tercero describe el diseño metodológico. El cuarto presenta los resultados y su análisis. Finalmente, el quinto capítulo expone las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, el tratamiento de aguas residuales es esencial para la sostenibilidad ambiental y la salud pública, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de agua limpia y saneamiento (ONU, 2023). En América Latina, solo un 30 % de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado, reflejando desafíos en infraestructura, cobertura y gestión operativa (BID, 2022).

El tratamiento de aguas residuales constituye un componente de la gestión ambiental y de la salud pública, especialmente en el contexto colombiano, donde la cobertura y calidad de los servicios de saneamiento básico aún presentan desafíos. Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son infraestructuras clave que permiten remover contaminantes del agua antes de su vertimiento o reutilización. Según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) (Martelo Payares et al., 2023), Colombia cuenta con más de 680 PTAR registradas, pero solo el 44 % de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado, lo que evidencia una brecha en términos de cobertura y eficacia operativa.

En el departamento de Antioquia operan aproximadamente 90 PTAR, posicionándolo como uno de los líderes en infraestructura de saneamiento básico a nivel nacional. Sin embargo, muchas de estas plantas, especialmente en municipios con menos de 30.000 habitantes, presentan deficiencias técnicas y operativas. El caso de la PTAR Aguas Claras, en Bello, es ilustrativo de esta problemática, ya que desde su entrada en operación ha enfrentado múltiples fallas técnicas y ha sido objeto de denuncias por malos olores y afectaciones a la comunidad (El Colombiano, 2024).

En este contexto, los trabajadores de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se enfrentan a una exposición constante a sustancias químicas peligrosas como ácido sulfúrico, cloro gaseoso, hipoclorito de sodio, cloruro férrico y otros agentes utilizados en los procesos de coagulación, desinfección y ajuste de pH. Además, la descomposición de la materia orgánica genera gases como amoníaco y sulfuro de hidrógeno, cuya acumulación en ambientes mal ventilados incrementa el riesgo de intoxicaciones y enfermedades respiratorias crónicas (Graczyk et al., 2021; Prevor, 2022).

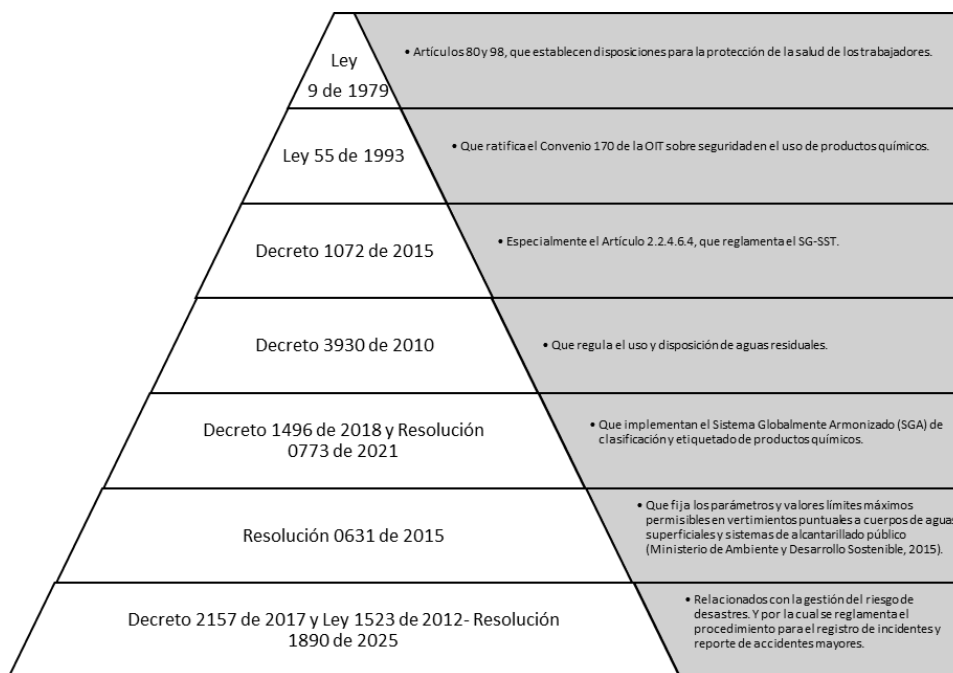
Desde una perspectiva sociodemográfica, los operarios de estas plantas municipales frecuentemente provienen de comunidades vulnerables, con bajos niveles de escolaridad y vínculos laborales inestables. Esto, sumado a la obsolescencia tecnológica y a la falta de cultura preventiva, incrementa la vulnerabilidad frente a los riesgos químicos. La situación se agrava cuando los sistemas de control de ingeniería son ineficaces o inexistentes, y cuando las Fichas de Datos de Seguridad (FDS) están desactualizadas o no se cumplen en la práctica.

En las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) industriales del departamento de Antioquia, aunque la mayoría de los trabajadores cuentan con formación tecnológica o profesional, persisten vacíos en el conocimiento del Programa de Riesgo Químico, así como de los riesgos específicos asociados a la exposición ocupacional en este tipo de procesos. Además, se evidencia un desconocimiento de los planes operativos normalizados y técnicos que integran el Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias. Esta situación plantea un riesgo latente que compromete tanto la salud de los trabajadores como la capacidad de respuesta institucional. Por ello, el interés de esta investigación radica en generar evidencia sobre los niveles reales de exposición y la efectividad de los controles de ingeniería implementados, para orientar decisiones informadas que fortalezcan la prevención, mejoren la gestión del riesgo químico y aseguren el cumplimiento normativo en entornos de alto impacto como las PTAR.

El uso continuo de sustancias químicas peligrosas en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), sumado a la falta de controles de ingeniería y protocolos actualizados, constituye la causa de una exposición ocupacional que afecta la salud respiratoria, dérmica y sistémica de los trabajadores. Esta problemática genera incumplimientos en materia de seguridad y salud en el trabajo, aumentando el riesgo de accidentes, enfermedades laborales y eventos críticos en las operaciones, con consecuencias que comprometen tanto la integridad de los operarios como el cumplimiento de la normativa vigente.

Colombia cuenta con un marco normativo robusto que regula la seguridad en el trabajo y el manejo de sustancias químicas. A continuación, se presenta la pirámide normativa que resume los instrumentos legales que regulan la gestión del riesgo químico en Colombia y su aplicación en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR):

Ilustración 1- Pirámide normativa principal sobre gestión del riesgo químico en PTAR en Colombia



Nota. Elaboración propia con base en normativa nacional: (Congreso de la República de Colombia, 2012; Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo, 2015; Decreto 1496 de 2018, 2018; Decreto 2157 de 2017, 2017; Ley 0009 de 1979, 1979; Ley 55 de 1993, 1993; Resolución 631 de 2015, 2015; Ministerio de Ambiente, 2010; Ministerio de Trabajo, 2025).

A pesar de este marco normativo, persisten brechas en la implementación efectiva de estas disposiciones, como lo han evidenciado investigaciones desarrolladas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Cóbbita (Sánchez Quevedo & Marín Camacho, 2022), en Cali (Córdoba Rojas, 2007) y en la PTAR de Santiago Cali (Yepes Benavides, 2013). Estas investigaciones han documentado deficiencias en el almacenamiento de sustancias incompatibles, ausencia de monitoreo atmosférico, falta de ventilación mecánica y uso inadecuado de elementos de protección personal (EPP), entre otros aspectos críticos que comprometen la salud de los trabajadores.

La falta de implementación efectiva de controles ante la exposición a sustancias químicas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) sigue siendo un problema crítico, documentado por múltiples estudios recientes. Las investigaciones mencionadas destacan la falta de protocolos claros para el manejo de sustancias corrosivas, la escasa disponibilidad de sistemas de detección de gases, y la inexistencia de rutinas de mantenimiento preventivo en equipos críticos. Esta situación genera

consecuencias graves para la salud de los trabajadores, como quemaduras, afecciones respiratorias, dermatitis, intoxicaciones agudas y riesgos cancerígenos.

En el contexto de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), el uso continuo de sustancias químicas peligrosas como ácido sulfúrico, hipoclorito de sodio, cloro gaseoso y peróxidos representa un componente de los procesos de desinfección, coagulación y tratamiento biológico. Si bien estas sustancias son necesarias para garantizar la calidad del agua tratada, su manipulación implica riesgos para los trabajadores cuando no se gestionan de forma técnica. La exposición directa o indirecta a estos agentes puede causar efectos agudos o crónicos sobre la salud, afectando el sistema respiratorio, la piel y, en casos severos, generando intoxicaciones o muertes. La Guía Técnica de Riesgo Químico del Ministerio de Salud (Solano et al., 2021) destaca que, aunque más del 30 % de los entornos laborales en Colombia manipulan productos químicos peligrosos, apenas un 15 % implementa mecanismos efectivos de control, lo que agrava el escenario en sectores de alto riesgo como el tratamiento de aguas residuales.

La persistencia del riesgo químico en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se ve amplificada por condiciones operativas desprovistas. A nivel nacional, se han documentado múltiples plantas que operan con sistemas de ventilación limitados, almacenamiento improvisado, Fichas de Datos de Seguridad (FDS) desactualizadas y sin protocolos claros para la manipulación, traslado o disposición de sustancias químicas. Estas deficiencias se acompañan de un diseño inoperante de los planes de emergencia y una gestión poco estructurada del riesgo químico. Esta situación vulnera no solo la salud de los trabajadores, sino también el cumplimiento normativo establecido en el Decreto 1072 de 2015 y en la Resolución 0312 de 2019, instrumentos legales que exigen a las organizaciones implementar un Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) integral, basado en el ciclo PHVA y el cumplimiento de estándares mínimos.

El problema también se ve sostenido por variables sociales y organizacionales. En muchas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), especialmente en municipios intermedios y zonas rurales de Antioquia, los operarios cuentan con bajos niveles de formación técnica en seguridad química, lo que dificulta la interpretación de FDS, pictogramas o procedimientos seguros. A esto se suma una débil cultura preventiva en las organizaciones, escasa inversión en tecnologías de automatización, y desconocimiento de herramientas que podrían reducir eventos catastróficos a simples incidentes controlables. Según el Consejo Colombiano de Seguridad (Consejo Colombiano de Seguridad (CSS), 2025), durante 2024 se reportaron 520.272 accidentes laborales en Colombia (4,02 por cada 100 trabajadores), de los cuales Antioquia concentró el 16,5 %. Además, se registraron 10.402 enfermedades laborales y 375 muertes asociadas a la actividad laboral. Según el informe CISPROQUIM de 2023 del Consejo Colombiano de

Seguridad (2023), en 2022 se atendieron 14 462 emergencias químicas, con 12 272 casos de intoxicación y 67 defunciones, siendo Antioquia uno de los departamentos con mayor incidencia (Hernández, 2023).

Frente a esta realidad, la presente investigación propone un enfoque de intervención técnica, basado en metodologías de evaluación cualitativa como la GTC 45, la NTP 386, la NTP 937, y el modelo COSHH Essentials adaptado en las NTP 935 y 936 (Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH), 2002; ICONTEC, 2010; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2012, 2018b, 2018c; Sousa Rodríguez & Tejedor Traspaderne, 2018). Estas herramientas permiten clasificar peligros, valorar niveles de exposición y priorizar controles adecuados. Se sugiere, además, realizar observación directa de tareas críticas, actualizar las FDS, y desarrollar un programa de gestión del riesgo químico y prevención y atención de emergencias ajustado al contexto de las PTAR de Antioquia. Dicho programa deberá incluir la implementación de ventilación localizada, automatización de procesos, reorganización del almacenamiento, fortalecimiento del uso de EPP y capacitación continua del personal. Estas acciones, alineadas contribuirán a reducir la ocurrencia de eventos adversos, fortalecer la cultura de prevención y cumplir con los estándares legales y técnicos aplicables.

Pregunta problema

¿Cuál es el nivel de exposición ocupacional a sustancias químicas peligrosas y qué tan eficaces son los controles de ingeniería aplicados para reducir dicha exposición en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del departamento de Antioquia, Colombia?

Justificación

La presente investigación surge como respuesta a la necesidad de mejorar las condiciones de seguridad y salud en el trabajo en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Colombia, particularmente en el departamento de Antioquia, donde las condiciones de exposición a sustancias químicas peligrosas han sido documentadas por autoridades sanitarias y académicas. Estas plantas, fundamentales para la sostenibilidad ambiental y la salud pública, implican el uso constante de productos como ácido sulfúrico, hipoclorito de sodio, cloro gaseoso y coagulantes férricos, cuyo manejo inadecuado puede derivar en efectos severos para la salud de los trabajadores y fallas operativas (Prevor, 2022; Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021).

Desde una perspectiva social, el estudio busca beneficiar a los operarios que se desempeñan en entornos de alto riesgo químico, en muchos casos sin contar con los recursos técnicos ni humanos necesarios para gestionar adecuadamente dichas exposiciones. Según el Consejo Colombiano de

Seguridad (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo & Accidentes de Trabajo Investigados, 2024), Antioquia concentró el 16,5 % de los accidentes laborales reportados en Colombia durante 2024. Adicionalmente, el sistema CISPROQUIM registró más de 14.000 emergencias químicas en 2022, de las cuales más de 12.000 correspondieron a intoxicaciones, reflejando una deficiencia estructural en la implementación de controles efectivos (Hernández, 2023).

El valor práctico de esta investigación radica en su capacidad de generar productos concretos como: propuestas de automatización de procesos de dosificación, reorganización del almacenamiento por compatibilidad química, elementos para minimizar el impacto de los accidentes y emergencias en caso de presentarse, herramientas de evaluación cualitativa del riesgo y recomendaciones normativas para mejorar los procedimientos internos. Todo ello permitirá optimizar la gestión del riesgo químico desde un enfoque técnico y operativo (Niño Barrero et al., 2021).

En el plano científico, el proyecto se inserta en la línea de investigación en higiene industrial, aportando evidencia desde un enfoque cualitativo aplicado. Se utilizarán metodologías como la GTC 45 (ICONTEC, 2010), la NTP 386 y 937, así como la estrategia COSHH Essentials (Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH), 2002; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2018b; Sousa Rodríguez & Tejedor Traspaderne, 2018), lo cual refuerza la pertinencia académica y metodológica del estudio. A diferencia de investigaciones previas, esta propuesta considera el contexto colombiano actual, elementos para atención a emergencias químicas incluyendo condiciones laborales, capacidades técnicas locales y brechas identificadas en el cumplimiento normativo.

Desde el enfoque de políticas públicas, se articula con instrumentos legales como el Decreto 1072 de 2015, la Resolución 0312 de 2019, el Decreto 1496 de 2018 y la más reciente Resolución 1890 de 2025, que actualiza los lineamientos para la implementación del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) y exige el cumplimiento riguroso del Sistema Globalmente Armonizado (SGA) para el manejo seguro de productos químicos y accidentes de mayores.

La elección del problema responde al contacto directo con empresas del sector servicios públicos e industrial en Antioquia, donde se evidencian brechas críticas en la gestión preventiva. Los hallazgos del proyecto no solo beneficiarán a estas organizaciones, sino que ofrecerán insumos valiosos para entes territoriales, entidades de vigilancia, gremios y profesionales de seguridad y salud en el trabajo, permitiendo la toma de decisiones informadas y el fortalecimiento de la cultura de prevención en escenarios de alto riesgo químico.

Así, esta investigación no solo aporta desde lo académico, sino que responde a una necesidad concreta de la sociedad: proteger la vida y salud de quienes hacen posible el saneamiento ambiental en Colombia.

Este estudio es innovador al integrar herramientas de evaluación cualitativa, observación en campo y análisis de controles de ingeniería específicamente en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), articulando la normativa colombiana con la realidad operativa del sector, permitiendo generar propuestas de mejora prácticas, viables y alineadas con los estándares de seguridad y salud en el trabajo.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar el nivel de exposición a sustancias químicas peligrosas y la efectividad de los controles de ingeniería en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Antioquia, con el fin de proponer estrategias de prevención y control que contribuyan a mitigar la exposición y reducir los daños en caso de accidentes o emergencias.

Objetivos específicos

1. Estimar el nivel de riesgo químico haciendo uso de metodologías cualitativas durante la ejecución de actividades y tareas en una Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).
2. Determinar la efectividad de los controles de ingeniería implementados en las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR.
3. Proponer estrategias para mitigar la exposición a sustancias químicas y reducir los daños en caso de accidentes o emergencias en los trabajadores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Para comprender los riesgos asociados a la exposición a sustancias químicas en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), este capítulo presenta un marco teórico articulado en tres ejes:

1. Antecedentes investigativos,
2. Fundamentos conceptuales en seguridad química e higiene industrial,
3. Bases legales aplicables.

Se integran también hallazgos documentales nacionales e internacionales que apuntan a brechas en la gestión del riesgo químico, así como evidencias de accidentes fatales vinculados a sustancias peligrosas.

Antecedentes de la Investigación

El análisis de antecedentes permite establecer el estado actual del conocimiento respecto al riesgo químico en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), destacando tanto los avances normativos como los vacíos persistentes en su aplicación práctica. En Colombia, aunque la construcción de PTAR comenzó como respuesta a la creciente contaminación hídrica en las décadas de los 60 y 70, no fue sino hasta la promulgación de la Ley 9 de 1979 que se introdujeron lineamientos iniciales sobre salud ocupacional en entornos industriales. Posteriormente, la Ley 55 de 1993, que adopta el Convenio 170 de la OIT, estableció directrices claras para el manejo seguro de sustancias químicas en el trabajo. Sin embargo, fue el Decreto 1072 de 2015 el que integró de manera estructurada y transversal la gestión del riesgo químico dentro del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), al exigir su identificación, evaluación y control como parte de los estándares mínimos obligatorios que deben cumplir todas las organizaciones (Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo, 2015; Ley 0009 de 1979, 1979; Ley 55 de 1993, 1993; Organización Internacional del Trabajo (ILO), 1990).

Más recientemente, la Resolución 1890 de 2025, emitida por el Ministerio del Trabajo, ha reforzado el enfoque preventivo frente a accidentes mayores, al establecer lineamientos específicos para la identificación de escenarios peligrosos, la evaluación de consecuencias y la planificación de medidas de prevención y respuesta. Esta resolución es altamente pertinente para las PTAR, especialmente aquellas que manipulan sustancias como ácido sulfúrico, cloro gaseoso, amoníaco o peróxidos en cantidades que pueden generar explosiones, fugas tóxicas o reacciones violentas. Su aplicación exige la elaboración de un

Estudio de Análisis de Riesgo (EAR) y un Plan de Prevención de Accidentes Mayores (PPAM), promoviendo una gestión más rigurosa del riesgo químico. Además, esta normativa se articula con la implementación del Sistema Globalmente Armonizado (SGA), adoptado en Colombia mediante el Decreto 1496 de 2018 y la Resolución 0773 de 2021, que establece criterios técnicos para la clasificación, etiquetado y comunicación de peligros de sustancias químicas, reforzando la prevención desde la identificación del riesgo (Decreto 1496 de 2018, 2018; Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA), 2021; Ministerio de Trabajo, 2025).

A nivel internacional, el conocimiento acumulado evidencia que los trabajadores de PTAR están expuestos a sustancias como cloro gaseoso, hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico y gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno, que representan un riesgo si no se implementan medidas técnicas efectivas (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Organización Internacional del Trabajo (ILO), n.d.; Osha, 2024). Diversos estudios han documentado eventos críticos como explosiones, intoxicaciones colectivas y muertes por inhalación de gases en estaciones de tratamiento, lo que refuerza la premura de aplicar marcos regulatorios actualizados como la Resolución 1890 (Agencia de Noticias YONHAP, 2024; Chemistry World & Phillip Broadwith, 2020; El Paso, 2024; Hernández, 2023).

Metodológicamente, investigaciones previas han utilizado herramientas cualitativas para la valoración del riesgo químico, especialmente en escenarios donde no se cuenta con monitoreo ambiental especializado. Se destacan la Guía Técnica Colombiana GTC 45 como base para el análisis de peligros, la Nota Técnica de Prevención NTP 386 como referente para la evaluación cualitativa del riesgo, y el modelo COSHH Essentials del Health and Safety Executive del Reino Unido, adaptado en las NTP 935 y 936, que permite identificar y jerarquizar riesgos incluso sin datos cuantitativos (Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH), 2002; ICONTEC, 2010; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2012, 2018b, 2018c, 2018a).

Así, este trabajo se enmarca dentro de un vacío evidenciado tanto en la literatura como en las condiciones reales observadas en PTAR del país: la débil implementación de controles de ingeniería frente a sustancias peligrosas y la limitada adopción de normativas sobre accidentes mayores. La revisión de antecedentes refuerza la necesidad de propuestas de intervención técnica, enfocadas en controles jerarquizados, reorganización operativa, y fortalecimiento de la cultura preventiva mediante acciones formativas y normativas ajustadas al contexto nacional actual.

Los antecedentes revisados aportan evidencia empírica y conceptual clave sobre la exposición a sustancias químicas en PTAR, tanto en contextos nacionales como internacionales. En Ecuador, (Sánchez Baque & Román Ullauri, 2020) identificó debilidades en los controles de riesgo químico y un subregistro

en la documentación de peligros, mientras que, en Colombia, (Sánchez Quevedo & Marín Camacho, 2022) expuso vacíos en la percepción del riesgo entre trabajadores municipales de PTAR. Casos como el de la PTAR El Ahogado, en México, resaltan la exposición a ácido sulfúrico, residuos peligrosos y deficiencias en bioseguridad (Servicios Ambientales Profesionales (SAP), 2022) y la Universidad Católica de Colombia (Funza: Aprovechamiento de Lodos Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipio de Funza, Como Insumo de Cultivo y Mejoramiento Del Suelo, 2018) resaltan la exposición a ácido sulfúrico, residuos peligrosos y deficiencias en bioseguridad.

En el plano internacional, se han documentado eventos críticos como la muerte de trabajadores por intoxicación en espacios confinados (Situaciones De Trabajo Peligrosas, 2024), explosiones en plantas del Reino Unido y China por fallas en el control de gases inflamables (Chemistry World & Phillip Broadwith, 2020; Xinhua, 2020), y muertes por intoxicación química en Corea del Sur y Estados Unidos (Agencia de Noticias YONHAP, 2024; El Paso, 2024). Estos antecedentes refuerzan la necesidad de adoptar metodologías cualitativas como GTC 45, NTP 386 y COSHH Essentials para evaluar los riesgos, y de fortalecer la implementación de controles de ingeniería, monitoreo ambiental y protocolos de emergencia en PTAR del contexto colombiano.

Lo anterior se evidenció también durante la revisión de documentación y visitas técnicas realizadas por el autor, donde se observaron carencias en protocolos de control y en la capacitación práctica del personal operativo.

A continuación, se presenta una síntesis comparativa de estos antecedentes que han guiado conceptualmente el desarrollo del estudio:

Tabla 1 Síntesis comparativa de antecedentes investigativos sobre riesgo químico en PTAR

¿Quién lo realizó?	¿Cuándo?	¿Qué plantearon?	¿Para qué me sirvió?
Sánchez Baque y Román Ullauri (2022)	2022	Evaluaron la exposición a hipoclorito y otras sustancias en PTAR usando la NTP 386 y entrevistas. Se identificó subregistro de riesgo y debilidad en los controles.	Aportó una perspectiva internacional aplicable en contextos con limitaciones de medición. Refuerza el uso de herramientas cualitativas.

Sánchez Quevedo y Marín Camacho (2022)	2022	Analizó el conocimiento y percepción del riesgo químico en trabajadores de PTAR municipales en Colombia.	Mostró vacíos en el conocimiento del programa de riesgo químico. Relevante para el diagnóstico de formación en PTAR antioqueñas.
El Ahogado (Tlajomulco de Zúñiga, 2022)	2013	Identificó riesgos por el uso de químicos como ácido sulfúrico y fallas en el control.	Fundamentó la revisión normativa y operativa sobre salpicaduras y riesgo directo en PTAR.
la Universidad Católica de Colombia (Vásquez Alemán & Vargas Martínez, 2018)	2021	Analizó el impacto de lodos contaminados en trabajadores, enfocándose en residuos químicos y bioseguridad.	Visibilizó el riesgo oculto en el manejo de lodos y residuos peligrosos. Aporta al análisis por subprocesos.
Guasca, Cundinamarca. Córdoba Rojas (2007)	2020	Aplicaron COSHH Essentials para analizar riesgos y generar controles técnicos.	Validó la utilidad del modelo COSHH para esta investigación y sus controles específicos por tarea.
Informe Sectorial Acueducto y Alcantarillado (SSPD, 2023)	2022	Reportó bajo cumplimiento en parámetros de tratamiento en más del 55 % de las PTAR colombianas.	Contextualizó el estado del sector y permitió enfocar la necesidad de control de calidad y salud laboral.
Guía Técnica de PTAR - CIAT y MinVivienda (Prevor, 2022)	s.f.	Describió las fases estándar del tratamiento de aguas residuales.	Sirvió como referencia para identificar las etapas críticas de riesgo químico.
EMCALI (Córdoba Rojas, 2007)	2022	Analizó riesgos de salpicaduras y recomendó respuestas inmediatas.	Refuerza la necesidad de equipos de descontaminación y EPP especializado en PTAR.
	2020	Examinó efectos de aguas residuales en zonas rurales desde una perspectiva comunitaria.	Amplió el enfoque hacia impactos sociales y salud pública. Complementa la visión técnica.

INSST (España) – NTP 386 / 473 / COSHH	2001–	Proporcionaron	Fundamentaron el uso de
	2018	metodologías cualitativas herramientas prácticas para esta investigación. para valorar riesgo químico en ausencia de monitoreo directo.	

Fuente: *Elaboración propia con base en* (Bermudez Grisales & Carrillo Loaiza, 2019; Cordoba Rojas, 2007; Funza: Aprovechamiento de Lodos Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipio de Funza, Como Insumo de Cultivo y Mejoramiento Del Suelo, 2018; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Martelo Payares et al., 2023; Ministerio de Salud y Protección Social, 2024; Prevor, 2022; Sánchez Baque & Román Ullauri, 2020; Sánchez Quevedo & Marín Camacho, 2022; Servicios Ambientales Profesionales (SAP), 2022).

Tabla 2 Cuadro comparativo de antecedentes internacionales y nacionales sobre riesgos químicos en PTAR

<i>País / Fuente</i>	<i>Año</i>	<i>Evento</i>	<i>Causa Principal</i>	<i>Implicaciones para la investigación</i>
<i>España / INSST (2023)</i>	2023	Fallecimiento de dos trabajadores por intoxicación en un pozo de PTAR durante obras de limpieza	Presencia de gases peligrosos acumulados en espacio confinado	Refuerza la necesidad de monitoreo atmosférico y protocolos de entrada a espacios confinados.
<i>Reino Unido / Chemistry World (2020)</i>	2020	Explosión en una planta de tratamiento de aguas residuales con cuatro fallecidos	Acumulación de biogás (metano) y fallas en control de atmósferas explosivas	Evidencia la importancia de ventilación y control de gases inflamables en procesos de tratamiento.
<i>China / Xinhua (2020)</i>	2020	Explosión en planta de aguas residuales en Beijing con	Falla técnica en sistema de ventilación y	Subraya la necesidad de mantenimiento preventivo y

		múltiples heridos	tratamiento de gases	evaluación técnica periódica.
Corea del Sur / Yonhap News (2024)	2024	Tres muertos por fuga de gas tóxico en planta de aguas residuales	Falta de sensores de detección y respuesta tardía	Refuerza el uso obligatorio de sensores fijos de detección de gases peligrosos.
Estados Unidos / Telemundo El Paso (2024)	2024	Trabajador fallece en planta de aguas residuales por exposición química	Manipulación inadecuada de químicos y ausencia de equipo de protección personal	Ilustra la necesidad de formación, protocolos y supervisión del uso de EPP.
Colombia / CCS (2023)	2023	Intoxicación fatal durante labores en sistema de depuración	Ausencia de evaluación de riesgo y entrada insegura al sistema	Confirma la urgencia de aplicar análisis de riesgo previo y capacitación específica.

Fuente: *Elaboración propia con base en* (Agencia de Noticias YONHAP, 2024; Chemistry World & Phillip Broadwith, 2020; Consejo Colombiano de Seguridad (CSS), 2025; El Paso, 2024; Situaciones De Trabajo Peligrosas, 2024; Xinhua, 2020)

En conclusión, los antecedentes revisados, tanto normativos como investigativos y empíricos, revelan un patrón persistente de vulnerabilidad en la gestión del riesgo químico en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), especialmente en lo relativo a la exposición a sustancias altamente peligrosas como cloro gaseoso, ácido sulfúrico e hipoclorito de sodio. La evidencia nacional e internacional respalda la necesidad urgente de fortalecer los controles de ingeniería, adoptar metodologías de evaluación accesibles como la GTC 45 y el modelo COSHH Essentials, y armonizar la gestión preventiva con marcos regulatorios como la Resolución 1890 de 2025 y el SGA. Estos hallazgos permiten no solo validar la pertinencia de esta investigación, sino también posicionarla como una

contribución aplicable al diseño de estrategias de intervención técnica, orientadas a proteger la vida, la salud y el entorno laboral de quienes operan en estas instalaciones críticas para el saneamiento ambiental.

Bases teóricas o fundamentos conceptuales

La comprensión del riesgo químico en el ámbito laboral se sustenta en los principios de la higiene industrial como disciplina científica que estudia, anticipa, reconoce, evalúa y controla los factores ambientales que puedan afectar la salud de los trabajadores. Autores como Kang (Kang, 2019) plantea que destacan que los procesos industriales modernos, como el tratamiento de aguas residuales, involucran exposición a múltiples agentes químicos volátiles, corrosivos y tóxicos, cuya combinación puede tener efectos sinérgicos o crónicos aún no del todo estudiados. Esta visión plantea la necesidad de avanzar de una gestión reactiva a una preventiva, mediante controles de ingeniería efectivos y evaluación sistemática del entorno laboral.

Desde un enfoque de gestión integral de la seguridad y salud en el trabajo (SST), (Schulte & Chun, 2009) proponen un modelo basado en el ciclo continuo de mejora (Planear-Hacer-Verificar-Actuar, PHVA), donde el riesgo químico no solo se controla con el uso de EPP, sino que debe integrarse a la cultura organizacional, a la planificación operativa y a los sistemas de alerta temprana. Estos modelos también consideran la importancia de la participación activa de los trabajadores, lo cual se relaciona con el principio de corresponsabilidad que promueve la OIT (Organización Internacional del Trabajo (OIT), 2011) en sus directrices sobre entornos laborales saludables.

Asimismo, la evidencia empírica señala que el enfoque tradicional centrado únicamente en la identificación de peligros debe complementarse con una gestión de riesgos basada en el conocimiento contextual, la vigilancia epidemiológica y la percepción del riesgo. Según (Yepes Benavides, 2013), la subestimación del riesgo químico por parte de empleadores y trabajadores es una de las causas más frecuentes de fallos en la prevención, especialmente en sectores públicos o con bajos niveles de inversión en infraestructura. Esto es relevante en el caso de las PTAR, donde muchas veces no se cuenta con monitoreo ambiental permanente ni protocolos específicos para el manejo de sustancias peligrosas y las emergencias y accidentes que están pueden causar.

Desde mi experiencia en campo, he notado que muchos operarios subestiman los riesgos químicos por la rutina de las actividades, lo que refuerza la necesidad de reforzar los controles de ingeniería y la formación continua.

Tabla 3 Definiciones conceptuales clave sobre riesgo químico y seguridad y salud en el trabajo

Concepto	Definición	Fuente
Sistema Globalmente Armonizado (SGA)	Normativa internacional adoptada por Colombia para la clasificación y comunicación de peligros de sustancias químicas, mediante etiquetado, pictogramas, frases H y Fichas de Datos de Seguridad.	Decreto 1496 de 2018; Resolución 0773 de 2021
Peligros de las sustancias químicas según el SGA	Riesgos asociados a efectos físicos (inflamabilidad, explosividad), para la salud (toxicidad aguda, cáncer, corrosión) y para el ambiente (toxicidad acuática), según clasificaciones armonizadas.	INSST, 2020; Prevor, 2022
Comunicación de peligros – SGA	Estrategia estandarizada para informar a los trabajadores sobre los riesgos de sustancias químicas, usando etiquetas, FDS y capacitación continua.	OSHA, 2022; Decreto 1496 de 2018
Etiquetado de sustancias químicas	Parte del SGA que exige incluir en los recipientes pictogramas, palabras de advertencia, frases H (riesgo) y frases P (precaución) para una comunicación efectiva del peligro.	Resolución 0773 de 2021
Fichas de Datos de Seguridad (FDS)	Documentos técnicos que contienen información detallada sobre los peligros, medidas de manejo seguro, almacenamiento, control de exposición y primeros auxilios de una sustancia.	INSST, 2020; Decreto 1496 de 2018
Identificación de peligros para la salud	Proceso de detección de agentes químicos que pueden causar daño a corto o largo plazo mediante inhalación, ingestión o contacto dérmico, considerando la toxicología de cada sustancia.	GTC 45, ICONTEC 2012
Priorización de sustancias químicas – metodologías cualitativas	Técnicas como la matriz de riesgo o el método de bandas de riesgo (COSHH Essentials) que permiten jerarquizar sustancias según peligrosidad, frecuencia de uso y cantidad manipulada.	INSST, 2015; HSE, 2020

Límites de exposición ocupacional	Concentraciones máximas permitidas de una sustancia química en el aire del lugar de trabajo, definidas por organismos como ACGIH, NIOSH o INSST.	ACGIH, 2023; INSST, 2020
Métodos cualitativos para evaluación de riesgo químico	Herramientas no instrumentales como la NTP 386 o el modelo COSHH Essentials que permiten estimar el nivel de riesgo en ausencia de mediciones ambientales.	INSST, 2001; HSE, 2020
Higiene industrial	Disciplina preventiva que evalúa y controla los riesgos físicos, químicos y biológicos en los entornos laborales, con énfasis en la protección de la salud del trabajador.	INSST, 2020; NIOSH, 2016
Vigilancia de la salud ocupacional	Estrategia preventiva que implica la evaluación médica periódica de los trabajadores expuestos, para detectar efectos adversos tempranos por exposición a agentes peligrosos.	Decreto 1072 de 2015; INSST, 2015
Marcadores biológicos de exposición	Indicadores medibles en sangre, orina u otros fluidos que permiten evaluar si un trabajador ha absorbido una sustancia química peligrosa.	INSST, 2020; WHO, 2017
Prevención y preparación ante emergencias químicas	Conjunto de medidas que incluyen capacitación, señalización, simulacros, equipos de contención y duchas de emergencia para actuar rápidamente ante incidentes con productos químicos.	Decreto 1072 de 2015; Guía Técnica PTAR, 2022; Prevor, 2022

Nota. Adaptado de (Consejo Colombiano de Seguridad, 2012; Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH), 2002; Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo, 2015; Decreto 1496 de 2018, 2018; Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA), 2021; ICONTEC, 2010; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2016; Londoño Vélez, 2023; Osha, 2024; Prevor, 2022; Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021).

Tabla 4 Términos técnicos clave relacionados con las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Término	Definición	Fuente
PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales)	Instalación destinada a remover contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua residual antes de su vertimiento al medio ambiente o reutilización.	Guía Técnica PTAR, MinVivienda (2022)
Tratamiento primario	Etapas iniciales del proceso donde se remueven sólidos grandes y arenas mediante cribado y sedimentación.	Guía PTAR, 2022
Tratamiento secundario	Fase biológica que degrada la materia orgánica disuelta mediante microorganismos en sistemas como lodos activados o reactores UASB.	Guía PTAR, 2022
Tratamiento terciario	Etapas avanzadas de depuración que mejoran la calidad del efluente mediante filtración, desinfección y eliminación de nutrientes.	INSST, 2020; Contyquim, 2025
Lodos residuales	Material semisólido generado en el tratamiento que requiere procesos de espesamiento, deshidratación y estabilización.	Guía PTAR, 2022
Vertimiento	Descarga final del agua tratada al medio ambiente (ríos, quebradas) cumpliendo parámetros normativos de calidad.	Decreto 3930 de 2010
Afluente	Agua residual cruda que ingresa a la planta para ser tratada.	Guía PTAR, 2022
Efluente	Agua ya tratada que sale de la planta y es vertida o reutilizada.	Guía PTAR, 2022
Coagulación–floculación	Proceso fisicoquímico que aglutina partículas suspendidas usando sustancias como cloruro férrico.	Contyquim, 2024
Desinfección	Etapas finales del tratamiento donde se eliminan microorganismos patógenos con productos como cloro o hipoclorito.	Prevor, 2022
Reactor biológico (UASB)	Unidad anaerobia usada en PTAR para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica.	Guía PTAR, 2022

Carga orgánica	Cantidad de materia orgánica biodegradable contenida en el agua residual, expresada generalmente como DBO5.	Guía PTAR, 2022
DBO5 (Demanda Biológica de Oxígeno)	Indicador de la cantidad de oxígeno requerido por microorganismos para descomponer materia orgánica en 5 días.	Guía PTAR, 2022

Nota. Adaptado (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Londoño Vélez, 2023; Ministerio de Ambiente, 2010; Ministerio de Salud y Protección Social, 2024; Pillado, 2025; Prevor, 2022)

Organización del sector o la actividad económica

El tratamiento de aguas residuales en Colombia forma parte del sector de saneamiento básico, clasificado bajo el código CIU Rev. 4 E 3700, correspondiente a las actividades de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales. Esta labor resulta fundamental para la sostenibilidad ambiental y la salud pública, ya que previene la contaminación de cuerpos hídricos y reduce la incidencia de enfermedades asociadas.

En Colombia, la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales ha tenido un crecimiento progresivo, con más de 700 PTAR en funcionamiento distribuidas por los 32 departamentos, aunque la eficiencia operativa —reflejada en estándares como la remoción de DBO5— aún no cumple los requisitos esperados (DANE, 2022). En Antioquia funciona un número significativo de PTAR, pero persisten debilidades en la gestión de riesgos y en el cumplimiento de parámetros normativos (Acuatécnica, 2024; DANE, 2022).

Este sector involucra tanto a entidades públicas como privadas, responsables del diseño, operación y mantenimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), cuyas características varían considerablemente: desde sistemas rurales de tratamiento primario hasta complejos urbanos con procesos fisicoquímicos y biológicos avanzados (Londoño Vélez, 2023; Ministerio de Salud y Protección Social, 2024).

En términos de estructura, muchas PTAR operan bajo modelos descentralizados y enfrentan limitaciones en infraestructura, monitoreo de contaminantes y formación técnica. Estas carencias son más marcadas en municipios de categorías 4 a 6, donde el personal carece de entrenamiento específico y de protocolos estandarizados para la gestión del riesgo químico (Prevor, 2022). La exposición a sustancias

como cloro gaseoso, hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno y coagulantes metálicos comúnmente utilizadas en procesos de desinfección, ajuste de pH y tratamiento de lodos, implica riesgos severos si no se aplican controles efectivos (Pillado, 2025).

Adicionalmente, según la Guía para el diseño y operación de PTAR del Ministerio de Vivienda (Ministerio de Vivienda, 2015), una parte de estas instalaciones trabaja sin planes actualizados de operación, mantenimiento ni gestión de emergencias. Esto incrementa el riesgo de incidentes derivados de fallos en la dosificación automatizada, fugas o manipulación inadecuada de sustancias peligrosas. Estudios realizados en Colombia han señalado que muchas PTAR operan por debajo de su capacidad instalada, debido a problemas recurrentes en el diseño hidráulico, falta de mantenimiento, y subutilización de tecnologías de tratamiento (Londoño Vélez, 2023; Ministerio de Vivienda, 2015).

El marco regulatorio colombiano contempla tanto normativas ambientales como de salud y seguridad en el trabajo. En el ámbito ambiental, el Decreto 3930 de 2010 y la Resolución 0631 de 2015 establecen los parámetros técnicos para el vertimiento de aguas residuales. En el plano laboral, normas como la Ley 9 de 1979, el Decreto 1072 de 2015 y la implementación del Sistema Globalmente Armonizado (SGA) mediante el Decreto 1496 de 2018, la Resolución 0773 de 2021 y Resolución 1890 de 2025, exigen condiciones seguras en el uso de sustancias químicas dentro del entorno de trabajo (Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo, 2015; Decreto 1496 de 2018, 2018; Ley 0009 de 1979, 1979; Resolución 631 de 2015, 2015; Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA), 2021; Ministerio de Ambiente, 2010; Ministerio de Trabajo, 2025).

No obstante, a pesar de su solidez técnica, la aplicación de estas normativas enfrenta barreras operativas. Muchas PTAR, especialmente de menor escala, no incluyen en sus Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) una evaluación específica del riesgo químico ni protocolos jerarquizados de intervención. Por esta razón, se requiere la adopción de herramientas como la GTC 45 (Consejo Colombiano de Seguridad, 2012) que permiten identificar peligros, clasificar niveles de riesgo y orientar decisiones sobre controles de ingeniería, sistemas de ventilación, automatización y capacitación continua.

Procesos productivos y actividades asociadas al sector

El tratamiento de aguas residuales en las (PTAR) involucra una secuencia de operaciones físicas, químicas y biológicas orientadas a remover contaminantes y garantizar la calidad del efluente. Estas actividades no solo cumplen una función ambiental clave, sino que también implican una serie de riesgos

laborales, particularmente asociados a la manipulación de sustancias químicas peligrosas, no siendo el único grupo de peligro presente, pero sí en el que se enfoca la presente investigación.

Ilustración 2 Proceso general del tratamiento de aguas residuales en una PTAR (Prevor, 2022).



Nota: Esquema general del tratamiento de aguas residuales en una PTAR.

Fuente: (Prevor, 2022).

El proceso operativo comienza con el **pretratamiento**, donde se retiran sólidos gruesos y materiales flotantes mediante cribado y desarenado. Aunque esta etapa es principalmente mecánica, puede liberar partículas en suspensión y microorganismos que afectan la salud respiratoria del trabajador. Luego, en el **tratamiento primario**, se sedimentan sólidos en suspensión y se introducen coagulantes como el cloruro férrico o sulfato de aluminio, que ayudan a aglomerar partículas finas. La manipulación de estos compuestos puede causar irritaciones dérmicas y oculares, así como exposición a vapores corrosivos si no se realiza en condiciones adecuadas (Pillado, 2025).

El **tratamiento secundario** está basado en procesos biológicos, como los lodos activados o reactores anaerobios, que degradan la materia orgánica disuelta. Esta fase puede generar gases como metano, amoníaco o sulfuro de hidrógeno (H_2S), con riesgos de asfixia o explosión en ambientes mal ventilados (Prevor, 2022).

En el tratamiento terciario, se realiza la desinfección, el ajuste de pH y la remoción de nutrientes. Aquí se aplican productos como el hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno y cloro gaseoso, todos ellos clasificados como sustancias químicas peligrosas por su toxicidad, corrosividad y potencial inflamable. La incorrecta dosificación o almacenamiento de estos productos puede provocar quemaduras, inhalación de gases tóxicos o reacciones peligrosas, especialmente cuando se mezclan inadvertidamente (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Pillado, 2025).

Por último, el **manejo de lodos** residuales involucra procesos de espesamiento, deshidratación y disposición. En esta etapa también se utilizan aditivos químicos como floculantes y acondicionadores, los cuales generan riesgo de contacto accidental y exposición prolongada si no se dispone de controles técnicos adecuados.

Se utilizan equipos críticos como cribas automáticas, dosificadores de reactivos, sistemas de aireación, cabinas cerradas de tratamiento, bombas centrífugas, sensores de gases tóxicos y reactores UASB, cuya operación segura debe incluir sistemas de contención, ventilación forzada y automatización de procesos (Londoño Vélez, 2023).

Estas observaciones se corroboraron durante las visitas de campo realizadas en el marco de esta investigación, donde se identificaron deficiencias en el uso de EPP y en la automatización de procesos de descargue de sustancias químicas. En varios municipios y PTAR, se evidenció que los trabajadores realizan manipulación directa de reactivos, dosificación a chorro, diluciones y preparaciones manuales en bidones, así como carencias en los sistemas de ventilación durante el manejo de productos peligrosos, lo que incrementa los riesgos de exposición.

Ilustración 3 Etapas del tratamiento de aguas residuales en una PTAR y sus principales actividades operativas



Nota. La imagen ilustra cada fase del proceso, desde el pretratamiento hasta el vertido o reutilización, incluyendo actividades de desinfección y tratamiento de lodos. Elaboración propia con base en (Pillado, 2025; Prevor, 2022).

Factores de riesgos laborales

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) concentran una diversidad de factores de riesgo laboral que deben ser clasificados y priorizados para garantizar la seguridad de los trabajadores. Según los lineamientos de la Guía Técnica Colombiana GTC 45 (ICONTEC, 2010) los factores de riesgo se agrupan en categorías como físicos, químicos, biológicos, biomecánicos, condiciones de seguridad (locativos, eléctricos, energías peligrosas, trabajo en alturas, espacios confinados, riesgo vial, entre otros) psicosociales y fenómenos naturales. Esta clasificación es reforzada por entidades como el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020) y la NIOSH, que destacan la importancia de la evaluación contextualizada por área de trabajo, frecuencia de exposición, consecuencias potenciales y controles existentes (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2016).

A partir del análisis de cada etapa operativa en una PTAR, se identificaron riesgos relevantes que afectan la salud en el trabajo, como la exposición a gases tóxicos (H_2S , Cl_2), sustancias corrosivas (ácidos, peróxidos), agentes biológicos (bacterias anaeróbicas) y condiciones de trabajo como ruido elevado, suelos encharcados o sistemas eléctricos deficientes. Estas condiciones requieren estrategias jerarquizadas de control, incluyendo desde la eliminación y sustitución hasta el uso de EPP especializado y automatización de procesos.

De acuerdo con el análisis realizado por el autor, estas condiciones se presentan de forma recurrente en las PTAR, lo que justifica la necesidad de establecer controles jerarquizados y específicos según cada área de trabajo.

La siguiente tabla resume los riesgos químicos identificados por área y jerarquizados por nivel de riesgo:

Tabla 5 Matriz de Factores de Riesgos químicos según GTC 45, INSST y NIOSH

<i>Proceso / Área</i>	<i>Agente Químico</i>	<i>Grupo de Peligro (GTC 45)</i>	<i>Descripción del Peligro</i>	<i>Efectos sobre la salud</i>	<i>Nivel de Riesgo</i>
Ajuste de pH	Ácido sulfúrico	Químico	Corrosivo, vapores irritantes	Quemaduras, irritación respiratoria y ocular	Importante

Desinfección	Cloro gaseoso	Químico	Tóxico por inhalación, comburente	Asfixia, irritación severa, edema pulmonar	Intolerable
Tratamiento biológico	Metanol	Químico	Neurotóxico, inflamable	Cefalea, mareos, riesgo de ceguera	Importante
Coagulación - floculación	Cloruro férrico	Químico	Corrosivo, irritante dérmico	Irritación dérmica y ocular	Importante
Limpieza y desinfección	Peróxido de hidrógeno	Químico	Oxidante, corrosivo	Quemaduras químicas, irritación respiratoria	Moderado
Laboratorio	Ácido nítrico	Químico	Corrosivo, oxidante	Lesiones respiratorias, dérmicas y oculares	Importante
Tratamiento terciario	Hipoclorito de sodio	Químico	Corrosivo, libera cloro	Irritación dérmica, ocular y respiratoria	Importante

Nota: Esta clasificación permite diseñar controles jerarquizados que garanticen la efectividad del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), conforme a las normativas del Decreto 1072 de 2015, Resolución 0312 de 2019, GTC 45 (ICONTEC, 2012) y guías técnicas internacionales como INSST (2021) y NIOSH.

Efectos a corto y largo plazo por la exposición

En las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), los trabajadores están expuestos de forma rutinaria a una variedad de agentes químicos, biológicos, condiciones de seguridad, físicos y ergonómicos que pueden producir efectos adversos tanto inmediatos como crónicos sobre la salud. Estas exposiciones, muchas veces infravaloradas, impactan la capacidad funcional, el bienestar psicológico y la seguridad a largo plazo de los operarios, requiriendo medidas integrales de vigilancia, evaluación y control.

En el ámbito químico, sustancias como el cloro gaseoso, el ácido sulfúrico y el sulfuro de hidrógeno (H₂S) representan peligros agudos y crónicos. Estudios del *National Institute for Occupational Safety and Health* (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2019) han documentado casos de muerte súbita por inhalación de H₂S en espacios confinados, mientras que la exposición prolongada al cloro puede provocar fibrosis pulmonar y enfermedad respiratoria obstructiva crónica (Ishii et al., 2022) Asimismo, la exposición dérmica o respiratoria al ácido sulfúrico se asocia con dermatitis crónica, daño ocular permanente y, en casos extremos, lesiones pulmonares irreversibles (Environmental Protection Agency, 2025).

Desde el enfoque psicosocial, las condiciones de turnos rotativos, aislamiento operativo y presión por cargas de trabajo también generan consecuencias tangibles. NIOSH 2024 ha identificado que la rotación nocturna se relaciona con insomnio, alteraciones del estado de ánimo y mayor riesgo de trastornos de ansiedad o depresión. Estos efectos, aunque menos visibles que los físicos, impactan la estabilidad emocional y familiar de los trabajadores del sector (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2024).

En cuanto a riesgos físicos, se destacan la exposición a ruido continuo superior a 85 dB y las temperaturas elevadas en zonas técnicas, que pueden producir desde hipoacusia neurosensorial (Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021) hasta fatiga térmica o golpes de calor. En paralelo, la exposición a metanol o solventes volátiles utilizados en laboratorios puede ocasionar visión borrosa, daño cerebral o incluso ceguera en caso de inhalación prolongada (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2016).

A nivel ergonómico, la manipulación de cargas pesadas sin herramientas mecánicas adecuadas o el trabajo prolongado en posturas forzadas derivan en trastornos musculoesqueléticos como lumbalgias, tendinitis y hernias discales (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020).

La siguiente tabla sintetiza estos hallazgos, categorizando los efectos según el agente de riesgo:

Tabla 6 Efectos a Corto y Largo Plazo por Agente de Riesgo

Agente Químico	Vía de Exposición	Órganos Afectados	Efectos a Corto Plazo	Efectos a Largo Plazo	Riesgo según SGA	Pictograma a SGA (Letra)
Cloro gaseoso	Inhalación, ocular	Vías respiratorias, ojos	Irritación ocular y respiratoria	Bronquitis crónica, fibrosis pulmonar	Toxicidad aguda, corrosivo para vías respiratorias	GHS05, GHS06
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	Inhalación	Sistema nervioso, pulmones	Mareos, pérdida de conciencia	Daño neurológico, edema pulmonar	Gas inflamable, toxicidad aguda	GHS02, GHS06
Ácido sulfúrico	Contacto, inhalación	Piel, ojos, vías respiratorias	Quemaduras químicas, irritación	Dermatitis crónica, daño ocular	Corrosivo, toxicidad aguda	GHS05

Metanol	Inhalación, dérmico	Sistema nervioso, ojos	Dolor de cabeza, visión borrosa	Ceguera, daño cerebral	Tóxico, inflamable, toxicidad por órganos	GHS02, GHS06, GHS08
Aerosoles contaminados	Inhalación, ocular	Vías respiratorias, ojos	Irritación ocular, conjuntivitis	Infecciones respiratorias recurrentes	Riesgo biológico químico indirecto	(No aplica pictograma SGA)
Ozono	Inhalación	Pulmones	Tos seca, dolor torácico	Disminución de función pulmonar	Tóxico agudo, oxidante	GHS03, GHS06
Hipoclorito de sodio	Contacto, inhalación	Piel, ojos, vías respiratorias	Irritación dérmica y ocular	Dermatitis de contacto	Corrosivo, tóxico por inhalación	GHS05, GHS07

Fuente: Elaboración propia con base en el SGA y (David C, 2024; El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), 2014; Environmental Protection Agency, 2025; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2019, 2024; Ishii et al., 2022; Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021)

Biomarcadores y Marcadores Biológicos de Exposición en PTAR

En ambientes laborales como las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), los biomarcadores de exposición y efecto se han convertido en herramientas para la evaluación del impacto de agentes químicos, físicos y psicosociales sobre la salud de los trabajadores. Estos marcadores permiten identificar alteraciones fisiológicas antes de la aparición de síntomas clínicos, facilitando acciones preventivas y decisiones en vigilancia epidemiológica.

Por ejemplo, el tiosulfato urinario es un biomarcador ampliamente validado para la detección de exposición al sulfuro de hidrógeno (H₂S), especialmente en tareas realizadas en espacios confinados, donde este gas puede acumularse y provocar efectos neurotóxicos o respiratorios graves (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2019). Para la exposición al metanol, se ha utilizado el ácido fórmico en sangre u orina como marcador de toxicidad metabólica, siendo útil en casos de exposición por inhalación en laboratorios o zonas mal ventiladas (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2014).

En condiciones de estrés oxidativo ambiental, como aquellas causadas por ozono o compuestos clorados, se ha identificado al malondialdehído (MDA) como un marcador de daño oxidativo celular, presente en trabajadores de áreas expuestas a gases oxidantes o cloro gaseoso (Environmental Protection

Agency, 2025). Por otro lado, biomarcadores neuroendocrinos como el cortisol salival y la melatonina urinaria se aplican para monitorear el impacto del trabajo en turnos rotativos o nocturnos sobre el ritmo circadiano y la respuesta al estrés crónico (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2024; Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021).

Además, marcadores musculares como la creatina quinasa (CK) sérica pueden indicar fatiga o lesión musculoesquelética, especialmente en trabajadores que realizan tareas manuales intensivas o manipulación de cargas sin soporte ergonómico (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020).

Este enfoque resulta especialmente pertinente en las PTAR, donde la manipulación de sustancias como ácido sulfúrico, hipoclorito de sodio, peróxidos y metales pesados demanda una vigilancia médica basada en indicadores biológicos, en concordancia con el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) y las recomendaciones internacionales.

Tabla 7 Biomarcadores y Marcadores Biológicos utilizados en Exposición Ocupacional en PTAR

Agente o Condición	Biomarcador / Marcador Biológico	Significado Clínico / Toxicodinámico	Aplicación en Campo
Cloro gaseoso	Cloraminas urinarias / leucocitosis nasal	Irritación química en mucosas	Evaluación post-exposición respiratoria
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	Tiosulfato urinario	Exposición aguda y subcrónica	Monitoreo tras tareas en pozos o reactores anaerobios
Metanol	Ácido fórmico en orina y sangre	Toxicidad metabólica (acidosis)	Evaluación en laboratorios o exposición prolongada
Ácido sulfúrico	pH urinario / proteinuria	Irritación sistémica o renal leve	Vigilancia en operarios de ajuste de pH
Ozono / cloro	Malondialdehído (MDA) en plasma	Estrés oxidativo crónico	Medición en áreas de contacto con oxidantes

Nota. Elaboración propia con base (El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), 2014; Environmental Protection Agency, 2025; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2020; Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2019; Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE), 2021)).

Sustancias químicas peligrosas identificadas en PTAR

Se presenta una tabla detallada de las sustancias químicas peligrosas más utilizadas en diferentes procesos de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). La identificación incluyó el estado físico, clasificación de peligrosidad según las fichas de datos de seguridad (FDS), cantidades aproximadas empleadas y las áreas específicas de uso. Esta información fue clave para el desarrollo de las matrices de evaluación de riesgo y permitió orientar las estrategias de control técnico en las zonas de mayor criticidad.

Tabla 8 Sustancias químicas peligrosas identificadas en procesos operativos de la PTAR

Sustancia Química	Estado Físico	Clasificación Peligrosidad	Cantidad Estimada	Área de Uso
Cloro gaseoso	Gas	Tóxico por inhalación, comburente	1-10 kg	Área de desinfección
Dióxido de cloro	Gas	Irritante respiratorio, oxidante	1-5 kg	Área de cloración secundaria
Ácido sulfúrico	Líquido	Corrosivo, reactivo con agua	50-100 L	Tanque de ajuste de pH
Ácido nítrico	Líquido	Oxidante, tóxico, corrosivo	10-20 L	Unidad de laboratorio
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	Gas	Inflamable, neurotóxico	Emisión gaseosa	Pozos y digestores
Metanol	Líquido	Neurotóxico, inflamable	20-40 L	Reactor biológico
Cloruro férrico	Líquido	Corrosivo, irritante dérmico	200-400 L	Dosificación de coagulante
Peróxido de hidrógeno	Líquido	Oxidante, causa quemaduras	10-25 L	Zona de limpieza
Soda cáustica	Sólido / Solución	Corrosivo, reacciona con ácidos	100-150 L	Ajuste de alcalinidad

Fuente: Elaboración propia con base en análisis documental y Fichas de Datos de Seguridad (FDS) de sustancias utilizadas en PTAR (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2012, 2018c, 2020; Ministerio de Empleo y Seguridad Social & Centro Nacional de Medios de Protección, 2012; Prevor, 2022; Sousa Rodríguez & Tejedor Traspaderne, 2018).

Estrategias de valoración e intervención

Proteger la salud de los trabajadores en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) exige implementar estrategias que reduzcan la exposición a sustancias químicas desde la fuente, garantizando ambientes laborales seguros y la continuidad operativa.

Estas estrategias deben seguir la jerarquía de controles, conforme al *Decreto 1072 de 2015* y lineamientos internacionales como los del *INSST (2020)*. Esta jerarquía prioriza, en orden descendente de eficacia, las acciones de eliminación, sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos y, finalmente, el uso de elementos de protección personal (EPP).

En el contexto de las PTAR, se identificaron oportunidades prácticas de intervención. Por ejemplo, la sustitución del cloro gaseoso por hipoclorito sódico líquido se ha aplicado con éxito en países como Alemania y Canadá, reduciendo el riesgo de inhalación accidental (OSHA, 2024; INSST, 2020). Para el sulfuro de hidrógeno (H_2S), la instalación de sistemas automáticos de detección de gases y ventilación forzada en espacios confinados en plantas urbanas de Madrid ha permitido mantener niveles por debajo de los valores límite permisibles de exposición ocupacional (EPA, 2020). Además, controles administrativos como la rotación de turnos y capacitaciones periódicas han demostrado ser eficaces en la gestión de riesgos asociados a la fatiga, ruido y la manipulación de sustancias irritantes.

El uso de EPP debe entenderse como la última barrera de protección y no como la estrategia principal. Su efectividad depende de la capacitación continua, el mantenimiento adecuado y la cultura de uso en los trabajadores. En este estudio, se identificó que el uso de guantes de nitrilo, gafas de protección y respiradores con filtros tipo B fue esencial en áreas con exposición a ácido sulfúrico y metanol, aunque sin controles de ingeniería adecuados, los EPP por sí solos no son suficientes (NIOSH, 2022; WHO, 2021).

La evidencia de campo confirma que la combinación de estas estrategias según el tipo de riesgo y área operativa permite priorizar los recursos de manera efectiva, fomentando la automatización y sustitución de procesos críticos y reduciendo la dependencia del EPP. Este enfoque integral, respaldado por la experiencia internacional, es clave para reducir enfermedades laborales, disminuir el ausentismo y prevenir fallas operativas en el sector de saneamiento.

La siguiente tabla resume la aplicación de estas estrategias de intervención en PTAR, clasificadas según la jerarquía de controles y acompañadas de ejemplos de buenas prácticas para orientar programas de gestión del riesgo químico:

Tabla 9 Aplicación Práctica de la Jerarquía de Controles en PTAR

<i>Nivel de control</i>	<i>Ejemplo aplicado</i>	<i>Justificación técnica</i>
Eliminación	Sustitución del cloro gaseoso por hipoclorito líquido	Elimina el riesgo de inhalación accidental (Contyquim, 2025)
Sustitución	Uso de leche de cal o CO ₂ en lugar de ácido sulfúrico	Reducción del riesgo corrosivo y exotérmico (Prevor, 2024)
Ingeniería	Cabinas con extracción, detectores de gas, Trivorex® en suelos	Minimiza la exposición mediante barreras físicas (EPA, 2020; Prevor, 2024)
Administrativo	Capacitación, protocolos SOP, duchas de emergencia	Disminuye errores humanos y promueve la seguridad organizacional (INSST, 2020)
EPP	Guantes resistentes, respiradores tipo B, caretas químicas	Actúa como última barrera ante la exposición directa (NIOSH, 2022)

Fuente: Elaboración propia con base en Contyquim (2025), Prevor (2024), EPA (2020), INSST (2020), NIOSH (2022).

De forma complementaria, la siguiente tabla presenta los niveles de riesgo, sus criterios de uso y las acciones recomendadas, para priorizar acciones de control según la severidad del riesgo en las PTAR:

Tabla 10 Relación entre niveles de riesgo y estrategias de intervención en PTAR

<i>Nivel de riesgo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Cuándo se utiliza</i>	<i>Estrategias de intervención sugeridas</i>
Intolerable	Representa un riesgo inaceptable para la salud o la vida. Puede generar daños irreversibles, enfermedades graves o muerte con exposición breve.	Cuando la sustancia es altamente tóxica o letal (cloro gaseoso, H ₂ S), sin controles adecuados y exposición frecuente.	Eliminación o sustitución obligatoria, sistemas de detección de gases y evacuación inmediata.
Muy alto	Alto potencial de daño severo, con efectos significativos sobre la salud y probabilidad alta de ocurrencia.	Cuando hay gases tóxicos, corrosivos o inflamables con controles que podrían fallar en tareas rutinarias.	Implementación urgente de controles de ingeniería y monitoreo continuo.
Alto	Riesgo importante que puede causar accidentes graves o	Cuando hay sustancias corrosivas o irritantes con	Controles de ingeniería y administrativos

	enfermedades ocupacionales si no se controla.	exposición moderada o alta, y controles básicos pueden fallar.	robustos, capacitación específica.
Importante	Puede causar lesiones leves o moderadas si no se gestiona bien, pero con baja probabilidad de efectos catastróficos.	Cuando la sustancia es oxidante o irritante, con exposición esporádica y efectos reversibles.	Uso de EPP, procedimientos seguros, capacitación en respuesta rápida.
Moderado	Riesgo aceptable con impacto leve o controlado, aunque requiere vigilancia continua.	Cuando la exposición es a agentes físicos con efectos a largo plazo o mala práctica, existiendo controles básicos.	EPP combinados con capacitación, supervisión y controles administrativos.
Bajo	No representa un riesgo significativo en condiciones normales de trabajo.	Para sustancias de baja peligrosidad bien controladas y sin exposición directa.	Monitoreo preventivo y revisión periódica de condiciones de seguridad.

Fuente. Elaboración propia con base en Contyquim (2025), Environmental Protection Agency (EPA, 2020), Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST, 2020), National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 2022), y Previor (2024).

Estas estrategias aportan a la protección de la salud y seguridad en el trabajo y fortalecen la sostenibilidad de las PTAR, en coherencia con los marcos normativos nacionales e internacionales. Lo observado en campo confirma que estas estrategias no solo son aplicables teóricamente, sino que resultan indispensables para la protección real de los trabajadores y la sostenibilidad operativa de las plantas.

Bases legales de la investigación

La evaluación y gestión del riesgo químico en trabajadores de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Colombia se sustenta en un conjunto normativo robusto que articula principios constitucionales, legislación nacional e instrumentos técnicos e internacionales. Este marco legal proporciona el soporte necesario para el diseño de intervenciones que protejan la salud de los trabajadores expuestos a sustancias químicas peligrosas y respalden la sostenibilidad ambiental del sistema.

Desde el nivel constitucional, el Artículo 49 de la Constitución Política de Colombia (1991) consagra el derecho fundamental a la salud y a un ambiente sano, imponiendo al Estado la responsabilidad de velar por la protección de los ciudadanos, especialmente en entornos laborales de alto riesgo. Este principio es desarrollado por la Ley 9 de 1979, también conocida como Código Sanitario Nacional, que establece medidas sanitarias para prevenir enfermedades profesionales, regular el uso de sustancias químicas y proteger la salud ocupacional en diversos sectores productivos (Artículo 49 de La Constitución Política de Colombia, 1991; Ley 0009 de 1979, 1979).

En el ámbito legal, la Ley 1523 de 2012 crea la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, exigiendo planes de prevención ante amenazas químicas y reforzando la necesidad de preparar a los sectores estratégicos como las PTAR ante emergencias tecnológicas o industriales (Congreso de la República de Colombia, 2012).

En el plano reglamentario, el Decreto 1072 de 2015 consolida el marco normativo en materia de trabajo y establece el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). Este sistema obliga a las organizaciones a identificar, valorar y controlar los factores de riesgo, incluyendo los químicos, y adoptar medidas correctivas y preventivas en sus procesos (Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo, 2015). Complementariamente, el Decreto 1496 de 2018 adoptó en Colombia el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) para la clasificación y comunicación de peligros químicos, el cual fue reglamentado mediante la Resolución 0773 de 2021, que establece la obligación de utilizar etiquetas, pictogramas, frases de riesgo (H) y de precaución (P), así como Fichas de Datos de Seguridad actualizadas (Decreto 1496 de 2018, 2018; Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA), 2021)

En cuanto a la normativa ambiental, el Decreto 3930 de 2010 regula el uso del recurso hídrico y los vertimientos de aguas residuales, mientras que la Resolución 0631 de 2015 fija los límites máximos permisibles para los vertimientos de aguas residuales tratadas, aspectos claves en la operación y control de calidad de las PTAR (Ministerio de Ambiente, 2010; Resolución 631 de 2015, 2015).

En materia de prevención de accidentes mayores con sustancias químicas peligrosas, la Resolución 1890 de 2025 representa un hito normativo reciente. Esta resolución exige a las empresas la identificación de escenarios de riesgo, la evaluación de consecuencias y la elaboración de dos instrumentos clave: el Estudio de Análisis de Riesgo (EAR) y el Plan de Prevención de Accidentes Mayores (PPAM). Su aplicación es obligatoria en sectores que manipulan sustancias como cloro gaseoso, ácido sulfúrico o peróxidos, cuyo mal manejo puede desencadenar fugas tóxicas, explosiones o reacciones violentas (Ministerio de Trabajo, 2025).

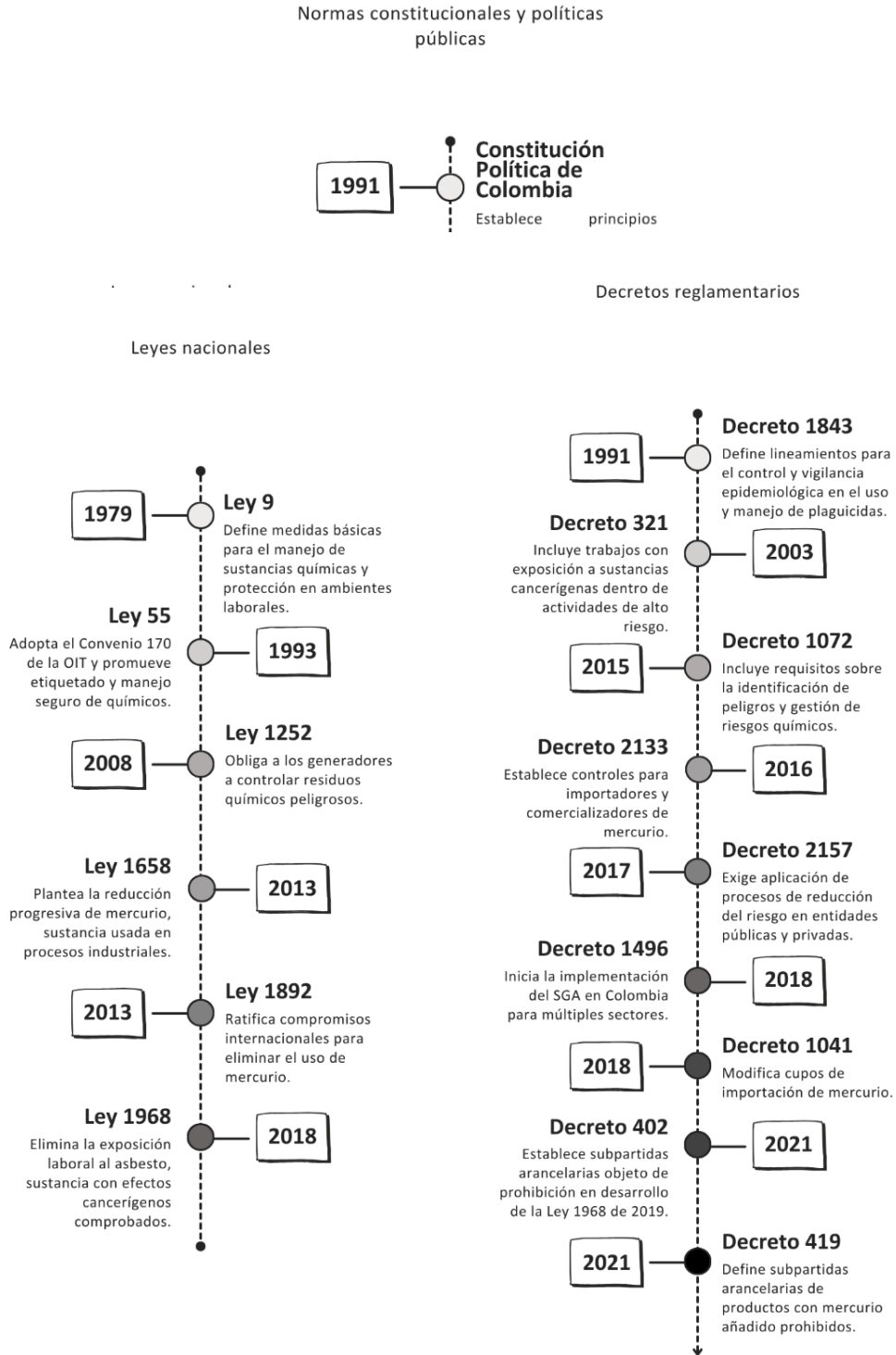
En cuanto a normativas específicas aplicables al contexto operativo de las PTAR, destacan dos reglamentaciones clave. La Resolución 0491 de 2020 regula el trabajo seguro en espacios confinados, comunes en cámaras subterráneas, digestores y tanques, estableciendo requisitos técnicos, procedimientos de ingreso, monitoreo atmosférico y protocolos de rescate. Por otro lado, la Resolución 4272 de 2021 establece las disposiciones vigentes para prevenir caídas durante labores realizadas sobre estructuras elevadas, como puentes de acceso, plataformas y techos (Resolución 491 de 2020, 2020; Resolución 4272 de 2021, 2021).

Finalmente, desde el enfoque técnico internacional, la norma ISO 45001:2018 proporciona directrices para implementar un sistema de gestión que fortalezca la cultura de prevención en SST. Asimismo, el modelo COSHH Essentials, desarrollado por el Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido, ha sido adaptado en las Notas Técnicas de Prevención (NTP 935–937) del INSST de España, y utilizado en Colombia como metodología cualitativa para estimar riesgos químicos en ausencia de mediciones ambientales (Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH), 2002; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2012, 2018c; Ministerio de Empleo y Seguridad Social & Centro Nacional de Medios de Protección, 2012; National Quality Assurance (NQA), 2018; Sousa Rodríguez & Tejedor Traspaderne, 2018)

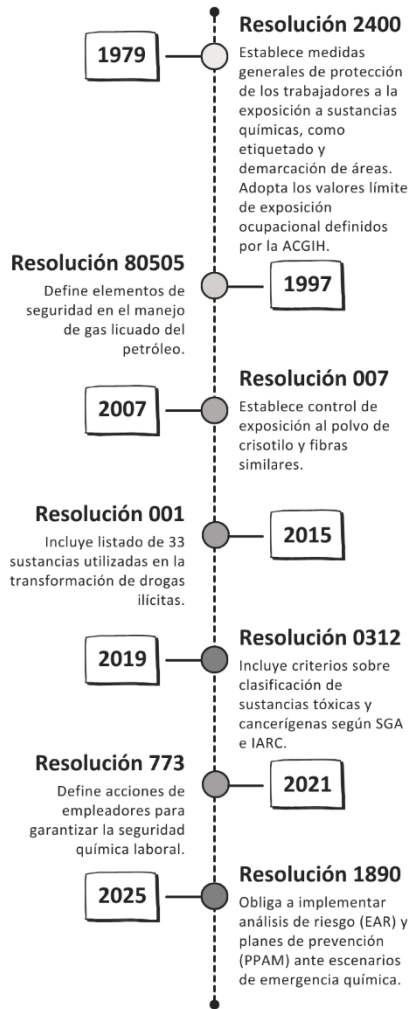
Este entramado legal no solo legitima las acciones del presente estudio, sino que refuerza su pertinencia en contextos donde la exposición a sustancias químicas es crítica. La integración armónica entre leyes, decretos, resoluciones y normas técnicas permite fortalecer los sistemas de vigilancia y control, fomentar la gestión preventiva y garantizar ambientes laborales más seguros en el sector del saneamiento básico.

A continuación, se presenta una línea del tiempo, que permite además de sintetizar los hitos normativos, evidenciar la necesidad de integrar la legislación vigente en las estrategias de prevención y control del riesgo químico en entornos de alto impacto como las PTAR.

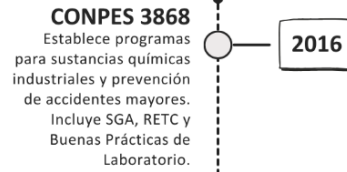
Ilustración 4 Línea del tiempo sobre la legislación aplicable en Seguridad y Salud en el Trabajo



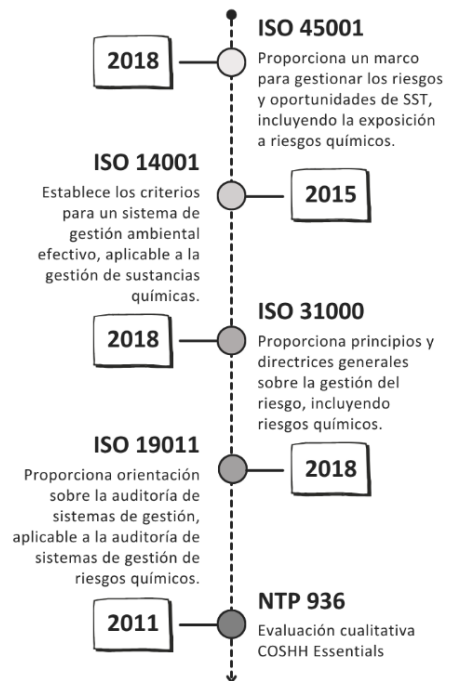
Resoluciones específicas

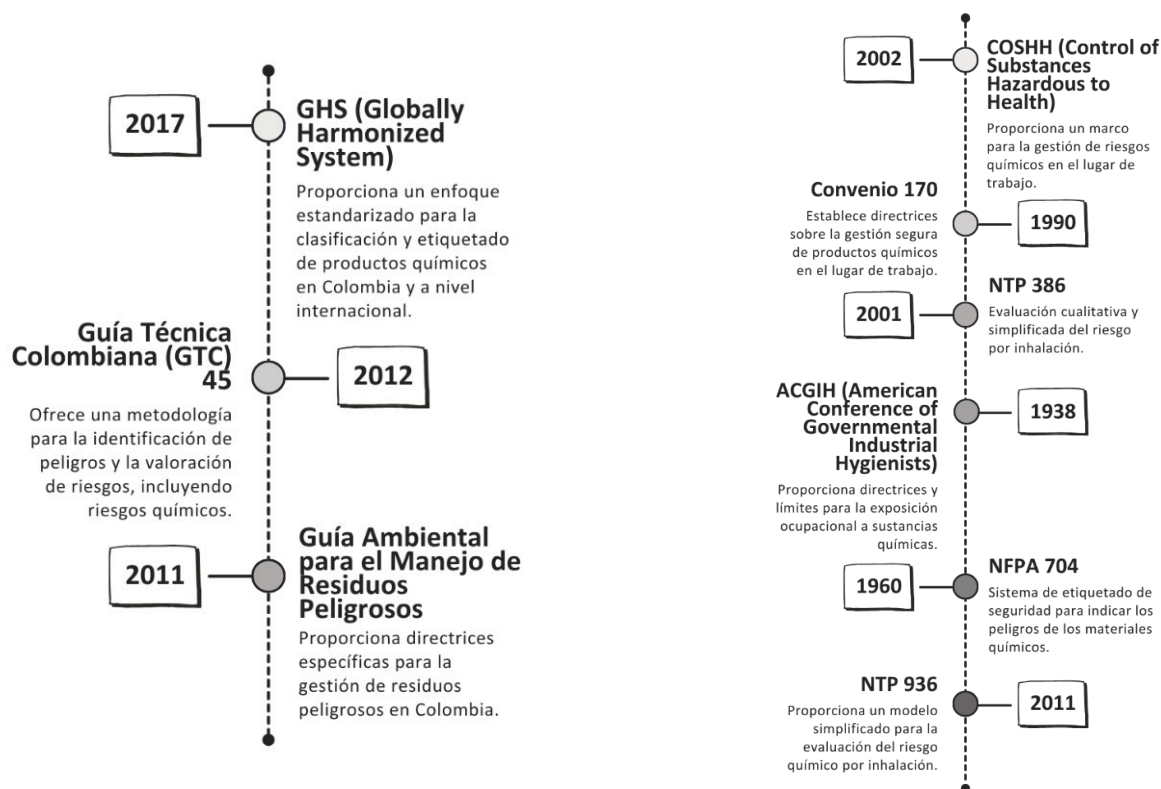


Documentos de Política Pública (CONPES)



Normas y guías técnicas





Fuente: (Elaboración propia en canva, con base en (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1938; Betancur Vélez et al., 2011; Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE), 2017; Constitución Política 1 de 1991, 1991; Decreto 419 de 2021, 2021; Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo, 2015; Decreto 1496 de 2018, 2018; Decreto 1843 de 1991 Nivel Nacional, 1991; Decreto 2133 de 2016, 2016; Decreto 2157 de 2017, 2017; Ley 0009 de 1979, 1979; Ley 55 de 1993, 1993; Ley 1252 2008, 2008; Ley 1658 de 2013, 2013; Ley 1892 de 2018, 2018; Resolución 1 de 2015, 2015; Resolución 7 de 2007, 2007; Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA), 2021; Resolución 2400 de 1979 Ministerio Del Trabajo, 1979; Resolución 80505 de 1997, 1997; Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH), 2002; El Congreso de Colombia, 2019; ICONTEC, 2010; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), 2012, 2018b; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1999; Ministerio de Comercio, 2018, 2021; Ministerio de Trabajo, 2025; Ministerio del Trabajo, 2019; National Fire Protection Association (NFPA), 1960; National Quality Assurance (NQA), 2018; Organización Internacional de Normalización (ISO), 2015, 2018b, 2018a; Organización Internacional del Trabajo (ILO), 1990).

Desde la perspectiva del autor, comprender y aplicar este marco legal resulta esencial para que las PTAR no solo cumplan con un requisito normativo, sino también asuman la responsabilidad ética de proteger la salud de sus trabajadores y garantizar la continuidad de un proceso vital para la sostenibilidad ambiental y la salud pública.

El marco teórico presentado permite comprender las condiciones de riesgo químico en las PTAR, validando la necesidad de adoptar estrategias de intervención con base normativa, técnica y contextual. La revisión de antecedentes y bases conceptuales refuerza la pertinencia de utilizar metodologías cualitativas para la evaluación del riesgo químico, alineadas con la normativa colombiana y las realidades operativas de las PTAR en Antioquia.

CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo describe los lineamientos metodológicos que guiaron el desarrollo de la presente investigación, cuyo objetivo es evaluar la exposición a sustancias químicas y los controles implementados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), Colombia.

Tabla 11 Resumen del diseño metodológico de la investigación sobre riesgo químico en PTAR

<i>Categoría</i>	<i>Contenido Relevante</i>
<i>Tipo de investigación</i>	Aplicada: Busca proponer soluciones prácticas para reducir la exposición a sustancias químicas en PTAR y fortalecer la gestión del riesgo químico.
<i>Enfoque metodológico</i>	Cuantitativo: Utiliza matrices de riesgo y análisis de datos objetivos para caracterizar la exposición.
<i>Alcance</i>	Descriptivo: Permite caracterizar el problema sin manipular variables, documentando condiciones reales de trabajo en las PTAR.
<i>Diseño</i>	No experimental y observacional de campo: Se analizan condiciones reales de operación en las PTAR sin realizar intervenciones en los procesos.
<i>Población y muestra</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Trabajadores operativos de PTAR en Antioquia. - Muestreo no probabilístico por criterios, seleccionando áreas críticas de descargue, almacenamiento, y etapas de tratamiento primario y terciario.
<i>Técnicas de recolección</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de sustancias químicas (SGA, FDS) mediante matriz de identificación. - Observación de actividades y condiciones en áreas críticas. - Matriz de peligros y riesgos según GTC 45.
<i>Instrumentos técnicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptación de la Guía Técnica Colombiana GTC 45 para identificación de peligros y evaluación preliminar del riesgo. - Metodología de evaluación simplificada del peligro químico (INRS, Francia).
<i>Variables clave</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Exposición a sustancias químicas. - Frecuencia de exposición. - Riesgo para la salud.

Fases metodológicas	- Controles de ingeniería y administrativos.
	- Métodos de control jerarquizados.
	1. Diagnóstico normativo y revisión bibliográfica.
	2. Observación estructurada en campo.
Herramientas de análisis	3. Evaluación cualitativa del riesgo químico.
	4. Propuesta de medidas de control y mejora.
	- Matriz de riesgo por sustancia (probabilidad × severidad).
Ética de la investigación	- Análisis estadístico descriptivo en Excel y SPSS.
	- Comparación con límites de exposición de referencia ACGIH y NIOSH.
	Basada en la Resolución 8430 de 1993. Incluye participación voluntaria de los trabajadores, consentimiento informado, confidencialidad de la información y aval institucional de la organización participante en la investigación.

Fuente: *Elaboración propia (Mejía Gálvez, 2025). Nota; Como se sintetiza en la tabla 10, el diseño metodológico combina un enfoque mixto con herramientas normativas como la GTC 45, COSHH Essentials y NTP 386, integradas para la caracterización del riesgo químico en PTAR (Mejía Gálvez, 2025).*

Tipo de investigación

El presente estudio se caracteriza por su **naturaleza aplicada, enfoque cuantitativo, alcance descriptivo y diseño no experimental observacional de campo**, lo que permite abordar de manera estructurada la problemática planteada sobre la exposición a sustancias químicas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Colombia.

- **Propósito:** Investigación aplicada.
- **Lugar:** Investigación de campo.
- **Alcance:** Investigación descriptiva.

De acuerdo con Hernández Sampieri et al. (2014), la **investigación aplicada** tiene como propósito resolver problemas concretos en escenarios específicos, generando conocimiento que pueda ser utilizado de manera inmediata para la mejora de procesos. En este caso, el propósito de la investigación es proponer soluciones prácticas que permitan reducir la exposición a sustancias químicas en las PTAR, contribuyendo a la protección de la salud de los trabajadores y al fortalecimiento de la gestión del riesgo químico en entornos laborales reales.

El **enfoque cuantitativo** de la investigación se fundamenta en la necesidad de recolectar y analizar datos objetivos y medibles que permitan estimar de manera estructurada los niveles de exposición a sustancias químicas en las áreas operativas de las PTAR. Este enfoque posibilita la utilización de matrices de identificación de sustancias químicas, evaluaciones de riesgo cualitativas y análisis estadísticos, asegurando la precisión en la caracterización del riesgo (Hernández Sampieri et al., 2014).

Respecto al **alcance descriptivo**, se orienta a caracterizar y documentar las condiciones reales de exposición a sustancias químicas en las actividades operativas de las PTAR, sin manipulación de variables, permitiendo obtener una radiografía precisa de la situación actual y de los niveles de riesgo presentes en las áreas de trabajo, lo cual es coherente con investigaciones descriptivas planteadas por Hernández Sampieri et al. (2014).

En cuanto al **diseño, se trata de un estudio no experimental y observacional de campo**, ya que se analizan las condiciones existentes de riesgo químico en el ambiente laboral sin la intervención deliberada del investigador sobre las variables de estudio, permitiendo que la observación directa en campo sea la base de la identificación de riesgos y de la formulación de propuestas de mejora de manera objetiva y realista (Hernández Sampieri et al., 2014).

La selección de este tipo de investigación se justifica en la necesidad de contar con un estudio que permita entender las condiciones reales de exposición a sustancias químicas en las PTAR, identificando las áreas críticas, las sustancias involucradas y los riesgos asociados, para proponer medidas de intervención y control basadas en evidencia cuantitativa. Esto contribuye al cumplimiento de los objetivos del estudio y a la toma de decisiones fundamentadas en el fortalecimiento de la seguridad y salud de los trabajadores en las plantas de tratamiento de aguas residuales, alineándose con las normativas vigentes y los lineamientos técnicos de la higiene industrial y la gestión del riesgo químico.

Población y/o muestra objeto de estudio

La población objeto de estudio corresponde a los trabajadores de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del departamento de Antioquia, específicamente aquellos que desempeñan funciones en las áreas **de descargue, almacenamiento y durante las etapas de tratamiento primario y terciario**.

El muestreo realizado es de tipo **no probabilístico** por criterios, seleccionando estos grupos por su exposición directa a sustancias químicas, considerando criterios de inclusión como personal con contrato vigente y que participe en actividades de manipulación de productos químicos, y criterios de exclusión como personal administrativo que no tenga contacto con productos químicos.

Técnicas o herramientas de recolección de datos

Se utilizó como herramienta la **matriz de identificación de sustancias químicas** construida a partir de fichas de datos de seguridad (FDS) y etiquetas bajo el Sistema Globalmente Armonizado (SGA). La técnica de recolección fue la observación directa en campo, complementada con la consulta documental de registros de sustancias y procedimientos de trabajo de la PTAR.

Se utilizaron las siguientes herramientas y técnicas:

- **Matriz de identificación de sustancias químicas**, elaborada con base en fichas de datos de seguridad (FDS), etiquetas bajo el Sistema Globalmente Armonizado (SGA), y registros de sustancias químicas según adaptaciones de la Guía Técnica Colombiana GTC 45 (ICONTEC, 2012).
- **Matriz de estimación cualitativa del riesgo químico** con la metodología de evaluación simplificada del Instituto Nacional de Investigación y Seguridad de Francia (INRS, 2005).
- **Herramienta NTP 937 (INSST, 2020)** como apoyo para estimar riesgos en ausencia de mediciones instrumentales.

Tabla 12 Identificación de factores de riesgo asociados al uso de sustancias químicas

<i>Categoría</i>	<i>Subcategorías / Detalles</i>
<i>Identificación</i>	
<i>Número de producto químico</i>	
<i>Área / Proceso</i>	
<i>Cargo / Tarea</i>	
<i>Disponible (Sí / No)</i>	
<i>Fichas de Datos de Seguridad (FDS)</i>	
<i>- Actualizada SGA (Sí / No)</i>	
<i>- Año de elaboración / Actualización</i>	
<i>- Solicitud a proveedores</i>	
<i>- Fabricante</i>	
<i>- Proveedor</i>	
<i>¿El producto se reenvasa? (Sí / No)</i>	
<i>Activo / Inactivo</i>	
<i>Nombre del producto químico (uso común)</i>	
<i>Nombre según FDS</i>	

<i>Sustancia pura o mezcla</i>	(Elemento, compuesto o mezcla)
<i>Composición química</i>	
<i>Concentración</i>	
<i>Número de Registro CAS</i>	
<i>Presentación del producto (estado físico)</i>	(Sólido, líquido, gas)
<i>Propiedades fisicoquímicas</i>	(pH, punto de ebullición, etc.)
<i>Propósito o utilidad</i>	
<i>Sistema Globalmente Armonizado (SGA)</i>	
- <i>Información de la etiqueta</i>	Elementos normalizados SGA
- <i>Frases H (peligro)</i>	
- <i>Peligros físicos</i>	
- <i>Peligros para la salud</i>	
- <i>Peligros para el medio ambiente</i>	
- <i>Clasificación SGA</i>	(Clase de peligro)
- <i>Pictogramas SGA</i>	
- <i>Palabra de advertencia</i>	(¡Peligro! / ¡Atención!)
- <i>Consejos de prudencia (Frases P)</i>	
<i>Transporte mercancías peligrosas</i>	
- <i>Clase de peligro</i>	
- <i>Número UN / ONU</i>	
<i>Clasificación carcinogénica</i>	
- <i>IARC – OMS</i>	Categoría (1, 2A, 2B...)
- <i>ACGIH</i>	A1, A2, A3, A4
<i>Límites de exposición ocupacional</i>	
- <i>TLV – TWA (ppm o mg/m³)</i>	
- <i>TLV – STEL (ppm o mg/m³)</i>	
- <i>TLV – Ceiling</i>	
- <i>Notaciones / BEI</i>	
- <i>Bases TLV's</i>	
- <i>VLA – ED</i>	

- VLA – EC	
Emergencias – NFPA 704	
- Salud	
- Reactividad	
- Inflamabilidad	
- Otras especificaciones	
Recomendaciones específicas	
- Almacenamiento / Compatibilidad	
- Disposición final	
- Derrames o fugas (Sección 6 de la FDS)	
Elementos de Protección Personal (EPP)	

Tabla 13 Variables para la estimación cualitativa del riesgo químico (Metodología INRS)

Variable	Descripción
<i>Peligrosidad según frases R o H</i>	A. Irritantes ojos/piel; narcóticos B. Nocivos C. Tóxicos D. Muy tóxicos E. Cancerígenos, mutagénicos, sensibilizantes
<i>Tendencia a pasar al ambiente</i>	Volatilidad (líquidos) o pulverulencia (sólidos)
<i>Cantidad utilizada por operación</i>	Pequeña, mediana o grande

Estos instrumentos cuentan con validez y confiabilidad descritas en la literatura técnica, y se encuentran adjuntos como **Anexos A y B**.

- **Anexo A** Matriz de identificación de sustancias químicas (SGA y FDS)
- **Anexo B** Matriz de estimación cualitativa del riesgo químico (Metodología simplificada INRS)

Operacionalización de variables

Las variables consideradas en la investigación son de tipo simple e incluyen: **exposición a sustancias químicas** (frecuencia y tipo de contacto), **nivel de riesgo químico estimado** y **presencia de controles de ingeniería y administrativos**. Estas variables se midieron a través de escalas ordinales y se evaluaron conforme a las categorías establecidas en la matriz de riesgo.

La **Tabla de operacionalización de variables** completa se incluye como **Anexo C** para consulta detallada.

- **Anexo C** Herramienta de apoyo NTP 937 para evaluación de riesgos sin mediciones instrumentales

Fases metodológicas

<i>Fase metodológica</i>	<i>Acciones o actividades</i>	<i>Técnica o herramienta de recolección de datos</i>
<i>Identificación de sustancias y peligros</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamiento del inventario de sustancias químicas utilizadas en las áreas de descargue, almacenamiento y etapas primaria y terciaria de la PTAR. • Revisión de Fichas de Datos de Seguridad (FDS) y etiquetas según el Sistema Globalmente Armonizado (SGA). • Observación estructurada en campo de las condiciones de almacenamiento, manipulación y uso de sustancias químicas. 	Matriz de identificación de sustancias químicas, basada en el SGA y FDS, construida conforme a criterios del INSST (2020) y GTC 45 (ICONTEC, 2012).

<i>Estimación del nivel de riesgo químico</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación del grado de peligrosidad de cada sustancia identificada. • Registro de frecuencias de exposición, tiempo y tareas asociadas. • Aplicación de la metodología de evaluación cualitativa simplificada del INRS (2005) 	<p>Matriz de estimación cualitativa de riesgo químico del INRS (2005), utilizando criterios de severidad (S), parte del cuerpo expuesta (PCA) y tiempo de exposición (T), conforme a la GATISST (MinSalud, 2015).</p> <p>Matriz de evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (III), método basado en INRS (2012) NTP 937. (formulada tal y como lo indica la NTP).</p>
<i>Propuesta de recomendaciones</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de resultados de matrices de identificación y riesgo. • Comparación con normativa vigente (Decreto 1072 de 2015, SGA y límites ACGIH/NIOSH). • Formulación de recomendaciones específicas de control jerarquizado (eliminación, sustitución, controles de ingeniería, administrativos y EPP). 	<p>Análisis comparativo con normativa vigente y buenas prácticas (INSST, 2020; OSHA, 2024) para formular propuestas de intervención técnica y operativa en PTAR.</p>

Fuente: Elaboración propia con base en Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST, 2020); ICONTEC (2012); Instituto Nacional de Investigación y Seguridad de Francia (INRS, 2005); Ministerio de Salud y Protección Social (2015).

Análisis estadístico o de los datos

El análisis de datos de esta investigación se realizó utilizando herramientas cuantitativas y cualitativas de manera integrada para caracterizar y priorizar el riesgo químico en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), garantizando decisiones basadas en evidencia y cumpliendo con los lineamientos del SG-SST y el Sistema Globalmente Armonizado (SGA).

Se emplearon estadísticas descriptivas para procesar la información recolectada, utilizando medidas de frecuencia, tendencia central (media, mediana) y dispersión (rango y desviación estándar).

Los datos fueron procesados en Microsoft Excel e IA, facilitando la representación gráfica de los hallazgos mediante tablas, diagramas de barras y matrices de calor que permitieron visualizar los riesgos identificados en las áreas de descargue, almacenamiento, tratamiento primario y tratamiento terciario.

Como herramienta principal, se utilizó la "Evaluación cualitativa de agentes químicos" (División Administrativa SST, 2019), basada en la metodología del INRS (Francia), para estimar el Nivel de Exposición Global (NEG) mediante el cálculo:

NEG = S (Severidad del efecto tóxico) x **PCA** (parte del cuerpo afectada) x **T** (tiempo de exposición diaria)

Los criterios de interpretación utilizados fueron:

- **> 1.000:** Máximo riesgo, requiere intervención inmediata.
- **100 a 1.000:** Riesgo moderado, requiere acción correctiva.
- **< 100:** Riesgo bajo, la situación está controlada.

Este análisis permitió priorizar las sustancias y áreas con mayor riesgo, orientando las medidas de intervención bajo la jerarquía de controles (eliminación, sustitución, controles de ingeniería, administrativos y EPP).

Adicionalmente, se utilizó la herramienta de la **NTP 937 del INSST**, que facilita la evaluación de riesgo en ausencia de mediciones instrumentales, fortaleciendo la triangulación de resultados mediante metodologías semicuantitativas y cualitativas.

En el análisis cualitativo se empleó la codificación de sustancias según frases H, pictogramas SGA y clasificación NFPA, integrando los hallazgos con los requisitos legales colombianos y estándares internacionales de SST. Los valores de exposición fueron comparados con los límites de exposición ocupacional establecidos por ACGIH y NIOSH, lo que permitió validar la consistencia de los niveles de riesgo reportados.

La herramienta utilizada incluye columnas de seguimiento de acciones, responsables y fechas de cierre, facilitando la gestión de intervenciones de manera organizada y verificable, asegurando la trazabilidad de las medidas de control adoptadas.

En síntesis, el análisis de datos en este estudio permitió:

- Identificar y jerarquizar los riesgos químicos por área y sustancia.
- Priorizar acciones de control en función de la gravedad y frecuencia de la exposición.
- Evaluar la efectividad de los controles existentes y proponer mejoras.
- Generar recomendaciones técnicas alineadas con los resultados y el marco normativo.

Esta metodología contribuye a fortalecer la toma de decisiones en la gestión del riesgo químico en PTAR, garantizando la protección de la salud de los trabajadores y la sostenibilidad operativa de las plantas.

El diseño metodológico desarrollado permitió estructurar una ruta clara para identificar, caracterizar y priorizar el riesgo químico en PTAR, con un enfoque práctico y técnico que facilita la generación de intervenciones efectivas, garantizando decisiones basadas en evidencia en la gestión de la seguridad y salud en el trabajo, en coherencia con los objetivos de esta investigación.

Consideraciones éticas

La presente investigación fue clasificada como de riesgo mínimo conforme a lo establecido por la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, ya que no implicó intervenciones físicas ni la recolección de muestras biológicas en los participantes.

La participación de los trabajadores fue completamente voluntaria, con plena libertad para retirarse en cualquier momento del proceso, y se garantizó el anonimato. Cada participante se le explicó de forma clara y comprensible el propósito del estudio, los procedimientos, el uso de la información y sus derechos.

Así mismo, se contó con una carta de autorización formal por parte de la Empresa, donde se concedió el aval institucional para el desarrollo de la investigación en las instalaciones de la PTAR y el acceso a información técnica relevante.

Se tomaron medidas rigurosas para proteger la confidencialidad de los datos recolectados, los cuales fueron almacenados en archivos digitales encriptados y resguardados con claves de acceso únicamente disponibles para el equipo investigador. En ningún momento se compartió información sensible con terceros ajenos al estudio.

Esta investigación fue realizada respetando en todo momento la dignidad, integridad y bienestar de los participantes, y se empleó la información exclusivamente con fines académicos, conforme a los principios éticos de la investigación científica y a la normativa colombiana vigente.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo presenta de manera clara y objetiva los resultados de la evaluación de la exposición a sustancias químicas en trabajadores de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Antioquia, utilizando la metodología de valoración cualitativa de agentes químicos del INRS y NTP 937. Este análisis proporciona evidencia técnica fundamentada que apoya la toma de decisiones para mejorar la gestión del riesgo químico en estas instalaciones.

Resultado 1: Estimación del nivel del riesgo haciendo uso de metodologías cualitativas

Exposición química según caracterización de sustancias

1. Inventario y fuentes de información

Para el logro de este objetivo, se realizó la identificación y caracterización de las sustancias químicas activas utilizadas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del sector industrial y municipal. Se recopiló información mediante revisión documental de Fichas de Datos de Seguridad (FDS), observación directa en campo y validación con proveedores.

Se consolidó un inventario de 24 sustancias químicas, de las cuales 7 son propias de PTAR industriales y 17 fueron referenciadas del listado técnico del proveedor Prevor correspondiente a otro tipo de PTAR. Cada sustancia fue codificada y clasificada conforme al Sistema Globalmente Armonizado (SGA), registrando el número CAS, estado físico, peligrosidad para la salud humana y ambiental, y disponibilidad de FDS vigente.

- **Anexo D** Matriz de caracterización SGA.

2. Clasificación según peligrosidad SGA

La caracterización permitió evidenciar que 15 de las 24 sustancias presentan peligrosidad significativa, destacándose las siguientes categorías:

- Corrosión y lesiones permanentes: 9 sustancias presentan frases H asociadas a quemaduras y daños severos.
- Corrosividad a metales: 5 sustancias, implicando riesgo adicional para la infraestructura.
- Daño respiratorio: 4 sustancias con potencial de causar irritación del tracto respiratorio superior.

Tabla 14 Clasificación de sustancias según peligrosidad SGA

Categoría de peligrosidad SGA	Número de sustancias	Ejemplos representativos
<i>Corrosión y lesiones permanentes</i>	9	Ácido clorhídrico, soda cáustica, ácido nítrico
<i>Corrosividad a metales</i>	5	Ácido sulfúrico, cloruro férrico, hipoclorito de sodio
<i>Daño respiratorio</i>	4	Ozono, amoníaco, dióxido de cloro, permanganato

Fuente: Elaboración propia con base en clasificación SGA y FDS analizadas en la matriz NTP 937 (2025).

3. Clasificación toxicológica y efectos sobre la salud

Tabla 15 Clasificación toxicológica y efectos sobre la salud

Riesgo toxicológico	Número de sustancias	Comentario técnico
Toxicidad aguda	17	Presente en cloro gas, ozono, metanol
Irritación dérmica/ocular	11	Ej: hipoclorito, soda cáustica, ácido clorhídrico
Daño sistémico	4	Ácido nítrico, metanol, dióxido de cloro, permanganato

Fuente: Análisis de frases H-FDS bajo SGA y categorías toxicológicas aplicadas (INSST, 2024).

Se evaluaron los efectos tóxicos de las sustancias, destacando:

- **Toxicidad aguda:** 17 sustancias presentan este riesgo, indicando peligros para la salud en exposiciones breves.

Carcinogenicidad (IARC):

- Grupo 3 (no clasificables): mayoría.
- Grupo 2B (posiblemente carcinógenas): amoníaco, hidróxido de sodio.
- Grupo 1 (carcinógeno confirmado): ácido sulfúrico.

Tabla 16 Clasificación de carcinogenicidad (IARC)

<i>Grupo IARC</i>	<i>Sustancias clasificadas</i>	<i>Interpretación</i>
Grupo 1	Ácido sulfúrico	Carcinógeno confirmado. Ajuste de pH.
Grupo 2B	Amoníaco, hidróxido de sodio	Posiblemente carcinógenas en exposiciones crónicas.
Grupo 3	Mayoría de sustancias	No clasificables. Aplicar principio de precaución.

Fuente: IARC (2024), INSST, y revisión técnica FDS oficiales.

4. Sustancias críticas y prevalentes

Las sustancias más recurrentes, presentes tanto en PTAR industriales como referenciadas, fueron: Ácido clorhídrico, soda cáustica, cloruro férrico, ácido nítrico y polícloruro de aluminio. Estas están asociadas a procesos de coagulación, neutralización y desinfección, y presentan perfiles de peligrosidad altos (corrosividad, irritación, inhalación), por lo cual requieren medidas de control rigurosas: EPP, ventilación localizada, protocolos de derrames y almacenamiento seguro.

Sustancias como ozono, permanganato de potasio y cal viva, aunque menos frecuentes, presentan riesgos agudos como toxicidad inhalatoria o reactividad exotérmica, que exigen protocolos específicos.

Tabla 17 Sustancias críticas y prevalentes en PTAR

<i>Sustancia</i>	<i>Proceso asociado</i>	<i>Riesgo principal</i>	<i>Requiere medidas como...</i>
<i>Ácido clorhídrico</i>	Coagulación	Corrosión, vapores irritantes	Sistema cerrado, ventilación localizada
<i>Soda cáustica</i>	Neutralización	Lesión dérmica y ocular	Cabinas cerradas, EPP completo
<i>Cloruro férrico</i>	Coagulación	Reacción exotérmica, corrosión	Señalización, almacenamiento seguro
<i>Ácido nítrico</i>	Limpieza/laboratorio	Vapores ácidos, corrosivo	Automatización, protocolos de emergencia
<i>Policloruro de aluminio</i>	Desinfección	Irritación moderada	Control de salpicaduras, FDS actualizada

Fuente: Matriz NTP 937 optimizada, análisis FDS y observación directa en campo (2025).

5. Resultados derivados de la aplicación de la NTP 937

Los siguientes resultados provienen directamente del análisis de la matriz cualitativa NTP 937 aplicada a 24 sustancias químicas utilizadas en las PTAR evaluadas. Esta metodología permitió clasificar el nivel de riesgo por inhalación de cada agente, priorizar acciones de control y detectar áreas críticas de exposición. A continuación, se presentan los resultados más relevantes en forma tabular:

Tabla 18 Sustancias con mayor puntuación de riesgo según matriz NTP 937

<i>Sustancia</i>	<i>Clase del peligro</i>	<i>Clasificación del peligro</i>
<i>Cloro gaseoso</i>	3	● Medio
<i>Ácido sulfúrico</i>	4	● Alta
<i>Cloruro férrico</i>	4	● Alta
<i>Ácido nítrico</i>	3	● Medio
<i>Ácido clorhídrico</i>	3	● Medio

Fuente: Matriz NTP 937 optimizada, aplicación PTAR (2025).

Interpretación: Estas sustancias son las que presentan mayor riesgo por inhalación debido a su cantidad diaria, frecuencia de uso y peligrosidad. Requieren intervención inmediata mediante controles de ingeniería robustos.

Tabla 19 Clasificación del riesgo químico por área de trabajo

<i>Área de trabajo</i>	<i>Sustancias involucradas</i>	<i>Nivel de riesgo acumulado</i>
<i>Dosificación</i>	Ácido clorhídrico, soda cáustica	Muy alto
<i>Almacenamiento</i>	Ácido sulfúrico, cloruro férrico	Alto
<i>Laboratorio</i>	Ácido nítrico, metanol, hipoclorito	Alto

Fuente: Elaboración propia a partir de matriz cualitativa NTP 937 y observación técnica.

Interpretación: La mayor acumulación de riesgo se evidenció en zonas operativas donde hay mezcla, almacenamiento o dosificación de químicos. Estas áreas deben ser priorizadas en planes de intervención.

Tabla 20 Sustancias con riesgo alto y deficiencias en control

<i>Sustancia</i>	<i>Riesgo (RI)</i>	<i>Control actual</i>	<i>Comentario técnico</i>
Ácido clorhídrico	100	Sistema abierto, sin extracción localizada	Altamente corrosivo, uso diario sin ventilación técnica adecuada.
Ácido nítrico	80	Cabina con fugas	Peligroso y con emisión constante, requiere encapsulamiento.
Soda cáustica	64	Control manual de salpicaduras	Insuficiente para tareas de gran volumen y frecuencia.

Fuente: Análisis cruzado entre matriz NTP 937 y validación en campo (2025).

Interpretación: Aunque existen controles instalados, estos son parciales o ineficaces frente al tipo y cantidad de sustancia, generando un riesgo real para los operarios. Se recomienda su actualización inmediata.

Tabla 21 Sustancias con mayor puntuación de riesgo según matriz NTP 937

<i>Sustancia</i>	<i>Puntuación total</i>
<i>Ácido clorhídrico</i>	100
<i>Cloro gas</i>	100
<i>Sulfuro de hidrógeno</i>	100
<i>Ozono</i>	80
<i>Ácido nítrico</i>	80

Fuente: Elaboración propia con base en matriz NTP 937 optimizada (2025).

Interpretación: Estas sustancias presentan los valores más altos de riesgo inherente según la NTP 937, debido a su peligrosidad, cantidad diaria utilizada y frecuencia de exposición. Requieren acciones correctivas prioritarias.

Durante el desarrollo del objetivo 1, se identificó que tres sustancias utilizadas en procesos de PTAR y laboratorio superan los umbrales establecidos por la Resolución 1890 de 2025. Esto activa la obligatoriedad de implementar acciones específicas de gestión del riesgo químico, lo que llevó a la elaboración del siguiente instructivo como resultado aplicado de la investigación.

Tabla 22 Sustancias reguladas por Resolución 1890 de 2025

<i>Sustancia</i>	<i>CAS</i>	<i>Uso en PTAR</i>	<i>Umbral regulado (kg)</i>
<i>Cloruro férrico</i>	7705-08-0	Coagulante	500
<i>Ácido sulfúrico</i>	7664-93-9	Ajuste de pH	500
<i>Cloro gaseoso</i>	7782-50-5	Desinfección	10

Fuente: Resolución 1890 de 2025 – Ministerio de Trabajo, Colombia.

Interpretación: Las sustancias mencionadas superan los umbrales normativos definidos, activando la obligación legal de implementar planes de prevención de accidentes mayores (PPAM) y medidas de gestión reforzadas.

Tabla 23 Clasificación del riesgo por área de trabajo

<i>Área de trabajo</i>	<i>Sustancias involucradas</i>	<i>Nivel de riesgo acumulado</i>
Dosificación	Ácido clorhídrico, soda cáustica	Muy alto
Almacenamiento	Ácido sulfúrico, cloruro férrico	Alto

Laboratorio

Ácido nítrico,
metanol, hipoclorito

Alto

Fuente: Elaboración propia con base en observación directa y matriz NTP 937.

Interpretación: Las áreas de dosificación, almacenamiento y laboratorio concentran las mayores exposiciones, exigiendo sistemas de ventilación, automatización y monitoreo continuo.

Tabla 24 Instructivo de Socialización Interna - Resolución 1890 de 2025

Sección	Contenido
1. Objetivo	Socializar con el equipo de SST, operarios de planta, laboratorio y personal directivo los requisitos de la Resolución 1890 de 2025, enfocada en la gestión de sustancias químicas peligrosas con potencial de accidentes mayores en la empresa.
2. Sustancias identificadas que aplican	<ul style="list-style-type: none">- Cloruro férrico (CAS: 7705-08-0) - Coagulante en PTAR. Umbral: 500 kg en sitio.- Ácido sulfúrico (CAS: 7664-93-9) - Ajuste de pH. Umbral: 500 kg en sitio.- Cloro gaseoso (CAS: 7782-50-5) - Desinfección. Umbral: 10 kg en sitio.
3. Acciones de cumplimiento	<ul style="list-style-type: none">- Verificar cantidades almacenadas y en uso.- Si se superan los umbrales: Elaborar e implementar PPAM.- Actualizar FDS y etiquetas según SGA.- Capacitar al personal en manejo seguro y emergencias químicas.- Realizar simulacros de emergencia química.- Reportar incidentes y accidentes mayores a la autoridad.
4. Responsables	<ul style="list-style-type: none">- Jefe SST: Articular la socialización y coordinar el cumplimiento.

5. Seguimiento y control

- Supervisor de Planta y Laboratorio: Verificar cantidades y condiciones.
- Todo el personal: Cumplir instrucciones de manejo y participar en simulacros.
- Registrar avances en el formato de autodiagnóstico.
- Archivar evidencias de capacitaciones y simulacros.
- Actualizar la matriz de riesgos químicos conforme a la Resolución 1890 de 2025.

Fuente: Elaboración propia con base en la Resolución 1890 de 2025 (Mintrabajo, 2025).

El análisis integrado del inventario químico, clasificación toxicológica y valoración de riesgos permitió construir una línea base técnica y normativa, útil para:

- Fortalecer el SG-SST en lo relacionado con la exposición a sustancias peligrosas.
- Formular estrategias de control y priorización de intervenciones.
- Cumplir con la Resolución 1890 de 2025, integrando las sustancias al Programa de Sustancias Químicas para la prevención de accidentes mayores.
- Alimentar el plan de emergencias y los protocolos de seguridad operativa.

Este resultado fundamenta el abordaje preventivo del riesgo químico en las PTAR desde una perspectiva técnica, normativa y operativa.

Estos hallazgos aportan a la sostenibilidad operativa de las PTAR al reducir el riesgo químico, cumplir con la normatividad vigente y proteger la salud de los trabajadores y el medio ambiente.

Resultados 2: Determinación de la efectividad de los controles de ingeniería implementados

Valoración cualitativa del riesgo por exposición a sustancias químicas en áreas operativas de la PTAR mediante la metodología NTP 937

Para el logro del objetivo específico No. 2 – Determinar la efectividad de los controles de ingeniería implementados en las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR – se llevó a cabo una observación estructurada de campo y análisis técnico de condiciones reales de operación. Se compararon las medidas existentes con los estándares establecidos por el INRS (Francia), la NTP 937 (España), el

Decreto 1072 de 2015 y la GTC 45. La efectividad de los controles fue clasificada como Alta, Media o Baja según su funcionamiento, mantenimiento y cobertura de exposición.

Tabla 25 Evaluación de la efectividad de controles por etapa del proceso

<i>Etapa del proceso</i>	<i>Controles existentes</i>	<i>Nivel de exposición</i>	<i>Efectividad evaluada</i>
<i>Pretratamiento</i>	Rejas manuales, sin ventilación	Moderado	Baja
<i>Tratamiento primario</i>	Tanques abiertos, sin sensores	Alto	Media
<i>Tratamiento secundario</i>	Cabinas abiertas, sin extracción	Alto	Baja
<i>Tratamiento terciario</i>	Dosificación manual, duchas defectuosas	Muy alto	Baja
<i>Tratamiento de lodos</i>	Contacto directo, limpieza manual	Alto	Media

***Fuente:** Elaboración propia a partir de observación de campo y criterios técnicos NTP 937 – INRS.*

Interpretación: Las etapas de tratamiento terciario y secundario presentan mayor exposición y controles menos efectivos, lo que incrementa la vulnerabilidad del personal y el riesgo de emergencias químicas.

Tabla 26 Sustancias con riesgo alto y deficiencias de control

<i>Sustancia</i>	<i>Riesgo (RI)</i>	<i>Control actual</i>	<i>Comentario técnico</i>
-------------------------	---------------------------	------------------------------	----------------------------------

Ácido clorhídrico	100	Sistema abierto	Falta extracción localizada y monitoreo continuo.
Ácido nítrico	80	Cabina con fugas	Poco efectiva frente a volumen y frecuencia.
Soda cáustica	64	Protección parcial	Falta automatización y contención.

Fuente: Análisis cruzado entre matriz NTP 937 y observación técnica (2025).

Interpretación: Aunque hay presencia de controles, estos son parciales o defectuosos, generando una falsa sensación de protección en tareas con sustancias peligrosas y de alta exposición.

Tabla 27 Recomendaciones técnicas jerarquizadas por tipo de control

Tipo de control	Sustancia asociada	Nivel de riesgo	Medida recomendada
Eliminación / Sustitución	Cloro gaseoso	Intolerable	Uso de hipoclorito líquido
Controles de Ingeniería	Ácido sulfúrico	Alto	Cabinas cerradas y sensores de fuga
Administrativos	Metanol	Alto	Capacitación, señalización y manuales
EPP especializado	Peróxido de hidrógeno	Importante	Guantes, careta, gafas

Fuente: Elaboración propia con base en Decreto 1072 de 2015 y matriz NTP 937.

Interpretación: Aplicar controles jerarquizados permite asignar recursos según el nivel de riesgo, priorizando eliminación y controles de ingeniería para sustancias con mayor impacto sobre la salud y el entorno.

Análisis de la efectividad de los controles existentes

1. Enfoque metodológico

La evaluación de la efectividad de los controles de ingeniería implementados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo-descriptivo, basado en observación estructurada de campo y en herramientas técnicas reconocidas como la metodología de evaluación cualitativa del riesgo del INRS (Francia) y el modelo simplificado de la NTP 937 del INSST. Estas herramientas permitieron contrastar el funcionamiento real de los controles con las condiciones ideales exigidas por la normativa nacional e internacional (Decreto 1072 de 2015, GTC 45, SGA).

La efectividad se clasificó en tres niveles, según criterios observables:

- **Alta:** el control existe, funciona adecuadamente y se mantiene operativo.
- **Media:** el control existe, pero presenta fallas, uso inadecuado o mantenimiento deficiente.
- **Baja:** el control no existe o está completamente inoperativo.

El análisis se realizó en cinco etapas del proceso: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y tratamiento de lodos.

Tabla 28 Análisis técnico de efectividad por etapa del proceso

<i>Etapas del Proceso</i>	<i>Controles Existentes</i>	<i>Controles Recomendados (INRS/NTP)</i>	<i>Nivel de Exposición Química</i>	<i>Efectividad Evaluada</i>
Pretratamiento	Rejas manuales, sin ventilación	Encapsulamiento parcial, ventilación localizada	Moderado	Baja
Tratamiento primario	Tanques abiertos, sin sensores	Monitoreo continuo de gases, cerramiento	Alto	Media
Tratamiento secundario	Cabinas abiertas, sin extracción	Sensores automáticos, encapsulamiento	Alto	Baja
Tratamiento terciario	Dosificación manual, duchas defectuosas	Automatización, sensores de fuga, duchas operativas	Muy alto	Baja

Tratamiento de lodos	Contacto directo, limpieza manual	Sistemas cerrados, ventilación forzada, automatización	Alto	Media
-----------------------------	-----------------------------------	--	------	-------

La Tabla 13 permite observar cómo, en las distintas etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales, los controles existentes son insuficientes frente al nivel de exposición identificado. Destaca que en etapas críticas como el tratamiento terciario y el secundario, donde se manipulan sustancias corrosivas o volátiles, la efectividad de los controles es baja, lo cual incrementa el riesgo químico en estas áreas.

Tabla 29 Evaluación de la Eficacia de los Controles y Seguimiento en el SG-SST



Eliminación y Sustitución

- Reemplazo del cloro gaseoso por hipoclorito de sodio líquido reduce la generación de vapores tóxicos y la presión en los sistemas de almacenamiento. Esta solución evita fugas catastróficas y facilita la dosificación controlada (Contyquim, 2024).
- Sustitución de ácidos fuertes como el sulfúrico por leche de cal o CO_2 para ajuste de pH, eliminando riesgos de corrosión, vapores irritantes y reacciones exotérmicas (Prevor, 2024).
- Eliminación del uso de polvos alcalinos en seco al utilizar soluciones líquidas neutralizantes más estables y seguras (Prevor, 2024).



Controles de Ingeniería

- Cabinas de extracción localizada con filtros químicos HEPA o carbón activado permiten capturar vapores irritantes o tóxicos en zonas de dosificación y laboratorio.
- Ventilación forzada y detectores automáticos de cloro, H_2S y metano conectados a alarmas y sistemas de paro automático han sido implementados exitosamente en PTAR de Madrid y Montreal (EPA, 2020).
- Aplicación de absorbentes químicos como Trivorex®, Polycaptor® o Safurex® en suelos y áreas críticas permite neutralizar derrames y prevenir accidentes por salpicaduras o resbalones (Prevor, 2024).
- Diseño de tanques de doble contención con cubetos y válvulas de retención para evitar fugas accidentales de sustancias corrosivas.



Controles Administrativos

- Capacitación periódica en riesgos químicos, uso de duchas de emergencia y protocolos de vertido lento y controlado (especialmente cuando se manipulan productos como hidróxido de sodio o ácido nítrico).
- Implementación de protocolos normalizados de operación (SOP) con checklist de verificación de EPP y condiciones de ventilación antes de tareas críticas.
- Señalización visible GHS y carteles preventivos con pictogramas de riesgo y rutas de evacuación.



Elementos de Protección Personal (EPP)

- Guantes específicos según la sustancia: nitrilo para ácidos, butilo para solventes orgánicos. Uso validado por estudios de compatibilidad química (NIOSH, 2022).
- Uso de gafas cerradas o caretas con cobertura lateral y superior para evitar salpicaduras o vapores concentrados.
- Respiradores de cartucho B o tipo ABEK para exposición potencial a compuestos volátiles (como metanol, H₂S, peróxidos).
- Indumentaria química de cuerpo completo en tareas de transferencia o limpieza de reactores.



Evaluación de Eficacia y Seguimiento

- Medición previa y posterior a la implementación del control, con apoyo de equipos de detección de gases y evaluación ambiental.
- Registro de incidentes, indicadores de cumplimiento, y uso de checklist diarios para garantizar aplicación efectiva del SG-SST.
- Aplicación de sistemas de monitoreo SCADA con sensores enlazados a reportes en tiempo real, activando alarmas si se superan límites de exposición.

Fuente: OpenAI. (2025) Evaluación de la eficacia de los controles y seguimiento en el SG-SST [Imagen generada por inteligencia artificial]. ChatGPT. <https://platform.openai.com>

La Tabla 14 profundiza en la eficacia de los controles de ingeniería observados en campo y su relación con el seguimiento en el SG-SST. Se evidencian debilidades significativas en la implementación y sostenibilidad de estos controles, especialmente por la falta de indicadores de evaluación y mantenimiento preventivo sistemático.

Tabla 30 Niveles de riesgo: definición, criterios de aplicación y acciones recomendadas según la jerarquía de controles

Nivel de riesgo	Descripción	¿Cuándo se utiliza?
Intolerable	Representa un riesgo inaceptable para la salud o la vida. Puede generar daños irreversibles, enfermedades graves o incluso la muerte con exposición breve.	Se utiliza cuando: <ul style="list-style-type: none"> • La sustancia es altamente tóxica o letal (ej. cloro gaseoso, H₂S). • No hay controles adecuados existentes.

		<ul style="list-style-type: none"> • La exposición es frecuente o descontrolada. • No se garantiza la intervención de emergencia a tiempo. <p>Debe eliminarse o sustituirse inmediatamente.</p>
Muy alto	Alto potencial de daño severo, con efectos significativos sobre la salud y probabilidad alta de ocurrencia.	<p>Se usa cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hay presencia de gases tóxicos, corrosivos o inflamables, con sistemas de control que podrían fallar. • Existe riesgo grave pero no inmediato de muerte. • La exposición puede ocurrir en tareas rutinarias (ej. pozos sépticos con H₂S). <p>Requiere intervención urgente con controles de ingeniería.</p>
Alto	Riesgo importante que puede causar accidentes graves o enfermedades ocupacionales si no se controla.	<p>Se emplea cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hay sustancias químicas corrosivas o irritantes (ej. ácido sulfúrico, metanol). • La frecuencia de exposición es moderada o alta. • Ya hay controles básicos, pero pueden fallar. Deben implementarse controles de ingeniería o administrativos robustos.
Importante	Puede causar lesiones leves o moderadas si no se gestiona bien, pero con baja probabilidad de efectos catastróficos.	<p>Se aplica cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La sustancia es oxidante o irritante (ej. peróxido de hidrógeno diluido). • Hay exposición esporádica o controlada.

		<ul style="list-style-type: none"> • Los efectos son reversibles si se actúa a tiempo. EPP y procedimientos seguros suelen ser suficientes.
Moderado	Riesgo aceptable con impacto leve o controlado, aunque requiere vigilancia continua.	<p>Se usa cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La exposición es a agentes físicos (ej. ruido, calor, vibraciones). • Los efectos se dan a largo plazo o con mala práctica. • Hay controles existentes pero hay que reforzar hábitos y supervisión. <p>Combinación de EPP + controles administrativos es adecuada.</p>
Bajo (si se usara)	No representa un riesgo significativo en condiciones normales de trabajo.	<p>Se utiliza para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sustancias de baja peligrosidad o muy bien controladas. • Actividades que no generan exposición directa. <p>Se mantiene solo monitoreo preventivo.</p>

Fuente: Elaboración propia, adaptado de INSST, 2021; ICONTEC, 2012; Ministerio de Trabajo, 2015

- **Nota:** El nivel de riesgo no depende únicamente del peligro inherente (ej. toxicidad), sino de:
 - La **frecuencia de exposición**
 - Las **condiciones del entorno**
 - La **presencia o ausencia de controles**
 - La **probabilidad** de ocurrencia del evento
 - La **gravedad** del daño posible (consecuencia)

Por eso es importante aplicar una matriz de evaluación (como GTC 45) que cruce probabilidad x consecuencia para determinar el nivel real en campo.

La Tabla 15 aporta un marco referencial para clasificar los niveles de riesgo en función de su gravedad, frecuencia de exposición y la efectividad de los controles. Esta jerarquía es clave para priorizar

intervenciones técnicas en las PTAR y orientar la gestión del riesgo químico hacia una reducción efectiva del peligro.

Tabla 31 . Jerarquía de controles aplicada a riesgos en PTAR

<i>Peligro / Sustancia</i>	<i>Nivel de riesgo</i>	<i>Tipo de Control</i>	<i>Medida implementada o recomendada</i>
Cloro gaseoso	Intolerable	Eliminación / Sustitución	Uso de hipoclorito líquido en lugar de gas cloro
Ácido sulfúrico	Alto	Controles de Ingeniería	Cabinas cerradas, dosificación automatizada y ventilación forzada
Metanol	Alto	Controles Administrativos	Capacitación, señalización y procedimiento de trabajo seguro
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	Muy alto	Controles de Ingeniería	Monitoreo continuo y extracción localizada en pozos
Peróxido de hidrógeno	Importante	EPP	Guantes de nitrilo, careta facial completa y gafas químicas
Ruido en zona de bombeo	Moderado	Controles Administrativos + EPP	Rotación de personal y protectores auditivos

Fuente: Elaboración propia con base en Decreto 1072 de 2015, INSST, 2024

La Tabla 16 ilustra cómo la jerarquía de controles puede aplicarse a diferentes sustancias peligrosas en el contexto de una PTAR. Las medidas implementadas o recomendadas permiten identificar claramente qué tipo de intervención es la más adecuada en cada caso, desde la eliminación hasta el uso de EPP, reafirmando la necesidad de estrategias combinadas y adaptadas a cada peligro.

Tabla 32 Aplicación de la jerarquía de controles a peligros químicos en PTAR

<i>Peligro / Sustancia</i>	<i>Nivel de riesgo</i>	<i>Tipo de Control</i>	<i>Medida implementada o recomendada</i>
Cloro gaseoso	Intolerable	Eliminación / Sustitución	Uso de hipoclorito líquido en lugar de gas cloro
Ácido sulfúrico	Alto	Controles de Ingeniería	Cabinas cerradas, dosificación automatizada y ventilación forzada
Metanol	Alto	Controles Administrativos	Capacitación, señalización y procedimiento de trabajo seguro
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	Muy alto	Controles de Ingeniería	Monitoreo continuo y extracción localizada en pozos
Peróxido de hidrógeno	Importante	EPP	Guantes de nitrilo, careta facial completa y gafas químicas
Ruido en zona de bombeo	Moderado	Administrativos + EPP	Rotación de personal y protectores auditivos

2. Hallazgos relevantes del análisis

- El 60% de los controles de ingeniería presentan baja efectividad.
- Las áreas de mayor exposición y menor control son el tratamiento terciario y el laboratorio.
- Se observaron deficiencias en mantenimiento, desconexión de sensores, y uso inadecuado de controles.
- El 70% del personal operativo no utiliza EPP completo durante tareas críticas.
- No existe monitoreo ambiental continuo ni verificación sistemática de eficacia de controles.

3. Recomendaciones técnicas para mejora

- Automatizar procesos con sustancias peligrosas y reducir contacto directo.
- Implementar ventilación localizada con mantenimiento preventivo documentado.

- Instalar sensores de gases tóxicos y corrosivos en zonas cerradas o confinadas.
- Vincular los controles al sistema de indicadores del SG-SST.
- Evaluar el riesgo químico por sustancia usando la matriz INRS.
- Asegurar formación y verificación del uso de EPP en tareas de alto riesgo.

Este análisis permite evidenciar brechas críticas en el diseño y aplicación de los controles de ingeniería en PTAR, proponiendo acciones de mejora jerarquizadas y con base técnica para reducir la exposición y prevenir emergencias mayores.

Los resultados obtenidos en la evaluación de la efectividad de los controles de ingeniería implementados en las PTAR revelan importantes deficiencias en la protección frente al riesgo químico. Más del 60% de los controles presentan una efectividad baja o media, situación que compromete la seguridad de los trabajadores, especialmente en zonas donde se manipulan sustancias peligrosas como ácido sulfúrico, cloro gaseoso y metanol.

Las áreas más críticas son el tratamiento terciario, el laboratorio y el manejo de lodos, donde los sistemas de ventilación, detección de gases y automatización de procesos son inexistentes o están fuera de servicio. Además, se identificó la baja adherencia al uso del EPP adecuado, lo cual agrava la exposición de los operarios.

Este resultado evidencia la necesidad de fortalecer los controles de ingeniería mediante inversiones en tecnologías de detección, encapsulamiento y automatización, así como reforzar la cultura de seguridad a través de formación continua, seguimiento y control efectivo desde el SG-SST. La jerarquización de medidas según el tipo de riesgo permitirá priorizar la intervención técnica y garantizar ambientes laborales más seguros en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Resultados 3: Propuesta de estrategias para mitigar la exposición a sustancias químicas y reducir los daños en caso de accidentes o emergencias

Proponer estrategias para mitigar la exposición a sustancias químicas y reducir los daños en caso de accidentes o emergencias.

3.1.1 Producto tangible: Guía Básica de Gestión del Riesgo Químico en PTAR Basada en modelos como los de Prevor, esta guía incluye:

- Planes Operativos Normalizados (PON).
- Controles de Ingeniería.
- Controles Administrativos.
- EPP especializado.
- Protocolos de Atención a Emergencias Químicas.




Contenido

01	Planes Operativos Normalizados (PON).
02	Controles de Ingeniería.
03	Controles Administrativos.
04	EPP especializado
05	Protocolos de Atención a Emergencias Químicas.
06	Prevención del riesgo químico y métodos de descontaminación

DURANTE LA EMERGENCIA ACTUACIÓN INMEDIATA ANTE EXPOSICIÓN

Situación	Acción inmediata
Inhalación de gas	Llevar a zona ventilada + oxígeno
Contacto ocular	Lavar 30 min con agua/salina
Contacto dérmico	Retirar ropa + lavar + neutralizar
Derrames	Aislar zona + aplicar absorbente + reportar

Nota: Nunca mezcles sustancias sin saber su compatibilidad. El agua sobre ácidos puede causar reacciones violentas.



01

Introducción

¿Por qué una guía solo para químicos en PTAR?

Las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan sustancias químicas con alto potencial de causar daños si no se manejan adecuadamente. Esta guía práctica busca orientar al personal sobre cómo actuar antes, durante y después de una emergencia química para proteger su salud y la operación de la planta.

Objetivo

Guiar al personal en el manejo correcto de emergencias químicas, con un enfoque paso a paso: antes, durante y después del evento.



10

PRINCIPALES PRODUCTOS QUÍMICOS USADOS EN PTAR

Cada uno tiene riesgos: corrosión, toxicidad, explosión o asfixia.

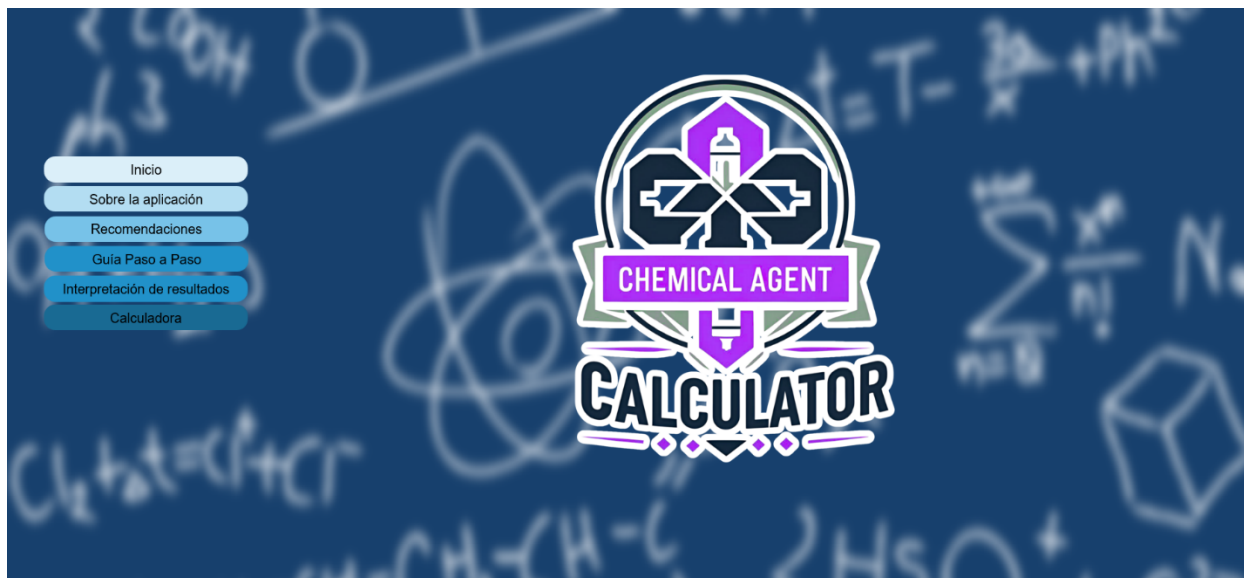
QUÍMICOS	USO
Hipoclorito de sodio	Desinfección
Sosa cáustica	Control de pH
Ácidos (sulfúrico, nítrico)	Neutralización
Polímeros orgánicos	Coagulación
Gas cloro / Ozono / Dióxido de cloro	Oxidantes
Ácido sulfhídrico / Metano	Gases por descomposición

3.1.2 Producto tangible: Desarrollar una herramienta automatizada y parametrizada en Excel que permita realizar de forma sistemática, cualitativa y simplificada la **evaluación del riesgo por inhalación de agentes químicos**, basada en el método adaptado del INRS según la NTP 937. Esta herramienta tiene como finalidad facilitar un **diagnóstico inicial riguroso del riesgo químico**, priorizar acciones de control y reducir la necesidad de mediciones cuantitativas, especialmente en entornos como plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), donde la exposición puede gestionarse de forma preventiva.

La herramienta considera múltiples variables relevantes que influyen en la concentración ambiental del agente químico, tales como:

- **Riesgo potencial** (que combina peligrosidad, cantidad y frecuencia),
- **Volatilidad o pulverulencia** según el estado físico y condiciones de uso,
- **Procedimiento de trabajo** y nivel de dispersión,
- **Protecciones colectivas existentes**,
- Y un **factor de corrección según el VLA**, para garantizar mayor precisión cuando los valores límite ambientales son bajos.

Gracias a su diseño automatizado, la herramienta permite **calcular puntuaciones de riesgo**, **clasificar el nivel de prioridad** de intervención y **apoyar la toma de decisiones** para la implementación de medidas correctivas o complementarias.



SOBRE LA APLICACIÓN

Objetivo
La finalidad es realizar un diagnóstico inicial del riesgo químico mediante un enfoque simplificado, que permita:

- Identificar agentes químicos potencialmente peligrosos.
- Estimar el riesgo por inhalación sin necesidad de recurrir inicialmente a mediciones ambientales.
- Determinar prioridades de actuación preventiva.
- Aplicar criterios sistemáticos y objetivos para la toma de decisiones.

Estructura de la herramienta
La evaluación del riesgo se construye a partir de los siguientes bloques, cada uno con su correspondiente clase y puntuación:

1. Riesgo potencial, calculado a partir de:
 - Clase de peligro (frases R/H, VLA, materiales/procesos).
 - Cantidad utilizada por día.
 - Frecuencia de uso.
2. Volatilidad o pulverulencia, según el estado físico, presión de vapor o forma del material sólido.
3. Tipo de procedimiento, evaluando el nivel de dispersión durante su uso.
4. Protección colectiva, basada en el tipo de ventilación o aislamiento utilizado.
5. Factor de corrección (FCVLA), cuando el valor límite ambiental es $\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$.

Aplicabilidad
La herramienta permite evaluar tanto sustancias puras como mezclas, y es útil en procesos donde no se requiere medición directa si el riesgo se estima como bajo. En caso contrario, su resultado sugiere la necesidad de tomar medidas correctivas o de realizar una evaluación cuantitativa más detallada.

Resultados
El resultado de la evaluación es una puntuación de riesgo por inhalación (Pinh), la cual se interpreta según tres niveles:

- > 1000: Riesgo probablemente muy elevado → medidas inmediatas.
- 101 – 1000: Riesgo moderado → revisar medidas o evaluar con medición.
- ≤ 100 : Riesgo bajo → no se requieren modificaciones inmediatas.

Limitaciones
Este método no sustituye evaluaciones obligatorias para agentes cancerígenos como el amianto, ni se aplica a productos de descomposición térmica, mezclas complejas sin información o sustancias sin datos de peligrosidad. Siempre debe ser validado por un higienista industrial o personal capacitado.

SOBRE LAS RECOMENDACIONES

1. Selección adecuada de agentes y procesos

- Prioriza el uso de agentes con menor peligrosidad siempre que sea técnicamente viable.
- Revisa las fichas de datos de seguridad (FDS) de los productos y confirma que estén actualizadas y en español.
- Evita procesos abiertos o dispersivos cuando sea posible.

2. Información técnica clara y completa

- Asegúrate de contar con el Valor Límite Ambiental (VLA-ED o VLA-EC) del agente.
- Identifica correctamente las frases H, EUH y R que definen el peligro del agente químico.
- Establece correctamente las cantidades y frecuencias de uso diarias/semanales.

3. Uso riguroso de la herramienta

- Introduce datos realistas y representativos del uso habitual en las condiciones de trabajo.
- Si hay incertidumbre en los datos, selecciona siempre el caso más desfavorable.
- Aprovecha las listas desplegables para asegurar homogeneidad en los criterios de selección.

4. Validación de resultados

- Contrasta los resultados del cálculo de riesgo con observaciones directas y mediciones si están disponibles.
- Cuando el riesgo sea moderado o alto, considera realizar muestreo ambiental conforme a la UNE-EN 689:2019.

5. Medidas preventivas inmediatas

- Cuando el riesgo estimado sea elevado, actúa sin demora con medidas técnicas (encapsulado, extracción localizada).
- Prioriza intervenciones en el foco emisor antes que confiar solo en los equipos de protección personal.
- Documenta todas las acciones preventivas adoptadas y haz seguimiento de su eficacia.

6. Formación y sensibilización

- Forma a los trabajadores sobre el significado del riesgo por inhalación y su clasificación.
- Asegúrate de que conocen los procedimientos seguros y el uso correcto de los EPP.
- Fomenta la identificación de condiciones inseguras o cambios en los procesos.

7. Reevaluación periódica

- Repite la evaluación cuando se introduzcan nuevas sustancias o procesos.
- Define un calendario de reevaluación basado en el nivel de riesgo identificado.
- Documenta todos los resultados, acciones preventivas y fechas de próxima revisión.

Inicio

Sobre la aplicación

Recomendaciones

Guía Paso a Paso

Interpretación de resultados

Calculadora

GUÍA PASO A PASO

1. Identificación del agente químico

- Registre el nombre y número CAS del agente químico.
- Verifique si cuenta con VLA-ED o VLA-EC (Valor Límite Ambiental de Exposición Diaria o Corta Duración).
- Consulte y anote las frases H, EUH y R correspondientes.

2. Definir condiciones de uso

- Seleccione la cantidad diaria de agente utilizado (de una lista desplegable).
- Indique la frecuencia de uso (día, semana, mes, año) también desde listas predefinidas.
- Establezca la presión de vapor (si es líquido) o pulverulencia (si es sólido).

3. Clasificación de variables

- La herramienta asignará automáticamente:

- Clase de cantidad
- Clase de frecuencia
- Clase de exposición potencial
- Clase de peligrosidad
- Clase de procedimiento
- Clase de protección colectiva
- Clase de volatilidad/pulverulencia

4. Evaluación del riesgo potencial

- A partir de la clase de peligrosidad y exposición potencial, se determina el riesgo potencial.
- El sistema calcula una puntuación de riesgo (de 1 a 10.000).
- **5. Ingreso de condiciones técnicas**
- Indique mediante 'X' o selección el tipo de procedimiento (cerrado, abierto, dispersivo).
- Marque los medios de protección colectiva aplicados (campana, cabina, extracción, etc.) asociadas al nivel.

6. Cálculo del riesgo final

- El sistema integrará:
 - Puntuación de riesgo potencial
 - Puntuación del tipo de procedimiento
 - Puntuación de protección colectiva
 - Factor de corrección según el VLA
- Se obtiene el valor final de riesgo por inhalación (Pinh).

7. Interpretación del resultado

- El valor final indica el nivel de riesgo:
 - Bajo (≤ 100)
 - Moderado (101 a 1000)
 - Elevado (> 1000)
- La herramienta mostrará automáticamente recomendaciones asociadas al nivel.

Inicio

Sobre la aplicación

Recomendaciones

Guía Paso a Paso

Interpretación de resultados

Calculadora

jg

SOBRE LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Clasificación del riesgo

La puntuación final obtenida a través del cálculo del riesgo por inhalación (Pinh) permite clasificar el riesgo en tres niveles:

- Riesgo bajo (Pinh ≤ 100):

No es necesaria la adopción inmediata de medidas preventivas. Se recomienda realizar una reevaluación periódica si existen cambios en el proceso, producto o condiciones de trabajo.

- Riesgo moderado (101 \leq Pinh \leq 1000):

Es recomendable revisar las medidas existentes, reforzar la ventilación o evaluar la posibilidad de sustitución del agente por otro menos peligroso. En algunos casos puede justificarse la evaluación mediante medición ambiental.

- Riesgo elevado (Pinh $>$ 1000):

Se requiere acción inmediata. Deben aplicarse medidas preventivas urgentes que pueden incluir: sustitución del producto, mejoras en el sistema de contención, protección respiratoria adecuada, y evaluación cuantitativa mediante muestreo y análisis.

Decisiones preventivas

La herramienta no solo permite clasificar, sino que también sugiere el tipo de acción a tomar. Estas acciones pueden clasificarse como:

- Medidas técnicas: Aislamiento de procesos, contención cerrada, mejora de ventilación.
- Medidas organizativas: Reducción de tiempo de exposición, modificación de tareas, rotación de trabajadores.
- Equipos de protección personal (EPP): Uso obligatorio de mascarillas con filtro adecuado o equipos de respiración asistida.

Seguimiento y reevaluación

Una vez aplicadas las acciones preventivas, se recomienda realizar una **nueva evaluación** con la herramienta para verificar si el nivel de riesgo ha disminuido.

Asimismo, toda reevaluación debe realizarse cuando:

- Se cambien sustancias, equipos o procedimientos.
- Exista una modificación en la cantidad o frecuencia de uso.
- Se reciban alertas toxicológicas nuevas o modificaciones legislativas.

El seguimiento continuo es clave para mantener la exposición por inhalación dentro de niveles aceptables.

Inicio

Sobre la aplicación





Recomendaciones














Guía Paso a Paso

Interpretación de resultados

Calculadora

jg

Nombre del agente (Colocar nombre)	Ácido nítrico	Descripción del material sólido (Lista desplegable)	Material en forma de polvo fino, formación de polvo que queda en suspensión en la manipulación (p.e. azúcar en polvo, harina, cemento, yeso, ...)	
CAS (Automático)	7697-37-2	Temp. uso (°C) (Llenar información)	20	
Frases_H (Automático)	H373, H374, H375, H410, H411, H412, H413	Punto de ebullición (°C) (Llenar información)	150	
Frases_R (Automático)	R10, R36/37, R50, R53, R59	Tipo de procedimiento (Marcar con una X)		
VLA (mg/m³) (Automático)	0,2	Dispersivo		 Vaciado manual de sal viva en tolva sin extracción. Aplicación de hipoclorito con mochila sin contención. Mezcla manual de permanganato de potasio en polvo al aire libre.
Materiales y procesos (Automático)		Abierto	X	 Preparación de ácido clorhídrico en tanque abierto. Mezcla manual de políboruro de aluminio en recipiente sin tapa. Dosisación de sulfato de aluminio desde tanque sin cubierta. Tanque cerrado de soda cáustica con apertura para recarga. Sistema de ácido peracético con toma de muestra manual. Limpieza interna de líneas de ácido fórmico cada semana.
Cantidad/día (Lista desplegable)	1.000 y + 1000 kg d.1	Cerrado/ abierto regularmente		
Día (Lista desplegable)	1 día	Cerrado permanente		
Semana (Lista desplegable)	1 semana			
Mes (Lista desplegable)	1 mes			
Año (Lista desplegable)	1 año			
Presión de vapor (kPa) (Lista desplegable)	Pv = 0,3 kPa			
Estado del material (Lista desplegable)				
Descripción del material sólido	Material en forma de polvo fino, formación de polvo que queda en suspensión en la manipulación	Protección colectiva		

Protección colectiva (Marcar con una X)				
Trabajo en espacio con aberturas limitadas de entrada y salida y ventilación natural desfavorable	X		Cabina de pequeñas dimensiones ventilada	
Ausencia de ventilación mecánica			Cabina horizontal	
Trabajos en intemperie			Cabina vertical	
Trabajador alejado de la fuente de emisión			Captación envolvente (vitrina de laboratorio)	
Ventilación mecánica general			Calculando...	
Campana superior			Clase de peligro	
Rendija de aspiración			Clase cantidad	
Rendija de aspiración			Clase frecuencia	
Aspiración integrada a la herramienta			Clase exposición potencial	
			Clase riesgo potencial	
			Puntuación clase riesgo potencial	
			Clase de volatilidad	
			Clase de pulverulencia	
			Puntuación de volatilidad o pulverulencia	
			Volatilidad líquidos	
			Clase de procedimiento	
			Puntuación de procedimiento	
			Clases de protección colectiva	
			Puntuación protección colectiva	
			VLA a FC	
			Calculo de riesgo	
			Puntuación del riesgo por inh	3000000
			Prioridad de acción	1
			Caracterización del riesgo	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)

Puntuación del riesgo por inhalación	3000000
Prioridad de acción	1
Caracterización del riesgo	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)

Puntuación del riesgo por inhalación	Prioridad de acción	Caracterización del riesgo
3000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
250000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
200	2	Riesgo moderado. Necesita probablemente medidas correctoras p/o una evaluación más detallada (mediciones)
250000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
40000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
2000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
300	2	Riesgo moderado. Necesita probablemente medidas correctoras p/o una evaluación más detallada (mediciones)
7000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
3000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
2000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
3	3	Riesgo a priori bajo (sin necesidad de modificaciones)
1000000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
140000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
14000000	1	Riesgo probablemente muy elevado (medidas correctoras inmediatas)

Fuente: Clasificación automática del riesgo potencial según frases H, R, VLA y materiales/procesos.
 Elaboración propia basada en NTP 937 (INSST, 2010).

Las imágenes presentadas a continuación corresponden a capturas de pantalla de la herramienta de evaluación del riesgo por inhalación desarrollada en Excel por las autoras del presente trabajo, con base en la metodología de la NTP 937 (INSST, 2010).

3.1.3 Soluciones Técnicas e Ingenieriles para la Gestión del Riesgo Químico en PTAR Este apartado complementa el esquema general de jerarquización de controles, incorporando soluciones técnicas e ingenieriles derivadas de literatura especializada, experiencias internacionales y fabricantes reconocidos como Prevor. Se organiza por tipo de control, enfocando cada acción según su fundamento técnico y aplicabilidad práctica en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 33 Pirámide de jerarquía de controles



Fuente: OpenAI. (2024). Ilustración de la jerarquía de controles del riesgo químico (eliminación, sustitución, ingeniería, administrativos y EPP) aplicada a PTAR. ChatGPT. <https://platform.openai.com>

Discusión de resultados

Esta investigación analizó de forma crítica la exposición a sustancias químicas peligrosas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Colombia, interpretando los hallazgos conforme a los objetivos planteados, el marco normativo vigente y los antecedentes teóricos y técnicos relevantes en la gestión del riesgo químico.

Los resultados obtenidos evidencian niveles de exposición a sustancias corrosivas, tóxicas o irritantes, principalmente durante operaciones manuales de dosificación, muestreo y limpieza. Las sustancias con mayor criticidad identificadas fueron el ácido clorhídrico, soda cáustica, cloro gaseoso y ácido sulfúrico, cuyas emisiones representan riesgos agudos a la salud respiratoria y dérmica de los trabajadores, lo cual coincide con lo documentado por Córdoba Rojas (2007), Chacua (2022) y Prevor

(2022). Este último enfatiza que las quemaduras químicas en ojos y piel siguen siendo uno de los mayores retos en entornos industriales, lo cual respalda el llamado a implementar soluciones de descontaminación inmediata, como Diphotérine® y Hexafluorine®, dentro de los protocolos operativos.

El análisis evidenció que el nivel de exposición está directamente relacionado con el grado de automatización de las plantas y el perfil del afluente. Las PTAR con bajos niveles de tecnificación o mantenimiento deficiente presentaron mayores deficiencias, como sistemas de ventilación desconectados, monitoreo ambiental inexistente y cabinas abiertas sin contención de vapores, corroborando lo expuesto por Cevallos (2022) sobre la fragilidad de los controles de ingeniería en municipios con presupuestos limitados.

A pesar de contar con protocolos documentados, se observó que en más del 70% de las actividades críticas no se hace uso completo del equipo de protección personal (EPP), lo que pone en evidencia vacíos en la cultura preventiva, la capacitación efectiva y la supervisión operativa. Esta situación es aún más preocupante considerando la alta rotación de personal operativo, particularmente en PTAR municipales, lo cual compromete la sostenibilidad de los programas de gestión de sustancias peligrosas.

Desde la perspectiva médica-ocupacional, se hace evidente la necesidad de fortalecer el componente de vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos. Se recomienda incluir exámenes ocupacionales específicos por exposición a sustancias corrosivas e inhalatorias, como pruebas de función pulmonar, dermatológicas y de irritación ocular, tal como se sugiere en la literatura internacional (NIOSH, 2022; WHO, 2021). Esto permitiría pasar de una gestión reactiva a una preventiva, con capacidad para identificar daños antes de que se materialicen como enfermedades profesionales.

Asimismo, se propone establecer como requisito obligatorio el uso y disponibilidad de equipos de emergencia para descontaminación química (duchas, lavajos, neutralizantes químicos como Trivorex®) en todas las plantas, independientemente de su tamaño, replicando buenas prácticas documentadas en Francia, Alemania y España (INSST, 2020; EPA, 2020).

Desde el enfoque técnico, la aplicación de metodologías cualitativas como la NTP 937 y el modelo simplificado del INRS permitió caracterizar los riesgos con base en severidad, parte del cuerpo afectada y tiempo de exposición. Esta herramienta es especialmente útil en contextos donde no se dispone de mediciones instrumentales. Sin embargo, se hace un llamado a que los prevencionistas complementen estas evaluaciones con observación directa, entrevistas y revisión documental, para una triangulación robusta de la evidencia.

Desde el marco normativo, los hallazgos se articulan con la Ley 1562 de 2012, el Decreto 1072 de 2015 y la Resolución 0312 de 2019, que establecen la obligación de controlar los riesgos químicos de

forma jerarquizada, promoviendo la sustitución de sustancias peligrosas, la implementación de controles de ingeniería y la preparación para emergencias.

Teóricamente, esta investigación refuerza los aportes de Hernández Sampieri (2014) sobre el valor de los estudios descriptivos para la comprensión de problemas reales de campo, y aporta evidencia empírica para el fortalecimiento del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) en el sector de saneamiento.

Entre las fortalezas de este estudio se destacan:

- El abordaje en condiciones reales de operación (no experimental),
- La utilización de herramientas técnicas y normativas vigentes,
- La generación de una Guía Técnica de aplicación práctica en las PTAR.

Entre sus limitaciones se identifican:

- La falta de mediciones cuantitativas del contaminante en aire,
- La no inclusión de exposición dérmica sistematizada,
- El acceso restringido a algunas instalaciones por criterios logísticos o administrativos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Este estudio permitió evaluar integralmente la exposición a sustancias químicas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), identificando los riesgos prioritarios, valorando la efectividad de los controles existentes y proponiendo estrategias de mitigación con herramientas cualitativas.

1. Síntesis de los hallazgos principales:

Se identificaron niveles elevados de riesgo químico en diversas etapas del proceso, especialmente durante actividades de dosificación, desinfección y en áreas de laboratorio. Un porcentaje significativo de las tareas evaluadas presentó riesgo químico, evidenciando la necesidad de reforzar los controles existentes.

2. Aporte o contribución del estudio:

Se desarrolló una Guía Básica de Gestión del Riesgo Químico en PTAR, aplicable a contextos reales, la cual contribuye a fortalecer la implementación de estrategias jerarquizadas de control en entornos operativos, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia.

3. Implicaciones prácticas y teóricas:

Los resultados pueden aplicarse en la actualización de procedimientos de seguridad y salud en el trabajo, en el diseño de intervenciones operativas más seguras y en la formulación de políticas institucionales en PTAR, además de aportar al desarrollo de estrategias basadas en la jerarquía de controles y observación de campo.

4. Limitaciones del estudio:

No se realizaron mediciones directas de concentraciones químicas en aire debido a restricciones administrativas, y la alta rotación del personal operativo dificultó la sistematización de datos conductuales sobre el uso de elementos de protección personal.

5. Propuestas para investigaciones futuras:

Se recomienda continuar con estudios de validación de impacto aplicando la guía desarrollada, midiendo indicadores de mejora en salud ocupacional, accidentalidad y cumplimiento legal. Asimismo, se

sugiere complementar con mediciones higiénicas y estudios toxicológicos que fortalezcan la dimensión cuantitativa del riesgo.

Recomendaciones

1. Para operadores y administradores de PTAR:

- Implementar sustituciones de sustancias químicas de mayor peligrosidad por alternativas de menor riesgo, priorizando la protección de la salud de los trabajadores.
- Instalar sistemas de detección de gases y extracción forzada en áreas de mayor exposición química, así como fortalecer los controles operacionales.

2. Para entidades gubernamentales y reguladores:

- Avanzar en la integración de guías de gestión de riesgo químico específicas para PTAR dentro de los lineamientos normativos, fomentando su aplicación en plantas municipales e industriales.
- Promover espacios de formación continua y financiamiento para la implementación de medidas de control y tecnologías seguras en PTAR.

3. Para la academia y la investigación aplicada:

- Fomentar investigaciones interdisciplinarias sobre exposición a sustancias químicas en aguas residuales y fortalecer la enseñanza de metodologías de evaluación de riesgo químico en los programas académicos.
- Validar y documentar la aplicación de guías de gestión de riesgo químico en condiciones reales de operación.

4. Para profesionales y estudiantes en SST:

- Capacitarse en herramientas de evaluación de riesgo químico, fortaleciendo sus competencias para la gestión y control de sustancias químicas en plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Aplicar la jerarquía de controles y metodologías cualitativas en la identificación, evaluación y control del riesgo químico en sus lugares de trabajo.

Referencias bibliográficas

- Acuatécnica. (2024). *Acuatécnica 2024: Aguas residuales en Colombia - Acuatécnica*.
<https://acuatecnica.com/revolucion-de-las-aguas-residuales-en-colombia/?utm>
- Agencia de Noticias YONHAP. (2024). *YNA: Un trabajador resulta muerto y otros 6 heridos al limpiar un tanque de aguas residuales*. <https://sp.yna.co.kr/view/MYH20240206013200883>
- Almeida Cevallos, & Diego Fernando. (2025). *Ibarra, Propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la planta de tratamientos de aguas residuales de Ibarra* [Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/17192>
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (1938). *ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)*.
- Artículo 49 de La Constitución Política de Colombia (1991).
<https://www.constitucioncolombia.com/titulo-2/capitulo-2/articulo-49>
- Bermudez Grisales, J. A., & Carrillo Loaiza, J. E. (2019). *Guasca, Evaluación y diagnóstico a la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del casco urbano del municipio de guasca Cundinamarca*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/40189aeb-122f-45d5-bf70-a6c394b56ae0/content>
- Betancur Vélez, M., Gómez, B. E., & Bustamante Moreno, A. M. (2011). *Guía para la Gestión de Residuos Peligrosos*. https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/GestionRespel/GUIA_RESPEL.pdf
- Buitrago Cabra, P. E., & Arevalo Cárdenas, L. A. (2023). *Monografía, El reto de la implementación de las medidas de control del riesgo en empresas del sector de fabricación de químicos*. <https://alejandria.poligran.edu.co/bitstream/handle/10823/6937/Monograf%C3%ADa.pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm>
- Chemistry World, & Phillip Broadwith. (2020). *Chemistry World: Cuatro muertos en una explosión en una planta de tratamiento de aguas residuales del Reino Unido*. <https://www.chemistryworld.com/news/4-dead-in-uk-sewage-treatment-works-explosion/4012854.article>
- Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE). (2017). *(GHS) Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals* (7th ed.). United Nations. <https://unece.org/ghs-rev7-2017>

Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>

CONPES 3868 CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL REPÚBLICA DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (2016).
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3868.pdf>

Consejo Colombiano de Seguridad. (2012). *ICONTEC 2012: GTC 45: Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional*.
http://132.255.23.82/sipnvo/normatividad/GTC_45_DE_2012.pdf

Consejo Colombiano de Seguridad (CSS). (2025, April 22). *CCS 2025, Aunque la siniestralidad laboral se redujo en 2024, aún se presentan más de 1400 accidentes y se pierde una vida al día*.
https://ccs.org.co/siniestralidad_laboral_2024/

Constitución Política 1 de 1991 (1991).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>

Control de Sustancias Peligrosas para la Salud (COSHH). (2002). *COSHH: Control de sustancias peligrosas para la salud (COSHH)*. <https://www.hse.gov.uk/coshh/>

Cordoba Rojas, E. A. (2007). *EMCALI, Caracterización De Las Condiciones Inseguras De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales*. [Universidad Autónoma De Occidente].
<https://red.uao.edu.co/bitstreams/06e36853-ead3-4ba5-8f23-d49a9d545771/download?utm>

DANE. (2022). *Boletín Sectorial de Servicios Públicos Domiciliarios 2022*.
https://www.sen.gov.co/sites/default/files/pagina-migraciones-files/2024-03/Boletin_Sectorial_Servicios_Publicos_Domiciliarios_2022.pdf?utm

David C. (2024). *Riesgos biológicos: prácticas y herramientas para la prevención*.
<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2046>

Decreto 419 de 2021 (2021). <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30041601#>

Decreto 1072 de 2015 Sector Trabajo (2015).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=72173>

Decreto 1496 de 2018, 6 (2018).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87910&utm>

Decreto 1843 de 1991 Nivel Nacional (1991).
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=114357>

Decreto 2133 de 2016 (2016). <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/30030294>

Decreto 2157 de 2017 (2017).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=199583>

El Colombiano. (2024, April 1). *El Colombiano, Vecinos de la PTAR de Bello protestan: dicen que hasta la vida sexual se les ha afectado por los malos olores.*

<https://www.elcolombiano.com/antioquia/vecinos-de-ptar-de-bello-protestan-por-malos-olores-GE24132774>

El Congreso de Colombia. (2019). *Ley 1968 de 2019.* <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-1968-de-2019/>

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH). (2014). *CDC 2020: Alcohol Metílico.* <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/67561.html>

El Ministerio de Salud. (1993). *La Resolución 8430 de 1993.*

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/lists/bibliotecadigital/ride/de/dij/resolucion-8430-de-1993.pdf>

El Paso. (2024). *El paso: El Paso Water confirma la muerte de uno de sus empleados en una Planta de Aguas Residuales.* <https://www.telemundo48elpaso.com/noticias/local/el-paso-water-confirma-la-muerte-de-uno-de-sus-empleados-en-una-planta-de-aguas-residuales/2350455/>

Environmental Protection Agency. (2025). *Environmental Protection Agency: Exposición del paciente y el índice de calidad del aire.* <https://epa.gov/ozone-pollution-and-your-patients->

Funza: Aprovechamiento de Lodos Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipio de Funza, Como Insumo de Cultivo y Mejoramiento Del Suelo (2018).

<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/08231b15-2898-4290-95c0-4e97c8fb5c94>

Graczyk, H., Azzi, M., & Mandrioli, D. (2021). *Organización Internacional del Trabajo International- Labour Organization - Exposure to hazardous chemicals at work and resulting health impacts: A global review.* <https://www.ilo.org/publications/exposure-hazardous-chemicals-work-and-resulting-health-impacts-global>

Hernández, A. C. (2023). *CSS 2023: Reporte Cisproquim 2023.* <https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Reporte-Cisproquim-PS-408.pdf?utm>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (McGraw Hill España, Ed.; 6th ed.). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008&utm>

ICONTEC. (2010). *GTC 45: Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional.* <https://saludocupacionalunad.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/07/gtc-45-2010.pdf?utm>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, & Accidentes de Trabajo Investigados. (2024). *CSS: Trabajadores fallecen intoxicados en obras de depuración*. <https://ccs.org.co/trabajadores-fallecen-intoxicados-en-obras-de-depuracion/>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (1993). *NTP 330: Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente*. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/9-serie-ntp-numeros-296-a-330-ano-1994/ntp-330-sistema-simplificado-de-evaluacion-de-riesgos-de-accidente-1993>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2012). *NTP 936: Agentes químicos: evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (II). Modelo COSHH Essentials - Año 2012*. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/27-serie-ntp-numeros-926-a-960-ano-2012/nota-tecnica-de-prevencion-ntp-936>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2018a). *NTP 336: Absorción de sustancias químicas por la piel*. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/10-serie-ntp-numeros-331-a-365-ano-1995/ntp-336-absorcion-de-sustancias-quimicas-por-la-piel>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2018b). *NTP 386: Observaciones planeadas del trabajo*. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/11-serie-ntp-numeros-366-a-400-ano-1996/ntp-386-observaciones-planeadas-del-trabajo>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2018c). *NTP 935: Agentes químicos: evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (I). Aspectos generales - Año 2012*. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/27-serie-ntp-numeros-926-a-960-ano-2012/nota-tecnica-de-prevencion-ntp-935>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2020). *NTP: Notas Técnicas de Prevención*. <https://www.insst.es/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2024). *NTP 446: Fallo de componentes válvulas*. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/13-serie-ntp-numeros-436-a-470-ano-1998/ntp-446-fallo-de-componentes-valvulas>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional. (2014). *NIOSH 2014: Metilcloroformo*. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0404.html#print>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional. (2016). *NIOSH 2016: Guía de bolsillo sobre peligros químicos*. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0404.html#print>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional. (2019). *NIOSH 2019: Sulfuro de Hidrógeno*.
<https://archive.cdc.gov/#/details?url=https://www.cdc.gov/niosh/topics/hydrogensulfide/default.html>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional. (2024). *NIOSH 2024: Sobre la fatiga y el trabajo*.
https://www.cdc.gov/niosh/fatigue/about/?CDC_AAref_Val=https://www.cdc.gov/niosh/topics/workerschedules/#print

Ishii, K., Takeuchi, A., Nishinoiri, O., Endo, G., & Ono-Ogasawara, M. (2022). Lin, Xu, Chen, & Wang, 2022: Development of a method to determine workers' personal exposure levels to glyphosate. *Journal of Occupational Health*, 64(1). <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12345/7249444>

Kang, S. K. (2019). Una plataforma de personas que trabajan por la salud de los trabajadores. *Safety and Health at Work*, 10(1), 1–2. <https://doi.org/10.1016/J.SHAW.2019.02.001>

Ley 0009 de 1979 (1979).
https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/ley%200009%20de%201979.pdf?utm

Ley 55 de 1993 (1993). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=37687>

Ley 1252 2008 (2008). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1252-2008.pdf>

Ley 1658 de 2013 (2013). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53781>

Ley 1892 de 2018 (2018). <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30035032#>

Londoño Vélez, S. (2023). *Guía Técnica PTAR: Guía de diseño conceptual y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeñas comunidades para profesionales*.
<https://www.cornare.gov.co/informacion-de-interes/guia-de-diseno-conceptual-y-operacion-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-domesticas-en-pequenas-comunidades-para-profesionales/#guia-ptar/1/>

Martelo Payares, J. M., Gómez Vargas, M. T., Sánchez Buitrago, M. del P., Zambrano Chávez, W. A., Grajales Bustos, D. C., Guerrero Vélez, D. E., Copete Rivera, D. A., & Jaramillo Zapata, M. (2023). *SSPD 2023: Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado*.
<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-Acueducto-y-Alcantarillado-2022-v2.pdf>

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). *Decreto 3930 de 2010*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40620>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1999). *Decreto 321 de 1999*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5272>

- Ministerio de Comercio, I. y T. (2018). *Decreto 1041 de 2018*. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30035235>
- Ministerio de Comercio, I. y T. (2021). *Decreto 402 de 2021*. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30041542#>
- Ministerio de Empleo y Seguridad Social, & Centro Nacional de Medios de Protección. (2012). *COSHH Essentials, Metodología simplificada para la evaluación del riesgo por exposición a productos químicos*. <https://www.insst.es/documents/94886/214929/2.COSHH+ESSENTIALS.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2024). *Guía para la identificación de peligros, valoración de riesgos y determinación de controles ministerio de salud y protección social*. <https://www.minsalud.gov.co/Ministerio/Institucional/Procesos%20y%20procedimientos/GTHG01.pdf?utm>
- Ministerio de Trabajo. (2025). *Resolución 1890 de 2025*. <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/81894008/1890.pdf/6aed0f9c-dfcc-f6d5-222b-4558e5f56002?t=1747237171092>
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2015). *Ministerio de Vivienda 2014: Informe nacional de monitoreo uso y ejecución de los recursos del sistema general de participaciones para agua potable y saneamiento básico (SGP-APSB)*. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-09/informe-monitoreo-sgp-apsb-vigencia-2014.pdf>
- Ministerio del Trabajo. (2019). *Resolución 0312 de 2019*. <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59995826/Resolucion+0312-2019-+Estandares+minimos+del+Sistema+de+la+Seguridad+y+Salud.pdf>
- National Fire Protection Association (NFPA). (1960). *NFPA 704 - Marcado químico y diamante de fuego*. <https://entirelysafe.com/article/nfpa-704-chemical-marking-fire-diamond>
- National Quality Assurance (NQA). (2018). *ISO 45001 2018 GUÍA IMPLEMENTACIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD*. <https://www.nqa.com/medialibraries/NQA/NQA-Media-Library/PDFs/Spanish%20QRFs%20and%20PDFs/NQA-ISO-45001-Guia-de-implantacion.pdf>
- Niño Barrero, Y. F., González Álvarez, Y. C., & Rentería Cáceres, H. D. (2021). *Guía Técnica: Riesgo químico en lugares de trabajo*. https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2023/12/Guia_Riesgo_Quimico_CCS.pdf
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2024). *NTP 750: Evaluación del riesgo por exposición inhalatoria de agentes químicos. Metodología simplificada*. <https://www.insst.es/documentacion/coleccion-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/21->

serie-ntp-numeros-716-a-750-ano-2006/ntp-750-evaluacion-del-riesgo-por-exposicion-inhalatoria-de-agentes-quimicos.-metodologia-simplificada

OpenAI. (2025a). *Imagen generada por inteligencia artificial para ilustrar zonas críticas de exposición química en PTAR*. ChatGPT – Imagen generada por IA (puedes indicar esto como fuente o herramienta usada).

OpenAI. (2025b). *Imagen generada por inteligencia artificial para ilustrar zonas críticas de exposición química en PTAR*. ChatGPT – Imagen generada por IA (puedes indicar esto como fuente o herramienta usada).

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2015). *ISO 14001 2015 Sistemas de Gestión Ambiental- Requisitos con orientación para su uso*. www.iso.ch

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2018a). *ISO 19011 Directrices para la auditoría de los sistemas de gestión*. <https://www.ramajudicial.gov.co/documents/5454330/14491339/norma-iso-19011-2018.pdf/5e630ca4-b75d-4cb9-89be-7fbd1b4b5b27>

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2018b). *ISO 31000 Administración/Gestión de riesgos - Lineamientos guía*. <https://www.ramajudicial.gov.co/documents/5454330/14491339/Norma.ISO.31000.2018.Espanol.pdf/cb482b2c-afd9-4699-b409-0732a5261486>

Organización Internacional del Trabajo (ILO). (n.d.). *Safety and health at work | International Labour Organization*. Retrieved June 20, 2025, from <https://www.ilo.org/topics-and-sectors/safety-and-health-work>

Organización Internacional del Trabajo (ILO). (1990). *Convenio 170: C170 - Convenio sobre los productos químicos, 1990 (núm. 170)*. https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_es/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_INSTRUMENT_ID:312315

Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2011). *Peligros en las plantas de tratamiento de aguas residuales (residuos). Peligros en las plantas de tratamiento de aguas residuales (residuos)*. <https://www.iloencyclopaedia.org/part-xvii-65263/public-and-government-services/item/831-hazards-in-sewage-waste-treatment-plants?utm>

Osha. (2024). *OSHA 3173-12R 2024*. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/osha3173.pdf>

Pillado, K. (2025). *Contyquim 2025: Tratamiento químico del agua: ¿Cómo funciona y cuándo se utiliza?* <https://contyquim.com/blog/tratamiento-quimico-del-agua-como-funciona-y-cuando-se-utiliza>

- Prevor. (2022, November 10). *Prevor 2022. El riesgo de salpicaduras químicas en el tratamiento de las aguas residuales.* <https://www.prevor.com/es/el-riesgo-de-salpicaduras-quimicas-en-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales/>
- Resolución 1 de 2015 (2015). <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30031758#>
- Resolución 7 de 2007 (2007). <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=22637>
- Resolución 491 de 2020 (2020). <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=90906>
- Resolución 631 de 2015 (2015). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- Resolución 773 de 2021 - Sistema Globalmente Armonizado (SGA) (2021). https://safetia.co/normatividad/resolucion-773-de-2021/#google_vignette
- Resolución 2400 de 1979 Ministerio Del Trabajo (1979). <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=53565>
- Resolución 4272 de 2021 (2021). <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=120880>
- Resolución 80505 de 1997 (1997). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_80505_1997.htm
- Sánchez Baque, J. V., & Román Ullauri, S. E. (2020). *Salesiana: Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales Industriales para una empresa Empacadora y Exportadora de Camarón en la ciudad de Guayaquil* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19149/4/UPS-GT002985.pdf>
- Sánchez Quevedo, A. V., & Marín Camacho, A. (2022). *Exposición ocupacional a sustancias químicas asociadas al tratamiento de aguas residuales planta del EPAMSCAS combita, adscrito al instituto nacional penitenciario y carcelario INPEC* [Universidad El Bosque]. <https://repositorio.unbosque.edu.co/server/api/core/bitstreams/2fc1ad24-e895-4982-af19-78598e8e7f18/content>
- Santos, M., Almeida, A., Costa, T., Santos, M., Almeida, A., & Costa, T. (2021). SAÚDE OCUPACIONAL APLICADA AO SETOR DE RECOLHA E TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS. *Revista Portuguesa de Saúde Ocupacional Online*, 11, 119–128. <https://doi.org/10.31252/RPSO.01.05.2021>
- Schulte, P. A., & Chun, H. K. (2009). Climate Change and Occupational Safety and Health: Establishing a Preliminary Framework. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(9), 542–554. <https://doi.org/10.1080/15459620903066008>

- Servicios Ambientales Profesionales (SAP). (2022). *Ahogado: Estudio de riesgo*.
<https://www.ceajalisco.gob.mx/sites/mcs/wp-content/uploads/2024/02/Estudio-de-Riesgo-PTAR-EL-AHOGADO.pdf>
- Situaciones De Trabajo Peligrosas. (2024). *BINVAC 099: Fallecimiento de dos trabajadores intoxicados en un pozo durante las obras de mejora de una estación de depuración de aguas residuales | INSST*.
<https://www.insst.es/stp/binvac/099-fallecimiento-trabajadores-intoxicados-pozo-durante-obras-estacion-depuracion-aguas-residuales>
- Solano, A., Consejo, L., Rodrigo, E., Franco, F., Lucía González Rodríguez, C., Danuber, W., Calderón, H., Felipe, A., Castellanos, M., Fernando, Y., Barrero, N., Olave, J. J., Leidy, M., Pérez, L., Daniel, C., Vargas, A. Q., Luz, M., Soto, S., Tamayo, F. M., ... Palacio, H. M. (2021). *Consejo Colombiano de Seguridad [CCS] 2021*. <https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2022/02/Directorio2022.pdf>
- Sousa Rodríguez, E., & Tejedor Traspaderne, J. N. (2018). *NTP 0937: Agentes químicos: evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación (III). Método basado en el INRS - Año 2012*.
<https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/27-serie-ntp-numeros-926-a-960-ano-2012/nota-tecnica-de-prevencion-ntp-937>
- Unidad de Seguridad Química y Salud (CHE). (2021). *Organización Mundial de la Salud [OMS] 2021* (Organización Mundial de la Salud y Programa Internacional de Seguridad Química, Ed.).
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240035720>
- Xinhua. (2020). *Xinhua: Tres muertos y dos heridos en accidente de planta de tratamiento de aguas residuales en sur de China*. https://spanish.xinhuanet.com/2020-09/24/c_139393812.htm
- Yepes Benavides, M. (2013). *Universidad Nacional: Análisis de las condiciones de salud de los trabajadores de una planta de tratamiento de aguas residuales Santiago de Cali, 2013*. [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/47232>

Anexos

- A. **Anexo A.** Matriz de identificación de sustancias químicas (SGA y FDS)
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexo A](#)
- B. **Anexo B.** Matriz de estimación cualitativa del riesgo químico (Metodología simplificada INRS)
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexo B](#)
- C. **Anexo C. Tabla de resultados generados por la calculadora basada en la NTP 937 para la evaluación de riesgos sin mediciones instrumentales**
Este anexo presenta la tabla de resultados obtenidos a partir del uso de la herramienta automatizada desarrollada conforme a la metodología de la NTP 937, la cual permite realizar una

evaluación cualitativa y simplificada del riesgo por inhalación de agentes químicos, sin necesidad de mediciones instrumentales.

Si desea utilizar esta calculadora para evaluar otro agente químico, o si tiene conocimientos adicionales que puedan complementar su aplicación, puede comunicarse directamente con la autora de esta tesis a los siguientes números de contacto: 3208993643 o al 312 873 8041: [Anexo C-D-E](#)

- D. **Anexo D.** Tabla de operacionalización de variables del estudio
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexo C-D-E](#)
- E. **Anexo E.** Tabla de vinculación de objetivos con fases metodológicas y técnicas de recolección
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexo C-D-E](#)
- F. **Anexo F.** Plantilla de matriz de calor en Excel para visualización de riesgos
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexos F](#)
- G. **Anexo G.** Carta de autorización institucional de la empresa
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexos G](#)
- H. **Anexo J.** Fichas de Datos de Seguridad (FDS) de sustancias priorizadas en el estudio
El anexo puede ser consultado en el siguiente enlace: [Anexos J](#)